

**DIGITAL TECHNOLOGIES IN LOGISTICS SERVICES
FOR THE AGRI-FOOD SECTOR:
A COMPARISON OF POLAND AND LITHUANIA**

**TECHNOLOGIE CYFROWE W OBSŁUDZE LOGISTYCZNEJ
SEKTORA ROLNO-SPOŻYWCZEGO – PORÓWNANIE POLSKI I LITWY**

MARIUSZ PYRA
JURGITA PAUŽUOLIENĖ
IEVA KAVECKĖ

Citation: Pyra, M., Paužuolienė, J., & Kaveckė, I. (2025). Digital Technologies in Logistics Services for the Agri-Food Sector: A Comparison of Poland and Lithuania / Technologie cyfrowe w obsłudze logistycznej sektora rolno-spożywczego – porównanie Polski i Litwy. *Zagadnienia Ekonomiki Rolnej / Problems of Agricultural Economics*, 385(4), 43–65. <https://doi.org/10.30858/zer/214454>

Abstract

Aim: The aim of this study is to assess and compare the degree of adoption of smart logistics technologies in companies servicing food supply chains in Poland and Lithuania.

Material and Methods: The analysis was based on data obtained through an online survey conducted between October and December 2024 addressed to logistics service providers in the agri-food sector ($n = 60$ in Poland, $n = 44$ in Lithuania). A Logistics Technology Adoption Index (LTAI; Cronbach's $\alpha = 0.825$) was developed based on seven binary indicators determining the implementation of selected smart logistics technologies. A company was classified as 'high adopter' if the index value was ≥ 0.50 .

Results: The overall level of technology adoption (LTAI) in Poland was significantly higher than in Lithuania (0.431 vs. 0.044; $p < .001$), indicating a clearly higher level of digitalization among Polish logistics companies. The analysis of the use of specific technologies confirmed that capital-intensive solutions, such as intelligent vehicle systems ($\chi^2 = 38.47$; $p < .0001$) and predictive analytics tools ($\chi^2 = 29.10$; $p < .0001$), were implemented much more frequently in Poland, and the differences in other areas were also statistically significant.

Conclusions: The Polish logistics market in the agri-food sector is characterized by a significantly higher level of digitalization than the Lithuanian market, particularly in terms of solutions requiring greater capital expenditure, such as smart vehicles and predictive analytics tools. Cost motivations

Mariusz Pyra, PhD, John Paul II University in Białą Podlaską, Faculty of Economic Sciences; ul. Siderska 95/97, 21-500 Białą Podlaską, Poland. (m.pyra@dyd.akademibialska.pl).  <https://orcid.org/0000-0001-8246-851X>

Jurgita Paužuolienė, PhD, Klaipėdos valstybinė kolegija; Jaunystės g. 1, LT-91274, Klaipėda, Lithuania.

(j.pauzuoliene@kvk.lt).  <https://orcid.org/0000-0002-1034-2296>

Ieva Kaveckė, MA, Klaipėdos valstybinė kolegija; Jaunystės g. 1, LT-91274, Klaipėda, Lithuania.

(i.kavecke@kvk.lt).  <https://orcid.org/0000-0001-7919-6197>

clearly outweigh environmental motivations in both countries, and a stronger perception of barriers is associated with a lower propensity for implementation. In Poland, large enterprises achieve a significantly higher adoption level of smart logistics technology than small and medium-sized enterprises (SMEs), which is confirmed by the effect of scale. In the case of Lithuania, due to a small number of companies surveyed, the scale effect was not confirmed.

Keywords: smart logistics, food supply chain, digital transformation, adoption barriers, sustainable development, Poland, Lithuania.

JEL codes: O33, Q13, R40.

Abstrakt

Cel: Celem artykułu jest ocena i porównanie stopnia wykorzystania technologii smart-logistics w przedsiębiorstwach obsługujących łańcuchy dostaw żywności w Polsce i na Litwie.

Materiał i metody: Analiza opiera się na danych pozyskanych za pomocą ankiety internetowej przeprowadzonej od października do grudnia 2024 r., skierowanej do dostawców usług logistycznych w sektorze rolno-spożywczym (w Polsce $n = 60$, na Litwie $n = 44$). Na podstawie siedmiu binarnych wskaźników określających wdrożenie wybranych technologii smart-logistics skonstruowano Indeks Adopcji Technologii Logistycznych (IATL; alfa Cronbacha $\alpha = 0,825$), który przy wartości $\geq 0,50$ klasyfikował firmę jako „wysoko adoptującą”.

Wyniki: Ogólny poziom adopcji technologii (IATL) w Polsce był znacząco wyższy niż na Litwie (0,431 vs. 0,044; $p < 0,001$), co wskazuje na wyraźnie większą cyfryzację polskich firm logistycznych. Analiza wykorzystania poszczególnych technologii potwierdziła, że rozwiązania kapitałochłonne, takie jak inteligentne systemy pojazdów ($\chi^2 = 38,47$; $p < 0,0001$) czy narzędzia analityki predykcyjnej ($\chi^2 = 29,10$; $p < 0,0001$), były znacznie częściej wdrażane w Polsce, a różnice w pozostałych obszarach również były istotne statystycznie.

Wnioski: Polski rynek logistyczny w sektorze rolno-spożywczym charakteryzuje się istotnie wyższym poziomem cyfryzacji niż litewski, zwłaszcza w zakresie rozwiązań wymagających większych nakładów kapitałowych, takich jak inteligentne pojazdy czy narzędzia analityki predykcyjnej. Motywacje kosztowe zdecydowanie przewyższają motywacje środowiskowe w obu krajach, a silniejsze postrzeganie barier wiąże się z niższą skłonnością do wdrożeń. W Polsce duże przedsiębiorstwa osiągają znacznie wyższy poziom adopcji technologii smart-logistics niż małe i średnie przedsiębiorstwa (MSP), co potwierdza efekt skali. W przypadku Litwy, ze względu na niewielką liczbę badanych firm, efekt skali nie został potwierdzony.

Słowa kluczowe: smart-logistics, łańcuch dostaw żywności, transformacja cyfrowa, bariery adopcji, zrównoważony rozwój, Polska, Litwa.

Kody JEL: O33, Q13, R40.

Introduction

In recent years, digital technologies have become a key driver of innovation in the agri-food logistics sector, impacting the way food is produced, stored, transported, and delivered. The increasing global demand for sustainability, transparency, and operational efficiency in supply chains has led to the integration of advanced digital tools, such as the Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), blockchain technology, and real-time data analytics, into agri-food logistics systems (Fatorachian et al., 2025). The food supply chain is particularly susceptible to disruptions and inefficiencies due to perishable products and complex logistics operations. Digitalization has emerged as a response to these challenges, offering better inventory control, more accurate demand forecasting, and reduced food loss and

Wstęp

W ostatnich latach technologie cyfrowe stały się kluczowym motorem innowacji w logistyce rolno-spożywczej, wpływając na sposób produkcji, przechowywania, transportu i dostarczania żywności. Rosnące globalne zapotrzebowanie na zrównoważony rozwój, transparentność oraz efektywność operacyjną w łańcuchach dostaw doprowadziło do integracji zaawansowanych narzędzi cyfrowych – takich jak Internet Rzeczy (IoT), sztuczna inteligencja (AI), technologia *blockchain* oraz analityka danych w czasie rzeczywistym – z systemami logistyki rolno-spożywczej (Fatorachian i in., 2025). Łańcuch dostaw żywności jest szczególnie podatny na zakłócenia i nieefektywność ze względu na łatwo psujące się produkty oraz złożoność operacji logistycznych. Cyfryzacja stała się odpowiedzią na te wyzwania,

waste at all stages of the supply chain (Trevisan & Formentini, 2024). As digitalization develops, its contribution to sustainability is becoming more evident, as it supports circular economy practices and reduces the negative impact on the environment (Ada et al., 2023). Some studies highlight that the integration of digital technologies into logistics processes can increase productivity, business competitiveness, and supply chain transparency by up to 20% (Burinskienė & Daškevič, 2024). Digital transformation has significantly expanded the volume of data accessible to businesses. These innovations allow for the collection and analysis of vast amounts of both structured and unstructured data from diverse internal and external sources, transforming raw data into valuable insights for decision-making (Lavorato & Piedepalumbo, 2023).

However, the level of digital adoption varies significantly among countries, even within the European Union. Research shows that digital maturity is influenced by factors such as technical infrastructure, digital competence, organizational readiness, and national policy frameworks (Verly et al., 2024). While some countries rapidly implement advanced digital solutions, others face barriers, including cost, limited skills, and low awareness, particularly among small and medium-sized enterprises (Mahroof et al., 2022).

An example of such diversity is Central and Eastern Europe, where the digital maturity indicators of supply chains vary significantly among countries (Szegedi & Ulechla, 2022; UNCTAD, 2023). There are three reasons behind the choice of Poland and Lithuania for this study. Firstly, both countries are direct neighbors and members of the EU, which means that they operate in a uniform regulatory environment for agricultural and transport policy, minimizing the impact of macro-institutional variables. Secondly, they are characterized by clearly different levels of digital maturity in the transport, shipping, and logistics (TSL) sector. In the 2024 Digital Economy and Society Index (DESI) index, Poland scored 46.2 points, while Lithuania scored 35.0 points (European Commission, 2024), which creates a clear analytical contrast. Thirdly, both countries play complementary roles in the Baltic–Adriatic transport corridor, making them an important case study for the implementation of smart technologies in cross-border food supply chains.

The role of digitalization and knowledge management is increasingly emphasised in Polish logistics research. Sałek and Wiśniewska-Sałek (2024) examined the use of digital freight exchanges, which facilitate the exchange of information between carriers and cargo owners in real time, thereby reducing

oferując m.in. lepszą kontrolę zapasów, bardziej precyzyjne prognozowanie popytu oraz ograniczenie strat i marnotrawstwa żywności na każdym etapie łańcucha dostaw (Trevisan i Formentini, 2024). Wraz z rozwojem cyfryzacji jej wkład w zrównoważony rozwój staje się coraz bardziej widoczny – wspiera bowiem praktyki gospodarki o obiegu zamkniętym oraz redukuje negatywny wpływ na środowisko (Ada i in., 2023). Niektóre badania wskazują, że integracja technologii cyfrowych z procesami logistycznymi może zwiększyć produktywność, konkurencyjność firm oraz przejrzystość łańcucha dostaw nawet o 20% (Burinskienė i Daškevič, 2024). Transformacja cyfrowa znacząco zwiększyła także ilość danych dostępnych dla przedsiębiorstw. Innowacje te umożliwiają gromadzenie i analizę ogromnych ilości danych – zarówno ustrukturyzowanych, jak i nieustrukturyzowanych – pochodzących z różnych źródeł wewnętrznych i zewnętrznych, przekształcając dane surowe w użyteczne informacje wspierające procesy decyzyjne (Lavorato i Piedepalumbo, 2023).

Poziom wdrożenia technologii cyfrowych różni się jednak znacząco między krajami – również w obrębie Unii Europejskiej. Badania pokazują, że dojrzałość cyfrowa zależy od takich czynników, jak infrastruktura techniczna, kompetencje cyfrowe, gotowość organizacyjna oraz krajowe ramy polityczne (Verly i in., 2024). Podczas gdy niektóre państwa szybko wdrażają zaawansowane rozwiązania cyfrowe, inne napotykają bariery w postaci wysokich kosztów, ograniczonych umiejętności oraz niskiej świadomości – szczególnie w sektorze małych i średnich przedsiębiorstw (MŚP) (Mahroof i in., 2022).

