

Uniwersytet Morski w Gdyni
Wydział Zarządzania i Nauk o Jakości
Koło Naukowe Transportu i Logistyki TRANSLOG



TRANSPORT I LOGISTYKA WOBEC WSPÓŁCZESNYCH WYZWAŃ GOSPODARCZYCH I SPOŁECZNYCH

Gdynia 2026

REDAKTOR NAUKOWY: dr SŁAWOMIR SKIBA

RECENZENCI:

dr KAROLINA GWARDA – Uniwersytet Morski w Gdyni

dr ROBERT MAREK – Uniwersytet Morski w Gdyni

dr JOANNA MIKLIŃSKA – Uniwersytet Morski w Gdyni

dr SŁAWOMIR SKIBA – Uniwersytet Morski w Gdyni

dr inż. ADAM KAIZER – Uniwersytet Morski w Gdyni

mgr inż. ADRIANNA KARAŚ – Uniwersytet Morski w Gdyni

WYDAWCA:



UNIWERSYTET MORSKI W GDYNI

ul. Morska 81-87

81-225 Gdynia

www.umg.edu.pl

ISBN 978-83-67428-85-9

KOMITET ORGANIZACYJNY: IGOR DRENDA – KNTiL TRANSLOG

REDAKCJA I KOREKTA: EWA GIEDZIUN

PROJEKT OKŁADKI: ŁUKASZ NOWICKI

Całkowitą odpowiedzialność za stronę merytoryczną artykułów ponoszą Autorzy.

SPIS TREŚCI

WSTĘP	4
MARTYNA MIKOŁAJCZAK, ZUZANNA LEHMANN	
Algorytm kontra człowiek – kto powinien decydować o trasach i zapasach?	5
BLANKA BOLESKA, PAULINA CZAJA	
Autonomiczne drony w optymalizacji ostatniej mili – bariery, szanse, przyszłość	19
MAGDALENA SIKORA, WERONIKA NADOLNA	
Cyfrowe bliźniaki w logistyce. Jak symulacje zmniejszają ryzyko i optymalizują operacje.....	36
PAULINA CZAJA, BLANKA BOLESKA	
Wpływ geopolityki na zmiany tras kontenerowców na świecie	48
VARVARA KOZIULIA	
Logistyka humanitarna w sytuacjach kryzysowych jako element odporności łańcuchów dostaw	65
NATALIA KARALUS, AGATA HRABELSKA	
Predykcyjna mobilność logistyczna w inteligentnym mieście: model integracji danych IoT i algorytmów sztucznej inteligencji	76
KAROL OWSIANKA	
Przesiadka: <i>Mission possible</i> – znoszenie barier dla osób o ograniczonej mobilności.....	91

WSTĘP

Oddajemy w ręce czytelników kolejną publikację **Koła Naukowego Transportu i Logistyki TRANSLOG**, funkcjonującego w ramach Uniwersytetu Morskiego w Gdyni, stanowiącą zbiór artykułów przygotowanych przez studentów reprezentujących uczelnie z całej Polski. Autorzy podejmują aktualne i istotne zagadnienia związane z rozwojem transportu, logistyki oraz zarządzania łańcuchami dostaw, ukazując wyzwania i kierunki zmian zachodzące we współczesnej gospodarce.

W najnowszym opracowaniu poruszono tematy obejmujące m.in. zastosowanie sztucznej inteligencji i cyfrowych bliźniaków w logistyce, autonomiczne systemy transportowe, wpływ geopolityki na globalne łańcuchy dostaw, logistykę humanitarną, rozwiązania dla inteligentnych miast oraz dostępność transportu dla osób o ograniczonej mobilności.

Różnorodność prezentowanych zagadnień odzwierciedla interdyscyplinarny charakter współczesnej logistyki oraz pokazuje, jak dynamicznie rozwija się ta dziedzina.

Mamy nadzieję, że publikacja będzie wartościowym źródłem wiedzy i inspiracji zarówno dla studentów, jak i wszystkich osób zainteresowanych tematyką transportu i logistyki.

Dziękujemy autorom za zaangażowanie oraz wkład w przygotowanie niniejszego wydawnictwa i życzymy czytelnikom inspirującej lektury.

ALGORYTM KONTRA CZŁOWIEK – KTO POWINIEN DECYDOWAĆ O TRASACH I ZAPASACH?

W ostatnich latach narzędzia oparte na sztucznej inteligencji oraz algorytmach optymalizacyjnych stały się powszechnym wsparciem procesów decyzyjnych, szczególnie w logistyce. Jednocześnie wiele procesów, zwłaszcza w sektorze publicznym, nadal opiera się na decyzjach człowieka, których jakość może być ograniczona przez czynniki poznawcze oraz zmęczenie. Celem pracy jest ocena jakości decyzji podejmowanych przez człowieka w porównaniu z rozwiązaniami, generowanymi przez algorytmy optymalizacyjne na przykładzie planowania tras odbioru odpadów w systemie PSZOK. Cel zrealizowano poprzez zaprojektowanie eksperymentu dotyczącego problemu trasowania pojazdów (VRP), w którym rozwiązania uczestników o różnym poziomie kompetencji zestawiono z wynikami algorytmu zaimplementowanego w środowisku Google Colab z wykorzystaniem języka Python. Analizie poddano długość tras, czas realizacji oraz emisję CO₂, co pozwoliło na wskazanie różnic w efektywności oraz potencjału wykorzystania algorytmów w przyszłych systemach logistycznych.

Słowa kluczowe: algorytmy optymalizacyjne, podejmowanie decyzji, logistyka miejska, VRP.

WSTĘP

Wraz z rozwojem miast coraz większego znaczenia nabiera sprawne zarządzanie procesami logistycznymi, w tym systemem odbioru odpadów komunalnych. Szczególnie wymagającym obszarem jest transport odpadów wielkogabarytowych, który wiąże się z koniecznością planowania tras w warunkach licznych ograniczeń, takich jak czas pracy, pojemność pojazdów czy dostępność punktów odbioru [2, 5]. W praktyce zadania te często realizowane są przez człowieka, który opiera się na doświadczeniu oraz intuicji. Jednocześnie rozwój metod optymalizacyjnych wskazuje, że wiele problemów logistycznych można rozwiązywać w sposób bardziej uporządkowany i efektywny z wykorzystaniem algorytmów [8]. W literaturze przedmiotu zagadnienie to opisywane jest jako problem trasowania pojazdów (VRP), znajdujący zastosowanie m.in. w gospodarce odpadami [4].

Celem pracy jest porównanie jakości planowania tras odbioru odpadów wielkogabarytowych przez człowieka z wykorzystaniem metod optymalizacji

na przykładzie dzielnic miasta Poznań. W pracy przyjęto hipotezę, że zastosowanie algorytmów optymalizacyjnych pozwala na bardziej efektywne planowanie tras, prowadzące do ograniczenia długości przejazdów, czasu realizacji oraz emisji CO₂ w porównaniu z planowaniem manualnym.

1. ROLA OPTYMALIZACJI W LOGISTYCE MIEJSKIEJ

Logistyka miejska stanowi jeden z kluczowych obszarów funkcjonowania współczesnych miast, obejmując przepływ towarów, osób oraz odpadów. Wraz ze wzrostem liczby mieszkańców oraz intensyfikacją konsumpcji rośnie również znaczenie efektywnego zarządzania systemami odbioru i zagospodarowania odpadów. Szczególną rolę odgrywają tutaj procesy transportowe, które generują zarówno koszty operacyjne, jak i wpływ na środowisko naturalne [1, 5].

W systemie gospodarki odpadami komunalnymi istotnym elementem są Punkty Selektywnej Zbiórki Odpadów Komunalnych (PSZOK), które pełnią funkcję węzłów logistycznych, umożliwiających zbiórkę oraz dalsze zagospodarowanie odpadów problemowych, w tym wielkogabarytowych. Ich lokalizacja oraz sposób obsługi wpływają bezpośrednio na organizację tras transportowych, a tym samym na efektywność całego systemu [2]. Niewłaściwe planowanie tras może prowadzić do zwiększenia liczby przejazdów, wydłużenia czasu pracy oraz wzrostu emisji zanieczyszczeń.

W praktyce wiele decyzji związanych z planowaniem tras nadal podejmuje człowiek. Decyzje te opierają się na doświadczeniu, znajomości lokalnych uwarunkowań oraz intuicji. Z jednej strony pozwala to na elastyczne reagowanie na zmienne warunki, z drugiej jednak może prowadzić do powstawania nieoptymalnych rozwiązań, wynikających z ograniczeń poznawczych, takich jak trudność w analizie wielu zmiennych jednocześnie czy podatność na uproszczenia decyzyjne [3].

Alternatywą dla podejścia intuicyjnego są metody oparte na algorytmach optymalizacyjnych, które umożliwiają systematyczne przeszukiwanie przestrzeni rozwiązań i wybór wariantu najbardziej efektywnego według przyjętych kryteriów. W literaturze przedmiotu wskazuje się, że ich zastosowanie pozwala na istotne ograniczenie kosztów transportu, skrócenie czasu realizacji usług oraz redukcję negatywnego wpływu na środowisko [6, 8].

Jednym z podstawowych modeli wykorzystywanych w tym obszarze jest zagadnienie trasowania pojazdów VRP (*Vehicle Routing Problem*), stanowiące rozszerzenie problemu komiwojażera, polegające na wyznaczeniu najkrótszej trasy odwiedzającej wszystkie punkty i powracającej do miejsca początkowego [4]. W klasycznej postaci VRP polega na wyznaczeniu optymalnych tras dla floty pojazdów, obsługujących zbiór punktów przy uwzględnieniu określonych ograniczeń, takich jak pojemność pojazdów czy czas pracy kierowców. W praktyce zagadnienie to występuje w bardziej złożonych wariantach, uwzględniających dodatkowe warunki, takie jak ograniczenia infrastrukturalne czy wymagania środowiskowe [1].

W kontekście logistyki odpadów VRP znajduje bezpośrednie zastosowanie w planowaniu tras odbioru odpadów z różnych obszarów miasta i ich transportu do punktów przetwarzania. Złożoność tego zagadnienia sprawia, że jego efektywne rozwiązanie jest trudne bez wykorzystania narzędzi wspomagających podejmowanie decyzji, co uzasadnia rosnące zainteresowanie zastosowaniem algorytmów w tym obszarze.

2. METODYKA BADAWCZA

2.1. Charakterystyka danych i obszaru

W eksperymencie wykorzystano dane, dotyczące mieszkańców wszystkich dzielnic miasta Poznań z roku 2022. Informacje te zostały pozyskane dzięki opublikowaniu raportu przez wydział spraw obywatelskich i usprawnień komunikacyjnych UMP [7]. Zestawienie zawierało: nazwę osiedla, powierzchnię w m², liczbę mieszkańców. Na potrzeby analizy wyodrębniono 42 osiedla, które następnie zagregowano do poziomu sześciu głównych dzielnic: Grunwald, Jeżyce, Nowe Miasto, Piątkowo, Stare Miasto i Wilda. Taki podział umożliwił uproszczenie dalszych obliczeń oraz lepsze odwzorowanie struktury przestrzennej miasta w kontekście analiz logistycznych.

W dalszej części badań skupiono się na zagospodarowaniu odpadów komunalnych w granicach administracyjnych miasta. Obecnie na terenie Poznania funkcjonują trzy Punkty Selektywnego Zbierania Odpadów Komunalnych (PSZOK) [10], zlokalizowane w różnych częściach miasta: Gratowisko Poznań Dębiec (część południowa), Gratowisko Poznań Wschód oraz Gratowisko Morasko (część

północna). Ze względu na przyjęte założenia badawcze oraz konieczność uproszczenia modelu logistycznego, do analizy wybrano dwa punkty – reprezentujące część północną i południową miasta. Przyjęcie takiego rozwiązania pozwoliło na skoncentrowanie się na porównaniu efektywności obsługi różnych obszarów przy ograniczonej liczbie punktów odbioru.

PSZOK-i pełnią istotną funkcję w systemie gospodarki odpadami, umożliwiając mieszkańcom bezpłatne przekazywanie wybranych frakcji odpadów komunalnych. Jednocześnie w przypadku niektórych kategorii, takich jak odpady budowlane czy niebezpieczne, przewidziane są dodatkowe opłaty. Punkty te nie przyjmują odpadów niesegregowanych, zawierających azbest, odpadów o nieznanym składzie oraz części odpadów problematycznych, w tym przemysłowych i mineralnych. Zakres ich działania wpływa bezpośrednio na sposób organizacji przepływów odpadów oraz decyzje logistyczne podejmowane zarówno przez mieszkańców, jak i operatorów systemu.

2.2. Model problemu

Na podstawie przygotowanych danych oraz założeń eksperymentu opracowano model problemu transportowego, który stanowi uproszczone odwzorowanie rzeczywistego procesu odbioru odpadów wielkogabarytowych w logistyce miejskiej. Model ten opiera się na problemie trasowania pojazdów, opisanym w poprzednim rozdziale. Analizowany system obejmuje sześć dzielnic miasta Poznania, które pełnią funkcję punktów odbioru odpadów, oraz dwa Punkty Selektywnej Zbiórki Odpadów Komunalnych, będące miejscami ich dostarczania. Dla każdego z punktów określono ilość generowanych odpadów w skali tygodnia oraz odległości pomiędzy wszystkimi lokalizacjami. W modelu przyjęto, że transport realizowany jest przez dwa pojazdy o jednakowej pojemności wynoszącej 10 ton. Każdy z pojazdów rozpoczyna i kończy trasę w wybranym PSZOK-u, przy czym możliwe jest odwiedzenie kilku dzielnic przed powrotem do punktu zbiórki.

W celu odwzorowania rzeczywistych warunków funkcjonowania systemu wprowadzono następujące ograniczenia:

- pojemność pojazdu nie może zostać przekroczona podczas realizacji trasy;
- całkowity czas pracy pojazdu, obejmujący przejazd oraz obsługę punktów, nie może przekroczyć 8 godzin;

- ilość odpadów dostarczonych do danego PSZOK-u nie może przekroczyć jego maksymalnej zdolności przyjęcia.

Czas przejazdu pomiędzy punktami został określony na podstawie macierzy odległości oraz przyjętej średniej prędkości pojazdu wynoszącej 30 km/h. Dodatkowo uwzględniono stały czas obsługi każdej dzielnicy równy 20 minut. W modelu uwzględniono również aspekt środowiskowy poprzez powiązanie długości trasy z emisją dwutlenku węgla. Przyjęto, że emisja wynosi 0,9 kg CO₂ na każdy kilometr przejazdu, co pozwala na ocenę wpływu poszczególnych rozwiązań na środowisko. Celem modelu jest wyznaczenie tras dla dwóch pojazdów w taki sposób, aby zapewnić obsługę wszystkich dzielnic przy jednoczesnym spełnieniu przyjętych ograniczeń oraz minimalizacji długości tras, czasu realizacji i emisji CO₂.

2.3. Projekt eksperymentu

W eksperymencie wzięło udział 10 osób o zróżnicowanym poziomie wiedzy i doświadczenia w zakresie logistyki, w tym studenci studiów inżynierskich i magisterskich oraz osoby zawodowo związane z branżą, w tym praktycy i wykładowcy akademicy. Uczestników podzielono ze względu na stopień styczności z logistyką, co umożliwiło analizę wpływu doświadczenia na jakość podejmowanych decyzji.

Celem eksperymentu było porównanie efektywności planowania tras odbioru odpadów przez człowieka z rozwiązaniami generowanymi przez algorytmy optymalizacyjne. Badanie miało charakter symulacyjny i opierało się na uproszczonym problemie trasowania pojazdów (VRP), odwzorowującym rzeczywiste warunki funkcjonowania systemu gospodarki odpadami.

Uczestnicy otrzymali jednakowy zestaw danych wejściowych, obejmujący listę dzielnic miasta Poznań, ilość generowanych odpadów wielkogabarytowych w skali tygodnia, lokalizacje dwóch punktów PSZOK, macierz odległości oraz mapę poglądową. Zadanie polegało na zaplanowaniu tras dla dwóch pojazdów przy uwzględnieniu określonych ograniczeń operacyjnych.

Eksperyment przeprowadzono w warunkach pracy indywidualnej. Każdy uczestnik miał 30 minut na przygotowanie rozwiązania, które następnie przekazywał w wybranej formie (np. arkusz kalkulacyjny lub opis). Zabronione było korzystanie z narzędzi optymalizacyjnych oraz sztucznej inteligencji, co miało na celu

odzworowanie procesu podejmowania decyzji bez wsparcia zaawansowanych technologii.

Uczestnicy zobowiązani byli do przedstawienia wyników w postaci:

- kolejności odwiedzanych dzielnic dla każdego pojazdu;
- przypisania tras do odpowiednich punktów PSZOK;
- łącznej długości tras (km);
- całkowitego czasu realizacji;
- całkowitej emisji CO₂;
- krótkiego uzasadnienia przyjętej strategii.

Na podstawie danych demograficznych dokonano obliczeń własnych, określając udział mieszkańców poszczególnych osiedli w obrębie dzielnic miasta Poznania. Przyjęto założenie, że ilość generowanych odpadów wielkogabarytowych jest proporcjonalna do liczby mieszkańców oraz nie uwzględnia sezonowości. Następnie wyznaczono udział mieszkańców poszczególnych dzielnic w ogólnej liczbie mieszkańców Poznania (stan na 31 grudnia 2022 roku) [7] i na tej podstawie oszacowano ilość generowanych odpadów wielkogabarytowych. W analizie wykorzystano dane wskazujące, że w 2022 roku w Poznaniu wytworzono 13,2 tys. ton tego typu odpadów. W dalszym etapie przeliczono wartości roczne na tygodniowe, dzieląc je przez 52 tygodnie.

Wyniki dla poszczególnych dzielnic prezentuje tabela 1.

Tabela 1

Zestawienie ilości odpadów wielkogabarytowych dla dzielnic miasta Poznań

Lp.	Dzielnica	Ilość odpadów wielkogabarytowych w skali tygodnia [tys. t]
1	Grunwald	0,0546
2	Jeżyce	0,0338
3	Nowe Miasto	0,0628
4	Piątkowo	0,0218
5	Stare Miasto	0,0538
6	Wilda	0,0271

Źródło: opracowanie własne.

Na przygotowanie badania składało się:

- przeprowadzenie obliczeń własnych w celu określenia wielkości generowanych odpadów w poszczególnych jednostkach przestrzennych;
- wyznaczenie reprezentatywnych punktów dla każdego z osiedli;
- odwzorowanie lokalizacji punktów na uproszczonej mapie miasta wraz z zastosowaniem siatki przestrzennej;
- wyznaczenie punktów centralnych metodą środka ciężkości z uwzględnieniem ilości generowanych odpadów;
- agregacja punktów do poziomu dzielnic poprzez wyznaczenie ich środków ciężkości;
- uwzględnienie lokalizacji Punktów Selektywnego Zbierania Odpadów Komunalnych jako węzłów logistycznych systemu;
- wyznaczenie odległości pomiędzy wszystkimi punktami oraz opracowanie macierzy odległości;
- wyznaczenie rozwiązania referencyjnego z wykorzystaniem algorytmu optymalizacyjnego.

2.4. Metody analizy

W celu oceny efektywności zaproponowanych rozwiązań przeprowadzono analizę porównawczą wyników, uzyskanych przez uczestników eksperymentu, oraz rozwiązania algorytmicznego. Analiza opierała się na zestawie mierników, umożliwiających ocenę zarówno efektywności operacyjnej, jak i wpływu środowiskowego. Podstawowym kryterium była łączna długość tras, wyrażona w kilometrach, bezpośrednio związana z kosztami transportu oraz zużyciem paliwa. Kolejnym wskaźnikiem był czas realizacji obejmujący przejazdy oraz obsługę punktów. Uwzględniono również emisję CO₂, obliczaną na podstawie długości tras przy założeniu wskaźnika 0,9 kg CO₂/km, co pozwoliło ocenić wpływ rozwiązań na środowisko. Dodatkowo analizie poddano efektywność wykorzystania pojazdów, w szczególności w zakresie ich pojemności oraz liczby przejazdów. W celu ułatwienia porównania zastosowano również analizę różnic procentowych pomiędzy wynikami uczestników a rozwiązaniem algorytmicznym.

3. WYNIKI I ANALIZA

3.1. Wyniki modelu algorytmicznego

W celu oceny efektywności planowania tras odbioru odpadów wielkogabarytowych opracowano model symulacyjny, uwzględniający rzeczywiste ograniczenia operacyjne systemu. W modelu przyjęto pojemność pojazdów na poziomie 10 ton, maksymalny czas pracy kierowcy wynoszący 8 godzin dziennie, konieczność odbywania przerw oraz ograniczenia przepustowości Punktów Selektywnej Zbiórki Odpadów Komunalnych (PSZOK). Dodatkowo uwzględniono aspekt środowiskowy poprzez analizę emisji CO₂ zależnej od długości tras.

Zastosowane podejście miało charakter dwuetapowy. W pierwszym etapie dokonano alokacji odpadów do poszczególnych punktów PSZOK z uwzględnieniem ich maksymalnej zdolności przyjęcia oraz odległości od obsługiwanych dzielnic. W drugim etapie zaplanowano trasy przejazdu pojazdów, dążąc do maksymalnego wykorzystania ich ładowności oraz ograniczenia liczby kursów. W modelu dopuszczono możliwość podziału strumienia odpadów pomiędzy oba punkty PSZOK, co wynikało z przyjętych ograniczeń systemowych.

W wyniku przeprowadzonej symulacji uzyskano rozwiązanie, umożliwiające pełne obsłużenie wszystkich analizowanych dzielnic miasta Poznań. Całkowita ilość przetransportowanych odpadów wyniosła 253,8 tony, co oznacza, że cały strumień odpadów został zagospodarowany w ramach dostępnej infrastruktury. Zgodnie z przyjętymi limitami do PSZOK Północ skierowano 152,3 tony odpadów, natomiast do PSZOK Południe – 101,5 tony.

Tabela 2

Zestawienie wyników dla PSZOK

Parametr	PSZOK Północ	PSZOK Południe
Liczba kursów	16	11
Łączna ilość odpadów [t]	152,3	101,5
Łączna długość tras [km]	346,75	97,88
Łączny czas operacyjny [h:min]	23:13:30	11:15:15
Czas całkowity z przerwami [h]	26,97	12,75
Liczba dni roboczych	4	2
Emisja CO ₂ [kg]	312,13	88,13

Źródło: opracowanie własne.

Na podstawie danych zawartych w tabeli 2 można zauważyć wyraźną dysproporcję w obciążeniu analizowanych punktów. PSZOK Północ obsłużył większą część strumienia odpadów, co przełożyło się na większą liczbę kursów, dłuższe trasy oraz wyższą emisję CO₂ i czas realizacji. W przypadku PSZOK Północ całkowita długość tras wyniosła 346,75 km, a czas pracy – po uwzględnieniu przerw – 26,97 godziny, co odpowiada 4 dniom roboczym. Dla PSZOK Południe wartości te były niższe i wyniosły odpowiednio 97,88 km oraz 12,75 godziny, czyli 2 dni robocze. Pomimo równoległej pracy dwóch pojazdów całkowity czas realizacji systemu determinowany jest przez bardziej obciążony element, którym jest PSZOK Północ, stanowiący wąskie gardło procesu. Oznacza to, że rzeczywisty czas realizacji odbioru odpadów dla całego miasta wynosi 4 dni robocze.

Należy również zauważyć, że końcowe kursy charakteryzowały się niższym stopniem wykorzystania pojemności pojazdów, co wynikało z konieczności odbioru pozostałych niewielkich ilości odpadów – zjawiska typowego dla systemów logistycznych. Przeprowadzona symulacja potwierdza, że zastosowane podejście pozwala na uzyskanie rozwiązania wykonalnego i spójnego z przyjętymi ograniczeniami, jednocześnie wskazując potencjalne obszary dalszej optymalizacji, w szczególności w zakresie bardziej równomiernego rozłożenia obciążenia pomiędzy PSZOK. W celu zwiększenia przejrzystości analizy udostępniono fragment implementacji modelu, opracowanego w środowisku Google Colab, obejmujący kluczowe elementy algorytmu. Dostęp do materiału możliwy jest poprzez zeskanowanie kodu QR zamieszczonego poniżej (rys. 1).



Rys. 1. Dostęp do implementacji modelu w środowisku Google Colab

3.2. Wyniki uczestników eksperymentu

W kolejnym etapie badania przeprowadzono eksperyment polegający na manualnym zaplanowaniu tras odbioru odpadów wielkogabarytowych przez uczestników. Każda z osób biorących udział w badaniu otrzymała identyczny zestaw danych wejściowych oraz zestaw ograniczeń, odpowiadających warunkom przyjętym w modelu algorytmicznym. Uczestnicy mieli za zadanie opracowanie rozwiązania w określonym czasie, bez wykorzystania narzędzi optymalizacyjnych oraz wsparcia algorytmicznego.

W eksperymencie wzięło udział 10 osób, reprezentujących zróżnicowany poziom doświadczenia oraz kompetencji analitycznych. Każdy uczestnik opracowywał rozwiązanie indywidualnie, podejmując decyzje na podstawie własnej wiedzy, intuicji oraz własnego sposobu interpretacji problemu.

Uzyskane rozwiązania zostały poddane analizie z uwzględnieniem czterech kluczowych kryteriów oceny:

- łącznej długości tras;
- całkowitego czasu realizacji;
- poziomu emisji CO₂;
- liczby kursów wykonanych przez obydwie samochody.

Tabela 3

Wyniki uczestników eksperymentu

Uczestnik	Łączna długość tras [km]	Czas realizacji [h]	Emisja CO ₂ [kg]	Liczba kursów
U1	209,875	14,30416667	195,35	21
U2	376,75	34,56	339,075	22
U3	597,76	47,26	537,99	14
U4	337,25	29,242	303,33	28
U5	251,965	15,3565	191,8935	21
U6	539,3	25,433	485,37	25
U7	82,25	7,7417	74,025	30
U8	155,625	9,3875	140,0625	36
U9	379,25	22,308	341,325	29
U10	282,75	19,09163	254,475	26

Źródło: opracowanie własne.

Na podstawie danych przedstawionych w tabeli 3 można zauważyć wyraźne zróżnicowanie jakości opracowanych rozwiązań. Różnice te dotyczą zarówno długości tras, jak i czasu realizacji oraz poziomu emisji CO₂, co wskazuje na istotny wpływ indywidualnego podejścia uczestników do problemu.

W analizowanych rozwiązaniach widoczne są różne strategie planowania. Część uczestników koncentrowała się na minimalizacji odległości poprzez wybór najbliższych punktów, co nie zawsze prowadziło do optymalnego wykorzystania pojemności pojazdów. W innych przypadkach podejmowano próby bardziej złożonego planowania tras, jednak bez wsparcia narzędzi optymalizacyjnych nie zawsze skutkowało to poprawą efektywności całego systemu.

Tabela 4

Zestawienie statystyczne wyników uczestników

Parametr	Wartość
Średnia długość tras [km]	321,2775
Minimalna długość tras [km]	82,25
Maksymalna długość tras [km]	597,76
Średni czas realizacji [h]	22,468
Minimalny czas realizacji [h]	7,7417
Maksymalny czas realizacji [h]	47,26
Średnia emisja CO ₂ [kg]	286,2896
Minimalna emisja CO ₂ [kg]	74,025
Maksymalna emisja CO ₂ [kg]	537,99

Źródło: opracowanie własne.

3.3. Porównanie wyników: człowiek vs algorytm

W celu weryfikacji przyjętej hipotezy dokonano porównania wyników uzyskanych przez człowieka oraz algorytm optymalizacyjny. Porównanie przeprowadzono, opierając się na trzech głównych kryteriach: łącznej długości tras, czasu realizacji oraz poziomu emisji CO₂. Rozwiązanie algorytmiczne, opisane w podrozdziale 3.1, stanowiło punkt odniesienia dla analizy.

Tabela 5

Porównanie wyników algorytmu oraz uczestników eksperymentu

Parametr	Algorytm	Średnia uczestników
Łączna długość tras [km]	444,63	321,28
Czas realizacji [h]	39,72	22,47
Emisja CO ₂ [kg]	400,26	286,2896

Analiza uzyskanych wyników wskazuje, że średnie wartości osiągnięte przez uczestników są niższe niż w przypadku rozwiązania algorytmicznego we wszystkich analizowanych kryteriach. Oznacza to, że w badanym przypadku podejście manualne pozwoliło na uzyskanie bardziej efektywnych rozwiązań pod względem wyżej wskazanych kryteriów.

Należy jednak podkreślić, że przedstawione wyniki dotyczą wyłącznie rozwiązań spełniających podstawowe założenia zadania. Część prac uczestników została odrzucona z analizy ze względu na istotne błędy, takie jak niespełnienie ograniczeń pojemności pojazdów czy rażące błędy rachunkowe. Oznacza to, że uzyskane wyniki reprezentują wyłącznie poprawne rozwiązania, co może wpływać na ich ogólną ocenę.

Istotnym czynnikiem wpływającym na wyniki jest również stopień złożoności modelu. W niniejszym badaniu zastosowano uproszczony algorytm, który mimo uwzględnienia kluczowych ograniczeń nie obejmował pełnej optymalizacji globalnej problemu. Przede wszystkim nie wzięto pod uwagę zaawansowanych metod optymalizacyjnych ani bardziej złożonych heurystyk, które mogłyby prowadzić do uzyskania lepszych wyników. W przeciwieństwie do tego uczestnicy, opierając się na intuicji oraz zdolności do syntetycznego postrzegania problemu, byli w stanie podejmować decyzje, uwzględniające wiele czynników jednocześnie. Pozwoliło to w niektórych przypadkach na bardziej efektywne planowanie tras, szczególnie w zakresie łączenia punktów odbioru oraz ograniczania liczby przejazdów.