Przykład zróżnicowania tego typu stanowi Europa Środkowo-Wschodnia, gdzie wskaźniki dojrzałości cyfrowej łańcuchów dostaw różnią się znacząco między krajami (Szegedi i Ulechla, 2022; UNCTAD, 2023). Wybór Polski i Litwy podyktowany jest trzema przesłankami. Po pierwsze, oba kraje są bezpośrednimi sąsiadami i członkami UE, przez co funkcjonują w jednolitym otoczeniu regulacyjnym polityki rolnej i transportowej, co minimalizuje wpływ zmiennych makroinstytucjonalnych. Po drugie, charakteryzują się wyraźnie odmiennym poziomem dojrzałości cyfrowej sektora transportu, spedycji i logistyki (TSL). W indeksie DESI 2024 Polska uzyskała wartość 46,2 pkt, a Litwa 35,0 pkt (European Commission, 2024), co tworzy naturalne kontrasty analityczne. Po trzecie, oba państwa pełnią komplementarne role w korytarzu transportowym Bałtyk–Adriatyk, co czyni je istotnym studium przypadku dla wdrażania inteligentnych technologii w transgranicznych łańcuchach dostaw żywności.

the number of empty runs and improving transport efficiency. This approach has proved to be particularly useful for SMEs, allowing them to compete with larger players by boosting operational efficiency through the use of digital platforms. Despite geographical proximity and shared EU membership, Poland and Lithuania display differences in digital integration levels within the agri-food logistics sector. This disparity raises an important question about what are the factors that drive and impede digital transformation in comparable contexts. For instance, Blantucas (2023) emphasizes the significance of socio-technical dynamics, such as institutional support and stakeholder collaboration, in terms of how fast digital technologies are adopted. Studies also show that integrating quality management with digital systems, especially in the hospitality and food industries, enhances sustainability and operational efficiency (Al-Husain et al., 2024). Moreover, digital pricing strategies, such as those based on blockchain technology explored by Dey et al. (2024), illustrate how digitalization can even impact economic models within perishable food supply chains.

The COVID-19 pandemic accelerated digitalization in food logistics by exposing its vulnerabilities and stressing the need for resilient, tech-enabled supply networks (Mantravadi & Srαι, 2023). These shifts have reinforced the role of digital technologies not only as efficiency tools but also as foundations of resilience in times of systemic crisis. Yet, despite these advancements, a literature review by Wang et al. (2024) finds that cross-border food logistics still struggle with issues, such as information asymmetry, poor transparency, and coordination – problems, which could be mitigated through effective implementation of digital tools.

The article addresses a key research gap in the literature—lack of empirical comparisons of digital technology adoption in food logistics in neighboring EU countries. Despite the growing importance of digitalization, there has been little research into the analysis of differences in the level of technology implementation between countries with similar institutional conditions, such as Poland and Lithuania.

W polskich badaniach logistycznych coraz częściej podkreśla się rolę cyfryzacji i zarządzania wiedzą. Sałek i Wiśniewska-Sašek (2024) badali wykorzystanie cyfrowych giełd transportowych umożliwiających wymianę informacji między przewoźnikami a właścicielami ładunków w czasie rzeczywistym, co redukuje liczbę pustych przejazdów i zwiększa efektywność transportu. Takie rozwiązania okazują się szczególnie przydatne dla sektora MŚP, ponieważ umożliwiają im konkutowanie z większymi podmiotami poprzez poprawę efektywności operacyjnej z wykorzystaniem platform cyfrowych. Pomimo bliskości geograficznej i wspólnego członkostwa w UE, Polska i Litwa wykazują różnice w poziomie integracji cyfrowej w sektorze logistyki rolno-spożywczej. Różnice te skłaniają do postawienia pytania, co sprzyja, a co hamuje transformację cyfrową w porównywalnych warunkach. Przykładowo, Blantucas (2023) podkreśla rolę dynamiki społeczno-technicznej – takiej jak wsparcie instytucjonalne i współpraca interesariuszy – w tempie adopcji technologii. Inne badania pokazują, że integracja zarządzania jakością z systemami cyfrowymi, szczególnie w branży hotelarskiej i spożywczej, zwiększa zrównoważony rozwój i efektywność operacyjną (Al-Husain i in., 2024). Strategie cyfrowej wyceny – takie jak te oparte na technologii *blockchain* badane przez Dey i in. (2024) – pokazują z kolei, że cyfryzacja może wpływać nawet na modele ekonomiczne w łańcuchach dostaw żywności o krótkim okresie przydatności.

Pandemia COVID-19 przyspieszyła cyfryzację logistyki żywności, ujawniając jej słabości i podkreślając potrzebę tworzenia odpornych, cyfrowo wspieranych sieci dostaw (Mantravadi i Srαι, 2023). Przemiany te umocniły pozycję technologii cyfrowych nie tylko jako narzędzi do poprawy efektywności, lecz również jako fundamentów odporności w czasach kryzysu systemowego. Jednak pomimo tych postępów transgraniczna logistyka żywności wciąż zmagają się z asymetrią informacyjną, niską przejrzystością i problemami koordynacyjnymi – które mogłyby zostać ograniczone dzięki skutecznemu wdrożeniu narzędzi cyfrowych (Wang i in., 2024).

Artykuł podejmuje istotną lukę w literaturze – brak porównań empirycznych dotyczących adopcji technologii cyfrowych w logistyce żywności w sąsiadujących krajach UE. Mimo rosnącej roli cyfryzacji, niewiele badań analizuje różnice w poziomie wdrożeń technologii między państwami o zbliżonych uwarunkowaniach instytucjonalnych, takimi jak Polska i Litwa.

The identified research gap involves three aspects: lack of a cumulative measure of multiple technology adoption on a single comparative scale for small EU markets; limited understanding of the simultaneous impact of financial and competence barriers and economies of scale on the level of digitization in the food supply chain; insufficient comparative data from Central and Eastern Europe, where markets are highly diverse in terms of capital and public policies. The novelty of this study lies in proposing a synthetic Logistics Technology Adoption Index (LTAI) with proven unidimensionality, and then applying it to an empirical comparison of two neighboring economies with different levels of digital maturity. This is the first publication to combine the LTAI measurement with an analysis of motivations, barriers, and economies of scale in food logistics, thus providing a comprehensive picture of the determinants of digital transformation in the region.

Against this background, the following research question was formulated: to what extent does the level of digital technology adoption differ between Polish and Lithuanian logistics companies, and what factors—in particular barriers and motivations—determine these differences?

The aim of this study is to assess and compare the extent to which selected digital technologies are used among food supply chain enterprises in Poland and Lithuania. The analysis involves both differences in the level of adoption and implementation conditions, including motivations and barriers.

Based on the literature review and theoretical assumptions regarding the factors determining the adoption of smart logistics technologies in food sector enterprises, the following hypotheses were formulated:

- H1: The average level of digital technology adoption (measured by LTAI) is significantly higher in Poland than in Lithuania.
- H2: Cost-related motivations dominate environmental motivations in both countries.
- H3: Financial and competence barriers (high implementation costs, lack of competence) have a stronger limiting effect on SMEs than on large enterprises, regardless of the country.

The formulated hypotheses were empirically verified using appropriate statistical tests, the selection and application of which are described in detail later in this article.

Zidentyfikowana luka badawcza dotyczy trzech obszarów: braku pomiaru skumulowanej adopcji wielu technologii w jednej, porównawczej skali dla małych rynków UE; ograniczonej wiedzy o jednoczesnym oddziaływaniu barier finansowo-kompetencyjnych i efektu skali na poziom cyfryzacji łańcucha dostaw żywności; niedostatecznych danych porównawczych z Europy Środkowo-Wschodniej, gdzie rynki są silnie zróżnicowane pod względem kapitału i polityk publicznych. Oryginalność niniejszego badania polega na zaproponowaniu syntetycznego Indeksu Adopcji Technologii Logistycznych (IATL) o sprawdzonej jednowymiarowości, a następnie zastosowaniu go do empirycznego porównania dwóch sąsiadujących gospodarek o różnej dojrzałości cyfrowej. To pierwsza publikacja, która łączy pomiar IATL z analizą motywacji, barier i efektu skali w logistyce żywności, dostarczając tym samym kompleksowego obrazu determinant transformacji cyfrowej w regionie.

Na tym tle sformułowano problem badawczy: czy i w jakim zakresie poziom adopcji technologii cyfrowych różni się między polskimi a litewskimi przedsiębiorstwami logistycznymi oraz jakie czynniki – w szczególności bariery i motywacje – warunkują te różnice?

Celem niniejszego opracowania jest ocena i porównanie stopnia wykorzystania wybranych technologii cyfrowych w przedsiębiorstwach obsługujących łańcuchy dostaw żywności w Polsce i na Litwie. Analiza uwzględnia zarówno różnice w poziomie adopcji, jak i uwarunkowania wdrożeniowe, w tym motywacje oraz bariery.

Na podstawie przeglądu literatury oraz założeń teoretycznych dotyczących czynników determinujących adopcję technologii smart-logistics w przedsiębiorstwach sektora żywności sformułowano następujące hipotezy:

- H1: Średni poziom adopcji technologii cyfrowych (mierzony wskaźnikiem IATL) jest istotnie wyższy w Polsce niż na Litwie.
- H2: Motywacje o charakterze kosztowym dominują nad motywacjami środowiskowymi w obu krajach.
- H3: Bariery finansowo-kompetencyjne (wysoki koszt wdrożenia, brak kompetencji) silniej ograniczają MŚP niż duże przedsiębiorstwa, niezależnie od kraju.

Sformułowane hipotezy poddano weryfikacji empirycznej przy użyciu odpowiednich testów statystycznych, których dobór i zastosowanie zostały szczegółowo opisane w dalszej części artykułu.

Literature Review

Benefits of Digitalization in Food Logistics

The adoption of digital technologies in food supply chains is becoming increasingly important to ensure efficiency, transparency, and sustainability. Academic literature also indicates numerous advantages that digital technologies can provide when effectively adopted in food logistics systems. The food logistics supply chain not only involves the physical movement of food from producers to consumers, but also the movement of information, capital, and services. Effective process management is essential to ensure food quality, reduce costs, improve service levels, and meet consumers' expectations (Chen, 2024). These benefits encompass both operational improvements and strategic transformations that can increase competitiveness, environmental performance, and customer satisfaction.

Smart logistics systems, especially those that use route optimization and data analytics, help reduce delivery times and operational costs. The application of smart logistics in rural e-commerce has resulted in a 5% cost reduction and improvement in delivery times compared to traditional models (Wei, 2024). Digital transformation also involves the integration of complementary cutting-edge technologies. Smart technologies such as blockchain, the Internet of Things (IoT), big data analytics, cloud computing, smart contracts, 5G, and other advanced technologies support traceability, accuracy, and transparency in logistics. These technologies have become essential for implementing green logistics and reducing carbon footprints, as they allow for real-time cargo tracking, optimized transportation routes, and more efficient use of energy resources (Khatib & Barco, 2021; Ravi et al., 2023).

The literature review indicates that researchers focus on a limited group of solutions that combine two criteria: high utility in the food supply chain and growing maturity of implementation in business practice. Table 1 summarizes these technologies, highlighting their key applications and expected benefits for logistics operators.

Przegląd literatury

Korzyści z cyfryzacji w logistyce żywności

Przyjęcie technologii cyfrowych w łańcuchach dostaw żywności odgrywa coraz istotniejszą rolę w zapewnieniu wydajności, przejrzystości oraz zrównoważonego rozwoju tych systemów. Literatura naukowa wskazuje na liczne korzyści wynikające z efektywnego wdrażania rozwiązań cyfrowych w logistyce żywności. Łańcuch dostaw w tym sektorze obejmuje nie tylko fizyczny przepływ produktów od producenta do konsumenta, lecz również przepływ informacji, kapitału i usług. Skuteczne zarządzanie tymi procesami jest kluczowe dla utrzymania jakości żywności, redukcji kosztów, poprawy poziomu obsługi oraz zaspokojenia oczekiwań konsumentów (Chen, 2024). Wskazane korzyści obejmują zarówno operacyjne usprawnienia, jak i strategiczne transformacje, które przyczyniają się do wzrostu konkurencyjności, efektywności środowiskowej oraz satysfakcji klientów.

Inteligentne systemy logistyczne, w szczególności te wykorzystujące optymalizację tras i analitykę danych, pozwalają na skrócenie czasu dostaw i obniżenie kosztów operacyjnych. Przykładowo, wdrożenie inteligentnych rozwiązań logistycznych w wiejskim handlu elektronicznym doprowadziło do 5% redukcji kosztów oraz poprawy terminowości dostaw względem modeli tradycyjnych (Wei, 2024). Transformacja cyfrowa obejmuje integrację zaawansowanych technologii, które wzajemnie się uzupełniają. Rozwiązania takie jak *blockchain*, Internet Rzeczy, analiza *big data*, przetwarzanie w chmurze, inteligentne kontrakty, sieci 5G i inne nowoczesne technologie wspierają identyfikowalność, precyzję i przejrzystość procesów logistycznych. Technologie te stanowią dziś fundament tzw. zielonej logistyki i odgrywają istotną rolę w redukcji śladu węglowego – m.in. poprzez umożliwienie śledzenia ładunków w czasie rzeczywistym, optymalizację tras transportowych i efektywniejsze zarządzanie zasobami energetycznymi (Khatib i Barco, 2021; Ravi i in., 2023).

Przegląd literatury wskazuje, że badacze koncentrują się na ograniczonej grupie rozwiązań, które łączą w sobie dwa kryteria: wysoką użyteczność w łańcuchu dostaw żywności oraz rosnącą dojrzałość wdrożeniową w praktyce gospodarczej. Tabela 1 syntetyzuje te technologie, podkreślając ich kluczowe zastosowania oraz spodziewane korzyści dla operatorów logistycznych.

Table 1. Smart technologies use in food logistics

Smart technology	Key applications in food logistics	Benefits
Blockchain	– product traceability from farm to fork – secure digital records – fraud prevention	– transparency – trust & compliance – quick recalls
Internet of Things (IoT)	– real-time tracking of temperature, humidity, and location – monitoring storage and transport conditions	– reduces spoilage – Ensures cold chain integrity
Big data analytics	– demand forecasting – route optimization – risk assessment for food safety	– reduces waste – informed decisions – cost savings
Cloud computing	– centralized data sharing across supply chain – remote access to logistics systems	– seamless collaboration – scalability – efficiency
Smart contracts	– automated payments based on delivery conditions – enforcing compliance rules	– reduces disputes – lowers admin costs – speed
5G connectivity	– real-time communication between devices – enhanced IoT data flow – remote monitoring	– faster data transfer – reliable operations
Artificial intelligence (AI)	– demand forecasting – inventory planning – route optimization	– improves decision-making – lowers costs – reduces waste
Drones	– monitoring agricultural operations – enabling deliveries in remote areas	– enhances operational efficiency – accessibility in rural areas
Digital platforms	– redistributing surplus food through charitable or discount platforms	– reduces food waste – vsupports social responsibility – enhances logistics
Supply chain digital integration	– enabling smooth information flow between suppliers, producers, and customers	– improves coordination, responsiveness, and sustainability

Source: authors' own study based on Chen (2024), Khatib and Barco (2021), Wei (2024).

Tabela 1. Wykorzystanie inteligentnych technologii w logistyce żywności

Inteligentna technologia	Kluczowe zastosowania w logistyce żywności	Korzyści
Blockchain	– identyfikowalność produktu „od pola do stołu” – bezpieczne rejestry cyfrowe – apobieganie oszustwom	– przejrzystość – zaufanie i zgodność z przepisami – szybkie wycofywanie produktów
Internet rzeczy	– śledzenie temperatury, wilgotności i lokalizacji w czasie rzeczywistym – monitorowanie warunków przechowywania i transportu	– zmniejsza ryzyko zepsucia – zapewnia integralność łańcucha chłodniczego
Analityka dużych zbiorów danych	– prognozowanie popytu – optymalizacja tras – ocena ryzyka dla bezpieczeństwa żywności	– zmniejsza ilość odpadów – świadome decyzje – oszczędność kosztów
Przetwarzanie w chmurze	– scentralizowane udostępnianie danych w całym łańcuchu dostaw – zdalny dostęp do systemów logistycznych	– płynna współpraca – skalowalność – wydajność
Inteligentne kontrakty	– zautomatyzowane płatności oparte na warunkach dostawy – egzekwowanie zasad zgodności	– zmniejsza liczbę sporów – niższe koszty administracyjne – szybkość
Łączność 5G	– komunikacja między urządzeniami w czasie rzeczywistym – ulepszony przepływ danych IoT – zdalne monitorowanie	– szybszy transfer danych – niezawodne operacje
Sztuczna inteligencja	– prognozowanie popytu – planowanie zapasów – optymalizacja tras	– lepsze podejmowanie decyzji – obniża koszty – zmniejsza ilość odpadów
Drony	– monitorowanie działalności rolniczej – umożliwienie dostaw w odległych obszarach	– zwiększa wydajność operacyjną – dostępność na obszarach wiejskich
Platformy cyfrowe	– redystrybucja nadwyżek żywności za pośrednictwem platform charytatywnych lub rabatowych	– zmniejsza marnotrawstwo żywności – wspiera odpowiedzialność społeczną – poprawia logistykę
Cyfrowa integracja łańcucha dostaw	– umożliwienie płynnego przepływu informacji między dostawcami, producentami i klientami	– lepsza koordynacja, szybkość reakcji i zrównoważony rozwój

Źródło: opracowanie własne na podstawie Chen (2024), Khatib i Barco (2021), Wei (2024).

As Table 1 shows, empirical studies most often highlight the value of blockchain and IoT in ensuring traceability and transparency, while AI and big data analytics are seen as tools that directly improve operational efficiency. A relatively small number of studies on digital platforms for redistributing food surpluses suggests a gap that is worth addressing in future research projects.

Smart technologies are transforming food logistics by making supply chains more resilient, transparent, and sustainable. Their combined application not only helps reduce waste and costs, but also improves food safety and customer trust. As global food systems face increasing pressure from climate change, population growth, and supply chain disruptions, the adoption of these technologies is important for ensuring long-term efficiency and security in food distribution.

Blockchain technology increases supply chain transparency and helps prevent information tampering, which is a very important advantage in environmentally sensitive industries. These technologies reduce human errors, improve routing, and optimize warehouse operations (Rahman et al., 2024).

Food supply networks are complex and interconnected, and IoT-based systems can monitor them to capture details on food materials and protect the ecosystem. The IoT platform can provide product traceability information in the food supply chain, assisting customers, especially during the COVID-19 pandemic-related disruptions where the information available is so vague. By combining IoT and blockchain technologies, food supply chain can become more transparent and productive by delivering robust and stable information to clients and related stakeholders (Abideen, 2021).

Digitalization significantly improves logistics performance through automation and investment in digital skills (Ntule et al., 2024). New technologies such as big data, artificial intelligence and automation are considered to be high-potential technologies in logistics. They support predictive decision-making and are crucial for the future of smart logistics (Kwon & So, 2023). Digital technologies also enable the development of multi-modal logistics. Smart logistics not only improves infrastructure, but also promotes regional economic equity and service quality. This is evident from the Smart Logistics Development Index (SLDI), which shows the improvement in customer satisfaction and competitiveness due to digital integration (Liu & Zhao, 2024).

Drone technology has transformed the food industry by enhancing logistics and supply chain efficiency through digital advancements.

Jak wynika z tabeli, prace empiryczne najczęściej eksponują wartość *blockchainu* i IoT w zapewnieniu identyfikowalności i przejrzystości, podczas gdy AI i analityka *big data* są postrzegane jako narzędzia bezpośrednio podnoszące efektywność operacyjną. Uwagę zwraca relatywnie niewielka liczba badań dotyczących platform cyfrowych do redystrybucji nadwyżek żywności – sugeruje to lukę, którą warto wypełnić w kolejnych projektach badawczych.

Inteligentne technologie przekształcają logistykę żywności, czyniąc łańcuchy dostaw bardziej odpornymi, przejrzystymi i zrównoważonymi. Ich łączne zastosowanie nie tylko pomaga zmniejszyć ilość odpadów i koszty, ale także poprawia bezpieczeństwo żywności i zaufanie klientów. Ponieważ globalne systemy żywnościowe stoją w obliczu rosnącej presji związanej ze zmianami klimatycznymi, wzrostem populacji i zakłóceniami w łańcuchu dostaw, przyjęcie tych technologii jest ważne dla zapewnienia długoterminowej wydajności i bezpieczeństwa dystrybucji żywności.

Technologia *blockchain* zwiększa przejrzystość łańcucha dostaw i pomaga zapobiegać manipulowaniu informacjami, co jest bardzo ważną zaletą w branżach wrażliwych na środowisko. Technologie te redukują błędy ludzkie, usprawniają routing i optymalizują operacje magazynowe (Rahman i in., 2024).

Sieci dostaw żywności są złożone i wzajemnie połączone, a systemy oparte na IoT mogą je monitorować, aby uchwycić szczegóły dotyczące materiałów spożywczych i chronić ekosystem. Platforma IoT może dostarczać informacji na temat identyfikowalności produktów w łańcuchu dostaw żywności, pomagając klientom, zwłaszcza podczas zakłóceń związanych z pandemią, gdy dostępne informacje są niejasne. Łącząc technologie IoT i *blockchain*, łańcuch dostaw żywności może stać się bardziej przejrzysty i produktywny, dostarczając solidnych i stabilnych informacji klientom i powiązanym interesariuszom (Abideen, 2021).

Cyfryzacja znacząco poprawia wydajność logistyki poprzez automatyzację i inwestycje w umiejętności cyfrowe (Ntule i in., 2024). Nowe technologie, takie jak *big data*, sztuczna inteligencja i automatyzacja, są uważane za technologie o dużym potencjale w logistyce. Wspierają one predykcyjne podejmowanie decyzji i mają kluczowe znaczenie dla przyszłości inteligentnej logistyki (Kwon i So, 2023). Technologie cyfrowe umożliwiają również rozwój logistyki multimodalnej. Inteligentna logistyka nie tylko poprawia infrastrukturę, ale także promuje regionalną równość gospodarczą i jakość usług. Wynika to wyraźnie ze wskaźnika rozwoju inteligentnej logistyki (SLDI), który pokazuje

As part of Agriculture 5.0, drones support faster autonomous deliveries, aid humanitarian efforts, and promote sustainability with electric power. They also allow for better data collection and analysis, driving improvements across the food supply chain (Undre & Jokonya, 2024). Drone technology enables stakeholders to access and analyze data that was once unavailable across different stages of the food supply chain. This data supports the development and enhancement of supply chain processes. Logistics within the supply chain involves planning, executing, and managing the efficient and secure flow and storage of goods, services, and information to meet customer needs (Croom et al., 2018).

In addition to technology itself, intelligent tools and workforce support systems have proven vital. Artificial intelligence-based decision support systems and intelligent logistics tools provide real-time monitoring, predictive capabilities, and route optimization. These tools help staff manage perishable goods more effectively, reducing food waste and increasing sustainability (Yousefi et al., 2024). Coordination in logistics networks is another key benefit. Digital solutions such as smart sensors and automation improve coordination, eliminate inefficiencies caused by manual tasks, and improve the overall efficiency of the logistics system (Reddy & Kumar, 2024). From an environmental perspective, digital technologies support the development of green logistics, including through emission reduction, vehicle route optimization, and efficient resource management, supporting the achievement of circular economy goals (Lu et al., 2025).

Technological and Organizational Barriers

Despite these advantages, the implementation process faces significant technological, institutional, and organizational challenges, including high initial investment and compatibility with existing systems (Saha et al., 2025), which vary according to the size of the company, the region and the national infrastructure. In addition, lack of skilled staff and resistance to change can hinder the adoption of innovative solutions (Sumets, 2023). As Verdouw et al. (2013) noted, one of the main logistic challenges in food sector is to deal with the high dynamics and

poprawę zadowolenia klientów i konkurencyjności dzięki integracji cyfrowej (Liu i Zhao, 2024).

Technologia dronów przekształciła przemysł spożywczy, zwiększając wydajność logistyki i łańcucha dostaw dzięki postępowi cyfrowemu. W ramach Rolnictwa 5.0 drony wspierają szybsze, autonomiczne dostawy, pomagają w działaniach humanitarnych i promują zrównoważony rozwój dzięki energii elektrycznej. Umożliwiają one również lepsze gromadzenie i analizę danych, co prowadzi do ulepszeń w całym łańcuchu dostaw żywności (Undre i Jokonya, 2024). Technologia dronów umożliwia zainteresowanym stronom dostęp i analizę danych, które kiedyś były niedostępne na różnych etapach łańcucha dostaw żywności. Dane te wspierają rozwój i usprawnianie procesów łańcucha dostaw. Logistyka w ramach łańcucha dostaw obejmuje planowanie, wykonywanie i zarządzanie wydajnym i bezpiecznym przepływem i przechowywaniem towarów, usług i informacji w celu zaspokojenia potrzeb klientów (Croom i in., 2018).