PODSUMOWANIE

Celem pracy było porównanie jakości decyzji podejmowanych przez człowieka oraz rozwiązań generowanych przez algorytm optymalizacyjny w kontekście planowania tras odbioru odpadów wielkogabarytowych. Analiza została

przeprowadzona na podstawie opracowanego modelu symulacyjnego oraz wyników eksperymentu z udziałem uczestników. Uzyskane wyniki wskazują, że w analizowanym przypadku uczestnicy eksperymentu osiągnęli lepsze rezultaty niż rozwiązanie algorytmiczne.

Należy jednak podkreślić, że porównanie dotyczy wyłącznie rozwiązań, spełniających wszystkie założenia i ograniczenia zadania. Przeprowadzona analiza wykazała również istotne zróżnicowanie jakości rozwiązań opracowanych przez uczestników, co wskazuje na duży wpływ indywidualnych predyspozycji, doświadczenia oraz sposobu podejmowania decyzji. Oznacza to, że choć człowiek jest w stanie osiągać bardzo dobre wyniki, nie są one gwarantowane i mogą się znacząco różnić w zależności od osoby. Zastosowany model algorytmiczny okazał się mniej efektywny od najlepszych rozwiązań manualnych, jednak nie oznacza to, że podejście algorytmiczne jest ogólnie mniej skuteczne. Otrzymane wyniki wskazują raczej, że efektywność algorytmu w dużej mierze zależy od poziomu zaawansowania przyjętego modelu oraz zakresu uwzględnionej optymalizacji. W związku z tym jako kierunek dalszych badań można wskazać rozwój bardziej zaawansowanych metod optymalizacyjnych, w szczególności uwzględniających pełną optymalizację problemu trasowania pojazdów oraz zastosowanie heurystyk i metaheurystyk. Pozwoliłoby to na bardziej adekwatne porównanie możliwości algorytmów i człowieka w kontekście złożonych problemów logistycznych.

Reasumując, przeprowadzona analiza wskazuje, że w warunkach zastosowania uproszczonego modelu algorytmicznego człowiek może osiągać lepsze wyniki pod względem efektywności operacyjnej. Jednocześnie rozwój bardziej zaawansowanych narzędzi optymalizacyjnych może w przyszłości zmienić tę relację, co uzasadnia dalsze badania w tym obszarze.

LITERATURA

1. Crainic G., Crainic T.G., Thompson R.G., *City logistics: Concepts, methods and systems*, sierpień 2008.
2. European Commission, *Waste statistics*, Eurostat.
3. Kahneman D., *Maps of bounded rationality: Psychology for behavioral economics*, The American Economic Review, 2003, vol. 93, no. 5, pp. 1449–1475.
4. Rossit D., Tohmé F., Frutos M., *The bi-objective vehicle routing problem in waste collection*.
5. Santinha G., Marques J., *Smart cities and urban logistics: A systematic review of the literature*, Europa XXI, luty 2022.

6. Tan L., *Vehicle routing optimization based on ant colony algorithm*, Pattern Recognition Letters, 2009, vol. 30, no. 9.
7. Wydział Spraw Obywatelskich i Uprawnień Komunikacyjnych UMP, Poznań, obliczenia własne.
8. Zunic E., Donko D., Mehic E., *Data-driven approach to vehicle routing problem*, Uniwersytet w Sarajewie, Bośnia i Hercegowina.

Źródła internetowe

9. https://badam.poznan.pl/nasza-przestrzen/02_srodowisko/gospodarka-odpadami-2/ (dostęp 29.03.2026).
10. <https://www.poznan.pl/mim/wortals/wortal%2C904/punkty-selektywnego-zbierania-odpadow-komunalnych%2Cpoi%2C6100> (dostęp 29.03.2026).

ALGORITHM VS HUMAN – WHO SHOULD DECIDE ON ROUTES AND INVENTORY

In recent years, tools based on artificial intelligence and optimization algorithms have become widely used to support decision-making processes, particularly in logistics. At the same time, many processes, especially in the public sector, are still based on human decisions, the quality of which may be limited by cognitive factors and fatigue. The aim of this study is to evaluate the quality of human decision-making compared to solutions generated by optimization algorithms, using the example of planning bulky waste collection routes within the PSZOK system. The objective was achieved by designing an experiment based on the Vehicle Routing Problem (VRP), in which solutions developed by participants with varying levels of expertise were compared with the results of an algorithm implemented in the Google Colab environment using Python. The analysis focused on route length, total execution time, and CO₂ emissions, allowing for the identification of differences in efficiency and the potential application of algorithms in future logistics systems.

Keywords: optimization algorithms, decision-making, urban logistics, VRP.

AUTONOMICZNE DRONY W OPTYMALIZACJI OSTATNIEJ MILI – BARIERY, SZANSE, PRZYSZŁOŚĆ

Celem artykułu jest analiza możliwości wykorzystania autonomicznych dronów w optymalizacji logistyki ostatniej mili, ze szczególnym uwzględnieniem potencjalnych korzyści, ograniczeń oraz kierunków przyszłego rozwoju tej technologii. W pracy wykorzystano metodę analizy literatury przedmiotu oraz analizę porównawczą w ujęciu przestrzennym, co umożliwiło ocenę zastosowań dronów w różnych warunkach operacyjnych i środowiskowych.

W pierwszej części przedstawiono istotę oraz główne wyzwania logistyki ostatniej mili, w tym wysokie koszty operacyjne, zatłoczenie obszarów miejskich oraz negatywny wpływ transportu na środowisko. Następnie scharakteryzowano technologię autonomicznych dronów (UAV), ze szczególnym uwzględnieniem zasad ich funkcjonowania, systemów sterowania oraz infrastruktury wspierającej.

W dalszej części omówiono praktyczne zastosowania dronów w dostawach, prezentując wybrane modele operacyjne oraz przykłady wdrożeń, realizowanych przez przedsiębiorstwa logistyczne i technologiczne. Wskazano również główne korzyści wynikające z ich wykorzystania, takie jak skrócenie czasu dostawy, zwiększenie efektywności operacyjnej oraz ograniczenie emisji zanieczyszczeń.

Ostatnia część pracy koncentruje się na identyfikacji barier wdrożeniowych, obejmujących ograniczenia technologiczne, regulacyjne, ekonomiczne oraz społeczne. Wskazano także możliwe kierunki rozwoju technologii dronowej oraz oceniono jej potencjał w kontekście przyszłości systemów logistycznych i koncepcji inteligentnych miast.

Słowa kluczowe: transport, efektywność, nowoczesny, drony, optymalizacja, ostatnia mila.

WSTĘP

Rozwój handlu elektronicznego oraz rosnące oczekiwania konsumentów w zakresie szybkości i elastyczności dostaw sprawiają, że logistyka ostatniej mili staje się jednym z kluczowych obszarów współczesnych systemów transportowych. Jest to jednocześnie etap generujący najwyższe koszty operacyjne oraz największe wyzwania organizacyjne, związane m.in. z zatłoczeniem miast, emisją zanieczyszczeń czy trudnościami w optymalizacji tras dostaw. W odpowiedzi na te

problemy coraz większą uwagę poświęca się nowoczesnym technologiom, w tym autonomicznym dronom, które mogą znacząco usprawnić realizację dostaw na krótkich dystansach.

Autonomiczne statki powietrzne (ang. *Unmanned Aerial Vehicle* – UAV) stanowią innowacyjne rozwiązanie, pozwalające na skrócenie czasu dostawy, redukcję kosztów oraz ograniczenie negatywnego wpływu transportu na środowisko. Ich zastosowanie wpisuje się również w rozwój koncepcji inteligentnych miast (ang. *Smart City*) oraz automatyzacji procesów logistycznych. Jednocześnie wdrożenie tej technologii napotyka liczne bariery, zarówno technologiczne, jak i prawne, ekonomiczne oraz społeczne.

1. LOGISTYKA OSTATNIEJ MILI A TECHNOLOGIA AUTONOMICZNYCH DRONÓW

1.1. Istota i znaczenie logistyki ostatniej mili

Logistyka ostatniej mili stanowi końcowy etap procesu dystrybucji, obejmujący odcinek drogi pomiędzy ostatnim centrum dystrybucji (magazynem, hubem) a odbiorcą końcowym [3]. Można ją zdefiniować jako zespół czynności organizacyjnych, związanych z doręczaniem przesyłek bezpośrednio do domu klienta lub do wskazanego przez niego punktu przekazania, takiego jak automat paczkowy (np. Paczkomat) lub punkt odbioru typu PUDO [3].

W łańcuchu dostaw ostatnia mila pełni kluczową rolę ostatecznego ogniwa w relacji pomiędzy sprzedawcą a konsumentem. Jest to etap najtrudniejszy do optymalizacji i najbardziej problematyczny w kontekście całego procesu dystrybucji.

W sektorze *e-commerce* znaczenie tego etapu gwałtownie wzrosło wraz z rozwojem modelu B2C (*business-to-customer*), w którym produkty wysyłane są bezpośrednio do klienta z pominięciem tradycyjnych sklepów detalicznych. Ostatnia mila determinuje niezawodność, czas dostawy oraz ogólną jakość doświadczenia zakupowego klienta, co bezpośrednio wpływa na lojalność nabywcy i wzrost poziomu konkurencyjności przedsiębiorstw.

Tradycyjny przebieg ostatniej mili w logistyce przed pojawieniem się intensywnego rozwoju *e-commerce* obrazuje rysunek 1 [3]. W tradycyjnym modelu dystrybucji proces dostawy obejmował transport towarów z magazynu do punktu

sprzedaży detalicznej. W rezultacie proces ostatniej mili był realizowany przez kupującego-klienta, który po dokonaniu zakupu towaru sam go dostarczał do miejsca przez siebie wyznaczonego. Model ten charakteryzował się mniejszym stopniem złożoności logistycznej po stronie przedsiębiorstw, jednak wiązał się z niższym poziomem wygody dla klienta oraz ograniczoną elastycznością dostaw.



Rys. 1. Tradycyjny przebieg ostatniej mili

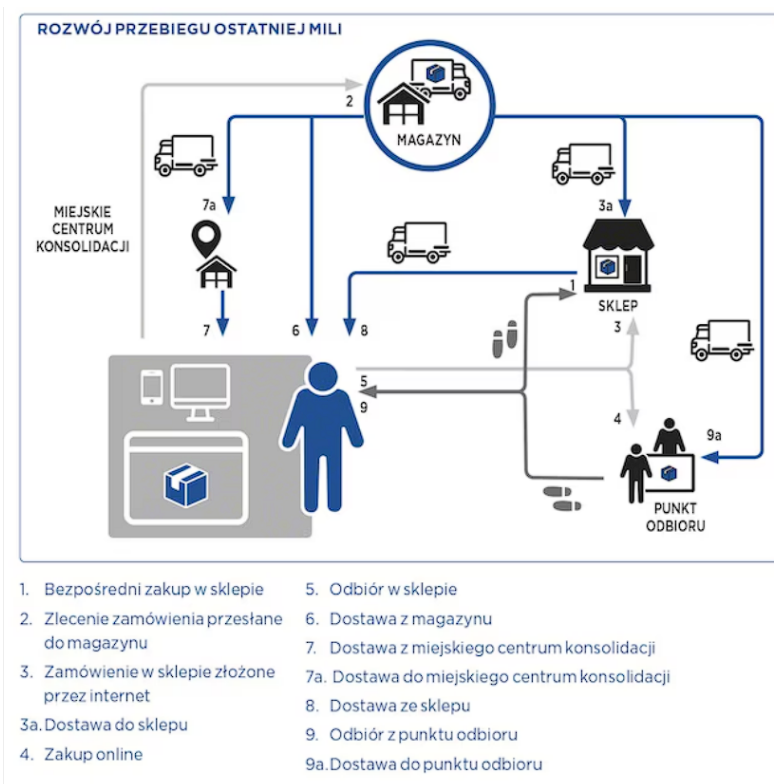
Źródło: [21].

W przeciwieństwie do wcześniejszych etapów logistyki (np. transportu liniowego czy magazynowania), które charakteryzują się dużą skalą i relatywnie wysoką przewidywalnością, ostatnia mila opiera się na realizacji wielu małych, zindywidualizowanych dostaw do odbiorców końcowych, często rozproszonych przestrzennie [2]. To powoduje, że efektywność kosztowa znacząco spada.

Na rysunku 2 przedstawiono typową organizację dostawy przesyłki w ramach ostatniej mili. Obrazuje on złożoność współczesnych procesów dystrybucyjnych, w których przesyłka może być realizowana wieloma alternatywnymi ścieżkami. Proces rozpoczyna się w magazynie, skąd towar może zostać skierowany bezpośrednio do sklepu, punktu odbioru lub miejskiego centrum konsolidacji. Następnie możliwa jest zarówno dostawa bezpośrednia do klienta, jak i odbiór osobisty – w sklepie bądź w dedykowanym punkcie odbioru. Uwzględniono także warianty związane z zakupem *online* oraz tradycyjnym zakupem w sklepie, co podkreśla integrację kanałów sprzedaży (ang. *model omnichannel*).

Z przedstawionego przebiegu wynika, że ostatnia mila jest etapem wysoce złożonym organizacyjnie, wymagającym koordynacji wielu ogniw łańcucha dostaw

oraz elastycznego dopasowania do preferencji klienta. Różnorodność kanałów dostawy i odbioru zwiększa poziom obsługi klienta, jednocześnie prowadzi do wzrostu kosztów operacyjnych, większego obciążenia infrastruktury transportowej oraz trudności w optymalizacji tras. W konsekwencji ostatnia mila stanowi jeden z najbardziej wymagających i kosztotwórczych elementów współczesnych systemów logistycznych.



Rys. 2. Aktualny przebieg ostatniej mili

Źródło: [21].

Szacuje się, że koszty ostatniej mili stanowią od 13 do nawet 75% całkowitych kosztów logistycznych, w zależności od modelu biznesowego, branży oraz stopnia urbanizacji obszaru dostaw [4, 5]. W 2021 roku średni udział tego etapu wynosił około 53% kosztów po stronie sprzedawców, co jednoznacznie wskazuje,

że optymalizacja ostatniej mili jest kluczowym obszarem poszukiwania przewagi konkurencyjnej. Na poziomie kosztowym dominują tu wydatki związane z pracą kurierów, zużytym paliwem, utrzymaniem floty oraz zarządzaniem operacjami dostawczymi [21].

Istotnym czynnikiem generującym koszty jest konieczność obsługi tzw. rozproszonego popytu. Dostawy realizowane są do wielu pojedynczych punktów, co ogranicza możliwość konsolidacji przesyłek i optymalizacji tras. W efekcie pojazdy często pokonują dłuższe dystanse przy relatywnie niskim stopniu wypełnienia, co bezpośrednio przekłada się na wzrost kosztu jednostkowego dostawy [3].

Dodatkowym obciążeniem są nieudane próby doręczenia (ang. *failed deliveries*), które generują konieczność ponownej obsługi przesyłki. Każda taka sytuacja oznacza dodatkowy koszt transportu, pracy kuriera oraz obsługi systemowej. Również procesy zwrotów i reklamacji (ang. *reverse logistics*) są szczególnie kosztowne w *e-commerce*, gdzie odsetek zwrotów – zwłaszcza w branży odzieżowej – potrafi sięgać kilkudziesięciu procent. Obsługa zwrotów wymaga ponownego transportu, sortowania oraz często ponownego wprowadzenia produktu do obrotu [15].

Kluczowe oczekiwania klientów obejmują szybkość, niezawodność i terminowość dostawy. Standardem rynkowym przestaje być dostawa w ciągu kilku dni, a coraz częściej oczekuje się realizacji zamówienia w modelu tego samego dnia (ang. *the same-day*), następnego dnia (ang. *the next-day*), natomiast liderzy rynkowi budują przewagę konkurencyjną, oferując dostawy w ciągu dwóch, a nawet jednej godziny, od momentu zakupu. Wymaga to budowy gęstej sieci centrów dystrybucyjnych oraz zaawansowanego planowania operacyjnego w czasie rzeczywistym. Klienci również oczekują możliwości wyboru precyzyjnych okien czasowych (nawet co do 15 minut), zmiany miejsca doręczenia w trakcie transportu, przekierowania przesyłki do punktu odbioru lub automatu paczkowego oraz dostępu do usług 24/7. Realizacja tych oczekiwań wymaga integracji systemów IT, monitorowania przesyłek w czasie rzeczywistym oraz wdrażania rozwiązań, takich jak inteligentne systemy zarządzania transportem (TMS) czy wykorzystanie sztucznej inteligencji, która wspiera optymalizację tras dostaw przesyłek w ramach ostatniej mili [8]. W rezultacie ostatnia mila staje się nie tylko najbardziej kosztownym, ale również strategicznie najważniejszym elementem łańcucha

dostaw, determinującym poziom satysfakcji klienta oraz konkurencyjność przedsiębiorstw, działających w sektorze *e-commerce* i logistyki.

1.2. Wyzwania operacyjne ostatniej mili

Ostatnia mila stanowi najbardziej wymagający operacyjnie etap łańcucha dostaw, generujący szereg wyzwań związanych z kosztami, organizacją procesów oraz funkcjonowaniem infrastruktury miejskiej. Wraz z rozwojem *e-commerce* i rosnącymi oczekiwaniami klientów, dotyczącymi szybkości oraz elastyczności dostaw, znaczenie efektywnego zarządzania tym etapem stale rośnie.

Wysokie koszty dostaw. Etap ostatniej mili stanowi najbardziej kapitałochłonny fragment procesu dystrybucji, pochłaniający znaczną część całkowitych wydatków logistycznych (szacunkowo od 13 do 75%). Tak wysoki poziom nakładów wynika z konieczności obsługi rozproszonych odbiorców indywidualnych oraz realizacji dostaw w krótkich, często ściśle określonych przedziałach czasowych. Istotnym czynnikiem zwiększającym koszty są również procesy posprzedażowe, w tym ponowne doręczenia, zwroty towarów oraz obsługa reklamacji [21].

Problemy z optymalizacją tras. Jest to etap najtrudniejszy do optymalizacji ze względu na ogromną liczbę zmiennych. Efektywne zaplanowanie trasy wymaga uwzględnienia zagęszczenia miejsc dostaw, wąskich okien czasowych (często z dokładnością do 15 minut), kosztów paliwa oraz aktualnych wzorców ruchu drogowego. Przedsiębiorstwa takie jak UPS czy DHL wdrażają systemy oparte na sztucznej inteligencji (np. ORION, Wise Systems), aby w czasie rzeczywistym korygować trasy kurierów [13].

Korki i zatłoczenie miast. Dynamiczny rozwój motoryzacji indywidualnej przy niedostatecznej infrastrukturze prowadzi do powstawania kongestii (korków). Zjawisko to jest jednym z głównych problemów logistyki miejskiej, utrudniającym planowanie i zwiększającym koszty eksploatacji pojazdów. Rozwiązaniem tego problemu są m.in. rowery cargo (nie dotyczy ich brak miejsc parkingowych i wąskie uliczki) oraz drony i roboty autonomiczne, które nie korzystają z tradycyjnej infrastruktury drogowej [3, 8].

Opóźnienia. Kongestia bezpośrednio przyczynia się do istotnego wydłużenia czasu dostawy. W branży *e-commerce*, gdzie standardem staje się dostawa tego samego dnia lub w ciągu 1–2 godzin, każde opóźnienie negatywnie wpływa na jakość obsługi klienta i konkurencyjność firmy. Luka czasowo-przestrzenna między zakupem a konsumpcją powinna być skracana do minimum, co przy zatłoczonych miastach jest ogromnym wyzwaniem operacyjnym [2, 7].

Wpływ na środowisko. Logistyka ostatniej mili odpowiada za 40% wszystkich emisji związanych z handlem elektronicznym. Tradycyjne pojazdy spalinowe, zwłaszcza starsze napędzane silnikiem diesla, emitują znaczne ilości CO₂, tlenków azotu, cząstek stałych i benzo(a)pirenu. Ponadto transport drogowy generuje hałas, który na obszarach zurbanizowanych często przekracza normy (60 dB w dzień i 55 dB w nocy), co negatywnie wpływa na zdrowie mieszkańców [15].

Narastająca złożoność operacyjna oraz presja kosztowa sprawiają, że przedsiębiorstwa logistyczne są zmuszone do wdrażania innowacyjnych rozwiązań technologicznych oraz nowych modeli dystrybucji. Kluczowe znaczenie zyskują narzędzia, umożliwiające optymalizację tras, automatyzację procesów oraz ograniczenie negatywnego wpływu transportu na środowisko. Efektywne zarządzanie ostatnią milą staje się tym samym jednym z głównych czynników budowania przewagi konkurencyjnej w sektorze *e-commerce*.

1.3. Charakterystyka autonomicznych dronów

Autonomiczne drony, znane również jako bezzałogowe statki powietrzne (ang. *Unmanned Aerial Vehicle* – UAV) lub bezzałogowe systemy powietrzne (*Unmanned Aircraft System* – UAS), są to latające niewielkich rozmiarów jednostki powietrzne, zdolne do wykonywania operacji bez obecności pilota na pokładzie. Choć początkowo kojarzone głównie z wojskowością, stają się powszechnym elementem codzienności technicznej, znajdując zastosowanie w logistyce, ratownictwie czy rolnictwie [1, 4].

Drony autonomiczne stanowią statki powietrzne wielokrotnego użytku, które wykorzystują siły aerodynamiczne do zapewnienia nośności. Definiuje się je jako urządzenia sterowane za pomocą komputerów pokładowych lub pilotowane zdalnie. W trybie pełnej autonomii dron samodzielnie wykonuje lot według wcześniej zdefiniowanej i zaprogramowanej trasy [8, 9].

Istnieje wiele podziałów autonomicznych dronów, jednak w artykule najbardziej istotny jest ich podział ze względu na stopień sterowania nimi. W rezultacie można wyodrębnić drony sterowane manualnie, półautonomicznie i autonomicznie.

Szczegółowe różnice występujące między nimi omówiono poniżej.

Sterowanie manualne (ang. *Remote Piloted Vehicle* – RPV). Dron jest sterowany w czasie rzeczywistym przez operatora za pomocą stacji nadawczej lub specjalnego kontrolera. Operator posiada pełną kontrolę nad każdym ruchem urządzenia [1, 4].

Sterowanie półautomatyczne. Dron porusza się po wcześniej zdefiniowanej trasie, jednak operator ma możliwość ingerencji w przebieg lotu i wprowadzania korekt kursu w czasie rzeczywistym [1].

Sterowanie autonomiczne (UAV). Bezzałogowy statek powietrzny wykonuje lot samodzielnie na podstawie algorytmów oraz zaprogramowanych punktów nawigacyjnych (ang. *waypoints*). W najbardziej zaawansowanych systemach (np. poziom L4) urządzenia funkcjonują w pełni autonomicznie, a rola operatora ogranicza się do monitorowania przebiegu lotu oraz przejęcia kontroli wyłącznie w sytuacjach awaryjnych [3, 6].

Niezależnie od poziomu autonomii, kluczowym elementem, umożliwiającym realizację lotu oraz utrzymanie właściwego kursu, jest system nawigacyjny. To właśnie on odpowiada za określanie położenia drona w przestrzeni oraz wspiera realizację zaplanowanej trajektorii lotu, stanowiąc podstawę działania zarówno systemów półautomatycznych, jak i w pełni autonomicznych.

Nawigacja satelitarna jest kluczowa dla planowania tras i precyzyjnego określania pozycji drona w przestrzeni. Dron, wykorzystując GPS (ang. *Global Positioning System*), może samoczynnie wykonać zaplanowaną drogę, a w przypadku utraty łączności z operatorem – bezpiecznie wrócić do miejsca startu (funkcja *Return to Home*) [6]. Ogromne znaczenie mają również sensory (czujniki), wpływające na postrzeganie świata przez urządzenia. Składają się na nie kamery, radary i sensory, czujniki żyroskopowe i ciśnienia oraz skanery [3]. W obsłudze dronów AI pełni rolę „mózgu”, analizując dane z czujników, optymalizując trasę oraz umożliwiając podejmowanie decyzji w czasie rzeczywistym [3, 10].

W praktyce jednak systemy oparte wyłącznie na łączności radiowej i GPS są podatne na zakłócenia (tzw. *jammings*), co zostało szczególnie uwidocznione podczas konfliktu w Ukrainie. Intensywne działania z zakresu walki elektronicznej prowadzą do utraty sygnału nawigacyjnego oraz zerwania połączenia pomiędzy operatorem a dronem. W odpowiedzi na te zagrożenia opracowano szereg rozwiązań zwiększających odporność systemów bezzałogowych [11]. Jednym z nich jest rozwój dronów o zwiększonej autonomii, które są w stanie kontynuować misję lub osiągnąć cel nawet po utracie sygnału sterującego, wykorzystując wcześniej zaprogramowane algorytmy działania. Innym rozwiązaniem jest zastosowanie alternatywnych metod komunikacji, takich jak sieci *mesh*, które umożliwiają przekazywanie sygnału pomiędzy wieloma urządzeniami, zmniejszając ryzyko całkowitej utraty łączności. Równolegle rozwijane są systemy przeciwdziałania zakłóceniom, obejmujące m.in. wzmacnianie sygnału, wykorzystanie alternatywnych źródeł nawigacji (np. systemów inercyjnych) oraz integrację wielu źródeł danych w celu zwiększenia niezawodności działania dronów.

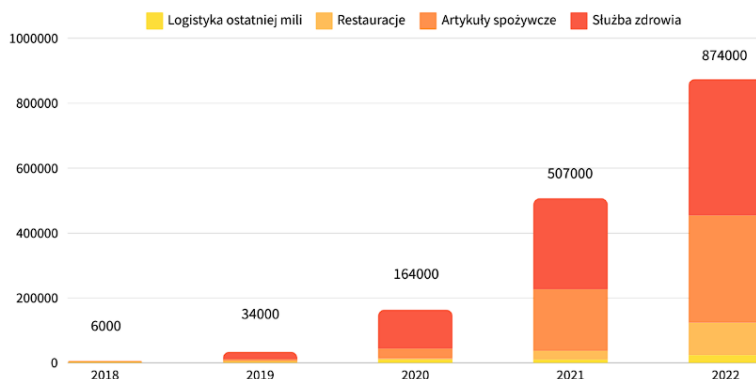
Rosnący poziom autonomii oraz rozwój systemów nawigacyjnych i komunikacyjnych sprawiają, że drony stają się coraz bardziej niezależne, niezawodne i zdolne do działania w złożonych warunkach operacyjnych. Integracja technologii, takich jak AI, systemy antykolizyjne oraz rozwiązania odporne na zakłócenia, znacząco zwiększa ich potencjał aplikacyjny. W kontekście logistyki ostatniej mili oznacza to możliwość szybszej, bardziej elastycznej i mniej kosztownej realizacji dostaw, szczególnie w obszarach miejskich o wysokim stopniu zatłoczenia.

2. ZASTOSOWANIE DRONÓW W OPTYMALIZACJI OSTATNIEJ MILI

2.1. Modele wykorzystania dronów w dostawach

Wykorzystanie bezzałogowych statków powietrznych w logistyce ewoluuje od fazy testów do konkretnych modeli operacyjnych, które mają na celu rozwiązanie problemów ostatniej mili oraz skrócenie czasu dostaw [14].

Na rysunku 3 przedstawiono skalę komercyjnego wykorzystania dostaw dronami według rodzaju zastosowania [1].



Rys. 3. Komercyjne dostawy dronami według rodzaju zastosowania

Źródło: [20].

Do podstawowych modeli wykorzystujących drony w dostawach w ramach ostatniej mili można zaliczyć:

1. Dostawy bezpośrednie (magazyn → klient). Model ten, określany czasem jako „fly-to-door”, zakłada pełną automatyzację procesu, w którym dron pobiera przesyłkę bezpośrednio z centrum dystrybucji lub linii pakowania i dostarcza ją pod adres odbiorcy. Drony chwytają paczkę, wykonują autonomiczny lot do celu na podstawie zaprogramowanych punktów GPS, a po dokonaniu doręczenia samodzielnie wracają do bazy. Pionierem w tym modelu jest Amazon z programem *Prime Air*, który zakłada dostarczanie paczek o masie do ok. 2,5 kg w promieniu 16 km w czasie poniżej 30 minut [1, 2].

2. Model hybrydowy (dron + kurier/pojazd). W tym modelu dron nie startuje z centralnego magazynu, lecz stanowi wyposażenie samochodu dostawczego, pełniąc rolę „latającego pomocnika” kuriera. Dron jest wypuszczany z dachu zaparkowanego pojazdu, aby dostarczyć przesyłkę do odbiorcy znajdującego się w niewielkiej odległości, podczas gdy kurier w tym samym czasie jedzie samochodem do kolejnego klienta. Rozwiązanie to pozwala na znaczną oszczędność czasu i skrócenie drogi przebytej przez pojazd kołowy, co jest szczególnie efektywne w miastach o dużym natężeniu ruchu. Badania sugerują, że system hybrydowy (połączenie samochodu i drona) jest obecnie najbardziej efektywnym ekologicznie

rozwiązaniem w ruchu wielkomiejskim [14]. Najbardziej znanym podmiotem wykorzystującym model hybrydowy jest UPS, który opracował rozwiązanie UPS Flight Forward [16].

Drony mogą być wykorzystywane zarówno do transportu towarów ogólnodostępnych jak i specjalistycznych, pod warunkiem, że są one dopuszczone do tego typu transportu. Dostawy specjalistyczne za pomocą dronów realizowane są na przykład w segmencie medycznym.