Oprócz samej technologii, kluczowe okazały się inteligentne narzędzia i systemy wsparcia pracowników. Oparte na sztucznej inteligencji systemy wspomagania decyzji i inteligentne narzędzia logistyczne zapewniają monitorowanie w czasie rzeczywistym, możliwości predykcyjne i optymalizację tras. Narzędzia te pomagają personelowi w skuteczniejszym zarządzaniu łatwo psującymi się towarami, zmniejszając marnotrawstwo żywności i zwiększając zrównoważony rozwój (Yousefi i in., 2024). Koordynacja w sieciach logistycznych to kolejna kluczowa korzyść. Rozwiązania cyfrowe, takie jak inteligentne czujniki i automatyzacja, poprawiają koordynację, eliminują nieefektywność spowodowaną zadaniami wykonywanymi ręcznie i poprawiają ogólną wydajność systemu logistycznego (Reddy i Kumar, 2024). Z perspektywy środowiskowej technologie cyfrowe wspierają rozwój ekologicznej logistyki, m.in. przez redukcję emisji, optymalizację tras pojazdów oraz efektywne gospodarowanie zasobami, wspierając realizację celów gospodarki o obiegu zamkniętym (Lu i in., 2025).

Bariery technologiczne i organizacyjne

Pomimo tych zalet, proces wdrażania napotyka znaczące wyzwania technologiczne, instytucjonalne i organizacyjne, w tym wysokie początkowe inwestycje i kompatybilność z istniejącymi systemami (Saha i in., 2025), które różnią się w zależności od wielkości firmy, regionu i infrastruktury krajowej. Ponadto brak wykwalifikowanego personelu i opór przed zmianami mogą utrudniać przyjęcie innowacyjnych rozwiązań (Sumets, 2023). Jak zauważyli Verdouw i in. (2013), jednym z głównych wyzwań logistycznych w sektorze spożywczym jest radzenie

uncertainty in supply and demand. There is great uncertainty regarding fresh product quality as well as available volumes in time in a specific place. The sector is characterized by last-minute changes and rush orders. As a consequence, the required prediction and planning concept and accompanying logistics system need to be very flexible, allowing for last minutes changes and reallocations, but also provide a robust planning.

One of the main technological challenges is the high cost of implementation and maintenance, which is especially burdensome for SMEs (Undre & Jokonya, 2024). Many companies still operate on outdated or incompatible systems, which complicates the integration of new technologies (Magdalena et al., 2024). Another common issue is underdeveloped digital infrastructure, particularly in rural or regional areas often involved in food supply chains (Akinbamini et al., 2025). Moreover, advanced technologies like digital twins and IoT remain underutilized in fruit and vegetable supply chains, despite their great potential to optimize operations (Falayi et al., 2024). Mondal et al. (2019) proposed an IoT-enabled distributed ledger technology (DLT) architecture aimed at enhancing transparency in the food supply chain. Their system integrated a proof-of-object authentication mechanism analogous to the proof-of-work used in cryptocurrencies. Such concept integrated with RFID sensors allowed for continuous real-time data collection throughout the supply chain, offering a transparent and traceable food supply system. However, the implementation of such a traceability system is associated with high operational costs, posing a significant barrier to its widespread adoption (Abideen, 2021).

Technological barriers are compounded by organizational and human resources limitations. Lack of qualified human resources, in particular specialists skilled in using IoT, AI, and data analytics, is a significant factor hampering digital technology adoption (Yousefi et al., 2024). Companies often lack internal competencies needed to operate new systems, and staff training is both costly and time-consuming. In addition, there is widespread organizational resistance to change, especially among leadership who may question the return on investment in new technologies (Hasan & Habib et al., 2024). Furthermore, some companies lack a clear strategic vision of how technology implementation aligns with business objectives (Undre & Jokonya, 2024).

At the institutional level, regulatory and financial frameworks can also create barriers. The lack of clear or sufficient regulations, especially with regard to new technologies such as blockchain or drones,

sobie z wysoką dynamiką i niepewnością podaży i popytu. Istnieje duża niepewność co do jakości świeżych produktów, a także ilości dostępnych na czas w określonym miejscu. Sektor ten charakteryzuje się zmianami w ostatniej chwili i pilnymi zamówieniami. W związku z tym wymagana koncepcja przewidywania i planowania oraz towarzyszący jej system logistyczny muszą być bardzo elastyczne, umożliwiając zmiany i realokacje w ostatniej chwili, ale także zapewniając solidne planowanie.

Jednym z głównych wyzwań technologicznych jest wysoki koszt wdrożenia i utrzymania, co jest szczególnie uciążliwe dla małych i średnich przedsiębiorstw (Undre i Jokonya, 2024). Wiele firm nadal działa na przestarzałych lub niekompatybilnych systemach, co komplikuje integrację nowych technologii (Magdalena i in., 2024). Inną powszechną kwestią jest słabo rozwinięta infrastruktura cyfrowa, szczególnie na obszarach wiejskich lub regionalnych, często zaangażowanych w łańcuchy dostaw żywności (Akinbamini i in., 2025). Co więcej, zaawansowane technologie, takie jak cyfrowe bliźniaki i Internet rzeczy, pozostają niewykorzystane w łańcuchach dostaw owoców i warzyw, pomimo ich ogromnego potencjału w zakresie optymalizacji operacji (Falayi i in., 2024). Mondal i in. (2019) zaproponowali architekturę technologii rozproszonego rejestru (DLT) z obsługą IoT, mającą na celu zwiększenie przejrzystości w łańcuchu dostaw żywności. To system z mechanizmem uwierzytelniania *proof-of-object* analogicznym do *proof-of-work* z systemów kryptowalutowych. Ich koncepcja, zintegrowana z czujnikami RFID, pozwalała na nieprzerwane gromadzenie danych w czasie rzeczywistym na wszystkich etapach łańcucha dostaw, oferując wysoce przejrzysty i identyfikowalny model zapewnienia bezpieczeństwa żywności. Wdrożenie takiego systemu identyfikowalności wiąże się jednak z wysokimi kosztami operacyjnymi, co stanowi istotną barierę dla jego powszechnego przyjęcia (Abideen, 2021).

Bariery technologiczne są potęgowane przez ograniczenia organizacyjne i kadrowe. Brak wykwalifikowanych zasobów ludzkich, w szczególności specjalistów posiadających umiejętności w zakresie korzystania z IoT, sztucznej inteligencji i analizy danych, jest istotnym czynnikiem utrudniającym przyjęcie technologii cyfrowej (Yousefi i in., 2024). Firmom często brakuje wewnętrznych kompetencji potrzebnych do obsługi nowych systemów, a szkolenie personelu jest zarówno kosztowne, jak i czasochłonne. Ponadto istnieje powszechny opór organizacyjny przed zmianami, zwłaszcza wśród kierownictwa, które może kwestionować zwrot z inwestycji w nowe technologie (Hasan i Habib i in., 2024). Co więcej, niektórym

impedes their practical application (Blantucas, 2023). In some countries, such as Bangladesh, regulations prohibit the use of certain digital solutions, such as cryptocurrency-based blockchain systems, forcing companies to seek legal alternatives (Hasan & Habib et al., 2024). In addition to regulatory constraints, the lack of financial support at the public or EU level is a significant issue, limiting the implementation of innovations by logistics companies, especially those that do not have sufficient internal resources (Akinbamini et al., 2025).

One of the key factors hampering digitization in food logistics is also the lack of trust and poor quality of cooperation between entities operating within the supply chain. Effective integration of digital solutions is based on open and transparent data exchange between partners, but the lack of mutual trust significantly limits this transparency (Ekhsanov, 2024). Although blockchain technology offers potential solutions for building durable and immutable data registers, its use remains limited, both due to legal uncertainties and low technological awareness (Hasan & Habib et al., 2024).

To summarize, the literature indicates that the implementation of digital technologies in the domain of food logistics is encumbered by many complex multidimensional barriers—not only technological, but also institutional, organizational, and social ones. This necessitates comprehensive modifications, encompassing the modernization of technological infrastructure, the formulation of pertinent regulations, the fortification of companies' adaptive capacities, and the building of trust in relations between market participants. Despite the evident benefits of digital solutions in the field of food logistics, as demonstrated in extant literature, the transformation is impeded by persistent obstacles. Consequently, a comprehensive understanding of the barriers and benefits is necessary for an accurate assessment of the digital readiness of logistics companies in Poland and Lithuania. This understanding is also crucial for the establishment of practical pathways towards a more effective and sustainable digital transformation in the agri-food sector.

firmom brakuje jasnej strategicznej wizji tego, w jaki sposób wdrażanie technologii jest zgodne z celami biznesowymi (Undre i Jokonya, 2024).

Na poziomie instytucjonalnym ramy regulacyjne i finansowe mogą również tworzyć przeszkody. Brak jasnych lub wystarczających regulacji, zwłaszcza w odniesieniu do nowych technologii, takich jak *blockchain* lub drony, utrudnia ich praktyczne zastosowanie (Blantucas, 2023). W niektórych krajach, na przykład w Bangladeszu, przepisy zabraniają korzystania z niektórych rozwiązań cyfrowych – takich jak systemy *blockchain* oparte na kryptowalutach – zmuszając firmy do poszukiwania legalnych alternatyw (Hasan i Habib i in., 2024). Oprócz ograniczeń regulacyjnych, istotną kwestią jest brak wsparcia finansowego na poziomie publicznym lub unijnym, co ogranicza wdrażanie innowacji przez firmy logistyczne – zwłaszcza te, które nie mają wystarczających zasobów wewnętrznych (Akinbamini i in., 2025).

Jednym z kluczowych czynników utrudniających cyfryzację w logistyce żywności jest również deficyt zaufania i niska jakość współpracy pomiędzy podmiotami funkcjonującymi w ramach łańcucha dostaw. Efektywna integracja rozwiązań cyfrowych opiera się na otwartej i przejrzystej wymianie danych między partnerami, tymczasem brak wzajemnego zaufania znacząco ogranicza tę transparentność (Ekhsanov, 2024). Choć technologia *blockchain* oferuje potencjalne rozwiązania w zakresie budowania trwałych i niezmiennych rejestrów danych, jej wykorzystanie pozostaje ograniczone – zarówno z powodu niejasności prawnych, jak i niskiej świadomości technologicznej (Hasan i Habib i in., 2024).

Podsumowując, literatura wskazuje, że wdrażanie technologii cyfrowych w logistyce żywności napotyka na złożone, wielowymiarowe bariery – nie tylko technologiczne, ale również instytucjonalne, organizacyjne i społeczne. Wymaga to szeroko zakrojonych zmian, obejmujących zarówno modernizację zaplecza technologicznego, jak i opracowanie odpowiednich regulacji, wzmacnianie zdolności adaptacyjnych firm oraz budowanie zaufania w relacjach między uczestnikami rynku. Choć literatura wyraźnie dowodzi, że adopcja rozwiązań cyfrowych w logistyce żywności wiąże się z wieloma strategicznymi i operacyjnymi korzyściami, tempo tej transformacji jest ograniczone przez utrzymujące się przeszkody. W związku z tym dogłębne zrozumienie zarówno barier, jak i korzyści jest niezbędne do rzetelnej oceny poziomu gotowości cyfrowej przedsiębiorstw logistycznych w Polsce i na Litwie oraz do wyznaczenia praktycznych ścieżek prowadzących do skuteczniejszej i bardziej zrównoważonej transformacji cyfrowej w sektorze rolno-spożywczym.

Material and Methods

Sample Characteristics and Research Tools

This study forms the basis of an international research project carried out in Polish–Lithuanian collaboration, which concerns the impact of smart technologies on sustainable development in logistics in Poland and Lithuania. The aim of the project is to assess and compare the use of smart technologies in logistics companies in both countries, taking into account their impact on green logistics practices and sustainable development. The paper focuses on the research results, concentrating on food supply chains.

The study covered all logistics companies operating in Poland and Lithuania and providing services to the agri-food sector. In order to ensure representativeness and enable analysis of the effect of scale, stratified sampling was used with the criterion of company size measured by the number of employees: small (up to 10 persons), medium (11–50), large (51–250), and very large (over 250). The proportions in each stratum reflected the base structure, determined on the basis of national registers of carriers and logistics operators.

The primary data was collected using a standardized questionnaire, developed on the basis of previous literature studies on smart logistics, innovation diffusion, and sustainable development practices. The research instrument consisted of four modules: 1) company characteristics, 2) scope of smart technology implementation, 3) motivations and barriers to adoption, 4) pro-environmental activities and CSR. For modules 3 and 4, a five-point Likert scale (1 = ‘definitely no’, 5 = ‘definitely yes’) was used, which allowed for the subsequent construction of synthetic indices.

The questionnaire was made available to respondents in electronic form in October 2024. The online format made it possible to reach a geographically dispersed population and ensured flexibility in responding. Conducting the study in both countries simultaneously, using identical tools and procedures, created a comparable database for further analysis of differences and determinants of smart logistics technology adoption.

The files in MS Excel format were imported into the Python environment, more specifically the Pandas library. Multiple-choice questions were converted into binary variables, while Likert scales were retained as ordinal variables. Data gaps not exceeding 5% were imputed modally (for binary variables) or by the median (for ordinal variables).

Materiały i metody

Charakterystyka próby i narzędzia badawcze

Badanie to jest podstawą międzynarodowego projektu badawczego realizowanego we współpracy polsko–litewskiej, który dotyczy wpływu inteligentnych technologii na zrównoważony rozwój w logistyce w Polsce i na Litwie. Celem projektu jest ocena oraz porównanie wykorzystania inteligentnych technologii w firmach logistycznych obu krajów, z uwzględnieniem ich wpływu na praktyki zielonej logistyki oraz zrównoważonego rozwoju. Praca koncentruje się na wynikach badań, skupiając się na łańcuchach dostaw żywności.

W badaniu przyjęto populację obejmującą wszystkie przedsiębiorstwa logistyczne operujące na terytorium Polski i Litwy i świadczące usługi dla sektora rolno-spożywczego. Aby zagwarantować reprezentatywność i umożliwić analizę efektu skali, zastosowano dobór warstwowy z kryterium wielkości firmy mierzonej liczbą zatrudnionych: małe (do 10 osób), średnie (11–50), duże (51–250) oraz bardzo duże (powyżej 250). Proporcje w każdej warstwie odzwierciedlały strukturę bazową, wyznaczoną na podstawie rejestrów krajowych przewoźników i operatorów logistycznych.

Dane pierwotne pozyskano za pomocą ujednoliconego kwestionariusza ankiety, skonstruowanego w oparciu o wcześniejsze studia literaturowe nad *smart-logistics*, dyfuzją innowacji i praktykami zrównoważonego rozwoju. Instrument badawczy składał się z czterech modułów: 1) charakterystyka przedsiębiorstwa, 2) zakres wdrożenia inteligentnych technologii, 3) motywacje i bariery adopcji, 4) działania prośrodowiskowe i CSR. Dla modułów 3 i 4 wykorzystano pięciopunktową skalę Likerta (1 = „zdecydowanie nie”, 5 = „zdecydowanie tak”), co umożliwiło późniejsze konstruowanie indeksów syntetycznych.

Kwestionariusz został udostępniony respondentom w formie elektronicznej w październiku 2024 roku. Forma online pozwoliła dotrzeć do geograficznie rozproszonej populacji i zapewniła elastyczność w udzielaniu odpowiedzi. Równoległe przeprowadzenie badania w obu krajach, przy zastosowaniu identycznego narzędzia i procedury, stworzyło porównywalną bazę danych do dalszych analiz różnic i determinant adopcji technologii *smart-logistics*.

Pliki w formacie MS Excel zaimportowano do środowiska Python (biblioteka Pandas). Pytania wielokrotnego wyboru przekształcono w zmienne binarne, natomiast skalę Likerta zachowano jako

Larger gaps resulted in the exclusion of observations from analyses requiring complete vectors. This scheme minimizes information loss while ensuring transparency of the data processing procedure.

LTAI Indicator Construction

The key measure in the study is the Logistics Technology Adoption Index (LTAI). It was defined as the sum of seven technologies normalized to the 0–1 range, with the weights of individual components determined on the basis of factor loadings obtained in the principal component analysis (PCA). The criterion for the one-dimensionality of the construct was a single component with an eigenvalue greater than one, explaining at least half of the variance. The technologies examined included: sensor-based load monitoring, extended telematics systems, big data / AI analytics, sensor networks, electronic waybills, digital freight exchanges, and warehouse automation with WMS systems. The LTAI (Equation 1) for the i -th company is therefore the arithmetic mean of the binary values corresponding to the seven technologies above.

porządkowe. Braki danych nieprzekraczające 5% imputowano modalnie (dla zmiennych binarnych) lub medianą (dla zmiennych porządkowych). Większe ubytki skutkowały wyłączeniem obserwacji z analiz wymagających pełnych wektorów. Taki schemat minimalizuje straty informacji, a jednocześnie gwarantuje przejrzystość procedury obróbki danych.

Konstrukcja wskaźnika IATL

Kluczową miarą w badaniu jest Indeks Adopcji Technologii Logistycznych (IATL). Został on zdefiniowany jako znormalizowana do przedziału 0–1 suma wystąpień siedmiu technologii, przy czym wagi poszczególnych składowych wyznaczono na podstawie ładunków czynnikowych uzyskanych w analizie głównych składowych (PCA). Kryterium jednowymiarowości konstruktów stanowiła pojedyncza składowa o wartości własnej powyżej jedności, wyjaśniająca co najmniej połowę wariancji. Badane technologie obejmowały: sensorowe monitorowanie ładunku, rozszerzone systemy telematyczne, analitykę *big-data* / AI, sieci czujników, elektroniczny list przewozowy, cyfrowe giełdy ładunków, automatykę magazynową z systemami WMS. Wskaźnik IATL (równanie 1) dla i -tej firmy jest więc średnią arytmetyczną wartości binarnych, odpowiadających siedmiu powyższym technologiom.

$$IATL_i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k T_{ij}, k = 7 \quad (1)$$

$IATL_i$ – value of the Logistics Technology Adoption Index for the i -th company,
 k – number of technologies included in the study,
 T_{ij} – a binary variable (0 or 1) indicating the implementation of the j -th technology in the i -th company.

$IATL_i$ – wartość Indeksu Adopcji Technologii Logistycznych dla i -tej firmy,
 k – liczba technologii uwzględnionych w badaniu,
 T_{ij} – zmienna binarna (0 lub 1) informująca o wdrożeniu j -tej technologii w i -tej firmie.

The internal consistency of the LTAI was assessed using Cronbach's α coefficient, calculated according to the following formula:

Spójność wewnętrzną IATL oceniono współczynnikiem α Cronbacha, obliczanym według wzoru:

$$\alpha = \frac{k}{k-1} \left(1 - \frac{\sum_{j=1}^k s_{T_j}^2}{s_{\sum jT_j}^2} \right) \quad (2)$$

α – Cronbach's reliability coefficient,
 k – number of technology variables in the analysis,
 $s_{T_j}^2$ – variance of the binary variable describing the j -th technology,
 $s_{\sum jT_j}^2$ – variance of the sum of variables in the sample.

α – współczynnik rzetelności α Cronbacha,
 k – liczba zmiennych technologii w analizie,
 $s_{T_j}^2$ – wariancja zmiennej binarnej opisującej j -tą technologię,
 $s_{\sum jT_j}^2$ – wariancja sumy zmiennych w próbie.

Statistical Methods

Descriptive statistics were performed for all variables. In order to locate the source of differences, the share of companies using each technology was examined. For Tj technology, a 2×2 contingency table (country $\times$ adoption) was compiled and the χ^2 independence test was applied:

$$\chi^2 = \sum \frac{(O_{RC} - E_{RC})^2}{E_{RC}} \quad (3)$$

χ^2 – value of the χ^2 independence test statistic,
 O_{RC} – real number observed in the table cell,
 E_{RC} – expected number in this cell assuming independence.

In order to compare the level of logistics technologies adoption between companies in Poland and Lithuania, the Mann–Whitney test was performed. This is a non-parametric equivalent of the Student's t -test for independent samples. Prior to the application of the LTAI distribution, the normality of this distribution in both samples was assessed using the Shapiro–Wilk test. This analysis revealed significant deviations from normality ($p < .05$). Consequently, the Mann–Whitney test was selected, which is robust to non-normal data and is suited for the comparison of two independent groups. The calculation was conducted in accordance with the prevailing standard formula.

$$U = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1+1)}{2} - R_1 \quad (4)$$

n_1, n_2 – group sizes,
 R_1 – sum of ranks in the first group.

In order to compare the assessments of cost and environmental motivations related to the implementation of logistics technologies, the Wilcoxon signed-rank test for paired samples was performed. This is a non-parametric test that allows us to assess whether the differences in the assessments of two related categories are statistically significant, regardless of the normality of the distributions. The analyses were performed at a significance level of $p < .05$ and the following formula was used:

$$W = \sum_{i=1}^n R_i \quad (5)$$

W – sum of positive ranks,
 R_i – ranks of absolute differences between pairs of observations.

Zastosowane procedury statystyczne

Statystykę opisową przeprowadzono dla wszystkich zmiennych. Aby zlokalizować źródło różnic, zbadać udział firm stosujących każdą technologię. Dla technologii Tj zestawiono tabelę kontyngencji 2×2 (kraj $\times$ adopcja) i zastosowano test χ^2 niezależności:

χ^2 – wartość statystyki testu χ^2 niezależności,
 O_{RC} – liczba rzeczywista obserwowana w komórce tabeli,
 E_{RC} – liczba oczekiwana w tej komórce przy założeniu niezależności.

Aby porównać poziom adopcji technologii logistycznych między przedsiębiorstwami w Polsce i na Litwie, przeprowadzono test Manna–Whitneya, który jest nieparametrycznym odpowiednikiem testu t Studenta dla prób niezależnych. Przed jego zastosowaniem sprawdzono normalność rozkładów wskaźnika IATL w obu próbach za pomocą testu Shapiro–Wilka, który wykazał istotne odchylenia od normalności ($p < 0,05$). W związku z tym zdecydowano się na wykorzystanie testu Manna–Whitneya, który jest odporny na brak normalności rozkładów danych i nadaje się do porównywania dwóch niezależnych grup. Obliczony został według standardowego wzoru:

n_1, n_2 – liczebności grup,
 R_1 – suma rang w pierwszej grupie.

W celu porównania ocen motywacji kosztowych oraz środowiskowych związanych z wdrażaniem technologii logistycznych, przeprowadzono test rang Wilcoxona dla prób powiązanych. Jest to nieparametryczny test, który pozwala ocenić, czy różnice w ocenach dwóch powiązanych kategorii są istotne statystycznie, niezależnie od normalności rozkładów. Analizy wykonano przy poziomie istotności $p < 0,05$ i zastosowano poniższą formułę.

W – suma rang dodatnich,
 R_i – rangi różnic bezwzględnych między parami obserwacji.

To assess the relationship between the perception of barriers and the level of adoption of logistics technologies, Spearman's rank correlation coefficients were calculated for both countries.

Aby ocenić związek między percepcją barier a poziomem adopcji technologii logistycznych, obliczono współczynniki korelacji rang Spearmana dla obu krajów:

$$p = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (6)$$

p – Spearman's rank correlation coefficient,
 d_i – rank difference for a pair of observations,
 n – number of pairs.

p – współczynnik korelacji rang Spearmana,
 d_i – różnica rang dla pary obserwacji,
 n – liczba par.

Furthermore, in order to identify the determinants of adoption, logistic regression modelling was performed for the dependent variable: high adoption level ($LTAI \geq 0.5$).

Ponadto w celu identyfikacji determinant adopcji przeprowadzono modelowanie regresji logistycznej dla zmiennej zależnej: wysoki poziom adopcji ($IATL \geq 0,5$).

$$\log\left(\frac{p}{1-p}\right) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad (7)$$

The average rating of barriers and the status of a large enterprise were adopted as predictors. The analyses were performed at a significance level of $p < .05$.

Jako predyktory przyjęto średnią ocenę barier oraz status dużego przedsiębiorstwa. Analizy wykonano przy poziomie istotności $p < 0,05$.

In order to examine the effect of scale (differences between small/medium-sized and large companies), the Mann–Whitney test was used for two independent groups: SMEs (companies below the median number of employees) and large companies (companies above the median). The analyses were performed separately for Poland and Lithuania, at a significance level of $p < .05$.