Transport medyczny jest uważany za najbardziej perspektywiczny i społecznie akceptowalny obszar wykorzystania dronów, ze względu na wysoką potrzebę szybkości i relatywnie niskie ryzyko operacyjne na terenach słabo zaludnionych. Drony są wykorzystywane do transportu leków, szczepionek, próbek krwi do badań, organów do przeszczepu oraz drobnej aparatury medycznej (np. defibrylatorów). Umożliwiają dostawy na obszary odizolowane: na przykład dostawy na wyspy (np. testy DHL na wyspę Juist), tereny góryste lub rejony odcięte przez klęski żywiołowe [2, 6].

Jednym z najbardziej rozwiniętych przykładów wykorzystania dronów w logistyce ostatniej mili w Polsce jest działalność firmy **Farada Group**. Spółka ta realizuje regularne, komercyjne dostawy medyczne dronami, transportując m.in. próbki laboratoryjne pomiędzy placówkami medycznymi. Drony tej firmy obsługują trasy m.in. na odcinkach Warszawa–Sochaczew oraz Warszawa–Pułtusk, wykonując codzienne loty dla laboratoriów diagnostycznych (np. ALAB Laboratoria).

Zastosowanie dronów w logistyce ostatniej mili przybiera zróżnicowane formy – od w pełni autonomicznych dostaw bezpośrednich, przez modele hybrydowe, aż po wyspecjalizowane zastosowania medyczne. Rozwój tych rozwiązań wskazuje na ich rosnący potencjał w zwiększaniu efektywności, skracaniu czasu dostaw oraz uzupełnianiu tradycyjnych systemów dystrybucji, szczególnie w warunkach miejskich i trudno dostępnych.

2.2. Przykłady wdrożeń dronów na przykładzie przedsiębiorstw

Dynamiczny rozwój technologii bezzałogowych statków powietrznych doprowadził do powstania licznych projektów pilotażowych oraz komercyjnych wdrożeń dronów w logistyce ostatniej mili na świecie. Najwięksi gracze technologiczni i logistyczni rozwijają własne systemy dostaw, testując różne modele

operacyjne oraz rozwiązania techniczne. Do najbardziej rozpoznawalnych przykładów należą inicjatywy Amazon, Zipline oraz Wing.

Amazon Prime Air. Program jest rozwijany i testowany głównie w Stanach Zjednoczonych. Pierwsza w pełni autonomiczna dostawa komercyjna odbyła się w grudniu 2016 roku. System wykorzystuje drony, które pobierają paczki o masie do 2,5 kg bezpośrednio z linii pakowania w centrum dystrybucyjnym. Urządzenia wykonują autonomiczny lot na podstawie GPS i dostarczają przesyłkę w promieniu 16 km [8, 10].

Zipline. Firma odniosła spektakularny sukces w Ruandzie, gdzie stworzyła system transportu medycznego. Istnieją plany rozszerzenia działalności na Kanadę i USA. Zipline wykorzystuje autonomiczne drony do transportu jednostek krwi do transfuzji oraz leków. System łączy pełną autonomizację lotu z nadzorem człowieka, co pozwala na dynamiczną zmianę wielkości i częstotliwości dostaw w sytuacjach kryzysowych [7, 9].

Wing (Alphabet). Usługa jest testowana i wdrażana w Australii (jako pierwsza otrzymała tam zgodę na działanie jako spółka lotnicza) oraz w USA we współpracy z siecią Walmart. Wykorzystuje drony hybrydowe typu *tail-sitter*, które startują pionowo, a w powietrzu lecą poziomo jak płatowce, co zwiększa ich zasięg i prędkość. Przesyłki są opuszczane na linie bez konieczności lądowania maszyny u klienta [8, 10].

Zastosowanie dronów w logistyce, szczególnie na etapie ostatniej mili, wiąże się z istotnymi korzyściami operacyjnymi. Umożliwiają one znaczące skrócenie czasu dostawy dzięki poruszaniu się najkrótszą trasą w przestrzeni powietrznej oraz omijaniu ograniczeń infrastruktury drogowej. W dłuższej perspektywie mogą również przyczynić się do redukcji kosztów operacyjnych oraz zwiększenia efektywności procesów logistycznych. Szczególnie istotna jest ich rola w obsłudze obszarów trudno dostępnych, gdzie tradycyjny transport jest utrudniony lub nieefektywny. Jednocześnie rozwój automatyzacji i integracji systemów bezzałogowych wskazuje na rosnący potencjał tej technologii w usprawnianiu całego łańcucha dostaw.

2.3. Wpływ na środowisko

Wykorzystanie dronów w logistyce miejskiej stanowi istotny element koncepcji *smart city*, przyczyniając się do budowy zrównoważonego i nowoczesnego systemu transportowego. Bezzałogowe jednostki powietrzne oferują szereg korzyści w zakresie ochrony środowiska oraz usprawnienia funkcjonowania aglomeracji [10].

Drony są napędzane energią elektryczną, co czyni je środkiem transportu przyjaznym środowisku, niezależnym od podaży ropy naftowej i wpisującym się w trendy e-mobilności.

Logistyka ostatniej mili odpowiada za 40% wszystkich emisji związanych z handlem elektronicznym, a zastąpienie tradycyjnych furgonetek dostawczych dronami pozwoliłoby mocno zredukować emisję CO₂, tlenków azotu i cząstek stałych w miastach oraz zmniejszyć liczbę pojazdów [5].

Wdrożenie dostaw dronami może doprowadzić do istotnego odciążenia transportu drogowego poprzez zmniejszenie liczby samochodów kurierskich poruszających się po drogach. Ponadto rozwiązany zostałby problem z miejscem do parkowania, co jest jedną z przyczyn zatorów. Drony docierałyby do miejsc trudno osiągalnych dla samochodów dostawczych [5, 8].

3. BARIERY WDROŻENIA I PRZYSZŁOŚĆ DRONÓW W LOGISTYCE

3.1. Bariery technologiczne i operacyjne

Mimo dynamicznego rozwoju technologia dronów (UAV) na obecnym etapie ma wiele ograniczeń technicznych, które stanowią barierę dla ich powszechnego wykorzystania w logistyce.

Choć technologia bezzałogowych statków powietrznych rozwija się niezwykle dynamicznie i budzi duże nadzieje, to ze względu na powyższe bariery techniczne, prawne oraz kwestie bezpieczeństwa, nadal nie jest ona w pełni dojrzała do masowego i powszechnego wdrożenia w logistyce miejskiej.

Bariery wdrożenia przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Bariery wdrożenia dronów w logistyce

Bariery i ograniczenia	Wy tłumaczenie
Ograniczony czas lotu i pojemność baterii	Determinuje to czas lotu oraz jego zasięg. Na ten moment osiągalne są jedynie loty maks. 40–50 minutowe [6, 14]
Niewielki udźwig dronów	Większość dronów jest zaprojektowana do przenoszenia jedynie lekkich, jednostkowych przesyłek o masie od 1,2 do maks. 2,5–3 kg [1, 5]
Wrażliwość na warunki atmosferyczne	Drony są nieodporne na zmienną pogodę, jak silny wiatr, śnieg, deszcz... Zjawiska te stanowią realne ryzyko uszkodzenia maszyny [8]
Problemy z niezawodnością systemów autonomicznych.	Istnieje ryzyko awarii technicznych, które w obszarach zaludnionych stanowią ryzyko podczas upadku drona [9]

Źródło: opracowanie własne.

3.2. Bariery prawne, ekonomiczne i społeczne

Wykonywanie lotów poza zasięgiem wzroku operatora (ang. *Beyond Visual Line of Sight* – BVLOS) jest kluczowe dla logistyki, ale wiąże się z rygorystycznymi wymogami technologicznymi i operacyjnymi. Wymaga to od dronów zdolności autonomicznego unikania kolizji (ang. *detect & avoid*) oraz stałej łączności z centrum sterowania. W wielu krajach, np. w USA, loty komercyjne są nadal mocno ograniczone do zasięgu wzroku pilota (VLOS) [1, 6].

Ponadto prawo lotnicze powinno nadążać za postępem technologicznym, co jest procesem trudnym i powolnym. Obecnie przepisy są ujednolicane w ramach Unii Europejskiej i zostały wdrożone w dniu 31.12.2020 roku, co miało ułatwić stworzenie wspólnego rynku i zasad wykorzystania dronów w transporcie komercyjnym [17]. Polska była jednym z pierwszych krajów na świecie, który wprowadził kompletne ramy prawne dla komercyjnego wykorzystania dronów już w 2013 roku. Pieczę nad rynkiem dronów komercyjnych w Polsce pełni Urząd Lotnictwa Cywilnego. ULC stawia wiele wymogów operatorom dronów komercyjnych, którzy muszą posiadać świadectwo kwalifikacji (UAVO), co wiąże się z koniecznością odbycia szkoleń, zdania egzaminów państwowych oraz posiadania ubezpieczenia OC [17]. Obowiązkowa jest również rejestracja dronów (np. powyżej 250 g w Polsce i USA) [5], co pozwala na identyfikację osób naruszających prawo. Ponadto zakup profesjonalnego sprzętu, systemów sterowania oraz ich utrzymanie i serwisowanie

wymagają znacznych nakładów inwestycyjnych. Do tego dochodzą koszty wdrożenia infrastruktury technologicznej, integracji systemów oraz szkolenia personelu, co sprawia, że wejście na rynek usług dronowych jest kapitałochłonne, zwłaszcza dla mniejszych firm. Choć w dłuższej perspektywie drony mogą przyczynić się do redukcji kosztów dostaw, początkowe nakłady inwestycyjne pozostają wysokie [3]. Wdrożenie dronów do użytku regulowanego napotyka również bariery społeczne, takie jak obawy o bezpieczeństwo, prywatność oraz ograniczona akceptacja społeczna, związana z brakiem bezpośredniego kontaktu z kurierem [5].

PODSUMOWANIE

Logistyka ostatniej mili stanowi końcowy i zarazem najdroższy i najtrudniejszy do optymalizacji etap łańcucha dostaw, generujący od 13 do nawet 75% całkowitych kosztów logistycznych. W obliczu dynamicznego rozwoju *e-commerce* oraz narastających problemów miejskich, takich jak kongestia i emisja CO₂, autonomiczne drony (UAV) są postrzegane jako kluczowa technologia, mogąca zrewolucjonizować ten sektor. Do najważniejszych korzyści z wdrożenia bezzałogowych pojazdów powietrznych należą: znaczące skrócenie czasu dostawy (nawet do 30 minut), obniżenie kosztów operacyjnych w długim okresie oraz możliwość dotarcia do trudno dostępnych lub odizolowanych lokalizacji. Ponadto drony, jako pojazdy elektryczne, przyczyniają się do redukcji zanieczyszczeń powietrza i hałasu na terenach zurbanizowanych. Mimo ogromnego potencjału masowe wykorzystanie dronów napotyka liczne bariery prawne i ekonomiczne, nie sprzyjają jemu też wysokie koszty wdrożenia, brak odpowiedniej infrastruktury, cyberbezpieczeństwo, akceptacja społeczna. Przyszłość logistyki miejskiej wskazuje na model hybrydowy, w którym drony będą wspierać tradycyjny transport kołowy oraz na pełną integrację z systemami *Smart City*, wykorzystującą sztuczną inteligencję i sieć 5G do optymalizacji procesów. Drony nie zastąpią całkowicie kurierów, lecz staną się ich niezbędnym, ekologicznym i efektywnym uzupełnieniem, trwale zmieniając organizację dostaw w ramach ostatniej mili.

LITERATURA

1. Berner B., Chojnacki J., *Wykorzystanie dronów w logistyce w Polsce – szanse i ograniczenia*, Politechnika Koszalińska, Koszalin 2016.
2. Cichosz M., *Drony w logistyce ostatniej mili – innowacje wspierające zrównoważoną logistykę*, Oficyna Wydawnicza SGH, Warszawa 2020.
3. Guzowski M., Szpilko D., *Nowoczesne technologie i rozwiązania wspierające logistykę ostatniej mili w e-commerce*, Politechnika Białostocka, Białystok 2025.
4. Kaczmarek M., Koy K., *Potencjał wykorzystania dronów w transporcie bezpośrednim*, Uniwersytet Gdański, Gdańsk 2024.
5. Kalembe P., *Współczesne zastosowania nowych technologii w sektorze TSL*, Uniwersytet Opolski, Opole 2017.
6. Mazur M., Wiśniewski A., *Clarity from above. PwC global report on the commercial applications of drone technology*, 2016.
7. Moroz M., *Innowacyjne sposoby przewyższania problemu „ostatniej mili” w e-commerce*, Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu, Wrocław 2010.
8. Orłowska M., Orłowski D., *Wyzwania i możliwości zastosowania dronów w logistyce miejskiej*, Akademia Sztuki Wojennej, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2024.
9. Ramiszewska A., Czubaszek M., *Wykorzystanie dronów w logistyce w Polsce, szanse i ograniczenia*, Politechnika Białostocka, Białystok 2021.
10. Szymczak M., *Perspektywy rozwoju technologii i rynku dronów*, [w:] Gajewski J., Paprocki W., Pieriegud J. (red.), *E-mobilność: wizje i scenariusze rozwoju*, Centrum Myśli Strategicznych, Gdańsk 2017.

Źródła internetowe

11. <https://about.ups.com/us/en/newsroom/press-releases/innovation-driven/ups-flight-forward-adds-new-aircraft.html> (dostęp 05.05.2026).
12. <https://dlapilota.pl/wiadomosci/polska/inicjatywa-sprawdzamy-raport-o-bezzałogowych-systemach-powietrznych-w-polsce#main-content> (dostęp 01.04.2026).
13. <https://efl.pl/pl/biznes-i-ty/artykuly/logistyka-ostatniej-mili-wyzwania-i-rozwiazania> (dostęp 01.04.2026).
14. <https://lot.dhl.com/saving-lives-one-drone-delivery-at-a-time/> (dostęp 01.04.2026).
15. <https://nedcon.pl/blog/zastosowanie-dronow-w-logistyce/> (dostęp 03.04.2026).
16. https://tek.info.pl/article/1828/komercyjne_medyczne_przeloty_dronami_codziennie_w_polsce (dostęp 05.05.2026).
17. <https://ulc.gov.pl/drony/informacje-ogolne>.
18. <https://univdatos.com/pl/reports/drone-warfare-market> (dostęp 03.04.2026).
19. <https://www.easa.europa.eu/en> (dostęp 03.04.2026).

20. <https://www.mckinsey.com/industries/aerospace-and-defense/our-insights/future-air-mobility-blog/commercial-drone-deliveries-are-demonstrating-continued-momentum-in-2023>(dostęp 01.04.2026).
21. <https://www.mecalux.pl/blog/ostatnia-mila-czyli-dostawa-zamowien-do-klientow> (dostęp 03.04.2026).

AUTONOMOUS DRONES IN OPTIMISING THE LAST MILE – CHALLENGES, OPPORTUNITIES, THE FUTURE

This article analyses the potential for using autonomous drones to optimise last-mile logistics, which is one of the most costly and problematic stages of the supply chain. The first section outlines the nature and main challenges of the last mile, including high operating costs, congestion in urban areas, and the negative environmental impact of transport. It then describes autonomous drone (UAV) technology, with particular emphasis on their operation, control systems and supporting infrastructure. The subsequent section of the article discusses the practical applications of drones in deliveries, presenting selected operational models and examples of implementations carried out by logistics and technology companies. The main benefits of their use were also highlighted, such as reduced delivery times, increased operational efficiency and reduced emissions. The final section of the article focuses on identifying barriers to implementation, including technological, regulatory, economic and social constraints. Finally, possible directions for the development of drone technology are outlined, along with an assessment of its potential in the context of future logistics systems and smart city concepts. The aim of this article is to analyse the potential for using autonomous drones to optimise last-mile logistics, with particular emphasis on the potential benefits, limitations and future development directions of this technology.

Keywords: transport, efficiency, modern, drones, optimisation, last mile.

CYFROWE BLIŹNIAKI W LOGISTYCE. JAK SYMULACJE ZMNIEJSZAJĄ RYZYKO I OPTYMALIZUJĄ OPERACJE

W opracowaniu przedstawiono istotę technologii cyfrowych bliźniaków oraz wyzwania związane z ich wdrażaniem, skupiając się na wykorzystaniu symulacji do optymalizacji operacji magazynowych. Wskazano, że wirtualne kopie systemów podnoszą efektywność przedsiębiorstw w ramach nowoczesnego łańcucha dostaw. Celem artykułu jest wykazanie kluczowego znaczenia Digital Twins dla współczesnej logistyki.

Słowa kluczowe: cyfrowe bliźniaki, cyfryzacja, efektywność, łańcuch dostaw, magazyny, optymalizacja, symulacja.

WSTĘP

Logistyka jest jednym z najważniejszych kluczowych obszarów funkcjonowania przedsiębiorstw. Wpływa na ich efektywność operacyjną oraz szybką zdolność do przystosowania się do zmieniających warunków rynkowych. Globalizacja łańcuchów dostaw, rozwój handlu elektronicznego oraz rosnące wymagania klientów powodują, że przedsiębiorstwa logistyczne nieustannie poszukują nowych narzędzi wspierających zarządzanie operacjami. Tradycyjne metody planowania i optymalizacji procesów coraz częściej okazują się niewystarczające w obliczu rosnącej niepewności i dużej zmienności otoczenia, dlatego w grę wchodzi cyfrowe bliźniaki, które tworzą nowy punkt widzenia w logistyce.

1. ISTOTA CYFROWYCH BLIŹNIAKÓW W LOGISTYCE

Jednym z najbardziej innowacyjnych rozwiązań, wspierających zarządzanie logistyką, jest koncepcja cyfrowych bliźniaków. Cyfrowy bliźniak stanowi wirtualne odwzorowanie rzeczywistego systemu, które umożliwia jego analizę, symulację oraz

optymalizację w czasie rzeczywistym. Integracja danych operacyjnych, technologii symulacyjnych oraz narzędzi analitycznych pozwala przedsiębiorstwom lepiej rozumieć procesy oraz podejmować trafniejsze i bardziej świadome decyzje.

1.1. Charakterystyka cyfrowych bliźniaków

Cyfrowy bliźniak (ang. *digital twin*) jest wirtualną kopią procesu, maszyny bądź magazynu, która dokładnie odwzorowuje zachowanie swojego odpowiednika w rzeczywistości. Oznacza to, że każdy detal rzeczywistego obiektu – od czasu przetwarzania paczek po reakcje maszyn na zmiany w obciążeniu – można na bieżąco obserwować i efektywnie analizować w środowisku cyfrowym [6]. Dzięki integracji technologii, takich jak Internet Rzeczy (IoT) ze sztuczną inteligencją oraz zaawansowanymi narzędziami symulacyjnymi, odblokowują się możliwości nie tylko takie jak odwzorowanie rzeczywistości, ale również monitorowanie, analizowanie i optymalizowanie jej działania w czasie rzeczywistym [1]. Cyfrowe bliźniaki pozwalają przedsiębiorstwom lepiej rozumieć zachowanie systemów logistycznych, identyfikować wąskie gardła oraz przewidywać skutki podejmowanych decyzji. Stanowią cyfrową reprezentację rzeczywistego obiektu, procesu lub systemu, która umożliwia jego analizę w środowisku wirtualnym. W przeciwieństwie do tradycyjnych modeli symulacyjnych cyfrowy bliźniak jest systemem dynamicznym, który stale się aktualizuje na podstawie danych napływających z rzeczywistości, co umożliwia uzyskanie bardzo wysokiego poziomu odwzorowania rzeczywistych procesów.

1.2. Elementy cyfrowego bliźniaka

W logistyce cyfrowe bliźniaki mogą odwzorowywać różne elementy systemu, takie jak magazyny, centra dystrybucyjne, środki transportu czy całe łańcuchy dostaw. Ich zastosowanie pozwala na dokładną i kompleksową analizę przepływów materiałowych oraz informacyjnych. Stanowi to jedną z podstaw do podejmowania decyzji operacyjnych i strategicznych. Dodatkowo umożliwia ciągłe monitorowanie procesów oraz szybsze reagowanie na możliwe zakłócenia w systemie logistycznym.

Kluczowe elementy cyfrowych bliźniaków są następujące:

- model fizyczny – linia produkcyjna, magazyn, sieć transportowa bądź nawet całe miasto stanowiące rzeczywisty obiekt;

- model cyfrowy – wirtualne odtworzenie rzeczywistego obiektu, umożliwiające analizę, symulację oraz testy różnych scenariuszy;
- warstwa danych – odpowiada za zbieranie oraz aktualizację danych pochodzących z różnych źródeł;
- mechanizmy analityczne – narzędzia i algorytmy służące do przetwarzania danych, przeprowadzania analiz oraz prognozy przyszłych zdarzeń;
- urządzenia IoT i czujniki – narzędzia umożliwiające zbieranie danych w czasie rzeczywistym poprzez monitorowanie parametrów pracy systemu i otoczenia;
- technologie *Big Data* – wspierają przechowywanie, przetwarzanie i analizę danych;
- interfejs użytkownika – umożliwia prezentację danych w czytelnej formie, łatwej do interpretacji i wykorzystania w praktyce.

Wymienione elementy współpracują ze sobą, wspólnie tworząc spójny i efektywny system, który pozwala na odwzorowanie rzeczywistości w środowisku cyfrowym oraz efektywne zarządzanie procesami logistycznymi [1, 4].

2. WYZWANIA WDROŻENIA CYFROWYCH BLIŹNIAKÓW

Wdrażanie cyfrowych bliźniaków w logistyce i magazynowaniu nie jest procesem prostym i wiąże się z wieloma trudnościami, które mogą znacząco wpłynąć na jego przebieg. Jednym z głównych problemów jest brak specjalistów posiadających odpowiednie i aktualne kompetencje. Technologia ta wymaga wiedzy z różnych obszarów, takich jak analiza danych, systemy informatyczne czy rozwiązania oparte na Internecie Rzeczy, dlatego znalezienie osób, które łączą wszystkie te umiejętności, bywa dużym wyzwaniem. W praktyce często oznacza to konieczność dodatkowego szkolenia pracowników lub korzystania z usług firm zewnętrznych, co zwiększa koszty i wydłuża cały proces wdrożenia.

Kolejną istotną kwestią jest integracja cyfrowego bliźniaka z już funkcjonującymi systemami w przedsiębiorstwie. Wiele firm korzysta z różnych narzędzi informatycznych, które nie zawsze są ze sobą w pełni kompatybilne. Połączenie ich w jeden spójny system, który będzie odwzorowywał rzeczywistość na bieżąco, wymaga nie tylko odpowiednich technologii, ale też dobrze zaplanowanej architektury danych. Często wiąże się to z koniecznością modernizacji istniejącej

infrastruktury, a nawet częściowej wymiany systemów, co generuje dodatkowe koszty oraz ryzyko zakłóceń w działalności operacyjnej.

Również nie można zapomnieć o aspektach organizacyjnych. Wdrożenie cyfrowych bliźniaków zmienia sposób podejmowania decyzji – większe znaczenie zaczynają mieć dane i analizy, a mniejsze intuicja czy doświadczenie pracowników. Dla wielu organizacji jest to duża zmiana, wymagająca dostosowania kultury pracy oraz podniesienia kompetencji zespołu. Dochodzą do tego kwestie związane z jakością danych oraz ich bezpieczeństwem. System działa poprawnie tylko wtedy, gdy dane są aktualne i wiarygodne, a jednocześnie odpowiednio zabezpieczone przed zagrożeniami. Dodatkowym utrudnieniem jest możliwy brak jednolitych standardów wdrażania tej technologii, co sprawia, że firmy często muszą wypracowywać własne rozwiązania, które uwzględnią nie tylko aspekty techniczne, ale także organizacyjne i finansowe [3].

3. KORZYŚCI ZASTOSOWANIA CYFROWYCH BLIŹNIAKÓW

Zastosowanie cyfrowych bliźniaków w logistyce daje przedsiębiorstwom realne możliwości usprawnienia wielu procesów i lepszego zarządzania operacjami. Jedną z najważniejszych zalet jest możliwość stworzenia cyfrowego odwzorowania rzeczywistego systemu, które pozwala dokładnie i szczegółowo przeanalizować jego działanie. Dzięki temu łatwiej zauważyć miejsca, w których pojawiają się problemy lub nieefektywności, a następnie wprowadzić odpowiednie zmiany. Duże znaczenie ma również możliwość monitorowania procesów w czasie rzeczywistym – firmy mogą na bieżąco śledzić przepływ towarów, poziom zapasów czy pracę urządzeń, co zwiększa kontrolę nad całym łańcuchem logistycznym [3].

Istotną zaletą cyfrowych bliźniaków jest także możliwość testowania różnych scenariuszy bez ingerencji w rzeczywiste operacje. Przedsiębiorstwo może sprawdzić, jak zmiana organizacji magazynu lub sposobu realizacji dostaw wpłynie na efektywność, bez ryzyka popełnienia kosztownych błędów w praktyce. Takie podejście pozwala podejmować decyzje w bardziej świadomy sposób i opierając się na danych, a nie tylko na doświadczeniu. Dodatkowo cyfrowe bliźniaki umożliwiają przewidywanie pewnych zdarzeń, na przykład potencjalnych awarii, co pozwala reagować z wyprzedzeniem i skutecznie unikać przestojów.

Nie bez znaczenia jest także wpływ tej technologii na obsługę klienta. Lepsze planowanie procesów oraz większa przejrzystość działań sprawiają, że zamówienia mogą być realizowane szybciej, sprawniej i bardziej terminowo. Firmy są też w stanie szybciej reagować na zmieniające się warunki rynkowe i potrzeby klientów. W efekcie cyfrowe bliźniaki nie tylko poprawiają efektywność wewnętrzną przedsiębiorstwa, ale również pomagają budować jego przewagę konkurencyjną [3].

Dodatkowo Digital Twin w logistyce umożliwia również symulacje scenariuszy „*what-if*”, w których można przewidzieć skutki decyzji strategicznych i operacyjnych. Przykładowo, przedsiębiorstwo może zasymulować wpływ zmiany układu magazynu, zwiększenia liczby pracowników czy wprowadzenia nowego systemu sortowania paczek, zanim podejmie rzeczywiste kroki, bez narażania realnych zasobów na straty. To nie tylko zwiększa efektywność, ale także minimalizuje nieprzewidziane koszty, ryzyko błędów, zwiększa przepustowość oraz ułatwia planowanie.

4. FLEXSIM JAKO ŚRODOWISKO TESTOWE

Oprogramowanie FlexSim stanowi zaawansowane środowisko do modelowania, symulacji zdarzeń dyskretnych (DES) i wizualizacji obecnych oraz przyszłych procesów logistycznych. Jego głównym zadaniem jest optymalizacja przepływów materiałowych i informacyjnych w przedsiębiorstwie, co pozwala skutecznie identyfikować i eliminować tzw. wąskie gardła (ang. *bottlenecks*), ograniczać straty czasowe, a w efekcie redukować niepotrzebne koszty operacyjne oraz zwiększać przychody [2]. W aspekcie nowoczesnej logistyki FlexSim działa jako pełnoprawny cyfrowy bliźniak (*digital twin*).

Kluczową przewagą tego narzędzia jest możliwość zasilania modelu rzeczywistymi i aktualnymi danymi operacyjnymi, a także uwzględnienie zmienności procesów za pomocą rozkładów prawdopodobieństwa (np. różny czas pakowania, nieregularne dostawy) [7]. Pozwala to na przeprowadzanie precyzyjnych eksperymentów symulacyjnych i analiz typu „*what-if*” (co by było, gdyby?). Inżynierowie mogą testować różne warianty układu przestrzennego czy wielkości floty wózków widłowych, a wybór ostatecznego rozwiązania nie opiera się na intuicji, lecz na twardych danych i wskaźnikach KPI, wygenerowanych przez program.

Z punktu widzenia zarządzania ryzykiem największą wartością wirtualnego testowania jest to, że odbywa się ono całkowicie bez przerywania rzeczywistych działań operacyjnych. Przedsiębiorstwa mogą bezpiecznie „przećwiczyć” scenariusze kryzysowe, takie jak nagłe wzrosty zamówień czy awarie sprzętu. Pozwala to na proaktywne podejmowanie decyzji inwestycyjnych, chroniąc firmę przed tzw. przeinwestowaniem lub wdrożeniem nieefektywnych procesów na żywym organizmie.

Dodatkowo, architektura programu FlexSim znacząco obniża próg wejścia w zaawansowane symulacje. Wykorzystanie intuicyjnego interfejsu typu „przeciągnij i upuść” (*drag-and-drop*), kompletna biblioteka obiektów 3D z wbudowaną logiką oraz wizualne środowisko do tworzenia schematów sprawiają, że sporządzanie modeli nie wymaga zaawansowanego kodowania ani specjalistycznej wiedzy w początkowej fazie projektu. Przekłada się to na znacznie krótszy czas potrzebny do stworzenia dokładnego, działającego prototypu, co jest kluczowe w dynamicznie zmieniającej się branży TSL.

5. STUDIUM PRZYPADKU

Aby zobrazować opisane wcześniej możliwości środowiska FlexSim w praktyce, opracowano wirtualny model wycinka operacji magazynowych. Zamiast modelować cały obiekt, wzięto pod uwagę najbardziej wrażliwy etap łańcucha przepływu, czyli strefę przyjęcia, identyfikacji i etykietowania oraz strefę wysyłki. Taki wybór pozwala w przejrzysty sposób zaobserwować zjawisko tworzenia się „wąskich gardeł” przy wzmożonym ruchu oraz przetestować metody ich optymalizacji w wirtualnym świecie.

W strukturze zbudowanego układu logistycznego wykorzystano podstawowe obiekty logiki dyskretniej programu:

- źródło (*source*) – reprezentujące strefę przyjęć; jest to punkt początkowy, w którym generowane są nowe przesyłki wchodzące do symulowanego systemu;
- bufor (*queue*) – obszar tymczasowego składowania poza paletą; obserwacja tego obiektu w trakcie symulacji pozwala wizualnie ocenić ryzyko powstawania potencjalnych zatorów;

- stanowisko pracy (*processor*) – odzwierciedla kluczowy proces kompletacji i pakowania zamówień; przepływający towar spędza tu określony czas przeznaczony na realizację operacji;
- ujście (*sink*) – stanowi strefę wyjścia i ostateczny punkt końcowy symulacji.

Każdy z powyższych obiektów w środowisku FlexSim został wyposażony w odpowiednie parametry czasowe, co pozwalało na realistyczną symulację przepływu ładunków w magazynie. Dzięki temu możliwe było odwzorowanie rzeczywistych zależności między strefami, przeanalizowanie różnych parametrów i testowanie scenariuszy optymalizacyjnych w pełni bezpiecznych dla przedsiębiorstwa.

5.1. Scenariusz bazowy

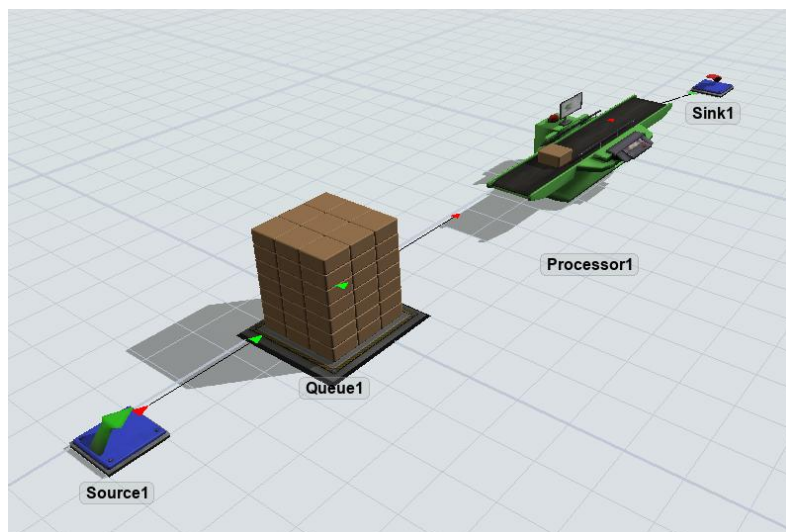
W modelu przyjęto stałe parametry wejściowe w celu weryfikacji jego przepustowości. Strefa wejścia generuje dokładnie jedną paczkę co 10 sekund. Następnie ładunek trafia do obszaru buforowego, gdzie oczekuje na zwolnienie zasobów stanowiska pracy.

W analizowanym wariantcie proces identyfikacji i oznakowania paczki na stanowisku trwa 15 sekund. Po zakończeniu tych operacji jednostka ładunkowa opuszcza symulowany układ, trafiając do strefy ujścia. Taki model umożliwia dokładną obserwację całego cyklu pracy i analizę czasu przebywania ładunku w poszczególnych strefach.

5.2. Symulacja ryzyka

Możliwość wcześniejszego zasymulowania pozwala wirtualnie zaplanować przepustowość i na przykład zaimplementować nowe stanowiska pracy. Zestawienie przyjętych wartości czasowych stanowi podstawę do przeprowadzenia testu obciążeniowego. Po uruchomieniu symulacji w programie FlexSim natychmiast ujawnia się kluczowy błąd w przepustowości zaprojektowanego układu, ponieważ stanowisko pracy potrzebuje na obsługę przesyłki więcej czasu niż wynosi odstęp między kolejnymi dostawami. System z założenia staje się niewydolny.

Symulacja tego scenariusza obniża to ryzyko: w strefie buforowej zaczyna lawinowo rosnąć kolejka oczekujących paczek, tworząc zator. W rzeczywistym magazynie skutkowałoby to całkowitym paraliżem strefy pakowania i opóźnieniami w wysyłce.



Rys. 1. Wizualizacja zjawiska "wąskiego gardła" w środowisku FlexSim przed optymalizacją

Źródło: opracowanie własne w programie FlexSim 2025.

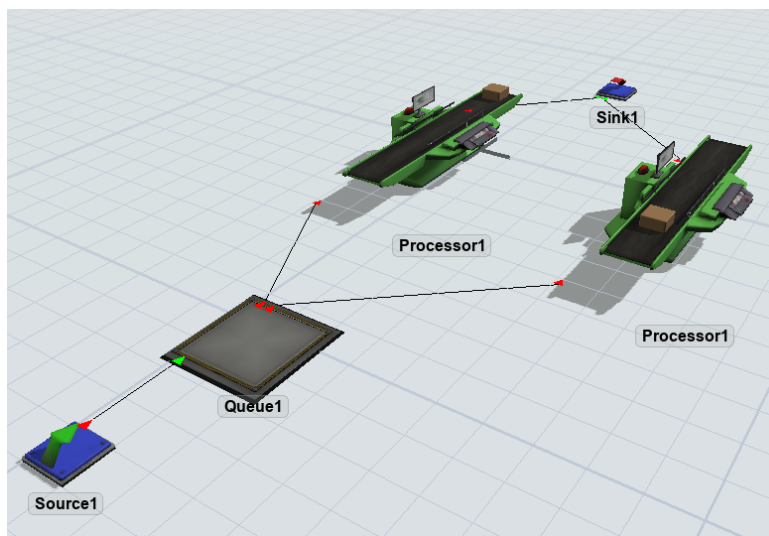
5.3. Optymalizacja procesu

W celu wyeliminowania zidentyfikowanego zatoru i przywrócenia płynności przepływu została przeprowadzona optymalizacja modelu cyfrowego (scenariusz *To-Be*). Zamiast fizycznie ingerować w rzeczywisty układ lub testować rozwiązania kosztowną metodą prób i błędów, w środowisku FlexSim zasymulowano rozbudowę strefy kompletacji. Do modelu wprowadzono drugie, równoległe stanowisko pracy, charakteryzujące się identycznym czasem obsługi, wynoszącym 15 sekund.

Strumień przesyłek, napływających ze strefy buforowej, został w programie rozdzielony na oba stanowiska. Dzięki temu zabiegowi sumaryczna przepustowość systemu uległa podwojeniu. Średni czas potrzebny na obsłużenie napływających zamówień stał się krótszy niż fakt ich wejścia do systemu.

Ponowne uruchomienie symulacji w sposób jednoznaczny udowodniło skuteczność wprowadzonego rozwiązania. Kolejka w strefie odkładczej przestała się piętrzyć, a przepływ jednostek ładunkowych do strefy ujścia stał się w pełni płynny i stabilny. Ten etap eksperymentu doskonale obrazuje, jak technologia cyfrowego bliźniaka ułatwia podejmowanie trafnych decyzji menedżerskich. Pozwala ona na bezkosztowne potwierdzenie, że inwestycja w dodatkowy sprzęt lub zatrudnienie

nowego pracownika faktycznie rozwiąże problem operacyjny, minimalizując tym samym ryzyko nietrafionych wydatków.



Rys. 2. Efekt implementacji drugiego stanowiska pakowania - eliminacja zatorów

Źródło: opracowanie własne w programie FlexSim 2025.

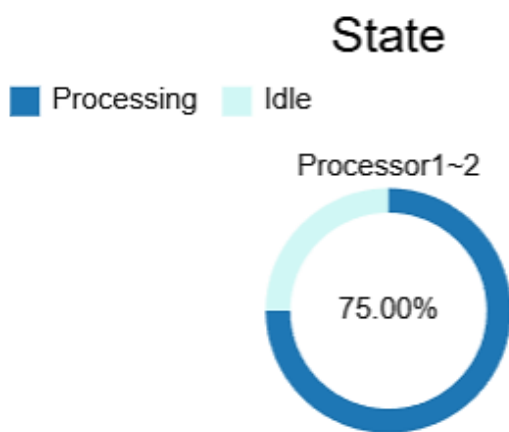
6. ANALIZA WYNIKÓW

Weryfikacja skuteczności wprowadzonych zmian wymagała oparcia się na twardych danych liczbowych. W tym celu zostały wykorzystane wbudowane w środowisko FlexSim narzędzia analityczne (*Dashboards*), które pozwalają na monitorowanie kluczowych wskaźników efektywności (KPI) układu w czasie rzeczywistym. Analizie poddano przede wszystkim stan utylizacji maszyn oraz wielkość kolejki w strefie buforowej.

Warto w tym miejscu podkreślić przewagę nad tradycyjnymi metodami. Standardowe, statystyczne arkusze kalkulacyjne (np. MS Excel) nie byłyby w stanie w pełni zdiagnozować i zwizualizować tego problemu. Excel potrafi obliczyć średnią przepustowość z suchych wzorów, ale nie zilustruje przestrzennego blokowania się paczek na obszarze roboczym ani nie odda dynamiki narastania

zatoru w czasie, co czyni cyfrowego bliźniaka 3D znacznie dokładniejszym narzędziem analitycznym.

Porównanie statystyk wygenerowanych dla scenariusza bazowego oraz zoptymalizowanego wykazuje diametralną różnicę w wydajności systemu. W modelu początkowym wskaźniki wyraźnie wskazywały na przeciążenie pojedynczego stanowiska pracy, które pracowało bez przerwy (100% *Processing*), podczas gdy strefa odkładcza ulegała przepełnieniu.



Rys. 3. Wykres kołowy przedstawiający stan obciążenia po optymalizacji, wygenerowany w programie FlexSim

Źródło: opracowanie własne w programie FlexSim 2025.

Implementacja drugiego stanowiska w scenariuszu *To-Be* doprowadziła do zrównoważenia obciążenia i upłynnienia pracy. Analiza wykresów stanu po optymalizacji dla obu procesorów wykazuje, że czas ich aktywnego działania (*Processing*) utrzymuje się na poziomie 75%. Pozostałe 25% stanowi naturalny czas oczekiwania na kolejny ładunek (*Idle*). Pojawienie się tych krótkich pauz jest zjawiskiem wysoce pożądanym w logistyce, oznacza bowiem, że system odzyskał bufor bezpieczeństwa, posiada zapas wydajności i jest teraz w stanie elastycznie wchłonąć ewentualne, nagłe skoki liczby zamówień. Równolegle, metryki dotyczące strefy buforowej potwierdziły całkowitą redukcję zatoru, co matematycznie i wizualnie udowadnia sukces przeprowadzonej optymalizacji.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzony na potrzeby niniejszego artykułu eksperyment symulacyjny jednoznacznie potwierdza tezę, że technologia cyfrowych bliźniaków stanowi nieocenione wsparcie we współczesnym zarządzaniu logistyką. Wykorzystanie oprogramowania FlexSim pozwoliło na bezpieczne i wizualne zidentyfikowanie ryzyka operacyjnego – w tym przypadku krytycznie wąskiego gardła – bez ingerowania w fizyczne procesy i narażania przedsiębiorstwa na potencjalne straty.

Zbudowanie wirtualnej repliki systemu udowodniło, że symulacje dynamiczne mają ogromną przewagę nad tradycyjnymi, statycznymi metodami analitycznymi. Pozwalają one na uwzględnienie parametru czasu oraz przestrzeni, co błyskawicznie obnaża wady w przepustowości układu oraz pokazuje ukryte zależności między procesami. Przetestowanie scenariusza naprawczego typu „*what-if*” potwierdziło, że dodanie drugiego stanowiska pracy skutecznie eliminuje zatory i przywraca płynność przepływów, jednocześnie zwiększając efektywność całego systemu.

Wnioski płynące z modelu dowodzą, że cyfrowe bliźniaki nie tylko optymalizują codzienne operacje magazynowe, ale przede wszystkim służą jako tarcza ochronna dla budżetu firmy. Umożliwiają one podejmowanie świadomych, popartych danymi decyzji inwestycyjnych, redukując ryzyko nietrafionych wydatków i kosztów testowania w świecie rzeczywistym praktycznie do zera. Każda zmiana w fizycznym łańcuchu dostaw powinna być dziś poprzedzona jej weryfikacją w cyfrowym świecie.

LITERATURA

1. https://akademiacyfryzacji.gs1.pl/baza_wiedzy/cyfrowy-blizniak/.
2. <https://flexsim.pl/>.
3. <https://kotrak.com/pl/blog/cyfrowy-blizniak-w-logistyce-i-magazynie/>.
4. <https://ruj.uj.edu.pl/server/api/core/bitstreams/975cf627-4e48-476a-8461-d011dc894760/content>.
5. <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/8/2663>.
6. <https://www.mecalux.pl/blog/cyfrowy-blizniak-przyklady>.
7. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK605499>.
8. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2950550X24000256>.

DIGITAL TWINS IN LOGISTICS. HOW SIMULATIONS REDUCE RISK AND OPTIMIZE OPERATIONS

The study presents the essence of digital twin technology and the challenges related to its implementation, focusing on the use of simulation to optimize warehouse operations. It indicates that virtual copies of systems enhance enterprise efficiency within the modern supply chain. The aim of the article is to demonstrate the crucial importance of Digital Twins for modern logistics.

Keywords: digital twins, digitalization, effectiveness, supply chain, warehouses, optimization, simulation.

WPŁYW GEOPOLITYKI NA ZMIANY TRAS KONTENEROWCÓW NA ŚWIECIE

Wpływ sytuacji geopolitycznej na funkcjonowanie światowej żeglugi kontenerowej oraz globalnych łańcuchów dostaw stał się jednym z istotnych wyzwań współczesnego transportu morskiego. Szczególne znaczenie mają strategiczne szlaki handlowe, takie jak Kanał Sueski i Morze Czerwone, których zakłócenia wpływają na funkcjonowanie handlu międzynarodowego. Blokada Kanału Sueskiego przez statek „Ever Given” oraz kryzys na Morzu Czerwonym doprowadziły do zmian tras żeglugowych, wydłużenia czasu transportu, wzrostu kosztów przewozów oraz zwiększenia emisji gazów cieplarnianych. Celem artykułu jest ukazanie wpływu współczesnych kryzysów geopolitycznych na transport morski oraz światową gospodarkę.

Słowa kluczowe: transport morski, żegluga kontenerowa, Kanał Sueski, Morze Czerwone, geopolityka, globalne łańcuchy dostaw, emisja CO₂, handel międzynarodowy.

WSTĘP

Transport morski odgrywa obecnie kluczową rolę w funkcjonowaniu światowej gospodarki oraz międzynarodowej wymiany handlowej. Rozwój konteneryzacji oraz wzrost znaczenia przewozów intermodalnych sprawiły, że żegluga morska stała się podstawowym elementem globalnych łańcuchów dostaw. Szczególne znaczenie mają przewozy kontenerowe, realizowane pomiędzy Europą, Azją oraz Ameryką Północną, ponieważ umożliwiają one szybki przepływ towarów na skalę międzynarodową. Jednocześnie rozwój transportu morskiego przyczynił się do wzrostu znaczenia portów, terminali przeładunkowych oraz strategicznych szlaków handlowych, które stanowią podstawę funkcjonowania handlu światowego [1, 3].

Współczesna żegluga kontenerowa opiera się na funkcjonowaniu kluczowych punktów transportowych, takich jak Kanał Sueski, Kanał Panamski czy Morze Czerwone. Zakłócenia występujące na tych trasach bardzo szybko wpływają na funkcjonowanie światowych łańcuchów dostaw, powodując opóźnienia transportowe, wzrost kosztów przewozów oraz problemy związane z dostępnością towarów. Szczególnie widoczne stało się to podczas blokady Kanału Sueskiego

przez statek „Ever Given” oraz kryzysu na Morzu Czerwonym, które doprowadziły do konieczności zmiany tras żeglugowych i kierowania statków wokół Przylądka Dobrej Nadziei [6, 7, 8].

Zmiany tras statków wpłynęły nie tylko na wydłużenie czasu transportu i wzrost kosztów działalności armatorów, ale również na zwiększenie zużycia paliwa oraz emisji gazów cieplarnianych, generowanych przez transport morski. W ostatnich latach coraz większe znaczenie mają działania, związane z ograniczaniem negatywnego wpływu żeglugi na środowisko naturalne oraz realizacją celów klimatycznych.

Transport pozostaje jednym z sektorów, generujących znaczną część emisji gazów cieplarnianych, dlatego organizacje międzynarodowe oraz państwa coraz częściej wdrażają regulacje, związane z dekarbonizacją transportu i poprawą efektywności energetycznej statków [2, 4, 5]. Międzynarodowa Organizacja Morska (IMO) w 2023 roku przyjęła strategię, zakładającą stopniowe osiągnięcie neutralności klimatycznej w żegludze międzynarodowej do 2050 roku. Dokument przewiduje rozwój technologii niskoemisyjnych, zwiększenie wykorzystania paliw alternatywnych oraz poprawę efektywności energetycznej statków. Coraz większą rolę odgrywają również innowacyjne rozwiązania, związane z ograniczeniem zużycia paliwa oraz redukcją emisji CO₂ w transporcie morskim [5, 9].

Celem artykułu jest ukazanie wpływu współczesnych kryzysów geopolitycznych na funkcjonowanie światowej żeglugi kontenerowej oraz przedstawienie ekonomicznych i środowiskowych skutków zmian tras żeglugowych. Szczególną uwagę poświęcono znaczeniu strategicznych szlaków handlowych, kryzysowi na Morzu Czerwonym oraz wpływowi wydłużania tras statków na koszty transportu, funkcjonowanie globalnych łańcuchów dostaw oraz emisję gazów cieplarnianych [5, 6, 7].

1. ZNACZENIE STRATEGICZNYCH SZLAKÓW MORSKICH W TRANSPORCIE KONTENEROWYM

Rozwój konteneryzacji znacząco wpłynął na funkcjonowanie światowego transportu morskiego oraz organizację całych łańcuchów dostaw. Wprowadzenie standaryzowanych kontenerów pozwoliło usprawnić operacje przeładunkowe, skrócić czas transportu oraz ograniczyć koszty związane z obsługą ładunków. Dzięki

temu możliwe stało się lepsze połączenie różnych gałęzi transportu, zarówno morskiego, kolejowego, jak i drogowego. Rozwój przewozów kontenerowych przyczynił się również do modernizacji portów i terminali kontenerowych, które zaczęły odgrywać kluczową rolę w międzynarodowej wymianie handlowej [1]. Konteneryzacja doprowadziła także do dużych zmian w funkcjonowaniu portów morskich i organizacji transportu. Tradycyjne porty, w których przeładunki wykonywano ręcznie, zostały zastąpione nowoczesnymi terminalami, wyposażonymi w place składowe oraz specjalistyczne urządzenia przeładunkowe. Dzięki zastosowaniu kontenerów znacząco skrócono czas postoju statków w portach oraz obniżono koszty transportu. Rozwój przewozów kontenerowych przyczynił się do wzrostu globalizacji handlu, ponieważ umożliwił szybki i tańszy transport towarów pomiędzy kontynentami [3].

Współczesny transport morski opiera się na rozbudowanej współpracy pomiędzy armatorami oraz operatorami, działającymi na tych samych szlakach żeglugowych. W praktyce funkcjonują tzw. konferencje żeglugowe, czyli porozumienia zawierane przez przewoźników morskich, obsługujących określone trasy lub grupy tras [10]. Ich celem jest przede wszystkim wspólne ustalanie warunków przewozu, organizacja połączeń oraz koordynacja działalności na wybranych szlakach morskich.

Rozwój globalnego handlu oraz rosnąca konkurencja sprawiły, że przedsiębiorstwa żeglugowe zaczęły coraz częściej współpracować również w zakresie przewozów multimodalnych. Armatorzy nie zajmują się już wyłącznie samym transportem morskim, ale oferują kompleksowe usługi logistyczne, obejmujące zarówno transport morski, jak i lądowy. W efekcie współczesne przedsiębiorstwo armatorskie pełni nie tylko funkcję przewoźnika, ale i organizatora całego procesu transportowego [10].

Należy zauważyć, że współpraca między armatorami obejmuje obecnie nie tylko ustalanie stawek przewozowych, ale także organizację tras, częstotliwości rejsów czy zdolności przewozowej statków. Coraz większe znaczenie mają także alianse strategiczne, które pozwalają ograniczać koszty działalności oraz zwiększać efektywność obsługiwanych połączeń. Współpraca tego typu wpływa bezpośrednio na funkcjonowanie najważniejszych światowych szlaków handlowych i pokazuje, jak silnie transport morski zależy od sytuacji gospodarczej oraz politycznej [10].

Transport morski od wielu lat pozostaje jednym z najważniejszych elementów światowej gospodarki i międzynarodowej wymiany handlowej. Dzięki możliwości

przewozu licznych ilości ładunków na duże odległości stał się podstawą funkcjonowania globalnych łańcuchów dostaw oraz rozwoju handlu pomiędzy kontynentami. Współczesna gospodarka w dużym stopniu opiera się na regularnych przewozach realizowanych drogą morską, ponieważ umożliwiają one dostarczanie surowców, półproduktów oraz gotowych produktów do niemal każdego regionu świata.

Znaczenie transportu morskiego wynika przede wszystkim z jego wysokiej efektywności kosztowej. Statki kontenerowe są w stanie przewozić tysiące kontenerów jednocześnie, co pozwala ograniczyć koszt transportu pojedynczego ładunku w porównaniu z innymi gałęziami transportu, szczególnie transportem lotniczym. Rozwój nowoczesnych jednostek oraz infrastruktury portowej umożliwił zwiększenie skali przewozów oraz usprawnienie obsługi ładunków, co przyczyniło się do dalszego wzrostu znaczenia żeglugi kontenerowej w handlu międzynarodowym [1, 10].

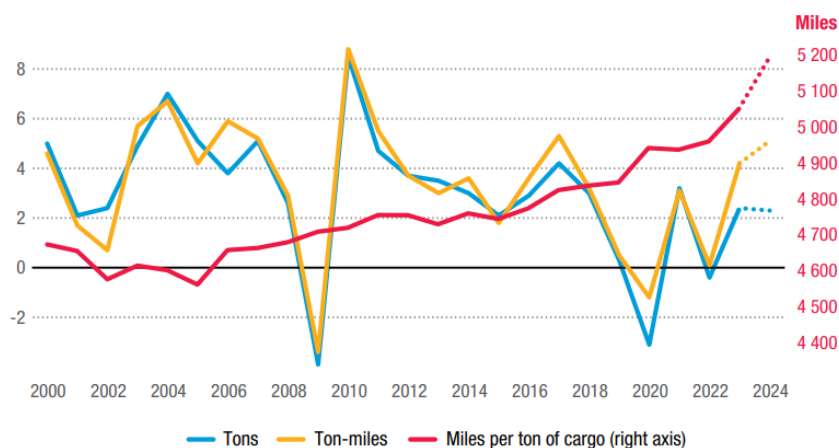
Rysunek 1 przedstawia zmiany w światowym handlu morskim w latach 2000–2024. Pokazano na nim wzrost przewozów morskich liczonych zarówno w tonach, jak i w tonomilach, czyli z uwzględnieniem długości tras transportowych. Widoczne jest, że w ostatnich latach handel morski rozwijał się nie tylko pod względem ilości przewożonych ładunków, ale również długości pokonywanych tras. Szczególnie zauważalne stało się to po 2022 roku, kiedy wzrost tonomili był większy niż wzrost samych przewozów liczonych w tonach. Oznacza to, że statki zaczęły pokonywać dłuższe dystanse, co wiązało się m.in. z zakłóceniami na światowych szlakach handlowych oraz koniecznością zmiany tras żeglugowych [7].

W ostatnich latach transport morski coraz silniej odczuwa skutki napięć geopolitycznych, zmian klimatycznych oraz zakłóceń pojawiających się na kluczowych szlakach handlowych.

Według raportu UNCTAD światowy handel morski osiągnął w 2023 roku poziom 12,292 mln ton, co oznacza wzrost o 2,4% w porównaniu z rokiem poprzednim. Jednocześnie zauważalny stał się wzrost długości tras przewozowych, spowodowany m.in. sytuacją na Morzu Czerwonym, wojną w Ukrainie oraz ograniczeniami występującymi w Kanale Panamskim [7].

Utrzymujące się napięcia geopolityczne, problemy w łańcuchach dostaw oraz ekstremalne zjawiska pogodowe wpływały na funkcjonowanie transportu morskiego i zwiększały niestabilność rynku. W rezultacie handel morski, liczony w tonomilach, rozwijał się szybciej niż przewozy liczone wyłącznie w tonach, co wskazuje

na wydłużanie tras transportowych i większe odległości pokonywane przez statki handlowe [7].



Rys. 1. Zmiany w światowym handlu morskim oraz wydłużanie tras transportowych w latach 2000–2024

Źródło: [7].

Współczesne szlaki morskie opierają się na kilku strategicznych punktach transportowych, określanych często jako „wąskie gardła” światowego handlu. Do najważniejszych należą m.in. Kanał Sueski, Kanał Panamski oraz cieśnina Malakka. Ich znaczenie wynika przede wszystkim z możliwości znacznego skrócenia tras przewozowych oraz ograniczenia kosztów transportu. Zakłócenia występujące w tych miejscach przyczyniają się do funkcjonowania globalnych łańcuchów dostaw, powodując opóźnienia, wzrost kosztów frachtu oraz problemy z dostępnością towarów [6, 7].

Rosnące znaczenie strategicznych punktów transportowych sprawia, że światowa żegluga staje się coraz bardziej podatna na różnego rodzaju zakłócenia. Kanał Sueski oraz Kanał Panamski pełnią funkcję kluczowych połączeń, skracających czas transportu i ograniczających koszty przewozów, jednak wszelkie problemy, występujące na tych trasach, bardzo szybko wpływają na funkcjonowanie globalnych łańcuchów dostaw. W raporcie podkreślono, że zakłócenia na Morzu Czerwonym doprowadziły do omijania Kanału Sueskiego przez wiele statków i kierowania ich wokół Przylądka Dobrej Nadziei, co wydłużyło czas transportu oraz zwiększyło

koszty operacyjne armatorów. Zmiany te wpływają również na wzrost zużycia paliwa oraz emisji dwutlenku węgla, ponieważ dłuższe trasy wymagają większej liczby dni rejsu i utrzymywania odpowiednich harmonogramów dostaw.

Jednocześnie transport morski pozostaje podstawowym elementem światowego handlu, a jego stabilne funkcjonowanie ma kluczowe znaczenie dla gospodarki globalnej oraz ciągłości międzynarodowych przepływów towarowych [7]. Kanał Sueski, który stanowi najkrótsze połączenie morskie pomiędzy Europą a Azją, łączy Morze Śródziemne z Morzem Czerwonym i umożliwia przepływ tysięcy statków handlowych rocznie. Dzięki jego wykorzystaniu możliwe jest skrócenie drogi transportowej o kilka tysięcy kilometrów w porównaniu z trasą prowadzącą wokół Afryki przez Przylądek Dobrej Nadziei. Ma to bezpośredni wpływ na czas dostaw, zużycie paliwa oraz koszty działalności armatorów [6, 7].

Istotne znaczenie ma również cieśnina Malakka, która stanowi najkrótsze połączenie pomiędzy Oceanem Indyjskim a Oceanem Spokojnym. Szlak ten jest szczególnie ważny dla transportu pomiędzy państwami Azji Wschodniej a Europą i Bliskim Wschodem. Ze względu na bardzo duże natężenie ruchu oraz strategiczne położenie obszar ten jest jednak szczególnie podatny na różnego rodzaju zakłócenia, takie jak problemy geopolityczne, warunki pogodowe czy zagrożenia dla bezpieczeństwa żegluga [7].

Z kolei Kanał Panamski, który łączy Ocean Atlantycki z Oceanem Spokojnym, umożliwia skrócenie transportu pomiędzy wschodnim i zachodnim wybrzeżem Ameryki, odgrywając istotną rolę w przewozach między Azją a Stanami Zjednoczonymi. W ostatnich latach coraz większym problemem stają się jednak ograniczenia związane ze zmianami klimatycznymi oraz spadkiem poziomu wody, które wpływają na przepustowość kanału i możliwości obsługi statków [6, 7].

Istotną rolę w funkcjonowaniu transportu morskiego odgrywają również porty morskie, które pełnią funkcję najważniejszych węzłów logistycznych światowego handlu. To właśnie w portach odbywa się przeładunek kontenerów oraz organizacja dalszego transportu drogowego, kolejowego lub śródlądowego. Rozwój nowoczesnych terminali kontenerowych oraz systemów logistycznych pozwolił zwiększyć efektywność obsługi statków i skrócić czas realizacji przewozów. W efekcie współczesne porty stały się nie tylko miejscami przeładunku towarów, ale także kluczowymi elementami globalnych sieci logistycznych.

Wraz z rozwojem globalizacji rosła również ranga strategicznych szlaków żeglugowych, które umożliwiają sprawne połączenie największych rynków świata.

Szczególne znaczenie mają trasy łączące Europę, Azję oraz Amerykę Północną, ponieważ to na nich koncentruje się największy ruch kontenerowy. Funkcjonowanie tych szlaków ma bezpośredni wpływ na stabilność handlu światowego, dlatego wszelkie zakłócenia pojawiające się na głównych trasach transportowych bardzo szybko oddziałują na sytuację gospodarczą oraz działalność przedsiębiorstw na całym świecie [6, 7].

2. KRYZYSY GEOPOLITYCZNE I ZMIANY TRAS KONTENEROWCÓW

Koniec 2023 roku przyniósł kolejne poważne zakłócenia w światowym transporcie morskim, związane z sytuacją bezpieczeństwa na Morzu Czerwonym. Ataki przeprowadzane przez rebeliantów Huti na statki handlowe doprowadziły do ograniczenia ruchu przez Kanał Sueski oraz zmusiły największych armatorów kontenerowych do zmiany dotychczasowych tras przewozowych. W efekcie wiele jednostek zaczęło omijać Morze Czerwone i kierować się wokół Przylądka Dobrej Nadziei, co znacząco wydłużyło czas transportu pomiędzy Azją a Europą. Zmiana tras wpłynęła bezpośrednio na funkcjonowanie globalnych łańcuchów dostaw. Według danych Reutersa wydłużenie rejsów wynosiło średnio od 10 do 14 dni, co zmusiło operatorów do angażowania większej liczby statków w celu utrzymania regularności serwisów kontenerowych. Dłuższe trasy przełożyły się również na wzrost zużycia paliwa, kosztów operacyjnych oraz emisji dwutlenku węgla. Szacowano, że emisje generowane przez statki obsługujące trasę Azja – Europa mogły wzrosnąć nawet o ponad 40% w porównaniu z sytuacją sprzed kryzysu [6, 8].