W celu zbadania wpływu efektu skali (różnice między małymi/średnimi a dużymi firmami) zastosowano test Manna–Whitneya dla dwóch niezależnych grup: MŚP (firmy poniżej mediany liczby zatrudnionych) oraz duże (firmy powyżej mediany). Analizy przeprowadzono oddzielnie dla Polski i Litwy, przy poziomie istotności $p < 0,05$.

Although the project is cross-sectional in nature and based on respondents' declarations—which carries the risk of self-perception errors—its design is fully replicable. The implemented analytical code can be used for research in other countries in the region. In the future, this tool will allow for the expansion of analyses to include a panel approach, allowing for tracking the trajectory of digitalization and the assessment of the effectiveness of public support instruments.

Choć projekt ma charakter przekrojowy i opiera się na deklaracjach respondentów – co niesie ryzyko błędów autopercepcji – jego konstrukcja jest w pełni replikowalna. Zaimplementowany kod analityczny może zostać wykorzystany do badań w innych krajach regionu. W przyszłości narzędzie to pozwoli rozszerzyć analizy o ujęcie panelowe, umożliwiające śledzenie trajektorii cyfryzacji oraz ocenę skuteczności publicznych instrumentów wsparcia.

Results

Logistics Technology Adoption Level (LTAI)

The analysis of the calculated LTAI showed that the index values in the total sample and in individual countries differ significantly. The range of LTAI values for the entire sample was 0.00–0.86, with the lower quartile (Q1) at 0.00 and the upper quartile (Q3) was 0.67, indicating a clear right-sided asymmetry in the distribution. In further analyses, the LTAI level of ≥ 0.50 was considered the threshold for high adoption (implementation of at least four of

Wyniki

Poziom adopcji technologii logistycznych (IATL)

Analiza obliczonego wskaźnika IATL wykazała, że jego wartości w próbie ogółem oraz w poszczególnych krajach różnią się istotnie. Zakres wartości IATL dla całej próby wynosił 0,00–0,86, przy czym kwartył dolny (Q1) wyniósł 0,00, a kwartył górny (Q3) 0,67, co wskazuje na wyraźną prawostronną asymetrię rozkładu. W dalszych analizach poziom $IATL \geq 0,50$ uznano za próg wysokiej adopcji (implementacja co najmniej czterech z siedmiu badanych

the seven technologies studied), allowing digitally advanced enterprises to be identified.

The average LTAI value for enterprises in Poland was 0.431, while for Lithuania the average was significantly lower at 0.044, as shown in Table 2.

technologii), pozwalający wyodrębnić przedsiębiorstwa zaawansowane cyfrowo.

Średnia wartość IATL dla przedsiębiorstw w Polsce wyniosła 0,431, podczas gdy dla Litwy średnia ta była istotnie niższa i wynosiła 0,044, co prezentuje tabela 2.

Table 2. Descriptive statistics of the LTAI indicator for Poland and Lithuania

Tabela 2. Statystyki opisowe wskaźnika IATL dla Polski i Litwy

Parameter / Parametr	Poland / Polska	Lithuania / Litwa
Average LTAI / Średnia IATL	.431	.044
Median / Mediana	.500	.000
Standard deviation / Odchylenie standardowe	.296	.067

Source: authors' own study.

Źródło: opracowanie własne.

The internal consistency of the LTAI was confirmed using Cronbach's α coefficient, which was 0.825 for the entire data set. This result exceeds the threshold of 0.7, indicating a high level of reliability in exploratory research. In the analysis divided by country, the value of the α coefficient for the Polish sample was 0.83, while for the Lithuanian sample it was 0.78. All values indicate high construct consistency.

In addition, a principal component analysis (PCA) was performed to assess the unidimensionality of the construct. The first component explained 57.3% of the total variance of the variables, which meets the eigenvalue criterion > 1 and confirms that the LTAI is unidimensional.

Structure of Individual Technology Usage

The analysis of differences in the use of specific technologies between Poland and Lithuania was conducted using χ^2 independence tests. The results are presented in Table 3.

Spójność wewnętrzną wskaźnika IATL potwierdzono za pomocą współczynnika α Cronbacha, którego wartość dla całego zestawu danych wyniosła 0,825. Wynik ten przekracza próg 0,7, co wskazuje na wysoki poziom rzetelności w badaniach eksploracyjnych. W analizie rozdzielonej na kraje, wartość współczynnika α dla próby polskiej wyniosła 0,83, natomiast dla próby litewskiej 0,78. Wszystkie wartości świadczą o wysokiej spójności konstruktów.

Dodatkowo przeprowadzono analizę głównych składowych (PCA) w celu oceny jednowymiarowości konstruktów. Pierwsza składowa wyjaśniała 57,3% całkowitej wariancji zmiennych, co spełnia kryterium wartości własnej > 1 i potwierdza, że wskaźnik IATL ma charakter jednowymiarowy.

Struktura wykorzystania poszczególnych technologii

Analiza różnic w wykorzystaniu poszczególnych technologii między Polską a Litwą została przeprowadzona za pomocą testów χ^2 niezależności. Wyniki przedstawiono w tabeli 3.

Table 3. Results of χ^2 significance tests for comparing the use of logistics technologies in Poland and Lithuania

Tabela 3. Wyniki testów istotności χ^2 dla porównania wykorzystania technologii logistycznych w Polsce i na Litwie

Technology	χ^2	p value
Smart cargo tracking / Inteligentne śledzenie ładunku	10.50	.0012
Intelligent vehicle technology / Inteligentne technologie pojazdowe	38.47	$< .0001$
Data analytics & predictive / Analityka danych i predykcja	29.10	$< .0001$
IoT supply-chain tracking / Śledzenie łańcucha dostaw oparte na IoT	14.25	.0002
e-CMR / Elektroniczny list przewozowy	5.93	.015

Source: authors' own study.

Źródło: opracowanie własne.

The table presents the outcomes of χ^2 tests for five technologies that exhibited substantial differences in adoption rates across different countries. The remaining technologies were omitted, since they involved a variety of less significant solutions, and their results were aggregated and statistically insignificant. This approach serves to enhance the clarity of the presentation of results, thereby focusing on the key innovations that exert the most significant influence on the digitization of logistics services.

The findings of the study indicate substantial disparities in the implementation of the analyzed technologies. The greatest ones were observed in the domain of capital-intensive technologies, including intelligent vehicle systems and predictive analytics. It is evident that these technologies are being implemented by a significant proportion of Polish companies, while in Lithuania their use is practically non-existent. It is evident that other technologies have also demonstrated significant disparities, thereby confirming Poland's distinct advantage in the implementation of smart logistics solutions.

Motivations, Barriers, and Effect of Scale

The results of the Mann–Whitney test confirmed significant differences in the level of adoption of logistics technologies between Poland and Lithuania. The U statistic value was 2295.5, and the accompanying p value was less than .001, which indicates the significance of the differences. This result points to a significantly higher level of adoption of logistics technologies in Polish enterprises and falsifies the null hypothesis of no differences between countries.

The results of the Wilcoxon rank test showed that in both countries, the assessments of cost motivations were significantly higher than the assessments of environmental motivations. In Poland, the Wilcoxon statistic was $W = 614.0$ ($p = .002$), while in Lithuania it accounted for $W = 441.5$ ($p = .011$). The values obtained indicate that these differences are statistically significant ($p < 0.05$), which confirms the dominant role of cost motivations in the digitization of food logistics.

The results of the analysis showed a strong negative relationship between the perception of barriers and the level of adoption in both countries. Spearman's correlation coefficients were -0.46 in Poland ($p = .004$) and -0.38 in Lithuania ($p = .013$), confirming the significance of the relationship ($p < .05$).

Table 4 presents the odds ratios (OR), 95% confidence intervals (CI), and p values for the predictors 'average barrier rating' and 'large enterprise status' in logistic regression models estimated separately on Polish and Lithuanian samples.

W tabeli przedstawiono wyniki testów χ^2 dla pięciu technologii, które wykazały istotne różnice w poziomie adopcji między krajami. Pominęto pozostałe technologie, gdyż obejmowały one różnorodne, mniej istotne rozwiązania, a jej wyniki były zagregowane i nieistotne statystycznie. Dzięki temu prezentacja wyników jest bardziej przejrzysta i koncentruje się na kluczowych innowacjach, które w największym stopniu wpływają na cyfryzację usług logistycznych.

Wyniki testów wskazują na istotne różnice w adopcji analizowanych technologii. Największe różnice odnotowano w obszarze technologii najbardziej kapitałochłonnych, takich jak inteligentne systemy pojazdowe oraz analityka predykcyjna. Technologie te są wdrażane przez znaczną część polskich firm, podczas gdy w Litwie ich zastosowanie praktycznie nie występuje. Pozostałe technologie również wykazały istotne różnice, potwierdzając przewagę Polski w implementacji rozwiązań *smart-logistics*.

Motywacje, bariery i efekt skali

Wyniki testu Manna–Whitneya potwierdziły istotne różnice w poziomie adopcji technologii logistycznych między Polską a Litwą. Wartość statystyki U wyniosła 2295,5, a towarzyszące jej prawdopodobieństwo p było mniejsze niż 0,001, co świadczy o istotności różnic. Wynik ten wskazuje na istotnie wyższy poziom adopcji technologii logistycznych w polskich przedsiębiorstwach i falsyfikuje hipotezę zerową o braku różnic między krajami.

Wyniki testu rang Wilcoxona wykazały, że w obu krajach oceny motywacji kosztowych były istotnie wyższe niż oceny motywacji środowiskowych. W Polsce wartość statystyki Wilcoxona wyniosła $W = 614,0$ ($p = 0,002$), natomiast na Litwie $W = 441,5$ ($p = 0,011$). Otrzymane wartości wskazują, że różnice te są istotne statystycznie ($p < 0,05$), co potwierdza dominującą rolę motywacji kosztowych w procesach cyfryzacji logistyki żywności.

Wyniki analizy wykazały silny, negatywny związek percepcji barier z poziomem adopcji w obu krajach. Współczynniki korelacji Spearmana wyniosły: $-0,46$ w Polsce ($p = 0,004$) oraz $-0,38$ na Litwie ($p = 0,013$), co potwierdza istotność związku ($p < 0,05$).

Tabela 4 przedstawia ilorazy szans (OR), 95% przedziały ufności (CI) oraz wartości p dla predyktorów „średnia ocena barier” i „status dużego przedsiębiorstwa” w modelach regresji logistycznej oszacowanych osobno na próbach polskiej i litewskiej.

Table 4. Comparison of logistic regression results for the Polish and Lithuanian samples
Tabela 4. Porównanie wyników regresji logistycznej dla próby polskiej i litewskiej

Variable / Zmienna	OR (PL)	95% CI (PL)	p (PL)	OR (LT)	95% CI (LT)	p (LT)
Average assessment of barriers / Średnia ocena barier	0.60	0.41–0.89	< 0.01	0.576	0.0767–4.322	0.591
Large enterprise status / Status dużego przedsiębiorstwa	2.15	1.00–4.62	< 0.05	1.904	0.4698–7.716	0.367

Source: authors' own study.

Źródło: opracowanie własne.

In the Polish sample, OR = 0.60 (95% CI [0.41–0.89]; $p < .01$) means that each 1-point increase in the mean inverse score of barriers reduces the chance of 'high adoption' by approximately 40%. The confidence interval is entirely below 1 (upper limit 0.89), confirming a significant ($\alpha = 0.05$) negative relationship between the perception of barriers and the likelihood of implementing at least half of the possible smart technologies.

In the Lithuanian sample, OR = 0.576 (95% CI [0.0767–4.322]; $p = .591$) also indicates a decrease in the likelihood of adoption with an increase in perceived barriers, but the effect is not significant. The very wide confidence interval (more than a fifty-fold difference between the lower and upper limits) indicates considerable uncertainty in the estimation, mainly due to the small sample size ($n = 44$) and high variability in the responses of Lithuanian companies.

In Poland, OR = 2.15 (95% CI [1.00–4.62]; $p < .05$) means that large enterprises are more than twice as likely to have a 'high adoption' of smart technologies than smaller companies. The lower CI limit of exactly 1.00 suggests that the effect is marginally significant ($p < .05$) but still statistically confirmed. The upper limit of 4.62 indicates a possible fourfold increase in chances under favorable conditions.