Wzrost kosztów transportu oraz wydłużenie czasu dostaw przełożyły się także na problemy w funkcjonowaniu całych łańcuchów logistycznych. Przekierowanie dużej liczby statków doprowadziło do przeciążenia części portów oraz ograniczenia dostępnej przepustowości światowej floty kontenerowej. Jednocześnie dłuższe trasy spowodowały większe zużycie paliwa oraz wzrost emisji dwutlenku węgla, co dodatkowo utrudnia realizację celów związanych z dekarbonizacją transportu morskiego [8].

Skutki kryzysu zaczęły być odczuwalne również poza sektorem transportowym. W raporcie wskazano, że wzrost kosztów przewozów i opóźnienia dostaw mogły przyczyniać się do wzrostu cen towarów oraz ponownego nasilenia presji

inflacyjnej. Szczególnie narażone okazały się branże motoryzacyjna, elektroniczna oraz energetyczna, które w dużym stopniu opierają się na regularnych dostawach, realizowanych drogą morską [8].

Rosnąca liczba ataków na statki handlowe spowodowała, że część największych światowych przedsiębiorstw transportowych i energetycznych zaczęła czasowo wstrzymywać rejsy przez Morze Czerwone. Decyzję o zawieszeniu transportu przez ten region podjęły m.in. koncern BP oraz najwięksi operatorzy kontenerowi, wskazując przede wszystkim na kwestie bezpieczeństwa załóg i statków. W efekcie coraz więcej jednostek skierowano na alternatywną trasę wokół Afryki [8].

2.1. Kryzys na Morzu Czerwonym

Zakłócenia na Morzu Czerwonym wpłynęły także na wzrost stawek frachtowych oraz pogorszenie punktualności dostaw. Dłuższe rejsy spowodowały zmniejszenie dostępnej przepustowości światowej floty kontenerowej, ponieważ większa liczba statków pozostawała przez dłuższy czas w trasie. Problemy te zaczęły oddziaływać nie tylko na połączenia między Azją a Europą, ale również na funkcjonowanie portów przeładunkowych oraz innych globalnych serwisów żeglugowych. Kryzys na Morzu Czerwonym bardzo szybko wpłynął na funkcjonowanie światowego handlu oraz globalnych łańcuchów dostaw. Ze względu na zagrożenie dla bezpieczeństwa żeglugi wielu armatorów zdecydowało się na omijanie Kanału Sueskiego i kierowanie statków wokół Przylądka Dobrej Nadziei. Zmiana tras spowodowała wydłużenie rejsów nawet o kilkanaście dni oraz znaczący wzrost kosztów transportu morskiego. Według przedstawionych danych stawki frachtowe dla kontenerów wzrosły z poziomu około 1900–2400 dolarów nawet do 10 000 dolarów za kontener 40-stopowy [6, 8].

Zakłócenia na Morzu Czerwonym uwiaryściły również, jak duże znaczenie dla światowego handlu posiada Kanał Sueski. Szlak ten odpowiada za około 12% globalnego handlu i stanowi jedno z najważniejszych połączeń pomiędzy Azją a Europą. W raporcie podkreślono, że skierowanie statków wokół Afryki wydłużyło trasę o około 3000–3500 mil morskich oraz zwiększyło czas transportu średnio o około 10 dni. Problemy te zaczęły wpływać nie tylko na przewoźników morskich, ale również na funkcjonowanie europejskich portów oraz przedsiębiorstw uzależnionych od regularnych dostaw towarów z Azji [8].

Kryzys na Morzu Czerwonym jest uznawany za jedno z najpoważniejszych zakłóceń we współczesnym transporcie morskim. Napięcia w regionie nasiliły się po ataku Hamasu na Izrael w październiku 2023 roku, kiedy rebelianci Huti zaczęli przeprowadzać ataki na statki handlowe, przepływające przez cieśninę Bab al-Mandab oraz Morze Czerwone. W krótkim czasie sytuacja zaczęła wpływać nie tylko na bezpieczeństwo żeglugi, ale również na funkcjonowanie światowego handlu i globalnych łańcuchów dostaw. Szczególnie istotne znaczenie ma położenie Morza Czerwonego oraz Kanału Sueskiego, stanowiących jedno z głównych połączeń pomiędzy Europą a Azją. Przez Kanał Sueski przechodzi około 12–15% światowego handlu oraz blisko jedna trzecia globalnego transportu kontenerowego. Według danych przedstawionych w artykule przed rozpoczęciem kryzysu przez kanał przepływało średnio około 1500 statków handlowych miesięcznie [6, 8].

Rosnące zagrożenie dla bezpieczeństwa żeglugi sprawiło, że największe linie kontenerowe, m.in. Maersk, MSC czy Hapag-Lloyd, zaczęły ograniczać przepływ statków przez Morze Czerwone i kierować jednostki wokół Przylądka Dobrej Nadziei. Zmiana trasy spowodowała wydłużenie rejsów pomiędzy Szanghajem a Rotterdamem nawet o około 4575 mil morskich oraz około 12 dodatkowych dni podróży. Przekierowanie statków wpłynęło również na funkcjonowanie światowej floty kontenerowej. Aby utrzymać regularność połączeń i tygodniowe serwisy, armatorzy byli zmuszeni angażować większą liczbę jednostek. Według danych przedstawionych w artykule obsługa typowego serwisu Azja – Europa wymagała nawet dwóch dodatkowych statków w porównaniu z trasą przez Kanał Sueski [6].

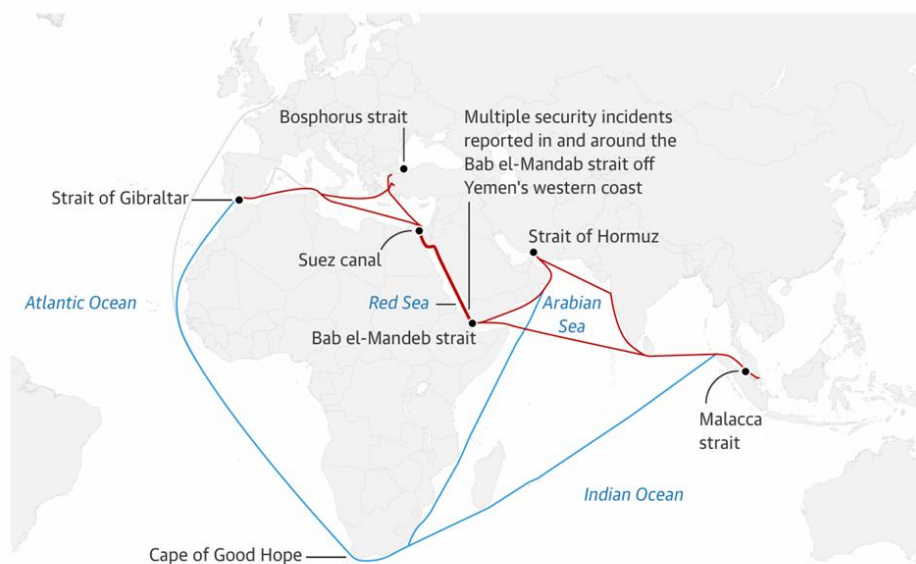
Mapa na rysunku 2 przedstawia najważniejsze szlaki żeglugowe przebiegające przez Morze Czerwone oraz strategiczne punkty transportowe, wykorzystywane w światowym handlu morskim. Zaznaczono na niej główne trasy, prowadzące przez Kanał Sueski, cieśninę Bab al-Mandab oraz cieśninę Malakka, które odgrywają kluczową rolę w przewozach pomiędzy Europą a Azją. Widoczne są również alternatywne trasy, wykorzystywane przez statki w sytuacji zakłóceń bezpieczeństwa na Morzu Czerwonym [8].

Na mapie pokazano, że w wyniku zagrożeń występujących w rejonie cieśniny Bab al-Mandab część armatorów zaczęła kierować statki wokół Przylądka Dobrej Nadziei. Oznacza to znaczne wydłużenie tras transportowych oraz konieczność pokonywania większych odległości pomiędzy Europą a Azją. Zmiany te wpływają bezpośrednio na wydłużenie czasu dostaw, wzrost kosztów przewozów oraz większe zużycie paliwa przez statki handlowe. Mapa dobrze pokazuje również, jak duże

znaczenie dla światowej żeglugi mają strategiczne „wąskie gardła” transportowe, których zakłócenie może oddziaływać na funkcjonowanie globalnych łańcuchów dostaw [8].

Red Sea shipping routes

■ Core route ■ Secondary route ● Choke point



Guardian graphic. Source: Guardian research

Rys. 2. Główne i alternatywne szlaki żeglugowe przez Morze Czerwone oraz strategiczne punkty transportowe światowego handlu

Źródło: [8].

Kryzys bardzo szybko przełożył się także na wzrost kosztów transportu morskiego. Autorzy wskazują, że stawki frachtowe na trasie Azja – Europa wzrosły w ciągu kilku tygodni o ponad 300%. Dodatkowo armatorzy zaczęli wprowadzać specjalne dopłaty, związane z sytuacją na Morzu Czerwonym, obejmujące m.in. opłaty za ryzyko wojenne, wyższe koszty paliwa oraz zakłócenia operacyjne [6, 8].

Zmiany tras statków oraz wydłużenie czasu dostaw wpływają również na działalność przedsiębiorstw produkcyjnych. Problemy z terminowym dostarczaniem komponentów doprowadziły do czasowego wstrzymywania produkcji w części

zakładów przemysłowych, szczególnie w branży motoryzacyjnej. W artykule wskazano m.in. na ograniczenia produkcji w fabrykach Tesli oraz Volvo, które były związane z opóźnieniami dostaw, realizowanych drogą morską. Kryzys na Morzu Czerwonym pokazał, jak silnie światowa gospodarka jest uzależniona od stabilnego funkcjonowania strategicznych szlaków morskich. Zakłócenia występujące w jednym regionie bardzo szybko zaczęły oddziaływać na przewoźników, porty oraz przedsiębiorstwa na całym świecie, wpływając zarówno na koszty transportu, jak i ciągłość dostaw w międzynarodowym handlu [6].

Zakłócenia na Morzu Czerwonym bardzo szybko odbiły się także na światowym handlu, ponieważ szlak prowadzący przez Kanał Sueski odpowiada za znaczną część globalnych przewozów towarowych oraz transportu surowców energetycznych. Problemy bezpieczeństwa doprowadziły do wzrostu cen ropy naftowej i gazu ziemnego oraz zwiększenia niepewności na rynku transportowym. Jednocześnie wydłużenie tras statków spowodowało opóźnienia dostaw oraz dalszy wzrost kosztów przewozów kontenerowych [6].

Kryzys pokazał również, jak silnie światowa gospodarka uzależniona jest od stabilnego funkcjonowania strategicznych szlaków morskich i jak zakłócenia na ich trasach wpływają na przedsiębiorstwa produkcyjne, sektor energetyczny oraz międzynarodowe łańcuchy dostaw. W rezultacie wiele firm zostało zmuszonych do poszukiwania alternatywnych tras transportowych oraz wdrażania działań zwiększających odporność swoich systemów logistycznych na podobne kryzysy w przyszłości [8].

3. EKONOMICZNE I ŚRODOWISKOWE SKUTKI ZMIANY TRAS ŻEGLUGOWYCH

Zmiany tras żeglugowych oraz wydłużenie rejsów wpłynęły nie tylko na koszty transportu, ale również na środowisko naturalne. Transport morski odpowiada za znaczną część światowego handlu, jednocześnie stanowiąc jedno z głównych źródeł emisji gazów cieplarnianych w sektorze transportowym. Przemysł morski odpowiada za około 3% globalnej emisji dwutlenku węgla, dodatkowym zaś problemem pozostają emisje tlenków siarki oraz tlenków azotu, powstających podczas spalania paliw ciężkich. Wydłużenie tras statków, związane z omijaniem Morza Czerwonego i Kanału Sueskiego, spowodowało większe zużycie paliwa oraz wzrost emisji

zanieczyszczeń do atmosfery. Dłuższy czas rejsów oznacza konieczność zwiększonej eksploatacji jednostek oraz utrzymywania regularności połączeń przy wykorzystaniu większej liczby statków. W efekcie wzrasta emisja dwutlenku węgla, a także innych substancji szkodliwych, wpływających zarówno na jakość powietrza, jak i środowisko morskie [2].

Należy zauważyć, że emisje tlenków siarki i azotu mają negatywny wpływ na ekosystemy oraz zdrowie człowieka. Powstające w wyniku spalania paliw ciężkich związki przyczyniają się m.in. do tworzenia kwaśnych deszczów, zanieczyszczenia powietrza oraz degradacji środowiska wodnego. Problemem pozostają również zanieczyszczenia, powstające podczas eksploatacji statków, w tym wycieki paliw, ścieki oraz odpady trafiające do mórz i oceanów [2].

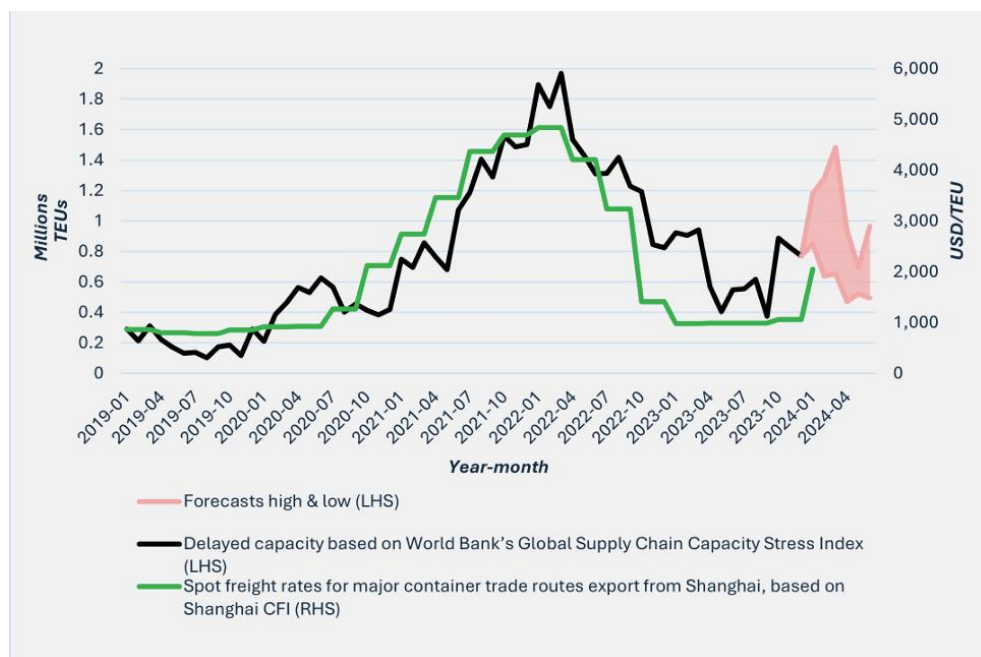
Rosnąca skala zagrożeń środowiskowych sprawia, że coraz większe znaczenie mają działania związane z ograniczaniem negatywnego wpływu transportu morskiego na środowisko. W odpowiedzi na rosnącą emisję zanieczyszczeń rozwijane są nowe technologie oraz rozwiązania, mające poprawić efektywność energetyczną statków i ograniczyć zużycie paliwa [2].

Rozwój technologii niskoemisyjnych staje się szczególnie istotny w kontekście wydłużania tras żeglugowych oraz rosnącego zużycia paliwa, wynikającego z kryzysów geopolitycznych. W efekcie armatorzy coraz częściej poszukują rozwiązań, pozwalających ograniczyć zarówno koszty eksploatacji statków, jak i wpływ transportu morskiego na środowisko [9].

Rysunek 3 przedstawia zależność pomiędzy opóźnieniami w globalnych łańcuchach dostaw a wysokością stawek frachtowych w transporcie kontenerowym w latach 2019–2024. Widoczne jest, że wraz ze wzrostem problemów, związanych z przepustowością i dostępnością transportu, rosły również ceny przewozów kontenerowych na najważniejszych światowych trasach handlowych. Największy wzrost zarówno opóźnień, jak i stawek frachtowych nastąpił w latach 2021–2022, kiedy światowy transport morski mierzył się z poważnymi zakłóceniami w funkcjonowaniu łańcuchów dostaw [8].

W kolejnych latach sytuacja zaczęła się stopniowo stabilizować, jednak wykres (rys. 3) pokazuje, że w 2024 roku ponownie pojawił się wzrost prognozowanych opóźnień oraz cen transportu kontenerowego. Zjawisko to związane jest m.in. z napięciami geopolitycznymi oraz problemami na strategicznych szlakach handlowych, które wymuszają wydłużanie tras rejsów i ograniczają dostępność statków. Wydłużony czas transportu wpływa bezpośrednio na zmniejszenie

przepustowości światowej floty kontenerowej, co prowadzi do dalszego wzrostu kosztów przewozów oraz niestabilności rynku transportowego [8].



Rys. 3. Wpływ zakłóceń w globalnych łańcuchach dostaw na stawki frachtowe w transporcie kontenerowym w latach 2019–2024

Źródło: [8].

3.1. Wpływ na emisję CO₂ i środowisko

Rosnąca skala emisji gazów cieplarnianych sprawiła, że Międzynarodowa Organizacja Morska (IMO) zaczęła wprowadzać działania, mające ograniczyć negatywny wpływ transportu morskiego na środowisko. Według danych IMO żegluga międzynarodowa odpowiada za około 2–3% światowej emisji dwutlenku węgla, dlatego sektor transportu morskiego został objęty strategią stopniowej redukcji emisji gazów cieplarnianych.

W 2023 roku IMO przyjęła zaktualizowaną strategię redukcji emisji, której głównym celem jest osiągnięcie neutralności klimatycznej w żegludze międzynaro-

dowej około 2050 roku. Dokument zakłada m.in. ograniczenie intensywności emisji CO₂, przypadającej na transportowaną jednostkę ładunku, oraz zwiększenie wykorzystania paliw i technologii niskoemisyjnych. Strategia przewiduje również stopniowe wdrażanie paliw alternatywnych oraz rozwój nowych rozwiązań technologicznych ograniczających zużycie paliwa przez statki. Coraz większe znaczenie przypisuje się także poprawie efektywności energetycznej statków.

Wśród działań wskazywanych przez IMO znajdują się m.in. optymalizacja prędkości rejsów, rozwój nowoczesnych systemów napędowych, wykorzystanie paliw takich jak LNG, metanol czy wodór oraz wdrażanie technologii wspomagających trasowanie (*routing*) statków i ograniczających zużycie energii.

Działania te nabierają szczególnego znaczenia w kontekście współczesnych kryzysów geopolitycznych, które doprowadziły do wydłużania tras żeglugowych i zwiększenia zużycia paliwa. Omijanie Morza Czerwonego oraz kierowanie statków wokół Przylądka Dobrej Nadziei powoduje wzrost emisji oraz utrudnia realizację celów klimatycznych wyznaczonych przez IMO. W efekcie konieczne są rozwiązania, pozwalające jednocześnie utrzymać ciągłość dostaw i ograniczać wpływ transportu morskiego na środowisko naturalne [5].

W odpowiedzi na rosnące problemy, związane z emisją gazów cieplarnianych, sektor transportu morskiego coraz częściej inwestuje w paliwa alternatywne oraz technologie ograniczające ślad węglowy. Według przedstawionych badań zastosowanie paliwa RMD 80 zamiast tradycyjnego paliwa MGO pozwoliło zmniejszyć emisję CO₂ o prawie 10%. Pokazuje to, że nawet częściowa zmiana stosowanych paliw może przyczynić się do ograniczenia negatywnego wpływu żeglugi na środowisko naturalne. Coraz większe znaczenie mają również rozwiązania, związane z wykorzystaniem LNG, wodoru, biopaliw czy napędów hybrydowych. Ich celem jest nie tylko ograniczenie emisji dwutlenku węgla, ale także zmniejszenie emisji tlenków siarki oraz azotu, które powstają podczas spalania tradycyjnych paliw okrętowych [9].

Transport pozostaje jednym z sektorów, mających największy wpływ na emisję gazów cieplarnianych w Unii Europejskiej. Według danych Parlamentu Europejskiego sektor transportowy odpowiada za około jedną czwartą całkowitej emisji CO₂ w UE, a mimo działań związanych z ochroną klimatu emisje w transporcie w ostatnich dekadach nadal rosły. W przeciwieństwie do wielu innych sektorów gospodarki transport pozostaje obszarem, w którym ograniczenie emisji jest

szczególnie trudne ze względu na stale rosnący handel międzynarodowy oraz zwiększający się ruch pasażerski i towarowy [4, 5].

Podkreślono również, że emisje generowane przez transport morski i lotniczy należą do najszybciej rosnących źródeł emisji gazów cieplarnianych. Rozwój handlu światowego oraz wzrost liczby przewozów doprowadziły do znaczącego zwiększenia ruchu morskiego, co bezpośrednio wpływa na poziom zużycia paliwa i emisję dwutlenku węgla. Pomimo poprawy efektywności energetycznej statków przewiduje się, że emisje pochodzące z żeglugi mogą w przyszłości nadal wzrastać.

Rosnąca presja związana z ograniczaniem emisji sprawia, że Unia Europejska oraz organizacje międzynarodowe coraz częściej wdrażają regulacje, mające przyspieszyć dekarbonizację transportu. Działania te obejmują m.in. rozwój systemów handlu emisjami, inwestycje w technologie niskoemisyjne oraz stopniowe zwiększanie udziału paliw alternatywnych w transporcie morskim. Szczególne znaczenie ma to obecnie w sytuacji kryzysów geopolitycznych, które prowadzą do wydłużania tras statków i dodatkowego wzrostu emisji generowanych przez żeglugę międzynarodową [4].

PODSUMOWANIE

Współczesny transport morski pozostaje jednym z najważniejszych elementów światowego handlu oraz globalnych łańcuchów dostaw. Rozwój przewozów kontenerowych oraz postępująca globalizacja sprawiły, że funkcjonowanie gospodarki światowej w dużym stopniu uzależnione jest od stabilności strategicznych szlaków handlowych oraz sprawnego działania transportu morskiego [1, 3].

Przeprowadzone rozważania pokazują, że kryzysy geopolityczne oraz zakłócenia, występujące na głównych trasach żeglugowych, mogą znacząco wpływać na funkcjonowanie światowej logistyki. Blokada Kanału Sueskiego przez statek „Ever Given” oraz kryzys na Morzu Czerwonym doprowadziły do konieczności omijania Kanału Sueskiego i kierowania statków wokół Przylądka Dobrej Nadziei. W rezultacie wydłużeniu uległ czas transportu, wzrosły koszty przewozów oraz zwiększyły się stawki frachtowe i problemy, związane z terminowością dostaw [6, 7, 8].

Zmiany tras żeglugowych wpłynęły również na środowisko naturalne. Wydłużenie rejsów spowodowało większe zużycie paliwa oraz wzrost emisji gazów

cieplarnianych, generowanych przez transport morski. Jednocześnie rosnąca presja, związana z ochroną klimatu, sprawia, że organizacje międzynarodowe oraz państwa coraz częściej wdrażają działania, mające ograniczyć wpływ żegluga na środowisko.

Szczególne znaczenie mają inwestycje w technologie niskoemisyjne, rozwój paliw alternatywnych oraz poprawa efektywności energetycznej statków [2, 4, 5, 9].

Współczesna żegluga morska stoi obecnie przed koniecznością pogodzenia efektywności ekonomicznej z wymaganiami środowiskowymi oraz potrzebą zwiększania odporności globalnych łańcuchów dostaw na przyszłe kryzysy. Dalszy rozwój transportu morskiego będzie w dużym stopniu zależał od zdolności sektora do ograniczania emisji gazów cieplarnianych, wdrażania nowoczesnych technologii oraz dostosowywania się do zmieniającej się sytuacji geopolitycznej i gospodarczej [5, 6, 9].

LITERATURA

1. Bartosiewicz A., *Transport morski kontenerów. Rola i znaczenie intermodalnych terminali przeładunkowych*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 2020.
2. Boratyńska P., *Zrównoważony rozwój transportu morskiego na rzecz ochrony środowiska*, [w:] Detyna B. (red.), *Młodzi logistycy w nauce*, Studenckie Zeszyty Naukowe Akademii Nauk Stosowanych Angelusa Silesiusa, 2025, nr 7, Wydawnictwo Naukowe Akademii Nauk Stosowanych Angelusa Silesiusa, Wałbrzych 2025.
3. Brzozowski M., *Morskie przewozy kontenerowe jako generator zmian*, Logistyka, 2011, nr 4.
4. European Environment Agency (EEA), *Transport and Environment Report 2023*, EEA Report, Kopenhaga 2023.
5. International Maritime Organization (IMO), *2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships*, Londyn 2023.
6. Notteboom T., Haralambides H., Cullinane K., *The Red Sea Crisis: Ramifications for Vessel Operations, Shipping Networks, and Maritime Supply Chains*, Maritime Economics & Logistics, 2024, vol. 26.
7. *Review of Maritime Transport 2024: Navigating Maritime Chokepoints*, United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD), United Nations, Genewa 2024.
8. *The Red Sea Crisis and Its Ripple Effect on Global Supply Chains and Sustainability*, 2024.
9. Zimny W., Liashuk V., *Alternatywne źródła statków a zrównoważony rozwój logistyki morskiej – studium przypadku na trasie Szwecja–Polska*, [w:] Detyna B. (red.), *Młodzi logistycy w nauce*, Studenckie Zeszyty Naukowe Akademii Nauk Stosowanych Angelusa Silesiusa, 2025, nr 7, Wydawnictwo Naukowe Akademii Nauk Stosowanych Angelusa Silesiusa, Wałbrzych 2025.

10. Zużewicz-Wiewiórowska I., *Konferencje żeglugowe w dobie przemian wspólnotowego prawa konkurencji*, Prawo Morskie, 2007, t. XXIII.

Źródła internetowe

11. <https://apnews.com/article/red-sea-ship-attacks-bp-yemen-houthis-dcece18717aa59648ff9a6b04fbc798c> (dostęp 05.05.2025).
12. <https://rmsolar.pl/transport-morski-jak-funkcjonuje-ten-kluczowy-sektor-gospodarki-swiatowej/> (dostęp 25.04.2025).
13. <https://slonecznasymfonia.pl/blog/transport-miedzynarodowy-morski-najwazniejsze-szlaki-handlowe/> (dostęp 25.04.2025).
14. <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20191129STO67756/emissions-from-planes-and-ships-facts-and-figures-infographic> (dostęp 05.05.2025).
15. <https://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/cutting-ghg-emissions.aspx> (dostęp 05.05.2025).
16. <https://www.reuters.com/sustainability/red-sea-crisis-forces-operators-use-more-container-ships-adding-emission-2024-04-10/> (dostęp 25.04.2025).

THE IMPACT OF GEOPOLITICS ON CHANGES IN CONTAINER SHIPPING ROUTES AROUND THE WORLD

The impact of the geopolitical situation on the functioning of global container shipping and global supply chains has become one of the major challenges facing modern maritime transport. Strategic trade routes, such as the Suez Canal and the Red Sea, are of particular importance, as disruptions to them affect the functioning of international trade. The blockage of the Suez Canal by the “Ever Given” and the crisis in the Red Sea have led to changes in shipping routes, longer transit times, increased freight costs and higher greenhouse gas emissions. The aim of this article is to highlight the impact of contemporary geopolitical crises on maritime transport and the global economy.

Keywords: maritime transport, container shipping, Suez Canal, Red Sea, geopolitics, global supply chains, CO₂ emissions, international trade.

Varvara Koziulia

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

LOGISTYKA HUMANITARNA W SYTUACJACH KRYZYSOWYCH JAKO ELEMENT ODPORNOŚCI ŁAŃCUCHÓW DOSTAW

W artykule przedstawiono teoretyczne podstawy odporności łańcuchów dostaw w warunkach kryzysowych oraz ich praktyczne zastosowanie w logistyce humanitarnej na przykładzie zbrojnego konfliktu na Ukrainie. Celem artykułu jest analiza mechanizmów organizacyjnych i technologicznych, wdrożonych na Ukrainie, w odpowiedzi na wyzwania logistyczne. Analizie poddano zarówno cyfrowe platformy zarządzania pomocą humanitarną, jak i fizyczne środki ochrony tras dostaw, obejmujące siatki antydronowe, systemy walki radioelektronicznej (REW) oraz awaryjne zasilanie generatorowe. Do systematycznej oceny mechanizmów zastosowano ramę analityczną IEOM. Zaprezentowane przykłady wskazują, że odporność humanitarnych łańcuchów dostaw w warunkach ekstremalnych wymaga integracji warstwy cyfrowej z fizyczną, a wypracowane rozwiązania mają charakter transferowalny i mogą stanowić punkt odniesienia dla systemów zarządzania kryzysowego innych państw.

Słowa kluczowe: logistyka humanitarna, odporność łańcucha dostaw, zarządzanie kryzysowe, cyfryzacja pomocy humanitarnej.

WSTĘP

Współczesne kryzysy zbrojne, klimatyczne oraz epidemiologiczne wywołują wyzwania logistyki humanitarnej, które wykraczają poza możliwości klasycznego zarządzania łańcuchami dostaw. W warunkach niepewności czasowych, zniszczonego środowiska infrastrukturalnego oraz wielopodmiotowego środowiska operacyjnego zaleca się wykorzystanie elastycznych rozwiązań o charakterze cyfrowym oraz odpornym [7]. Od 2022 roku na terenie Ukrainy, która podlega pełnoskalowemu atakowi zbrojnemu ze strony Rosji, obserwowana jest praktyczna realizacja innowacyjnej logistyki humanitarnej podczas aktywnego konfliktu zbrojnego. Wielkość oraz intensywność kryzysu spowodowały wdrożenie rozwiązań, które z perspektywy Polski oraz Europy mogą stać się nie tylko zapisem historycznym,

lecz także praktycznym punktem odniesienia do własnych planów reagowania kryzysowego.

1. TEORETYCZNE PODSTAWY ODPORNOŚCI ŁAŃCUCHÓW DOSTAW W WARUNKACH KRYZYSOWYCH

1.1. Pojęcie odporności łańcucha dostaw

Odporność łańcucha dostaw (ang. *supply chain resilience* – SCR) odnosi się do zdolności łańcuchów dostaw, w których znajdują się podmioty gospodarcze, m.in. do wchłaniania zewnętrznych wstrząsów, elastycznej adaptacji do zmian, a następnie szybkiego powrotu do pełnej sprawności w formie ewolucyjnej poprawy. W konwencjonalnej, inżynierskiej teorii odnosiła się ona do odzyskania stanu wyjściowego po wstrząsie, natomiast w paradygmacie nowszego pojmowania, inspirowanym ekologią oraz teorią systemów złożonych, wskazuje się w niej jednak na ewolucyjne zmiany strukturalne w stronę bardziej zrównoważonego, elastycznego formułowania łańcuchów dostaw. W ten sposób Christopher i Peck (2004) wprowadzili pojęcie odporności łańcuchów dostaw jako zdolności do funkcjonowania w stanie dobrobytu pomimo niewspółmiernych wstrząsów, wskazując na trzy podstawowe filary: widoczność, szybkość oraz elastyczność struktur organizacyjnych, w których możliwe są natychmiastowe wykrywanie zagrożeń i błyskawiczna reakcja [10].

Wskazane cechy pozwolą na rekonfigurację struktur relacyjnych w łańcuchach dostaw, a przede wszystkim nabiera to szczególnego znaczenia w niewspółmiernych, niespokojnych środowiskach globalnych, w których wskazuje się na pandemię oraz konflikty geopolityczne. Ponomarov i Holcomb (2009) definiują odporność łańcuchów dostaw jako zintegrowany wysiłek, który pozwala na utrzymanie kontroli nad zdolnościami dostawczymi w obliczu zakłóceń, obejmującej etapy przygotowania, reakcji i odbudowy [12].

1.2. Specyfika logistyki humanitarnej w porównaniu z komercyjną

Logistyka humanitarna została zdefiniowana przez Kembro i in. (2024) jako „zarządzanie logistyką i łańcuchem dostaw ukierunkowane na przygotowanie do kryzysu humanitarnego, reagowanie nań i odbudowę po nim, z celem ratowania życia i złagodzenia cierpienia dotkniętych populacji” [2].

Główne różnice między logistyką humanitarną a komercyjną polegają na kilku kwestiach. Przede wszystkim logistyka humanitarna nie ma na celu maksymalizacji zysków, zamiast tego skupia się na efektywnej alokacji zasobów, które ratują życie. Inną ważną różnicą jest niepewność, która jest integralną częścią logistyki humanitarnej – nikt nie wie, kiedy, gdzie i w jakim stopniu wystąpi kryzys [4]. Dodatkowo, w środowisku humanitarnym działają różne podmioty, takie jak rządy, organizacje pozarządowe, wolontariusze i instytucje międzynarodowe, co utrudnia koordynację i zarządzanie.

Powyższe różnice sprawiają, że mechanizmy wzmacniania odporności łańcuchów dostaw humanitarnych powinny być inne niż w środowiskach komercyjnych. Przede wszystkim kluczową rolę odgrywają: cyfryzacja danych i przepływów informacji, fizyczne zabezpieczenie tras dostaw, a także mechanizmy inkluzji podmiotów do zinstytucjonalizowanych rejestrów i systemów sprawozdawczości [8]. Z perspektywy europejskiej szczególnie istotne jest pytanie, na ile takie mechanizmy są transferowalne i możliwe do wdrożenia również w planach reagowania kryzysowego państw członkowskich UE.

2. CYFROWE I FIZYCZNE MECHANIZMY HUMANITARNEJ LOGISTYKI NA UKRAINIE

2.1. Systemy cyfrowe jako infrastruktura zarządzania pomocą – doświadczenia transferowalne

Jednym z kluczowych wyzwań logistyki humanitarnej jest zapewnienie nie tylko sprawnego przepływu towarów, lecz także ich pełnej identyfikowalności, rozliczalności i optymalnej dystrybucji do odbiorców, którzy potrzebują pomocy. Ukraina odpowiedziała na to wyzwanie wdrożeniem zespołu platform cyfrowych, z których kluczową stał się Zautomatyzowany System Rejestracji Pomocy Humanitarnej (*ukr.* AS HD), dostępny pod adresem good.gov.ua [11].

System AS HD został uruchomiony 1 grudnia 2023 roku w trybie pilotażowym, umożliwiając składanie deklaracji zarówno w formie papierowej, jak i cyfrowej. Od 1 kwietnia 2024 roku jedyną dopuszczalną ścieżką wwiezienia pomocy humanitarnej na Ukrainę jest droga elektroniczna [11]. Ta decyzja usprawniła procesy rejestracji, umożliwiając szybsze i bardziej efektywne śledzenie dostaw w czasie rzeczywistym, co znacząco podniosło transparentność i koordynację działań

pomocowych. Dzięki temu systemowi możliwe stało się także lepsze przewidywanie potrzeb beneficjentów oraz minimalizacja duplikacji dostaw między różnymi organizacjami.

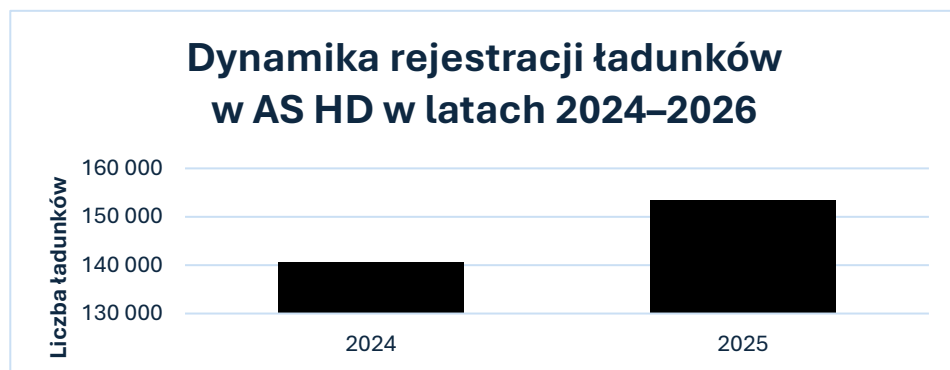
Mechanizm działania systemu obejmuje kilka wzajemnie powiązanych etapów. Organizacja rejestruje się przy użyciu kwalifikowanego podpisu elektronicznego (KEP), wprowadza dane dotyczące ładunku i składa deklarację, po czym otrzymuje unikatowy kod pomocy humanitarnej, który jest podawany podczas odprawy celnej na granicy [11]. W przypadku rozbieżności między deklaracją a faktycznie otrzymanym towarem organizacja wypełnia spis inwentaryzacyjny, którego dane są automatycznie przenoszone do raportu o celowym wykorzystaniu pomocy. Podmioty niespełniające wymogu składania sprawozdań podlegają automatycznemu wykluczeniu z Rejestru.

Kluczową funkcją systemu jest aktywne zarządzanie przepływem pomocy i zapobieganie dysfunkcjom łańcucha dostaw. System umożliwia śledzenie całego ruchu pomocy, zapobiegając dublowaniu dostaw i kierując je tam, gdzie potrzeby są największe. Typowym problemem przed wdrożeniem systemu była sytuacja, w której różne organizacje dowoziły podobną pomoc do tego samego obwodu, podczas gdy inne obwody pozostawały z niezaspokojonymi potrzebami [11].

Dynamika wzrostu systemu świadczy o jego szerokim przyjęciu. W marcu 2024 roku, po zakończeniu okresu przejściowego, do Rejestru dołączyło ponad 8 tysięcy odbiorców, a w systemie zarejestrowano ponad 18 tysięcy rekordów o ładunkach. Pod koniec października 2024 roku liczba ta wzrosła do 114 561 zarejestrowanych ładunków i 10 966 podmiotów. Do sierpnia 2025 roku łączna liczba zarejestrowanych ładunków przekroczyła 239 tysięcy [11], a w systemie działało 12,7 tysiąca odbiorców, w zdecydowanej większości organizacje charytatywne (63,94%), organizacje pozarządowe (18,86%) i instytucje państwowe (4,44%). System został opracowany przy wsparciu Programu EGAP, realizowanego przez Fundację Europa Wschodnia i finansowanego przez Szwajcarię.

Obok AS HD Ukraina wdrożyła także inne platformy cyfrowe, wspierające zarządzanie kryzysowe w warunkach konfliktu. Platforma cyfrowa Diia została rozszerzona o funkcjonalności, związane z rejestracją osób wewnątrz przemieszczonych, co umożliwiło błyskawiczną identyfikację potrzeb w skali wielomilionowej populacji [6]. System DELTA, pierwotnie wojskowy, został częściowo zaadaptowany na potrzeby logistyki cywilnej, umożliwiając geolokalizację

incydentów i dynamiczne planowanie tras dostaw na podstawie danych o sytuacji bezpieczeństwa [9].



Rys. 1. Dynamika rejestracji ładunków w AS HD w latach 2024–2026

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych MSP Ukrainy [11].

Z perspektywy transferowalności tych rozwiązań do innych państw kluczowe są następujące wnioski:

- po pierwsze, pełna cyfryzacja deklaracji importowych pomocy humanitarnej, połączona z mechanizmem sankcji za brak sprawozdawczości, dramatycznie redukuje niewłaściwą alokację zasobów;
- po drugie, integracja rejestrów osób potrzebujących z systemami zarządzania ładunkami umożliwia precyzyjne dopasowanie podaży do popytu;
- po trzecie, otwartość systemu na podmioty międzynarodowe (NGO, agencje ONZ, rządy państw wspierających) jest warunkiem koniecznym skuteczności w kryzysach wielopodmiotowych.

Polska, jako jeden z głównych kanałów tranzytowych pomocy dla Ukrainy oraz kraj o rosnącej ekspozycji na ryzyka geopolityczne, może czerpać z tych doświadczeń przy projektowaniu własnych krajowych systemów zarządzania kryzysowego [5].

2.2. Fizyczne zabezpieczenie tras dostaw: siatki antydronowe, systemy REW i ciągłość energetyczna

Cyfryzacja zarządzania ładunkami nie wyeliminowała fizycznych zagrożeń dla tras humanitarnych. Wynika to ze struktury współczesnych konfliktów: bezpilotowe statki powietrzne (BSP, drony) stały się jedną z dominujących broni pola walki, a ich niski koszt i dostępność sprawiają, że są używane również do atakowania infrastruktury cywilnej i tras logistycznych [3].

Opis poniższych rozwiązań ma na celu nie tylko dokumentację ukraińskich praktyk, lecz przede wszystkim pokazać, jakie warstwy ochrony łańcucha dostaw są niezbędne w warunkach zagrożenia hybrydowego – zagrożenia coraz bardziej relewantnego również dla polskiej infrastruktury krytycznej.

Pierwszą warstwą są siatki antydronowe, instalowane wzdłuż kluczowych dróg logistycznych. Jak informuje United24 Media [13], do 2026 roku Ukraina planuje pokryć siatkami łącznie 4000 km dróg przyfrontowych i granicznych. Siatki tworzą fizyczne tunele nad jezdnią. Na przykład na trasie Izium – Słowiańsk został zbudowany 40-kilometrowy tunel siatkowy, chroniący ruch logistyczny przed rosyjskimi dronami FPV. Podejście to, choć niskotechnologiczne, okazało się wysoce skuteczne: Ukraina szacuje, że kombinacja siatek z systemami elektronicznymi pozwala zniszczyć do 80–95% dronów atakujących chronione trasy [13].

Drugą, bardziej zaawansowaną warstwą ochrony są systemy walki radioelektronicznej REW (ang. *Electronic Warfare* – EW). REW jest to specjalistyczna dziedzina walki, której celem jest zakłócanie, osłabianie lub unieszkodliwianie systemem komunikacji radiowej i nawigacji przeciwnika – w tym systemów naprowadzania dronów [3]. W praktyce ukraińskiej oznacza to rozmieszczenie mobilnych i stałych systemów zakłócających (ang. *jammers*) wzdłuż tras humanitarnych, które blokują sygnały sterowania lub GPS stosowane przez drony przeciwnika. Wyzwaniem jest adaptacja technologiczna przeciwnika: drony sterowane światłowodowo (*fiber-optic* – FPV) są całkowicie odporne na tradycyjne zakłócenia radiowe, co wymusza ciągłe doskonalenie narzędzi przeciw BSP [13].

Trzecią, kluczową warstwą dla ciągłości łańcucha dostaw jest zagwarantowanie stałego zasilania energetycznego. Rosyjskie ataki na infrastrukturę energetyczną regularnie pozbawiają prądu dziesiątki ukraińskich miast, co bezpośrednio paraliżuje działanie wszelkich systemów cyfrowych, w tym AS HD [11]. W odpowiedzi Polska przekazała na początku 2026 roku 379 generatorów i 18 nagrzewnic

z rządowych rezerw strategicznych, uzupełnionych o 447 generatorów ze środków unijnych [11]. Działanie to ilustruje transnarodowy wymiar humanitarnego łańcucha dostaw: bez sprawnej infrastruktury energetycznej żadna platforma cyfrowa nie może funkcjonować.

Z perspektywy polskiej ten wątek jest szczególnie doniosły z dwóch powodów. Po pierwsze, Polska jest jednym z kluczowych partnerów logistycznych Ukrainy, a zrozumienie architektury ochrony tras dostaw jest warunkiem współpracy tranzytowej. Po drugie, zagrożenie atakami hybrydowymi na polską infrastrukturę energetyczną i komunikacyjną jest oceniane przez Agencję Bezpieczeństwa Wewnętrznego jako realne i rosnące [1]. Ukraińskie doświadczenia, zarówno w zakresie skuteczności siatek antydronowych, jak i utrzymania ciągłości energetycznej, mogą i powinny znaleźć odzwierciedlenie w polskich planach reagowania kryzysowego.

2.3. Strukturalna analiza mechanizmów

Do systematycznej oceny opisanych mechanizmów zastosowano metodę analityczną IEOM, wywodzącą się z czterech kryteriów: identyfikacja, efektywność, optymalizacja, monitorowanie [8]. Rama ta umożliwia porównanie skuteczności poszczególnych mechanizmów wzdłuż wspólnych wymiarów, co jest szczególnie użyteczne z punktu widzenia transferowalności rozwiązań do innych krajów.

Identyfikacja. Wymiar identyfikacji odnosi się do zdolności systemu do jednoznacznego rozpoznania podmiotów, ładunków i zagrożeń. W zakresie AS HD stworzono jednolity rejestr podmiotów i ładunków, eliminujący anonimowość przepływów – dzięki KEP każda organizacja jest jednoznacznie identyfikowalna, a każdy ładunek śledzony od granicy do odbiorcy końcowego. W zakresie fizycznych zabezpieczeń identyfikacja przejawia się w geolokalizacji zagrożeń dronowych i wyznaczaniu chronionych korytarzy. W świetle ram IEOM kluczowe jest, że oba mechanizmy – cyfrowy i fizyczny – działają komplementarnie: cyfrowy identyfikuje podmioty i ładunki, fizyczny identyfikuje i neutralizuje zagrożenia.

Efektywność. Wymiar efektywności obejmuje szybkość i koszt przeprowadzenia operacji logistycznych. Przejście z modelu papierowego na cyfrowy skróciło czas odprawy i wyeliminowało ręczne uzgadnianie dokumentacji. Wzrost liczby zarejestrowanych ładunków z 140 700 (2024 rok) do ponad 153 000 (2025 rok) świadczy

o znacznym wzroście przepustowości systemu. Niskokosztowe interceptory (ok. 1150 USD) zapewniają wysoki stosunek efektywności do kosztów w porównaniu z tradycyjnymi systemami obrony.

Poniższe zestawienie syntetyzuje ocenę poszczególnych mechanizmów w ramach IEOM (tab. 1).

Tabela 1

Ocena mechanizmów logistyki humanitarnej Ukrainy wg ramy IEOM

Mechanizm	Identyfikacja	Efektywność	Optymalizacja	Monitorowanie
AS HD	Wysoka – KEP, unikatowy kod ładunku, rejestr podmiotów	Wysoka – przezroczystość działań	Wysoka – eliminacja dublowania dostaw	Wysoka – automatyczne sankcje, dokumenty celne
Platforma Diia (IDP)	Średniowysoka – rejestracja IDP, lokalizacja potrzeb	Wysoka – szybka identyfikacja osób	Średniowysoka – linkowanie osób	Średniowysoka – monitorowanie statusów IDP
Siatki antydronowe	Średnioniska – pasywna ochrona, brak danych o zagrożeniach	Wysoka – niski koszt, 80–95% skuteczności na chronionych trasach	Średnioniska – stałe pokrycie trasy, ograniczona elastyczność	Średnioniska – ograniczone dane, ocena inspekcyjna
Systemy REW / interceptory	Wysoka – aktywne wykrywanie i neutralizacja dronów	Wysoka – niskokosztowe, wysoki poziom skuteczności działania	Wysoka – dynamiczna adaptacja do ewolucji technologicznej dronów	Wysoka – liczniki zestrzeleń, integracja z platformą DELTA
Generatory prądu	Niska – brak funkcji identyfikacyjnych	Wysoka – utrzymanie ciągłości wszystkich systemów	Niska – infrastruktura wspomagająca, nieoptymalizacyjna	Średnioniska – logistyka dystrybucji generatorów

Źródło: opracowanie własne na podstawie [3, 6, 9, 11, 13].

Optymalizacja. Odnosi się do zdolności systemu do alokacji zasobów według potrzeb. Dane zgromadzone w AS HD umożliwiają identyfikację gmin z niezaspokojonymi potrzebami i kierowanie do nich ładunków. Siatki antydronowe i systemy REW umożliwiają optymalne planowanie tras dostaw z uwzględnieniem profilu

ryzyka. Integracja danych z systemu AS HD z geolokalizacją zagrożeń (np. przez platformę DELTA) tworzy warunki dla dynamicznego, opartego na ryzyku planowania tras.

Monitorowanie. Obejmuje zdolność systemu do ciągłej oceny stanu operacyjnego i wykrywania dysfunkcji. Obowiązkowe sprawozdania z celowego wykorzystania pomocy oraz sankcja w postaci usunięcia z Rejestru tworzą mechanizm kontroli i odpowiedzialności. Dane o skuteczności siatek i interceptorów są na bieżąco monitorowane, umożliwiając adaptację taktyczną.

Analiza IEOM potwierdza komplementarność mechanizmów: system AS HD jest wysoce efektywny we wszystkich czterech wymiarach, natomiast siatki antydronowe wykazują relatywnie niskie wartości w obszarze identyfikacji i monitorowania, co uzasadnia ich kombinowanie z systemami REW. Generatory prądu pełnią rolę infrastruktury, umożliwiającej funkcjonowanie pozostałych mechanizmów – ich eliminacja spowodowałaby załamanie całego systemu logistycznego. Powyższa analiza dostarcza zatem nie tylko opisu ukraińskich praktyk, lecz także ram konceptualnych, przydatnych przy projektowaniu zintegrowanych systemów logistyki kryzysowej przez inne państwa.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzona analiza pozwala sformułować kilka istotnych wniosków o znaczeniu zarówno naukowym, jak i praktycznym.

Po pierwsze, przypadek Ukrainy dowodzi, że cyfryzacja procesów logistycznych w warunkach kryzysowych nie tylko jest możliwa, lecz może stanowić skuteczny instrument wzmacniania odporności humanitarnych łańcuchów dostaw. Przejście z modelu papierowego na w pełni cyfrowy w ciągu czterech miesięcy – przy jednoczesnym kilkunastokrotnym wzroście liczby zarejestrowanych ładunków – wskazuje na wysoką adaptacyjność systemu i jego uczestników [11].

Po drugie, wbudowane mechanizmy sprawozdawczości i sankcji tworzą strukturę odpowiedzialności, której brakowało w przedcyfrowym modelu. Zdolność systemu do identyfikowania niezaspokojonych potrzeb i zapobiegania dublowaniu

dostaw wpisuje się bezpośrednio w postulaty nowoczesnej logistyki humanitarnej, kładącej nacisk na koordynację i efektywność alokacji zasobów [2].

Po trzecie, skuteczna logistyka humanitarna wymaga integracji warstwy cyfrowej (AS HD, portal Diia, systemy REW) z fizyczną (siatki antydronowe, generatory prądu). Żadna z tych warstw nie jest wystarczająca samodzielnie – razem tworzą system odporny na wielowymiarowe zagrożenia. Analiza IEOM potwierdziła komplementarność poszczególnych mechanizmów i dostarczyła narzędzia do ich oceny porównawczej [8].

Po czwarte, i najważniejsze z punktu widzenia czytelnika polskiego, opisane mechanizmy mają charakter transferowalny. Polska, jako kraj graniczący z obszarem konfliktu, pełniący rolę tranzytu humanitarnego i narażony na zagrożenia hybrydowe, stoi przed koniecznością projektowania własnych systemów zarządzania kryzysowego uwzględniających właśnie te doświadczenia [1, 5]. Ukraina dostarcza modelu adaptacyjnego zarządzania humanitarnym łańcuchem dostaw, który może stanowić punkt odniesienia dla polityki pomocowej również w innych regionach, objętych konfliktami zbrojnymi.

LITERATURA

1. Agencja Bezpieczeństwa Wewnętrznego, *Raport o stanie bezpieczeństwa w Polsce 2024*, Warszawa 2024.
2. Kembro J., Kunz N., Frennesson L., Vega D., *Revisiting the Definition of Humanitarian Logistics*, Journal of Business Logistics, 2024, vol. 45, nr 2.
3. Kott A., Alberts D., *Information Age Anthology: The Information Age Military and Autonomous Systems*, RAND, 2022.
4. Kunecka D., Wróblewska I., *Logistyka w sytuacjach kryzysowych – wyzwania organizacyjne i technologiczne*, Logistyka, 2021, nr 4, s. 45–52.
5. Roszkowski M., *Polskie planowanie kryzysowe w obliczu zagrożeń hybrydowych – analiza luk systemowych*, Bezpieczeństwo Narodowe, 2023, nr 2, s. 67–84.
6. Trach O., *Diia yak platforma kryzovogo upravlinniy: doslidzhennya mobilizatsiyi tsyfrovoy derzhavi v umovah vijny* [Diia jako platforma zarządzania kryzysowego: mobilizacja cyfrowego państwa w warunkach wojny], Kyiv School of Economics Working Paper, Kijów 2024.
7. Wieland A., Durach C.F., *Two Perspectives on Supply Chain Resilience*, Journal of Business Logistics, 2021, vol. 42, nr 3, s. 315–322.

8. Wojciechowska-Filipek S., *Cyfryzacja usług publicznych jako czynnik budowania odporności łańcucha dostaw*, Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej, 2021, nr 42, s. 88–99.
9. Yarosh M., *DELTA: Military Situational Awareness Systems and Their Civilian Adaptation*, Ukrainian Journal of Logistics, 2024, vol. 2, s. 12–22.

Źródła internetowe

10. Christopher M., Peck H., *Building the Resilient Supply Chain*, The International Journal of Logistics Management, 2004, vol. 15, nr 2, s. 1–14, <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/server/api/core/bitstreams/6ce1ceca-e8c6-4b37-8f26-6fdb3c08a8a/content>.
11. Ministerstwo Polityki Społecznej Ukrainy, *Good.gov.ua – yak pratsiuiie avtomatyzovana systema reiestratsii humanitarnoi dopomohy*, 19.08.2025, <https://www.msp.gov.ua/press-center/news/good.gov.ua-yak-pratsyuye-avtomatyzovana-systema-reyestratsiyi-humanitarnoyi-dopomohy> (dostęp 30.03.2026).
12. Ponomarov S.Y., Holcomb M.C., *Understanding the Concept of Supply Chain Resilience*, The International Journal of Logistics Management, 2009, vol. 20, nr 1, s. 124–143, <https://www.scribd.com/document/937162751/Ponomarov-S-Y-Holcomb-M-C-2009-Understanding-the-Concept-of-Supply-Chain-Resilience>.
13. United24 Media, *Ukraine Plans 4,000 km Anti-Drone Net Corridors to Protect Frontline Logistics Routes*, 25.02.2026, <https://united24media.com/latest-news/ukraine-plans-4000-km-anti-drone-net-corridors-to-protect-frontline-logistics-routes-16275> (dostęp 30.03.2026).

HUMANITARIAN LOGISTICS IN CRISIS SITUATIONS AS AN ELEMENT OF SUPPLY CHAIN RESILIENCE

The article presents the theoretical foundations of supply chain resilience under crisis conditions and their practical application in humanitarian logistics, using the armed conflict in Ukraine as a case study. The aim of the article is to analyse the organisational and technological mechanisms implemented in Ukraine in response to logistical challenges. Both digital platforms for humanitarian aid management and physical means of protecting supply routes — including anti-drone nets, electronic warfare systems (EW) and emergency generator power supply — are subjected to analysis. The IEOM analytical framework was applied for the systematic evaluation of the mechanisms. The presented examples indicate that the resilience of humanitarian supply chains under extreme conditions requires the integration of digital and physical layers, and that the solutions developed are transferable in nature and may serve as a reference point for crisis management systems of other states.

Keywords: humanitarian logistics, supply chain resilience, crisis management, digitalisation of humanitarian aid.

PREDYKCYJNA MOBILNOŚĆ LOGISTYCZNA W INTELIGENTNYM MIEŚCIE: MODEL INTEGRACJI DANYCH IOT I ALGORYTMÓW SZTUCZNEJ INTELIGENCJI

Rosnąca urbanizacja i rozwój e-commerce stawiają przed logistyką miejską coraz większe wyzwania, prowadząc do kongestii, nieefektywności tras oraz wzrostu emisji CO₂. Celem niniejszej pracy jest ukazanie koncepcji predykcyjnej mobilności logistycznej w inteligentnym mieście, opartej na integracji danych z systemów IoT oraz algorytmów sztucznej inteligencji. Analiza obejmuje wykorzystanie danych sensorycznych i miejskich systemów informatycznych w celu przewidywania zdarzeń logistycznych, a także dynamicznego planowania tras i harmonogramów. Proponowany model warstwowy łączy warstwę sensoryczną, integracyjną, analityczną oraz decyzyjną. Wstępne wyniki wskazują, iż predykcyjne zarządzanie przyczynia się do poprawy efektywności dostaw, skrócenia czasu realizacji tras oraz ograniczenia negatywnego wpływu transportu na środowisko. Artykuł podkreśla potencjał integracji Internetu Rzeczy i sztucznej inteligencji w tworzeniu zrównoważonych systemów miejskich logistyki.
Słowa kluczowe: Smart City, Internet Rzeczy, sztuczna inteligencja, logistyka miejska, analiza danych, mobilność, predykcja.

WSTĘP

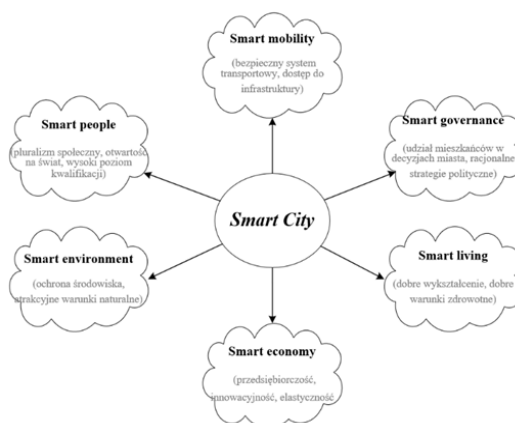
Współczesne miasta mierzą się z rosnącymi wyzwaniami wynikającymi z intensywniej urbanizacji oraz dynamicznego rozwoju handlu elektronicznego. Zjawiska te prowadzą do zwiększonego obciążenia infrastruktury transportowej, powstawania kongestii oraz negatywnego wpływu transportu na środowisko. Tradycyjne metody zarządzania logistyką miejską okazują się niewystarczające w obliczu rosnącej złożoności procesów. W odpowiedzi na te problemy rozwijana jest koncepcja inteligentnych miast, wykorzystująca technologie Internetu Rzeczy oraz sztucznej inteligencji. Szczególne znaczenie zyskuje podejście predykcyjne, umożliwiające prognozowanie i optymalizację procesów logistycznych w czasie rzeczywistym.

1. PREDYKCYJNA MOBILNOŚĆ LOGISTYCZNA

1.1. Logistyka miejska w ujęciu *Smart City*

Logistyka miejska w modelu *Smart City* definiowana jest jako zintegrowany proces koordynacji oraz synchronizacji przepływów osób i towarów w obszarach zurbanizowanych. Jej znaczenie systematycznie rośnie w związku z postępującą urbanizacją oraz zwiększającą się presją transportową i środowiskową w miastach [10]. W przeciwieństwie do tradycyjnej logistyki biznesowej, ukierunkowanej głównie na efektywność ekonomiczną, logistyka w inteligentnym mieście charakteryzuje się rozszerzoną funkcją celu. Obejmuje ona nie tylko aspekty kosztowe i operacyjne, ale również cele ekologiczne i społeczne, takie jak ograniczenia emisji zanieczyszczeń, redukcja kongestii transportowej oraz poprawa jakości życia mieszkańców.