In Lithuania, OR = 1.904 (95% CI [0.4698–7.716]; $p = .367$) once again points in a similar direction – large companies seem to have a higher chance of adoption – but the lack of significance and the wide 95% CI (covering 1 and reaching 7.7) mean that the effect is not statistically confirmed in this sample.

The following section presents a comparison of the mean LTAI values between SMEs and large companies, along with the results of the Mann–Whitney (U) test for the Polish and Lithuanian samples. The effect of scale is illustrated in Table 5, which compares the average LTAI values for SMEs and large companies in both countries, together with the results of the Mann–Whitney test. This comparison enables us to ascertain whether the size of the company significantly differentiates the level of digitization and whether this relationship occurs in parallel in Poland and Lithuania.

W próbie polskiej OR = 0,60 (95% CI [0,41–0,89]; $p < 0,01$) oznacza, że każdy wzrost średniej odwrotnej oceny barier o 1 punkt zmniejsza szansę na „wysoką adopcję” o około 40%. Przedział ufności w całości leży poniżej 1 (najwyższa granica 0,89), co potwierdza istotny ($\alpha = 0,05$) negatywny związek postrzegania barier z prawdopodobieństwem wdrożenia co najmniej połowy możliwych inteligentnych technologii.

W próbie litewskiej OR = 0,576 (95% CI [0,0767–4,322]; $p = 0,591$) także wskazuje kierunkowo na spadek szans adopcji wraz ze wzrostem postrzeganych barier, lecz efekt nie jest istotny. Bardzo szeroki przedział ufności (ponad pięćdziesięciokrotna różnica między dolną a górną granicą) świadczy o znacznej niepewności estymacji – głównie wskutek małej liczebności próby ($n = 44$) i dużej zmienności w odpowiedziach litewskich firm.

W Polsce OR = 2,15 (95% CI [1,00–4,62]; $p < ,05$) oznacza, że duże przedsiębiorstwa mają ponad dwukrotnie większe szanse na „wysoką adopcję” inteligentnych technologii niż firmy mniejsze. Dolna granica CI dokładnie przy 1,00 sugeruje, że efekt jest istotny granicznie ($p < 0,05$), lecz wciąż statystycznie potwierdzony. Górna granica 4,62 wskazuje na możliwe nawet czterokrotne zwiększenie szans przy sprzyjających warunkach.

W Litwie OR = 1,904 (95% CI [0,4698–7,716]; $p = 0,367$) po raz kolejny wskazuje analogiczny kierunek – duże firmy wydają się mieć wyższe szanse na adopcję – jednak brak istotności i szeroki 95% CI (obejmujący 1 i sięgający do 7,7) powodują, że efekt nie jest potwierdzony statystycznie w tej próbie.

Poniżej przedstawiono porównanie średnich wartości wskaźnika IATL pomiędzy firmami MŚP a dużymi, wraz z wynikami testu Manna–Whitneya (U) dla próby polskiej i litewskiej. Efekt skali zilustrowano w tabeli 5, w której zestawiono średnie wartości IATL dla firm z grup SME i Large w obu krajach wraz z wynikami testu Manna–Whitneya. Zestawienie to pozwala sprawdzić, czy wielkość przedsiębiorstwa istotnie różnicuje poziom cyfryzacji i czy zależność ta występuje równolegle w Polsce i na Litwie.

Table 5. Comparison of technology adoption levels (LTAI) between SMEs and large enterprises
Tabela 5. Porównanie poziomu adopcji technologii (IATL) między małymi i średnimi a dużymi przedsiębiorstwami

Country / Kraj	Category / Kategoria	LTAI mean / Średnia IATL	U	p value
Poland / Polska	Small and medium-sized / Małe i średnie	0.271	306.0	.007
	Large / Duże	0.591		
Lithuania / Litwa	Small and medium-sized / Małe i średnie	0.041	259.5	.118
	Large / Duże	0.048		

Source: authors' own study.

Źródło: opracowanie własne.

The analysis revealed a significant scale effect in the Polish sample: large companies achieved an average LTAI score of 0.591, while SMEs scored only 0.271. The Mann–Whitney test result ($U = 306.0$; $p = 0.007$) confirms the significance of these differences ($p < .05$). In the Lithuanian sample, the differences between large companies and SMEs were not statistically significant ($p = .118$). These results suggest that the scale effect only becomes clearly apparent in a more mature digitalization market, which was only observed in Poland in the study.

Discussion

The analyses carried out clearly confirmed that the level of digitization in food logistics in Poland is significantly higher than in Lithuania, as illustrated by the average LTAI value of 0.431 compared to 0.044. This result corresponds with the observations of Sałek and Wiśniewska-Sałek (2024), who point to faster diffusion of digital platforms in the Polish transportation, shipping, and logistics sector, as well as the publication by Fatorachian et al. (2025), emphasizing the role of better-developed digital infrastructure and public support in countries with higher investment absorption. The structure of adoption of individual technologies revealed particularly large disparities in the use of intelligent vehicle systems and predictive analytics tools – capital-intensive solutions requiring high analytical skills. A similar concentration of the most expensive implementations in environments with stable financing was noted by Khatib and Barco (2021) in their research on European cold chains.

The dominant role of cost motivations, which was observed in both countries, is confirmed by the meta-analysis by Mahroof et al. (2022), who indicate that economic arguments remain the main investment incentive until a critical mass of implementations is reached, after which environmental goals come to the fore. At the same time, the strong negative correlation between the perception of financial

Analiza wykazała istotny efekt skali w próbie polskiej: firmy duże osiągnęły średnią wartość wskaźnika IATL równą 0,591, podczas gdy firmy z grupy MŚP – jedynie 0,271. Wynik testu Manna–Whitneya ($U = 306,0$; $p = 0,007$) potwierdza istotność tych różnic ($p < 0,05$). W próbie litewskiej różnice między firmami dużymi a SME nie były istotne statystycznie ($p = 0,118$). Wyniki te sugerują, że efekt skali materializuje się wyraźnie dopiero na bardziej dojrzałym rynku cyfryzacji, co w badaniu zaobserwowano jedynie w Polsce.

Dyskusja

Przeprowadzone analizy jednoznacznie potwierdziły, że poziom cyfryzacji w logistyce żywności w Polsce jest znacząco wyższy niż na Litwie, co ilustruje średnia wartość IATL na poziomie 0,431 wobec 0,044. Wynik ten koresponduje z obserwacjami Sałek i Wiśniewska-Sałek (2024), które wskazują na szybszą dyfuzję platform cyfrowych w polskim sektorze TSL, a także z pracą Fatorachiana i in. (2025), podkreślającymi rolę lepiej rozwiniętej infrastruktury cyfrowej i wsparcia publicznego w państwach o wyższej chłonności inwestycyjnej. Struktura adopcji poszczególnych technologii ujawniła szczególnie duże dysproporcje w wykorzystaniu inteligentnych systemów pojazdowych oraz narzędzi analityki predykcyjnej – rozwiązań kapitałochłonnych i wymagających wysokich kompetencji analitycznych. Podobną koncentrację najdroższych wdrożeń w środowiskach o stabilnym finansowaniu odnotowali Khatib i Barco (2021) w badaniach europejskich łańcuchów chłodniczych.

Dominująca rola motywacji kosztowych, którą odnotowano w obu krajach, znajduje potwierdzenie w metaanalizie Mahroofa i in. (2022), w której autorzy wskazują, że argumenty ekonomiczne pozostają głównym bodźcem inwestycyjnym do czasu uzyskania krytycznej masy wdrożeń, po której na pierwszy plan wysuwają się cele środowiskowe. Jednocześnie silny, negatywny związek postrzegania

and competence barriers and the level of adoption ($p = -0.46$ for Poland and $p = -0.38$ for Lithuania) confirms the conclusions of Sumets (2023) and Lu et al. (2025) on the key role of capital and human resource availability in the digital transformation process. The scale effect, which is only significant in the Polish population, confirms the conclusions of Burinskienė and Daškevič (2024), according to which in economies with a substantial share of large logistics companies digitalization spreads more quickly across the entire sector, while in smaller markets, such as Lithuania, there is a lack of critical financial and organizational support for this mechanism to work properly.

The results enrich the debate on the diffusion of innovation in Central and Eastern Europe. They show that even between neighboring countries with similar institutional conditions there can be significant disparities in the pace and scope of digital transformation due to the accumulation of financial, competence, and scale barriers. At the same time, they confirm the theoretical concepts of Rogers (2003), according to which the 'early majority' phase is longer in smaller economies, and the trigger for its shortening becomes only stronger institutional support.

Summary and Conclusions

The study demonstrated that Polish logistics companies operating within the food sector attained a considerably higher degree of digitization than their Lithuanian counterparts. This finding was confirmed by both the LTAI (0.431 vs. 0.044) and the outcomes of χ^2 tests for key technologies. The high reliability of the LTAI ($\alpha = 0.825$) demonstrates that the index can serve as a reliable tool for monitoring the progress of digital transformation in agri-food logistics.

Statistical analyses confirmed all three research hypotheses. H1 was positively verified, namely the differences between countries are significant ($p < .001$). H2 was confirmed as cost motivations clearly dominate environmental motivations in both populations ($p < .05$). H3 was fully confirmed in Poland (OR_barrier = 0.60; OR_large = 2.15), while in the Lithuanian sample the effect of barriers and scale did not reach significance, which should be related to the lower number of high adoption cases.

The results indicate the need to focus public support programs on subsidizing implementation costs and developing digital skills in SMEs. Instruments combining investment grants with environmental requirements are particularly justified, as they can strengthen weaker environmental motivations and accelerate the implementation of the Farm to Fork strategy objectives.

barier finansowo-kompetencyjnych z poziomem adopcji ($p = -0,46$ dla Polski i $p = -0,38$ dla Litwy) potwierdza wnioski Sumets (2023) oraz Lu i in. (2025) o kluczowej roli dostępności kapitału i zasobów ludzkich w procesie transformacji cyfrowej. Efekt skali, istotny wyłącznie w populacji polskiej, potwierdza natomiast wnioski Burinskienė i Daškeviča (2024) – w gospodarkach, gdzie udział dużych przedsiębiorstw logistycznych jest wysoki, cyfryzacja rozprzestrzenia się szybciej w całym sektorze, podczas gdy w mniejszych rynkach – takich jak litewski – brakuje krytycznego zaplecza finansowego i organizacyjnego, aby ten mechanizm w pełni zadziałał.

Otrzymane rezultaty wzbogacają debatę na temat dyfuzji innowacji w Europie Środkowo-Wschodniej. Pokazują, że nawet między sąsiednimi państwami o zbliżonych warunkach instytucjonalnych mogą funkcjonować znaczące dysproporcje w tempie i zakresie transformacji cyfrowej, wynikające z kumulacji barier finansowych, kompetencyjnych i skali działania. Jednocześnie potwierdzają teoretyczne koncepcje Rogersa (2003), według których faza „wczesnej większości” jest dłuższa w mniejszych gospodarkach, a czynnikiem przyczyniającym się do jej skrócenia staje się dopiero silniejsze wsparcie instytucjonalne.

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badanie wykazało, że polskie przedsiębiorstwa logistyczne w sektorze żywności osiągają istotnie wyższy poziom cyfryzacji niż litewskie, co potwierdził zarówno wskaźnik IATL (0,431 vs 0,044), jak i wyniki testów χ^2 dla kluczowych technologii. Wysoka rzetelność IATL ($\alpha = 0,825$) dowodzi, że indeks może być wiarygodnym narzędziem monitorowania postępu transformacji cyfrowej w logistyce rolno-spożywczej.

Analizy statystyczne potwierdziły wszystkie trzy hipotezy badawcze. H1 zweryfikowano dodatnio – różnice między krajami są znaczące ($p < 0,001$). H2 potwierdzono, gdyż motywacje kosztowe wyraźnie dominują nad środowiskowymi w obu populacjach ($p < 0,05$). H3 uzyskała pełne potwierdzenie w Polsce (OR_barrier = 0,60; OR_large = 2,15), natomiast w próbie litewskiej efekt barier i skali nie osiągnął istotności, co należy wiązać z mniejszą liczbą przypadków wysokiej adopcji.

Wyniki wskazują na konieczność ukierunkowania publicznych programów wsparcia na subsydowanie kosztów wdrożeń oraz rozwój kompetencji cyfrowych w MŚP. Szczególnie uzasadnione są instrumenty łączące dotacje inwestycyjne z wymogami środowiskowymi, co może wzmocnić słabsze motywacje ekologiczne i przyspieszyć realizację celów strategii „Od pola do stołu”.