Istotnym elementem tego podejścia jest włączenie społeczności lokalnej w procesy decyzyjne, co sprzyja budowaniu zrównoważonych i akceptowalnych społecznie rozwiązań logistycznych [4]. Kluczowe obszary obejmują integrację systemową, inteligentną mobilność, efektywne gospodarowanie zasobami oraz zintegrowane zarządzanie miastem. Integracja systemowa opiera się na wykorzystaniu technologii informacyjno-komunikacyjnych w ramach wspólnej platformy miejskiej, umożliwiającej wymianę danych i podejmowanie decyzji w czasie rzeczywistym.



Rys. 1. Sześć wymiarów kształtujących koncepcję *Smart City* w obszarze miejskim

Źródło: [6].

Inteligentna mobilność koncentruje się na rozwoju innowacyjnych i zrównoważonych systemów transportowych, natomiast efektywność zasobów osiągnąta jest dzięki zastosowaniu sieci czujników monitorujących infrastrukturę miejską. Całość uzupełnia zintegrowane zarządzanie, łączące narzędzia teleinformatyczne z analizą danych w celu podnoszenia jakości życia mieszkańców.

1.2. Mobilność towarowa vs mobilność pasażerska

Zarządzanie mobilnością w modelu *Smart City* wymaga równoważenia potrzeb różnych użytkowników w przestrzeni miejskiej w warunkach prognozowanego wzrostu ruchu towarowego i pasażerskiego. Szacuje się, że mobilność towarowa może wzrosnąć o około 40% do 2030 roku oraz ponad 80% do 2050 roku względem roku 2005, co sprzyja wdrażaniu rozwiązań, takich jak konsolidacja ładunków w miejskich centrach dystrybucji, wykorzystanie pojazdów elektrycznych, rowerów cargo i mikroplatform przeładunkowych, a także rozwój dostaw nocnych z ograniczeniem hałasu [7]. Jednocześnie przewiduje się wzrost mobilności pasażerskiej o około 34% do 2030 roku i ponad 50% do 2050 roku, co uzasadnia rozwój zintegrowanego transportu publicznego, systemów multimodalnych, współdzielenia pojazdów oraz priorytetyzacji komunikacji zbiorowej z wykorzystaniem inteligentnych systemów sterowania ruchem [10].

1.3. Predykcja w zarządzaniu transportem

Fundamentem inteligentnego zarządzania miastem jest odejście od reaktywnego modelu podejmowania decyzji na rzecz podejścia predykcyjnego, opartego na przewidywaniu zdarzeń oraz na proaktywnym przeciwdziałaniu ich negatywnym skutkom. Systemy *Smart City* wykorzystują zaawansowane algorytmy analityczne do prognozowania zjawisk oraz proaktywnego sterowania procesami miejskimi, co zwiększa efektywność funkcjonowania infrastruktury i jakość życia mieszkańców [11]. Zastosowania tego podejścia obejmują dynamiczne zarządzanie popytem, czego przykładem jest projekt „*Meeting taxi demand*”, realizowany w Singapurze, umożliwiający przewidywanie zapotrzebowania na usługi taksówkowe na podstawie danych pogodowych. Istotnym obszarem jest również predykcyjna optymalizacja ruchu drogowego i parkowania, np. w Barcelonie, pozwalająca prognozować natężenie ruchu oraz dostępność miejsc parkingowych, w którego ramach

użytkownicy ruchu niezmotoryzowanego informowani są o prognozowanym poziomie zanieczyszczeń na poszczególnych trasach.

Uzupełnieniem tych działań jest predykcyjne zarządzanie infrastrukturą miejską, wykorzystujące systemy sztucznej inteligencji do wczesnego wykrywania potencjalnych awarii i przekroczeń dopuszczalnych parametrów [3].

2. INTERNET RZECZY

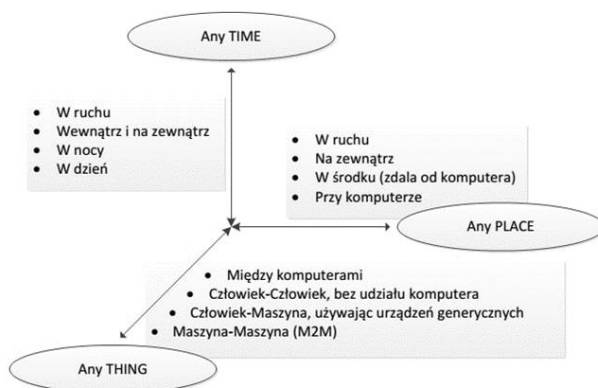
2.1. Istota IoT

Internet Rzeczy (ang. *Internet of Things*) stanowi obecnie jeden z kluczowych paradygmatów w rozwoju technologii informacyjnych. Pomimo szerokiego zainteresowania badawczego, w literaturze przedmiotu nie istnieje jedna, powszechnie przyjęta definicja. Większość ujęć podkreśla jednak, że IoT to sieć obiektów fizycznych wyposażonych w czujniki, urządzenia komunikacyjne oraz oprogramowanie, które umożliwiają gromadzenie, wymianę i analizę danych w czasie rzeczywistym za pośrednictwem Internetu [9]. Koncepcja Internetu Rzeczy polega na przekształcaniu tradycyjnych obiektów w elementy funkcjonujące w przestrzeni cyfrowej, co umożliwia ich bieżące monitorowanie i kontrolę, przy jednoczesnym ograniczaniu zasobów ludzkich. Podstawą funkcjonowania IoT są zatem rozwiązania techniczne, pozwalające na identyfikację, komunikację i współpracę między różnorodnymi obiektami cyfrowymi i fizycznymi, tworząc spójne środowisko wymiany danych [1]. Tym samym technologia ta staje się fundamentem w rozwoju koncepcji inteligentnych miast oraz zaawansowanych systemów logistyki miejskiej. Stanowi ona podstawową warstwę percepcyjną, która pozwala na pozyskiwanie informacji chociażby o stanie infrastruktury miejskiej, systemów transportowych, czy procesów społeczno-gospodarczych.

2.2. Struktura IoT

Struktura IoT opiera się na integracji sprzętu, oprogramowania pośredniego oraz warstw prezentacji danych, umożliwiających pełną funkcjonalność systemów [12].

- Sprzęt (*Hardware*) – obejmuje wszelkiego rodzaju czujniki, efektory, przetworniki, kamery i wbudowane moduły komunikacyjne, które są odpowiedzialne za gromadzenie i przetwarzanie danych z otoczenia.
- Oprogramowanie pośrednie (*Middleware*) – narzędzia do przechowywania i analizowania danych w czasie rzeczywistym, posługujące się chmurą i mgłą obliczeniową oraz analityką *Big Data*.
- Prezentacja (*Presentation*) – interfejsy wizualizacji danych, wszelkiego rodzaju aplikacje, które umożliwiają konsumentom interpretację wyników oraz monitorowanie procesów w czasie rzeczywistym.



Rys. 2. Wymiana danych w technologii IoT

Źródło: [9].

Komunikacja i wymiana danych w technologii IoT opiera się na koncepcji trzech „Any” – *Any Time* (zawsze), *Any Place* (wszędzie) oraz *Any Thing* (ze wszystkim). Jednocześnie stanowi to fundament współczesnych systemów cyfrowych, w których informacja umożliwia automatyzację procesów, rozwój inteligentnych usług oraz integrację fizycznych i cyfrowych elementów środowiska.

2.3. Źródła danych IoT

Źródła danych, wykorzystywane w logistyce miejskiej, charakteryzują się dużą różnorodnością pod względem struktury, dynamiki zmian oraz sposobu generowania informacji. Obejmują one zarówno dane strumieniowe o wysokiej częstotliwości, takie jak informacje z czujników ruchu czy systemów lokalizacji pojazdów, jak i dane zdarzeniowe oraz transakcyjne pochodzące z systemów zarządzania logistyką.

Istotną rolę odgrywają również dane kontekstowe, w szczególności środowiskowe, które wpływają na warunki realizacji procesów transportowych.

Kluczowym elementem efektywnego wykorzystania danych IoT jest ich odpowiednia integracja, standaryzacja oraz mapowanie do wspólnego modelu. Pozwala to na łączenie informacji pochodzących z różnych systemów i zapewnia ich spójność analityczną.

W praktyce oznacza to konieczność identyfikacji źródeł danych, określania ich struktury, zakresu informacyjnego, częstotliwości aktualizacji oraz potencjalnych zastosowań w modelach predykcyjnych.

Tabela 1

Źródła danych IoT w logistyce miejskiej

Źródło danych	Typ danych	Rodzaj danych	Częstotliwość	Zastosowanie
Czujniki ruchu drogowego	Dane okresowe	Natężenie ruchu, prędkość, poziom zatłoczenia	Wysoka (sekundy/minuty)	Predykcja czasu przejazdu, identyfikacja kongestii
GPS pojazdów dostawczych	Dane ciągłe (strumieniowe)	Pozycja obiektu, prędkość, kierunek	Wysoka (sekundy)	Predykcja czasu przejazdu, optymalizacja tras, monitorowanie floty
Punkty odbioru	Dane zdarzeniowe (progowe)	Poziom napelnienia, liczba dostępnych skrzyżowań, ID lokalizacji	Średnia (minuty/godziny)	Predykcja popytu, planowanie dostaw, harmonogramowanie tras
Dane środowiskowe	Dane strukturalne (kontekstowe)	Pogoda	Średnia (godziny)	Predykcja opóźnień, analiza ryzyka
Inteligentna infrastruktura (np. sygnalizacja świetlna)	Dane ciągłe (strumieniowe)	Status sygnalizacji, czas cyklu, status skrzyżowania	Wysoka (sekundy)	Modelowanie przepływu ruchu, synchronizacja tras
System WMS	Dane transakcyjne	Poziomy zapasów, status zamówień, lokalizacja	Niska (zdarzenia)	Planowanie dystrybucji
System TMS	Dane operacyjne	Zlecenia transportowe, harmonogramy, plan tras, status dostawy	Średnia	Optymalizacja planowania transportu

Źródło: [8].

3. ALGORYTM AI W LOGISTYCE

3.1. Pojęcie sztucznej inteligencji (AI)

Termin „sztuczna inteligencja” odnosi się do systemów informatycznych opartych na algorytmach, które wykazują cechy inteligentnego działania. AI funkcjonuje jako zbiór instrukcji zapisanych w kodzie źródłowym, umożliwiając przetwarzanie informacji, zapamiętywanie zmieniających się warunków, ich analizę oraz podejmowanie złożonych decyzji na podstawie dostępnych danych. Podstawą działania tychże systemów są algorytmy oraz modele matematyczne, które pozwalają na analizę dużych zbiorów danych i identyfikowanie występujących w nich zależności. Dzięki temu sztuczna inteligencja może adaptować się do nowych sytuacji i optymalizować swoje działania w dynamicznym środowisku.

W literaturze przedmiotu wyróżnia się kilka głównych kategorii AI. Najpowszechniejszą stosowaną formą jest tzw. wąska sztuczna inteligencja, która została zaprojektowana do realizacji jednego, ściśle określonego zadania, takiego jak rozpoznawanie twarzy, analiza obrazu czy automatyczne tłumaczenie języków. Bardziej zaawansowanym poziomem, nadal pozostającym w fazie koncepcyjnej, jest ogólna inteligencja, której celem jest osiągnięcie zdolności poznawczych porównywalnych z ludzkimi w wielu obszarach jednocześnie [13].

Rosnące możliwości i szerokie zastosowanie sztucznej inteligencji sprawiają, że AI uznawana jest za jedną z najbardziej przełomowych technologii współczesności, która w istotny sposób wpływa na funkcjonowanie wielu sektorów gospodarki, w tym przemysłu, logistyki oraz usług.

3.2. Techniki sztucznej inteligencji oraz ich wykorzystanie w transporcie miejskim

Do najczęściej stosowanych technik należą: uczenie maszynowe (*Machine Learning*) oraz jego rozwinięcie – uczenie głębokie (*Deep Learning*), które pozwalają systemom identyfikować wzorce o dużych zbiorach informacji, w tym danych tekstowych i wizualnych. W transporcie miejskim algorytmy sztucznej inteligencji są wykorzystywane przede wszystkim do optymalizacji przepływu towarów w warunkach dużego natężenia ruchu oraz zmiennego popytu. Kluczową rolę odgrywają algorytmy uczenia maszynowego, które analizują dane historyczne, dotyczące natężenia ruchu, godzin szczytu, warunków pogodowych oraz realizacji

wcześniejszych dostaw [2]. Na tej podstawie wspomniane systemy wspierają planowanie tras pojazdów dystrybucyjnych, minimalizując czas przejazdu i zużycie paliwa.

Algorytmy predykcyjne znajdują zastosowanie w prognozowaniu zapotrzebowania na dostawy w poszczególnych dzielnicach miasta. Dzięki analizie danych o zachowaniach klientów możliwe jest wcześniejsze rozmieszczenie przesyłek w miejskich centrach dystrybucyjnych lub mikrohubach, co skraca czas realizacji dostaw oraz ogranicza liczbę przejazdów w centrum miasta. Rozwiązania te są szczególnie istotne w logistyce ostatniej mili.

Istotnym wsparciem dla transportu miejskiego jest również wizualna sztuczna inteligencja. Systemy oparte na wizji komputerowej umożliwiają automatyczną identyfikację przesyłek podczas załadunku i rozładunku, kontrolę ich stanów oraz weryfikację poprawności doręczeń. Kamery i algorytmy AI pozwalają także monitorować przestrzeń miejską, wspierając bezpieczne manewrowanie pojazdów dostawczych w zatłoczonych strefach miejskich [14].

Uzupełnieniem powyższych rozwiązań są algorytmy, stosowane w pojazdach autonomicznych oraz półautonomicznych. W miastach wykorzystywane są one m.in. w elektrycznych pojazdach dostawczych, robotach kurierskich oraz autonomicznych wózkach transportowych, które poruszają się po wyznaczonych trasach. Zastosowanie tych technologii pozwala zwiększyć punktualność dostaw, zmniejszyć emisję spalin oraz poprawić efektywność miejskich systemów transportowych [15].

4. INTEGRACJA DANYCH INTERNETU RZECZY I ALGORYTMÓW AI

4.1. Warstwowy model integracji danych

Poniżej przedstawiony model integracji danych IoT i sztucznej inteligencji stanowi podstawę nowoczesnych systemów zarządzania logistyką miejską. Jego celem jest efektywne pozyskiwanie, przetwarzanie oraz wykorzystywanie danych w czasie rzeczywistym w celu optymalizacji procesów transportowych. Model ten znajduje zastosowanie w rozwiązaniach typu *Smart City* [5].

1. Warstwa sensoryczna (IoT). Odpowiada za pozyskiwanie danych z urządzeń i czujników rozmieszczonych w przestrzeni miejskiej. Obejmuje ona m.in. czujniki

natężenia ruchu, systemy GPS flot logistycznych, tagi RFID, dane meteorologiczne oraz informacje pochodzące z aplikacji miejskich. Dane te są gromadzone w czasie rzeczywistym, mają charakter strumieniowy, wieloźródłowy oraz cechują się wysoką zmiennością.

2. Warstwa transmisji i integracji danych. Na tym etapie dane są przesyłane i wstępnie przetwarzane z wykorzystaniem sieci 5G, infrastruktury chmurowej oraz rozwiązań *edge computing*. Realizowane są procesy czyszczenia, normalizacji, agregacji czasowej oraz redukcji szumów. Zastosowanie przetwarzania brzegowego pozwala na ograniczenia opóźnień decyzyjnych, co ma kluczowe znaczenie w dynamicznym zarządzaniu flotą transportową w środowisku miejskim.

3. Warstwa analityczna (AI). Stanowi ona kluczowy element modelu i obejmuje algorytmy sztucznej inteligencji, wykorzystywane do analizy i predykcji zdarzeń logistycznych. Modele predykcyjne, takie jak sieci LSTM, umożliwiają prognozowanie natężenia ruchu, czasu przejazdu oraz prawdopodobieństwo wystąpienia kongestii na podstawie danych historycznych, bieżących danych IoT oraz czynników zewnętrznych, takich jak uwarunkowania pogodowe czy wydarzenia masowe. Równolegle stosowane są algorytmy dynamicznej optymalizacji tras, w tym zmodyfikowane algorytmy Dijkstry oraz uczenie ze wzmocnieniem, pozwalające na wielokryterialną optymalizację czasu przejazdu, kosztów operacyjnych i emisji CO₂.

4. Warstwa decyzyjna. Wyniki analiz generowane w warstwie analitycznej przekazywane są do systemów zarządzania flotą, platform miejskich oraz paneli operatorów logistycznych. Na tej podstawie system formułuje rekomendacje operacyjne, takie jak zmiana trasy przejazdu, modyfikacja harmonogramu dostaw czy priorytetyzacja zleceń, a także generuje alerty, dotyczące przewidywanych zatorów komunikacyjnych.

5. Warstwa wykonawcza. Ostatnia warstwa odpowiada za realizację podjętych decyzji w systemach transportowych. Obejmuje ona automatyczne sterowanie flotą pojazdów, aktualizację tras w systemach nawigacyjnych oraz koordynację operacji logistycznych w czasie rzeczywistym. Integracja warstwy wykonawczej z pozostałymi elementami modelu umożliwia przejście podejścia reaktywnego do predykcyjnego w zarządzaniu transportem miejskim.

4.2. Studium przypadku – model symulacyjny miasta

W badaniu zastosowano metodę symulacji deterministycznej, opartej na parametrach literaturowych oraz średnich wartościach operacyjnych, raportowanych przez operatorów logistycznych. Przyjęte dane nie odnoszą się do konkretnego miasta, lecz stanowią model referencyjny dla jednostki miejskiej o populacji 500 tys. mieszkańców.

Założenia symulacyjne:

- 500 tys. mieszkańców;
- 120 pojazdów flot kurierskich;
- 8000 dostaw dziennie (n);
- godziny szczytu: 7:00–9:00 oraz 15:30–18:00;
- średnia długość trasy jednej dostawy (d): 12 km;
- średnie spalanie (f) – 8 l/100 km.

Porównywane wskaźniki KPI:

- średni czas dostawy;
- liczba opóźnień > 15 min;
- zużycie paliwa;
- emisja CO₂: 1 l = 2,64 kg CO₂;
- liczba zmian trasy w ciągu dnia.

Tabela 2

Modelowe wyniki symulacji

Wskaźnik	System klasyczny	System predykcyjny
Średni czas dostawy (ADT)	52 min	41 min
Opóźnienia (D)	18%	9%
Zużycie paliwa (<i>Fuel</i>)	100%	87%
Emisja CO ₂ (CO ₂)	100%	85%

Przyjęte wartości procentowych redukcji czasu przejazdu, liczby opóźnień oraz zużycia paliwa wynikają z przeglądu literatury przedmiotowej, dotyczącej systemów predykcyjnego zarządzania ruchem i dynamicznego routingu w logistyce. W badaniach tych raportuje się redukcję czasu przejazdu w przedziale 15–30%,

zmniejszenie liczby opóźnień o 40–60% oraz ograniczenia zużycia paliwa o 10–20%. W artykule zastosowano wartości pośrednie, odpowiadające scenariuszowi konserwatywnemu, w celu uniknięcia zawyżania efektów symulacji [14].

1. Średni czas dostawy [ADT]

a) System klasyczny:

$$ADT_{\text{classic}} = 52 \text{ min}$$

b) System predykcyjny:

$$r = 21,15\%$$

$$\Delta T = 52 \times 0,2115 = 11 \text{ min}$$

$$ADT_{\text{predictive}} = 52 - 11 = 41 \text{ min}$$

$$\text{Redukcja: } \frac{52-41}{52} \times 100\% = 21,15\%$$

2. Liczba opóźnień [D]

a) System klasyczny:

$$p_{\text{classic}} = 18\%$$

$$D_{\text{classic}} = 8000 \times 0,18 = 1440$$

b) System predykcyjny:

$$P_{\text{predictive}} = 9\%$$

$$D_{\text{predictive}} = 8000 \times 0,09 = 720$$

$$\text{Redukcja: } \frac{1440-720}{1440} \times 100\% = 50\%$$

3. Zużycie paliwa [Fuel]

$$\text{Całkowity dystans dzienny: } L = 8000 \times 12 = 96\,000 \text{ km}$$

a) System klasyczny

$$\text{Fuel}_{\text{classic}} = 96\,000 \times 0,08 = 7680 \text{ l}$$

b) System predykcyjny

$$R_{\text{fuel}} = 13\%$$

$$\text{Fuel}_{\text{predictive}} = 7680 \times 0,87 = 6681,6 \text{ l}$$

$$\text{Oszczędność: } 7680 \text{ l} - 6681,6 \text{ l} = 998,4 \text{ l} (13\%)$$

4. Emisja CO₂

a) System klasyczny

$$CO_{2\text{classic}} = 7680 \times 2,64 = 20\,275,2 \text{ kg}$$

b) System predykcyjny

$$CO_{2\text{predictive}} = 6681,6 \times 2,64 = 17\,639,4 \text{ kg}$$

Redukcja dzienna: $20\,275,2 \text{ kg} - 17\,639,4 \text{ kg} = 2\,635,8 \text{ kg}$

Redukcja roczna (300 dni): $2\,635,8 \text{ kg} \times 300 = 790\,740 \text{ kg} = 792 \text{ t}$

Tabela 3

Wyniki symulacji po wyliczeniu wskaźników KPI

Wskaźniki	System klasyczny	System predykcyjny	Zmiana [%]
Średni czas dostawy	52 min	41 min	-21,15
Liczba opóźnień	1440	720	-50
Zużycie paliwa	7680 l	6682 l	-13
Emisja CO ₂	20 275 kg	17 639 kg	-13
Roczna redukcja CO ₂	-	792 t	-

W celu syntetycznej oceny efektywności symulacji wprowadzono zagregowany wskaźnik efektywności systemu (SEI). Wskaźnik ten uwzględnia cztery wyżej wymienione, kluczowe mierniki operacyjne. Wartości zostały znormalizowane względem scenariusza klasycznego, a wagi (w_x) odzwierciedlają hipotetyczne preferencje decydenta miejskiego.

$$X_{\text{norm}} = \frac{X_{\text{predictive}}}{X_{\text{classic}}}$$

$$\text{Średni czas dostawy: } ADT_{\text{norm}} = \frac{41}{52} = 0,79$$

$$\text{Zużycie paliwa: } \frac{6682}{7680} = 0,87$$

$$\text{Emisja CO}_2: \frac{17639}{20275} = 0,87$$

$$\text{Opóźnienia: } \frac{720}{1440} = 0,5$$

$$\text{Wskaźnik efektywności systemu [SEI]} = w_1 \cdot ADT + w_2 \cdot \text{Fuel} + w_3 \cdot \text{CO}_2 + w_4 \cdot D$$

$$SEI = 0,4 \cdot ADT + 0,3 \cdot \text{Fuel} + 0,2 \cdot \text{CO}_2 + 0,1 \cdot D$$

a) System klasyczny

$$SEI_{\text{classic}} = 0,4 (1) + 0,3 (1) + 0,2 (1) + 0,1 (1) = 1,00$$

b) System predykcyjny

$$SEI_{\text{predictive}} = 0,4 (0,79) + 0,3 (0,87) + 0,2 (0,87) + 0,1 (0,5) = 0,316 + 0,261 + 0,174 + 0,05 = 0,801$$

Poprawa efektywności:

$$\frac{1 - 0,801}{1} \times 100\% = 19,9\%$$

Wzrost efektywności systemu o 20%.

PODSUMOWANIE

Artykuł przedstawia koncepcję predykcyjnej mobilności logistycznej w środowisku inteligentnego miasta, koncentrując się na integracji danych IoT oraz algorytmów sztucznej inteligencji w procesach zarządzania zarówno transportem towarowym, jak i pasażerskim. Omówiono w nim specyfikę logistyki miejskiej oraz znaczenie podejścia predykcyjnego, które umożliwia prognozowanie popytu, identyfikację zakłóceń i dynamiczną adaptację decyzji transportowych.

Szczególną uwagę poświęcono roli warstwy IoT jako fundamentu systemów analitycznych, podkreślając kluczowe źródła danych oraz ich mapowanie do wspólnego modelu.

Na podstawie przeprowadzonej symulacji wskazano na wyraźną przewagę systemu predykcyjnego nad klasycznym modelem zarządzania. W przeanalizowanym studium średni czas dostawy został skrócony o 21,15%, liczba opóźnień spadła o 50% oraz ograniczono zużycie paliwa o około 13%. W konsekwencji tego odnotowano również znaczną redukcję emisji CO₂ – o 2635,8 kg.

Uzyskane wyniki potwierdzają, że wykorzystanie danych IoT oraz algorytmów analitycznych może istotnie poprawić efektywność operacyjną systemów transportowych i jednocześnie przyczynić się do ograniczenia kosztów oraz negatywnego wpływu transportu na środowisko.

LITERATURA

1. Adamczewski P., *Internet rzeczy w rozwoju e-logistyki organizacji inteligentnych*, Studia Ekonomiczne, 2015, vol. 249.
2. Barcik R., Starow T., *Sztuczna inteligencja i technologie cyfrowe w logistyce ery przemyslu 4.0*, Zeszyty Naukowe Akademii Górnośląskiej, 2025, nr 33, s. 6–15.
3. Bauer M., *Simulation of the influence of increased speed limit and densification of stations on travel time based on the example of the first metro line in Warsaw*, Barcelona 2015.
4. Bruska A., *Logistyka jako komponent smart city*, Studia Miejskie, t. 6, Opole 2012.
5. Holling C.S., *Resilience and stability of ecological systems*, Annual Review of Ecology and Systematics, 1973.
6. Kaniowski M., Nowakowska-Grunt J., *Koncepcja smart city a zintegrowane zarządzanie aglomeracją miejską w sferze transportu. Przyczynek do dyskusji*, Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej, Zarządzanie, 2024, nr 53, s. 39–49.
7. Kiba-Janiak M., *Kluczowe czynniki sukcesu logistyki miejskiej z perspektywy zarządzania miastem*, Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, 2016, nr 420.
8. Kolasińska-Morawska K., Sułkowski Ł., Brzozowska M., Morawska P. (red.), *Transport w Smart City – zrównoważony transport w zdrowej tkance miejskiej*, Akademia WSB, Dąbrowa Górnicza 2025.
9. Rusek, D., Pniewski, R., *Nowoczesne technologie IT stosowane w logistyce*, Instytut Naukowo-Wydawniczy "SPATIUM", 2016, r.17, vol. 12.
10. Rześny-Cieplińska J., *Strategie logistyki miejskiej wobec koncepcji smart city na przykładzie miast polskich i zachodnioeuropejskich*, Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, 2018, nr 505.
11. Stawasz D., *Koncepcja „smart city” a innowacyjne podejście do zarządzania sprawami publicznymi w mieście*, Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego, Ekonomiczne Problemy Usług, 2015, nr 121.
12. Sułkowski Ł., Kaczorowska-Spychalska D., *Internet of Things. Nowy paradygmat rynku*, Difin, Warszawa 2018.
13. Tessmer K., *Sztuczna inteligencja w predykcji popytu i optymalizacji tras logistycznych, Integracja transportu i sztucznej inteligencji w zarządzaniu łańcuchem dostaw*, Uniwersytet Morski w Gdyni, Gdynia 2025.

Źródła internetowe

14. https://akademiacyfryzacji.gsl.pl/baza_wiedzy/sztuczna-inteligencja-w-logistyce/ (dostęp 22.02.2025).
15. <https://www.niegowic.edu.pl/ai-w-logistyce-jak-algorytmy-usprawniaja-lancuchy-dostaw/> (dostęp 21.02.2025).

PREDICTIVE LOGISTICS MOBILITY IN A SMART CITY: A MODEL FOR INTEGRATING IOT DATA AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Rapid urbanization and the growth of e-commerce are posing increasing challenges for urban logistics, leading to congestion, inefficient routing, and higher CO₂ emissions. The aim of this paper is to present a concept of predictive logistics mobility in a smart city, based on the integration of data from IoT systems and artificial intelligence algorithms. The analysis involves the use of sensor data and urban information systems to anticipate logistics events, as well as to dynamically plan routes and delivery schedules.

The proposed layered model combines a sensory layer, an integration layer, an analytical layer, and a decision-making layer. Preliminary results indicate that predictive mobility management can improve delivery efficiency, reduce route completion times, and mitigate the negative environmental impact of transport. The paper highlights the potential of integrating the Internet of Things and artificial intelligence to create sustainable urban logistics systems)

Keywords: Smart City, Internet of Things, public transport, effectiveness, mobility.

PRZESIADKA: MISSION POSSIBLE – ZNOSZENIE BARIER DLA OSÓB O OGRANICZONEJ MOBILNOŚCI

W artykule przedstawiono problemy, na jakie mogą się natknąć osoby o ograniczonej mobilności na węzłach przesiadkowych podczas zmiany środka transportu. Wskazane zostały główne czynniki utrudniające im ten proces oraz stosowane rozwiązania mające ułatwić pokonanie barier. Analizy dokonano na podstawie wybranych węzłów przesiadkowych w Krakowie. Przedstawiono również propozycję zmian w istniejącym rozwiązaniu, aby poprawić jego dostępność. Ponadto w tekście zaprezentowano możliwe użycie metody oceny wskaźnikowej węzłów przesiadkowych AMPTI do oceny dostępności węzła dla osób o ograniczonej mobilności.

Słowa kluczowe: węzeł przesiadkowy, osoby z ograniczoną mobilnością, dostępność, AMPTI.

WSTĘP

Osoby z ograniczoną mobilnością (ang. *People with Reduced Mobility* – PRM) napotykają podczas podróży wiele barier. Są to zarówno ograniczenia infrastrukturalne, jak i te związane z wykorzystywanym taborzem. Te pierwsze są często łatwe do wyeliminowania, przy niedużych nakładach finansowych lub odpowiednim planowaniu na etapie projektowym.