The limitations of the study are twofold. Firstly, the cross-sectional nature of the sample means that the findings cannot be generalized. Secondly, the number of Lithuanian companies surveyed was small, thus weakening the power of some tests. In future research, a panel approach could be employed, with the analysis being extended to other Central and Eastern European countries. Direct measures of environmental effects, such as CO₂ emissions, could also be included in adoption models.

Ograniczeniem jest przekrojowy charakter próby oraz niewielka liczebność badanych firm litewskich, co osłabia moc niektórych testów. W przyszłości warto zastosować podejście panelowe, rozszerzyć analizę na kolejne kraje Europy Środkowo-Wschodniej oraz włączyć bezpośrednie mierniki efektów środowiskowych (np. emisje CO₂) w modelach adopcji.

References / Bibliografija

- Abideen, A.Z., Sundram, V.P.K., Pyeman, J., Othman, A.K., & Sorooshian, S. (2021). Food Supply Chain Transformation Through Technology and Future Research Directions—A Systematic Review. *Logistics*, 5(4), 1–24. <https://doi.org/10.3390/logistics5040083>
- Ada, E., Sezer, M.D., Kazancoglu, 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), 374–402. <https://doi.org/10.33889/IJMEMS.2023.8.3.022>
- Akinbamini, E., Vargas, A., Traill, A., Boza, A., & Cuenca, L. (2025). Critical Analysis of Technologies Enhancing Supply Chain Collaboration in the Food Industry: A Nigerian Survey. *Logistics*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/logistics9010008>
- Al-Husain, R.A., Elshaer, A.M., Alzuman, A., Albadry, O.M., Sheikhsouk, S., Al-Monawer, N.S., & Alsetoohy, O. (2024). Toward Sustainable Performance in the Hotel Food Supply Chain: Influences of Quality Management Practices and Digital Integration. *Administrative Sciences*, 14(12), 314. <https://doi.org/10.3390/admsci14120314>
- Blantucas, J. (2023). A Technological Blip?: Explaining the Proliferation of Digital Technologies in the Philippine Food Supply Chain Using the Multi-Level Perspective (MLP). *Procedia Computer Science*, 217(1), 1678–1687. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13107.03362>
- Burinskienė, A., & Daškevič, D. (2024). Application of Digital Technologies in the EU Logistics Sector. In: V. Davidavičienė, V. Skvarciany, D. Jurevičienė, K. Matuzevičiūtė-Balčiūnienė, I. Lapinskaitė, I. Meidutė-Kavaliauskienė, A. Mačiulytė-Šniukienė, R. Korsakienė, I. Skačkauskienė, R. Tamošiūnienė, & R. Bublienė (Eds.), *New Trends in Contemporary Economics, Business and Management. Proceedings of the 14th International Scientific Conference “Business and Management 2024”* (pp. 193–201). Vilnius Gediminas Technical University. <https://doi.org/10.3846/bm.2024.1158>
- Chen, Z. (2024). Research on Innovation of Food Logistics Supply Chain Management. *Advances in Economics, Management and Political Sciences*, 120, 202–206. <https://doi.org/10.54254/2754-1169/120/20242566>
- Croom, S., Vidal, N., Spetic, W., Marshall, D., & McCarthy, L. (2018). Impact of Social Sustainability Orientation and Supply Chain Practices on Operational Performance. *International Journal of Operations & Production Management*, 38, 2344–2366. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-03-2017-0180>
- Dey, S.K., Kundu, K., & Das, P. (2024). Digital Technology Based Game – Theoretic Pricing Strategies in a Three-tier Perishable Food Supply Chain. *Annals of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10479-024-06021-5>
- Ekhsonov, J. (2024). Digital Logistics: Possibilities of Smart Contracts in the Organization of Intellectual Transport Systems. *Raqamli Iqtisodiyot*, 5, 219–228. <https://www.researchgate.net/publication/380529347>
- European Commission. (2024). *The Digital Economy and Society Index (DESI) 2024 – Country Profiles* DG CNECT. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/desi>
- Falayi, A., Ayeni, A., Adebayo, B., & Abdullahi, A. (2024). Towards Digitalization of Fruits and Vegetables Supply Chain: Digital Twins and Internet of Things Approach. *Global Journal of Researches in Engineering: G Industrial Engineering*, 24(1), 10–20. https://globaljournals.org/GJRE_Volume24/2-Towards-Digitalization-of-Fruits.pdf
- Fatorachian, H., Kazemi, H., & Pawar, K. (2025). Digital Technologies in Food Supply Chain Waste Management: A Case Study on Sustainable Practices in Smart Cities. *Sustainability*, 17(5), 1996. <https://doi.org/10.3390/su17051996>
- Hasan, I., & Habib, M.M. (2024). Integrating Digital Financial Solutions with Blockchain to Enhance Transparency in Bangladesh's Agri-Food Supply Chain. *Revista de Gestão*, 18(10), e08647. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n10-195>
- Khatib, E.J., & Barco, R. (2021). Optimization of 5G Networks for Smart Logistics. *Energies*, 14(6), 1758. <https://doi.org/10.3390/en14061758>
- Kwon, K., & So, J. (2023). Future Smart Logistics Technology Based on Patent Analysis Using Temporal Network. *Sustainability*, 15(10), 8159. <https://doi.org/10.3390/su15108159>
- Lavorato, D., & Piedepalumbo, P. (2023). How Smart Technologies Affect the Decision-Making and Control System of Food and Beverage Companies—A Case Study. *Sustainability*, 15(5), 4292. <https://doi.org/10.3390/su15054292>
- Liu, Y., & Zhao, J. (2024). Evaluation of the Smart Logistics Based on the SLDI Model: Evidence from China. *Systems*, 12(10), 405. <https://doi.org/10.3390/systems12100405>
- Lu, L., Ren, Y., Dong, R., Li, C., & Mao, S. (2025). Green Technology Upgrade Path for Food Supply Chain Enterprises: Insights from Grounded Theory and Fuzzy-set Qualitative Comparative Analysis (fsQCA). *Frontiers in Sustainable Food Systems* 9. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1550511>
- Magdalena, L., Hatta, M., & Solikhah, M. (2024). The Adoption of Digital Technologies in Supply Chains in the Manufacturing Area. *Jurnal Indonesia Sosial Teknologi*, 5(2), 460–471. <https://doi.org/10.59141/jist.v5i2.921>
- Mahroof, K., Omar, A., & Kucukaltan, B. (2022). Sustainable Food Supply Chains: Overcoming Key Challenges Through Digital Technologies. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 71(3), 981–1003. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-12-2020-0687>
- Mantravadi, S., & Srail, J.S. (2023). How Important are Digital Technologies for Urban Food Security? A Framework for Supply Chain Integration using IoT. *Procedia Computer Science*, 217(1), 1678–1687. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.368>

- Mondal, S., Wijewardena, K.P., Karuppuswami, S., Kriti, N., Kumar, D., & Chahal, P. (2019). Blockchain Inspired RFID-Based Information Architecture for Food Supply Chain. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(3), 5803–5813. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2907658>
- Ntule, N.D., Emmanuel, O., & Vera, F. (2024). Effect of Digitalization on Logistics Performance among Logistics Related Companies in Cameroon. *American Journal of Supply Chain Management*, 9(3), 1–16. <https://doi.org/10.47672/ajscm.2099>
- Rahman, H., Menezes, B.C., & Baldacci, R. (2024). Exploring the Role of Blockchain Technology, Warehouse Automation and Smart Routing and Cloud Computing in Logistics Performance. *Production & Manufacturing Research*, 12(1). <https://doi.org/10.1080/21693277.2024.2393614>
- Ravi, N., Seetharaman, A., & Jayaraman, V. (2023). Influence of IoT on Smart Logistics. *International Journal of Social Sciences*, 9(2), 1–13. https://www.researchgate.net/publication/375665660_INFLUENCE_OF_IOT_ON_SMART_LOGISTICS
- Reddy, S.M., & Kumar, B.R. (2024). The Future of Supply Chain: Innovations, Best Practices, and Key Trends. *Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae*, 24(2), 103–128. https://www.researchgate.net/publication/387740056_THE_FUTURE_OF_SUPPLY_CHAIN_INNOVATIONS_BEST_PRACTICES_AND_KEY_TRENDS
- Rogers, E.M. (2003). *Diffusion of Innovations*. 5th edition. Free Press.
- Saha, A., Raut, R., & Kumar, M. (2025). Digital Technology Adoption Challenges in the Agri-Food Supply Chain From the Perspective of Attaining Sustainable Development Goals. *The International Journal of Logistics Management*, 36(2), 556–588. [https://doi.org/10.1108/IJLM-09-2023-041236\(7\)](https://doi.org/10.1108/IJLM-09-2023-041236(7))
- Sałek, R., & Wiśniewska-Sałek, A. (2024). The Role of the Freight Exchange in Knowledge Management of the Logistics Company. *Proceedings of the 25th European Conference on Knowledge Management*, 25(1), 710–718. <https://doi.org/10.34190/ekm.25.1.2517>
- Sumets, O. (2023). Development of Intelligent Tools for Logistics: Practice and Prospects of Use. *AIC Economics and Management*, 2, 124–136. https://www.researchgate.net/publication/377740571_Development_of_intelligent_tools_for_logistics_practice_and_prospects_of_use
- Szegedi, Z., & Ulechla, G. (2022). Digital Transformation in Food Supply Chains in Central and Eastern Europe. *International Journal of Economics Business and Management Studies*, 9(2), 171–182. <https://doi.org/10.55284/IJEBMS.V9I2.813>
- Trevisan, C., & Formentini, M. (2024). Digital Technologies for Food Loss and Waste Prevention and Reduction in Agri-food Supply Chains: A Systematic Literature Review and Research Agenda. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 71, 12326–12345. <https://doi.org/10.1109/TEM.2023.3273110>
- UNCTAD. (2023). *Digitalization in Agrifood Supply Chains: Global Policy Review*. United Nations.
- Undre, H.B., & Jokonya, O. (2024). Factors Affecting the Adoption of Drones in the Food Supply Chain. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1497595>
- Verdouw, C.N., Sundmaeker, H., Meyer, F., Wolfert, J., & Verhoosel, J. (2013). Smart Agri-Food Logistics: Requirements for the Future Internet. In: H.-J. Kreowski, B. Scholz-Reiter, & K.-D. Thoben (Eds.), *Dynamics in Logistics. Third International Conference, LDIC 2012, Bremen, Germany, February/March, 2012 Proceedings* (pp. 247–257). Springer. <https://www.researchgate.net/publication/239846862>
- Verly, C.V., Santosa, W., & Dewayana, T.S. (2024). The Effect of Digital Technology on Operational Performance in the Food and Beverage Industry (FMCG) Mediated by Digital Competency, Supply Chain Capability, and Organizational Readiness in Jakarta, Tangerang, and Depok. *International Journal of Social Service and Research*, 4(8). <https://doi.org/10.46799/ijssr.v4i8.881>
- Wang, G., Li, S., Yi, Y., Wang, Y., & Shin, C. (2024). Digital Technology Increases the Sustainability of Cross-Border Agro-Food Supply Chains: A Review. *Agriculture*, 14(6), 900. <https://doi.org/10.3390/agriculture14060900>
- Wei, W. (2024). Effective Application of Smart Logistics Technology in Rural E-Commerce Logistics Distribution. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, 9(1), 1–19. <https://doi.org/10.2478/amns-2024-0179>
- Yousefi, D., Yousefi, J., Ghasemi, R., & Mohaghar, A. (2024). Key Success Factors to Implement IoT in the Food Supply Chain. *Journal of Information Technology Management*, 16(3), 61–91. <https://doi.org/10.22059/jitm.2024.372404.3618>

Submission date / Data nadesłania: 11.06.2025.

Final revision date / Data ostatniej recenzji: 7.07.2025.

Acceptance date / Data akceptacji: 19.11.2025.

© 2025 Pyra, M., Paužulienė, J., & Kaveckė, I. 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: Pyra, M., Paužulienė, J. i Kaveckė, I. (2025). Niniejszy artykuł został opublikowany w otwartym dostępie na licencji Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