Lecz kim tak naprawdę jest osoba o ograniczonej mobilności? Ciężko wskazać konkretną definicję w polskim prawodawstwie. Bazując jednak na przepisach polskich i europejskich aktów prawnych, można określić, że jest to osoba, która ma problemy z poruszaniem się ze względu na niepełnosprawność ruchową, zmysłową (czasową lub stałą) czy umysłową, wiek, chorobę lub jakąkolwiek inną przyczynę, która to osoba podczas podróży potrzebuje szczególnej uwagi lub/i dostosowania ogólnych usług do jej potrzeb [8]. Czasami zalicza się do takich osób również kobiety w ciąży, rodziców z wózkami lub małymi dziećmi, czy osoby z ciężkim bagażem.

Prawa osób z ograniczoną mobilnością są chronione przepisami zarówno krajowymi, jak i europejskimi. Akty takie jak Rozporządzenie Parlamentu

Europejskiego i Rady (WE) nr 181/2011 oraz Rozporządzenie (WE) nr 1107/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady gwarantują osobom o ograniczonej mobilności prawo do bycia traktowanym na równi z innymi pasażerami oraz nakładają na przewoźników obowiązek pomocy takim osobom, odpowiednio w transporcie autobusowym [5] oraz lotniczym [4]. Pierwszy z aktów wskazuje również, że przy budowie lub przebudowie terminali podmioty nimi zarządzające powinny uwzględniać potrzeby osób o ograniczonej mobilności. W polskim prawodawstwie o prawa osób z ograniczoną mobilnością dba między innymi Prawo przewozowe [6].

Należy ponadto zdefiniować, czym w istocie jest węzeł przesiadkowy. Jeśli chodzi o prawną definicję, to ustawa o publicznym transporcie zbiorowym definiuje zintegrowany węzeł przesiadkowy jako „miejsce umożliwiające dogodną zmianę środka transportu wyposażone w niezbędną dla obsługi podróżnych infrastrukturę, w szczególności: miejsca postojowe, przystanki komunikacyjne, punkty sprzedaży biletów, systemy informacyjne, umożliwiające zapoznanie się zwłaszcza z rozkładem jazdy, linią komunikacyjną lub siecią komunikacyjną” [7]. W literaturze przedmiotu można znaleźć inne, również szersze definicje.

Na potrzeby analizy przyjęto najbardziej podstawową definicję węzła przesiadkowego jako miejsca, w którym można się przesiąść na inną linię autobusową lub tramwajową, jak i na inny środek transportu oraz towarzyszącej temu miejscu infrastruktury (np. parkingi *Park & Ride*).

W artykule przedstawiono ograniczenia, jakie napotkać mogą na swojej drodze osoby o ograniczonej mobilności oraz omówiono rozwiązania, które ułatwiają takim osobom podróżowanie, a w szczególności przesiadanie się, na podstawie wybranych węzłów przesiadkowych w Krakowie. Ponadto pokazano możliwe wykorzystanie metody oceny wskaźnikowej węzłów przesiadkowych AMPTI w diagnozowaniu ich dostępności.

1. OGRANICZENIA DLA OSÓB O OGRANICZONEJ MOBILNOŚCI

Ograniczenia napotymane przez osoby o ograniczonej mobilności mogą mieć naturę zarówno infrastrukturalną, jak i być związane z taborem wykorzystywanym przez przewoźników. Głównym obszarem, na którym skupiono się w artykule, jest infrastruktura węzłów przesiadkowych. Jednakże w celu pogłębienia analizy

problemu wskazano również bariery, z którymi stykają się osoby z ograniczoną mobilnością podczas samej podróży środkami transportu zbiorowego.

Jak wcześniej wspomniano, definicja osoby o ograniczonej mobilności wskazuje wiele schorzeń lub sytuacji, w których można uznać, że dana osoba wymaga zapewnienia szczególnych warunków podróży. W związku z tym również ograniczenia doświadczane przez te osoby mogą mieć różne podłoże. Można przyjąć następujący podział ograniczeń:

- ograniczenia ruchowe – wynikające z niepełnosprawności ruchowej pasażera lub jego podeszłego wieku;
- ograniczenia sensoryczne (zmysłowe) – wynikające z niepełnosprawności pasażera ze względu na zmysły (wzrok, słuch);
- ograniczenia umysłowe – wynikające z niepełnosprawności umysłowej pasażera.

Do osób z ograniczoną mobilnością zalicza się również osoby chore, rodziców z dziećmi oraz/i wózkami dziecięcymi oraz pasażerów z ciężkimi bagażami. W praktyce można często te osoby przyporządkować do jednej z powyższych kategorii (np. jako osoby z ograniczeniem ruchowym, związanym z koniecznością niesienia ciężkiego bagażu).

1.1. Ograniczenia taborowe

W przypadku wykorzystywanych przez przewoźników pojazdów można wskazać kilka głównych ograniczeń. Pierwszym, najbardziej oczywistym, są pojazdy o wyłącznym udziale wysokiej podłogi. Konieczność wejścia do pojazdu po schodach utrudnia podróżowanie głównie osobom starszym i niepełnosprawnym. Dla osób na wózkach inwalidzkich może ona oznaczać brak możliwości odbycia podróży, o ile pojazd nie jest wyposażony w odpowiednie urządzenia.

Kolejnym elementem utrudniającym podróż może być brak głosowych zapowiedzi przystankowych, który utrudnia podróżowanie osobom niewidomym lub niedowidzącym. Ponadto brak czytelności wewnętrznej i zewnętrznej informacji pasażerskiej w pojeździe może być znacznym utrudnieniem dla osób starszych lub z niepełnosprawnościami umysłowymi, które to osoby mogą mieć problem z orientacją w przestrzeni, co utrudni im opuszczenie pojazdu na odpowiednim przystanku.

1.2. Ograniczenia infrastrukturalne

W przypadku infrastruktury przystankowej liczba możliwych do napotkania przez osoby o ograniczonej mobilności ograniczeń jest dużo większa. Poczynając od peronów niedostosowanych do wysokości pojazdów, wymuszających na pasażerach zrobienie wysokiego kroku, co m.in. dla osób starszych może być dużym wyzwaniem, kończąc na nieczytelnej, przystankowej informacji pasażerskiej.

Jeśli chodzi o utrudnienia w zakresie infrastruktury dla osób z ograniczeniami ruchowymi, należy również wymienić przejścia podziemne, z których na perony dostać się można wyłącznie z użyciem schodów. Przykładem takiego przystanku w Krakowie przez długi czas był Plac Bohaterów Getta, do którego prowadziło wyłącznie przejście podziemne (rys. 1). Powodowało to, że osoby, które miały trudności z poruszaniem się, często z konieczności wybierały nielegalne przejście przez jezdnię, aby mieć możliwość skorzystania z transportu tramwajowego.



Rys. 1. Wejście do przejścia podziemnego na przystanku Plac Bohaterów Getta w Krakowie

Źródło: zbiory własne.

Naziemne przejścia dla pieszych również mogą stanowić barierę, a na pewno utrudnienia, dla osób o ograniczonej mobilności. Wysokie krawężniki mogą utrudniać poruszanie się osobom na wózkach inwalidzkich, a przejścia bez sygnalizacji świetlnej mogą być szczególnie niebezpieczne dla osób niepełnosprawnych ze względu na zmysł wzroku.

Nieczytelna informacja pasażerska oraz słabe oznakowanie dojść do poszczególnych peronów przystankowych mogą sprawiać, że osoby starsze oraz osoby

z niepełnosprawnością umysłową mogą czuć się zagubione i mieć problem ze znalezieniem odpowiedniego peronu, z którego odjeżdża poszukiwany przez nich środek transportu.

Analizując węzły przesiadkowe pod kątem dostępności dla osób z ograniczoną mobilnością, nie można również zapomnieć o odległościach pomiędzy poszczególnymi peronami. Zbyt duże odległości mogą znacząco utrudniać przesiadanie się osobom starszym oraz z niepełnosprawnościami ruchowymi.

2. ROZWIĄZANIA UŁATWIAJĄCE PODRÓŻOWANIE OSOBOM O OGRANICZONEJ MOBILNOŚCI

Wiele z wcześniej wymienionych ograniczeń, zwłaszcza infrastrukturalnych, jest możliwych do wyeliminowania przy względnie niewielkich nakładach finansowych lub przy odpowiednim planowaniu nowej inwestycji. Często trudniejsze do wyeliminowania są ograniczenia dotyczące eksploatowanego taboru, gdyż wynikają one bezpośrednio z konstrukcji danego pojazdu.

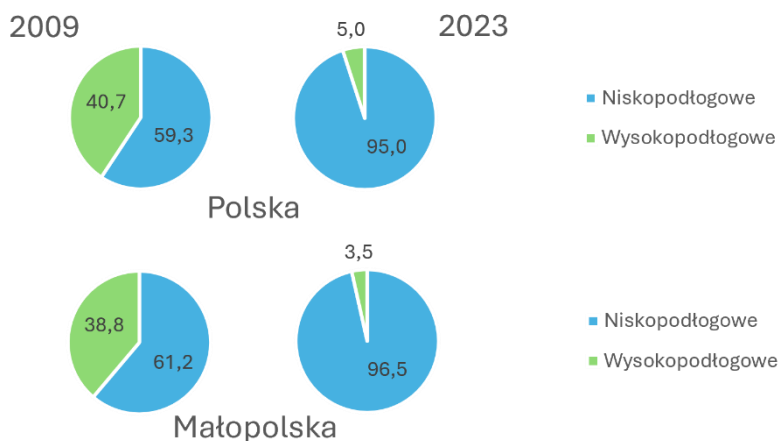
2.1. Rozwiązania dotyczące taboru

Najważniejsza, z punktu widzenia osób o ograniczonej mobilności, jest maksymalizacja udziału pojazdów niskopodłogowych, niskowejściowych i częściowo niskopodłogowych we flocie przewoźników. Przewoźnicy powinni dążyć do eliminacji z ruchu pojazdów wysokopodłogowych lub jeśli nie jest to możliwe, dostosowania ich do możliwości przewozu osób z ograniczoną mobilnością (przede wszystkim osób z niepełnosprawnościami, poruszających się na wózkach inwalidzkich). Ponadto pojazdy powinno wyposażać się w rampy lub podnośniki, umożliwiające osobom na wózkach inwalidzkich dostanie się do pojazdu.

W tym zakresie w perspektywie ostatnich lat zaszło wiele pozytywnych zmian. W 2023 roku w autobusowej komunikacji miejskiej w Polsce 95% pojazdów było niskopodłogowych, natomiast w 2009 roku było to 59,3%, co jest znaczącym wzrostem. Analizując miasta Małopolski, odsetek ten jest jeszcze większy i wynosi 96,5%.

Powyższe dane przedstawia wykres (rys. 2). Pod tym kątem duży postęp poczyniła Komunikacja Miejska w Krakowie, gdzie wszystkie autobusy są co najmniej niskowejściowe, a wśród obecnie eksploatowanych przez Miejskie

Przedsiębiorstwo Komunikacyjne S.A. w Krakowie tramwajów, pozostały nieliczne składy wyłącznie wysokopodłogowe.



Rys. 2. Udział pojazdów niskopodłogowych w miejskich przewozach autobusowych w Polsce i w Małopolsce w latach 2009 i 2023

Źródło: opracowanie własne na podstawie [8].

Drugim ważnym aspektem jest ulepszanie wewnętrznej i zewnętrznej informacji pasażerskiej. Kluczowe jest wyposażenie pojazdów w wyraźne i głośne głosowe zapowiedzi przystankowe, aby ułatwić osobom niewidomym i niedowidzącym podróż. Dodatkowo ważne jest, aby ekrany informacji pasażerskich znajdowały się w miejscach, umożliwiających ich łatwe czytanie. Powinno się dążyć, aby ekrany te służyły przede wszystkim do przekazywania czytelnych informacji o trasie i najbliższych przystankach linii, a w dalszej kolejności do wyświetlania na nich ewentualnych reklam.

2.2. Rozwiązania infrastrukturalne

W przypadku infrastruktury liczba możliwych do zastosowania rozwiązań ułatwiających podróż jest zdecydowanie większa. Jeśli chodzi o dostęp dla osób z niepełnosprawnościami do przystanków, do których prowadzi przejście podziemne, można zastosować kilka rozwiązań. Konieczna jest budowa windy, która umożliwiałaby wyjazd z przejścia podziemnego na peron. Jest to najlepsze rozwiązanie pod kątem bezpieczeństwa, ponieważ zachowuje charakter przejścia

wielopoziomowego, dzięki czemu ruch pieszy w dalszym ciągu odseparowany jest od ruchu pojazdów. Niestety, to rozwiązanie nie jest pozbawione wad. Często jest ciężkie do zaimplementowania na już istniejących węzłach przesiadkowych ze względu na układ samego przystanku. Gdy nie jest możliwy montaż windy, w celu ułatwienia dostępu dla osób o ograniczonej mobilności można stworzyć alternatywne dojście, poprzez wytyczenie naziemnego przejścia dla pieszych. Jak wspomniano wcześniej, jest to rozwiązanie mniej bezpieczne ze względu na krzyżowanie się ruchu pieszego i drogowego, lecz przy braku innej możliwości spełnia podstawową funkcję, czyli umożliwienie osobom o ograniczonej mobilności dostania się na peron.

Na poniższym zdjęciu (rys. 3) widać, że na omawianym wcześniej przystanku (Plac Bohaterów Getta w Krakowie), w celu zwiększenia dostępności, zdecydowano się na wytyczenie dodatkowego naziemnego przejścia dla pieszych.



Rys. 3. Naziemne przejścia dla pieszych prowadzące na perony przystanku
Plac Bohaterów Getta w Krakowie

Źródło: zbiory własne.

Kolejnym problemem do rozwiązania jest różnica wysokości między peronem przystankowym a wejściem do pojazdu. W zależności od typu przystanku można ten problem rozpatrywać dwojako. W przypadku, gdy pojazd dojeżdża bezpośrednio do krawędzi peronowej, należy dążyć do zrównania jej wysokości z wysokością wejścia w pojazd. Inaczej należy rozpatrzyć sytuację, w której pojazd nie dojeżdża bezpośrednio do peronu, lecz zatrzymuje się w pewnej odległości od niego. Taka

sytuacja najczęściej ma miejsce w przypadku komunikacji tramwajowej, gdy torowisko tramwajowe prowadzone jest środkiem jezdni, a szerokość drogi nie pozwala na stworzenie wyspy peronowej. Dużo tego typu przystanków występuje na trasach sieci tramwajowej w centrum Krakowa. W przypadku tychże przystanków w celu zwiększenia dostępności dla osób z ograniczoną mobilnością oraz ogólnego bezpieczeństwa pasażerów można przekształcać je w tzw. przystanki wiedeńskie (rys. 4). Są to przystanki, gdzie jezdnia między torowiskiem tramwajowym, a peronem przystankowym zostaje wyniesiona do poziomu chodnika oraz wejścia do pojazdu. Sprawia to, że pojazdy zbliżające się do przystanku muszą zwolnić, co zwiększa bezpieczeństwo pasażerów, a zarazem eliminuje różnicę wysokości między wejściem pojazdu a poziomem drogi.



Rys. 4. Przystanek wiedeński Teatr Słowackiego w Krakowie

Źródło: zbiory własne.

Dla osób o ograniczonej mobilności istotna jest również czytelna i dokładna informacja pasażerska. Ułatwia ona poruszanie się w obrębie węzła przesiadkowego, minimalizując ryzyko pomylenia przez taką osobę drogi. Jest to szczególnie istotne dla osób, których ograniczenia wynikają z niepełnosprawności umysłowej oraz osób

starszych, dla których ważne jest, aby system informacji pasażerskiej był łatwy do interpretacji. Pomocne mogą być również ekrany dynamicznej informacji pasażerskiej (SDIP). Pomagają one w realnej ocenie możliwości dotarcia przez osobę o ograniczonej mobilności na odpowiedni peron przed odjazdem ich środka transportu. Do systemu informacji pasażerskiej można zaliczyć także ścieżki prowadzące dla osób niewidomych oraz oznaczenia zapisane alfabetem Braille’a. Te rozwiązania znacząco ułatwiają poruszanie się w obrębie węzła przesiadkowego osobom niewidomym. Ponadto stosowanie jaskrawych, kontrastowych kolorów przy krawędziach peronowych oraz przy wejściach prowadzących do przejść podziemnych może zwiększyć bezpieczeństwo osób niedowidzących.



Rys. 5. System informacji pasażerskiej na węźle przesiadkowym Górka Narodowa P+R w Krakowie

Źródło: zbiory własne.



Rys. 6. Ścieżki dotykowe dla niewidomych oraz kontrastowa krawędź na peronie

Źródło: zbiory własne.

Następnym rozwiązaniem, które ułatwia przesiadanie się osobom o ograniczonej mobilności, są pasy autobusowo-tramwajowe (PAT, w Krakowie nazywane pasami A+T). Takie rozwiązanie jest szeroko stosowane m.in. w Krakowie i Wrocławiu.

Nie jest ono rozwiązaniem pozbawionym wad. Jedną z nich może być pogorszenie przepustowości torowisk w wyniku zajmowania pasów przez autobusy. Jednak liczba zalet takiego rozwiązania rekompensuje jego wady. Odizolowanie ruchu autobusowego od ruchu ogólnego zmniejsza narażenie linii autobusowych na opóźnienia, powodowane warunkami kongestii drogowej. Dodatkowo takie pasy, ze względu na przystosowanie ich do ruchu kołowego, pozwalają na korzystanie z nich przez pojazdy służb ratowniczych [1].

Jednak z punktu widzenia niniejszej analizy najważniejszą zaletą PAT jest umożliwienie przesiadki w tzw. systemie *door to door*, czyli zmiany środka transportu (np. z autobusu na tramwaj) bez konieczności zmiany peronu. Dla osób z ograniczoną mobilnością takie rozwiązanie jest niewątpliwym ułatwieniem.

Jak już wcześniej wspomniano, w Krakowie stosuje się takie rozwiązania, zwłaszcza w centrum miasta. Jako przykład można wskazać przystanek Politechnika 01. Przy peronie przystankowym zatrzymują się tam: 1 dzienna i 1 nocna linia tramwajowa oraz 11 dziennych i 4 nocne linie autobusowe. Dodatkowo, na poziomie -2 znajduje się przystanek w tunelu tramwajowym, w którym poruszają się 3 linie. Umożliwia to dogodną przeładkę między tymi środkami transportu, a liczba zatrzymujących się tam linii sprawia, że jest to miejsce, z którego da się odjechać w kierunku każdej dzielnicy Krakowa. Jednak tak duża liczba linii sprawia, że przepustowość tego węzła przeładkowego jest całkowicie wyczerpana. Autobusy i tramwaje stoją tam w kolejkach do obsługi peronu. Jest to związane ze słabą przepustowością wyjazdu z przystanku, jako że na samym jego początku znajduje się przejście dla pieszych oraz droga poprzeczna. W celu poprawy funkcjonowania węzła należałoby dążyć do zmiany cyklu sygnalizacji świetlnej, aby umożliwiała ona sprawniejsze opuszczanie węzła przez pojazdy komunikacji miejskiej.



Rys. 7. Pas A+T przy przystanku Politechnika 01 w Krakowie

Źródło: zbiory własne.

Dodatkowym problemem przy tak dużej liczbie linii, z których część ma wysokie częstotliwości kursowania, jest niska wydolność systemu dynamicznej informacji pasażerskiej. Zamontowany na przystanku ekran wyświetla 4 najbliższe odjazdy z przystanku. Skutkuje to tym, że wyświetla on w praktyce odjazdy pojazdów w ciągu najbliższych 2–3 minut, co sprawia, że nie spełnia on swojej funkcji dla osób z ograniczoną mobilnością (o której wspomniano wcześniej). Należałoby rozważyć montaż większej tablicy, aby wyświetlane przez nią odjazdy z przystanku obejmowały dłuższy okres.

3. ZASTOSOWANIE METODY OCENY WSKAŹNIKOWEJ AMPTI DO OCENY DOSTĘPNOŚCI WĘZŁÓW PRZESIADKOWYCH

Do oceny dostępności węzłów przesiadkowych dla osób o ograniczonej mobilności można również wykorzystać metodę oceny wskaźnikowej AMPTI. Opracowano ją na zlecenie Biura Drogownictwa i Komunikacji m.st. Warszawy. Jej pierwotna wersja zmieniała się kilkukrotnie. W 2014 roku została opisana przez jej autorów i składała się z 8 wskaźników [2]. Obecnie obejmuje 10 wskaźników, do których dane pozyskiwane są w drodze audytu węzła, pomiarów potoków pasażerskich oraz badań ankietowych. Tymi wskaźnikami są [3]:

- zawartość węzła (W1);
- czytelność węzła (W2);
- wyposażenie dodatkowe (W3);
- infrastruktura podstawowa (W4);
- dostępność dla niepełnosprawnych (W5);
- bezpieczeństwo osobiste (W6);
- bezpieczeństwo w ruchu (W7);
- informacja pasażerska (W8);
- efektywność przestrzenna (W9);
- zatłoczenie węzła (W10).

Do oceny dostępności węzła przesiadkowego dla osób o ograniczonej mobilności kluczowych jest w praktyce pięć z nich: W1, W2, W4, W5 i W8. Ich opisy przedstawia tabela 1. W przypadku wskaźnika W1, im mniejsza wartość, tym większa dostępność. W pozostałych przypadkach lepsza jest wartość większa.

Tabela 1

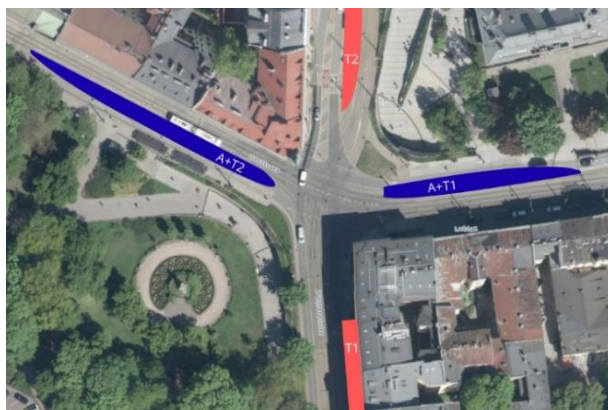
Skrócony opis wybranych wskaźników metody AMPTI i wyniki dla dwóch wybranych węzłów

Nazwa	Symbol	Opis	Wartość wskaźników	
			Teatr Słowackiego	Hala Targowa
Zwartość węzła	W1.2d	Średnia arytmetyczna długość przejścia między wszystkimi peronami	131,9 m	91,4 m
Czytelność węzła	W2	Średni odsetek przystanków lub wejść widocznych z innych przystanków.	66,7%	50%
Infrastruktura podstawowa	W4p	Odsetek peronów, które spełniają kryteria jakości infrastruktury	78,2%	65,6%
	W4s	Odsetek segmentów przejść, które spełniają kryteria jakości infrastruktury (chodniki, schody, przejścia naziemne i podziemne)	62,5%	75%
Dostępność dla niepełnosprawnych	W5p	Odsetek peronów, które spełniają kryteria dostępności dla osób starszych i niepełnosprawnych. Wzięto tu pod uwagę m.in. czy peron wyposażony jest w ścieżkę dotykową dla niepełnosprawnych	40%	50%
	W5s	Odsetek segmentów przejść, które spełniają kryteria dostępności dla osób starszych i niepełnosprawnych. Wzięto tu pod uwagę, czy węzeł wyposażony jest w windy, pochylnie, ścieżki dotykowe, obniżone krawężniki na przejściach i sygnały dźwiękowe dla osób niewidomych	50%	75%
Informacja pasażerska	W8p	Odsetek peronów z dostępną informacją pasażerską, kompletność rozkładów, informacji o taryfach, schematu sieci, planu węzła	66,7%	66,7%
	W8s	Odsetek segmentów przejść z dostępną informacją pasażerską. Ważne jest oznakowanie kierunkowe na peronach i przejściach	25%	25%

Źródło: opracowanie własne na podstawie [2, 3].

W powyższej tabeli (tab.1) przedstawiono również wyniki analizy, przeprowadzonej dla dwóch węzłów przesiadkowych w Krakowie (przystanki Teatr

Słowackiego oraz Hala Targowa z uwzględnieniem przystanku osobowego Kraków Grzegórzki – rys. 8 i 9).



Rys. 8. Plan węzła Teatr Słowackiego w Krakowie

Źródło: opracowanie własne na podstawie [10].



Rys. 9. Plan węzła Hala Targowa w Krakowie

Źródło: opracowanie własne na podstawie [10].

Ze względu na brak wystarczających danych o liczbie przesiadek, proponowane w metodzie wskaźniki W1.1c i W1.1d zostały pominięte, a policzony został jedynie W1.2d. Dla węzłów wyniósł on odpowiednio 131,9 m oraz 91,4 m. Oznacza to,

że pasażerowie przesiadający się w obrębie węzła Hala Targowa muszą pokonać blisko o jedną trzecią mniejszy dystans niż ci, którzy przesiadają się na przystanku Teatr Słowackiego.

Wskaźnik W2 większy jest dla węzła Teatr Słowackiego, co oznacza, że z jego peronu można dostrzec większą liczbę innych peronów lub wejść do nich.

Jeśli chodzi o wskaźnik W4, to oba węzły uzyskały umiarkowanie wysokie wyniki. W przypadku pierwszego z nich lepiej zostały ocenione perony (78,2%), lecz gorszą ocenę uzyskały segmenty przejść (62,5%). Na drugim z węzłów sytuacja była odwrotna (odpowiednio 65,6 i 75%).

Gorzej prezentują się wartości wskaźnika W5 dla obu węzłów. Są one przeciętne i oscylują w okolicach 50% (wyjątkiem jest W5s dla Hali Targowej, co wynika z nowej infrastruktury p.o. Kraków Grzegórzki dostosowanej dla osób z ograniczoną mobilnością).

W przypadku informacji pasażerskiej jest ona na peronach obu węzłów na umiarkowanie dobrym poziomie. Dużo gorzej sytuacja wygląda, gdy analizuje się segmenty przejść. Tam wartość wskaźnika W8s jest bardzo niska.

PODSUMOWANIE

Osoby o ograniczonej mobilności na swojej drodze napotykają wiele przeszkód i ograniczeń, które utrudniają im podróżowanie. Ograniczenia te mogą być różnej natury: sensorycznej, fizycznej lub umysłowej. Utrudnienia mogą pojawić się zarówno na etapie podróży, ze względu na niedostosowanie taboru do przewozu takich osób, jak i na etapie dotarcia na przystanek lub przesiadki, jako skutek złego stanu lub niedostosowania infrastruktury węzła przesiadkowego.

Prawa osób o ograniczonej mobilności chronione są zarówno polskimi aktami prawnymi, jak i aktami prawa europejskiego. W związku z tym, przy modernizacji istniejących węzłów przesiadkowych oraz budowie nowych należy dążyć do likwidacji barier dla osób o ograniczonej mobilności, aby ich podróż była łatwa, szybka i bezpieczna, bez żadnych możliwych do wyeliminowania utrudnień. W diagnozowaniu potencjalnych ograniczeń dla osób z ograniczoną mobilnością pomocna może być metoda oceny wielokryterialnej AMPTI. Analiza odpowiednich wskaźników może wskazać, gdzie należy skoncentrować działania w celu poprawy dostępności węzła przesiadkowego.

LITERATURA

1. Makuch J., *PAT – wspólne pasy i przystanki autobusowo-tramwajowe w Warszawie. Transport publiczny w Warszawie kluczem harmonijnego rozwoju stolicy Polski*, Warszawa 2005.
2. Olszewski P., Krukowska H., Krukowski P., *Metodyka oceny wskaźnikowej węzłów przesiadkowych transportu publicznego*, Transport Miejski i Regionalny, 2014, s. 4–9.
3. Olszewski P., Krukowski P., Pecelik P., *Zastosowanie i rozszerzenie metodyki oceny węzłów przesiadkowych AMPTI*, X Konferencja Naukowo-Techniczna, Poznań-Rosnówko, 17–19 czerwca 2015.
4. Rozporządzenie (WE) nr 1107/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 5 lipca 2006 r. w sprawie praw osób niepełnosprawnych oraz osób o ograniczonej sprawności ruchowej podróżujących drogą lotniczą.
5. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 181/2011 z dnia 16 lutego 2011 r. dotyczące praw pasażerów w transporcie autobusowym i autokarowym oraz zmieniające rozporządzenie (WE) nr 2006/2004 (DzU.UE.L.2011.55.1), rozdział III.
6. Ustawa z dnia 15 listopada 1984 r. Prawo przewozowe (DzU.2024.1262 t.j.), art. 14, ust. 2.
7. Ustawa z dnia 16 grudnia 2010 r. o publicznym transporcie zbiorowym (DzU.2025.285.t.j.), art. 4, ust. 1, pkt 27.

Źródła internetowe

8. bdl.stat.gov.pl/bdl/dane/podgrup/tablica.
9. <https://www.lawinsider.com/dictionary/person-with-reduced-mobility> (dostęp 8.03.2026r.)
10. <https://www.streetmap.pl/satelita/>.

CHANGING: MISSION POSSIBLE – ELIMINATING BARRIERS FOR PEOPLE WITH REDUCED MOBILITY

Text presents problems that may face people with reduced mobility at transfer nodes when changing their mean of transport. In the text were named significant factors that make interchanges difficult and solutions that are used to make changing easier. The analysis was based on selected transfer hubs in Cracow. Author of text came also with propositions of changes in existing solution to make it more accessible. Moreover there is shown how AMPTI indicator evaluation method can be used to rate accessibility of transfer nodes for people with reduced mobility.

Keywords: transfer node, people with limited mobility, accessibility, AMPTI.