
Zrównoważona logistyka: od koncepcji do wdrożenia, czyli jak symulacje umożliwiają przewidzenie skutków dla planety

Szymon Ługiewicz

Uniwersytet Morski w Gdyni

e-mail: sz.lugiewicz@gmail.com

Paweł Wierzbicki

Uniwersytet Morski w Gdyni

e-mail: p.wierzbicki@wn.umg.edu.pl

ORCID: [0009-0008-9834-4659](https://orcid.org/0009-0008-9834-4659)

© 2025 Szymon Ługiewicz, Paweł Wierzbicki

Praca opublikowana na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Międzynarodowe (CC BY 4.0).

Skrócona treść licencji na <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Cytuj jako: Ługiewicz, S., Wierzbicki, P. (2025). Zrównoważona logistyka: od koncepcji do wdrożenia, czyli jak symulacje umożliwiają przewidzenie skutków dla planety. W: B. Detyna (red.). *Młodzi logistycy w nauce. Studenckie Zeszyty Naukowe Akademii Nauk Stosowanych Angelusa Silesiusa nr 7/2025* (s. 81–91). Wydawnictwo Naukowe Akademii Nauk Stosowanych Angelusa Silesiusa.

DOI: [10.71433/2025.96.3.07](https://doi.org/10.71433/2025.96.3.07)

JEL Classification: C63, L91, Q53

■ **Streszczenie:** Artykuł przedstawia rodzaje i zastosowania symulacji w logistyce, skupiając się na możliwościach, jakie one dają we wspieraniu transformacji w kierunku bardziej zrównoważonych i efektywnych praktyk. Autorzy dokonują przeglądu najważniejszych technik symulacyjnych, w tym modelowania procesów logistycznych, analizy scenariuszy oraz optymalizacji zasobów, przy jednoczesnym omówieniu ich zastosowania w kluczowych obszarach logistyki, takich jak magazynowanie, transport i zarządzanie łańcuchem dostaw. Przedstawione przykłady ilustrują, jak narzędzia symulacyjne mogą być wykorzystywane do modelowania rzeczywistych operacji logistycznych w celu identyfikacji możliwości wprowadzenia potencjalnych usprawnień oraz redukcji kosztów i szkodliwych emisji. W artykule opisano konkretne oprogramowania przeznaczone do symulacji procesów logistycznych, planowania tras transportowych czy zarządzania flotą pojazdów. Autorzy omawiają również przypadki zastosowania tych narzędzi zarówno w prostych symulacjach operacyjnych, jak i bardziej złożonych analizach strategicznych, które pomagają przewidywać skutki wprowadzenia nowych rozwiązań technologicznych lub zmian w procesach logistycznych.

■ **Słowa kluczowe:** transport, symulacja komputerowa, zrównoważony rozwój

1. Wstęp

Zrównoważona logistyka staje się kluczowym elementem współczesnych strategii rozwoju przedsiębiorstw, szczególnie w kontekście narastających wyzwań środowiskowych, eko-

onomicznych i społecznych. Wprowadzenie rozwiązań wspierających efektywne wykorzystywanie zasobów, redukcję emisji czy ilości odpadów wymaga jednak przeprowadzenia precyzyjnych analiz i prognoz. Jednym z ważniejszych narzędzi umożliwiających takie działania są symulacje komputerowe. W logistyce pozwalają one przewidzieć potencjalne skutki podejmowanych decyzji – zarówno dla środowiska, jak i dla rentowności operacyjnej przedsiębiorstw. Symulacje odgrywają kluczową rolę w analizie procesów logistycznych, takich jak optymalizacja tras transportowych, zarządzanie magazynami czy ocena wpływu eksploatacji pojazdów na środowisko (por. Grabińska i in. 2022; Stajniak, 2020, s. 2511–2525). Dzięki ich zastosowaniu przedsiębiorstwa mogą projektować systemy bardziej zgodne z ideą zrównoważonego rozwoju, co przyczynia się do zmniejszenia negatywnego oddziaływania na środowisko przy jednoczesnym zwiększeniu efektywności kosztowej (Pawlak, 2021, s. 45–53). W niniejszym artykule zostaną omówione możliwości zastosowania symulacji w różnych obszarach logistyki, co przedstawiono poprzez przykłady wykorzystania wybranych programów.

W miarę wzrostu globalnej świadomości ekologicznej i wdrażania strategii na rzecz zielonej transformacji konieczne staje się bardziej kompleksowe spojrzenie na działania logistyczne. Symulacje pozwalają nie tylko na optymalizację procesów, ale także na ocenę długoterminowego wpływu decyzji na środowisko – czy spowodują one emisje CO₂, zwiększone zużycie energii czy generowanie nadmiarowych odpadów (por. Szarata i Karoń, 2021, s. 5–15). W dobie postępu technologicznego i rozwoju narzędzi, takich jak sztuczna inteligencja czy zaawansowane systemy modelowania, symulacje mogą wspierać podejmowanie świadomych i odpowiedzialnych decyzji, tym samym przyczyniając się do budowania bardziej zrównoważonej logistyki (Komorowski i Wojciechowski, 2022, s. 123–141).

2. Symulacje w zrównoważonej logistyce – jak to działa?

Symulacje komputerowe pozwalają tworzyć cyfrowe modele procesów logistycznych, dzięki czemu można przetestować konkretne rozwiązanie bez ponoszenia kosztów realnego, a także umożliwiają przeanalizowanie, w jaki sposób różne zmienne wpływają na takie czynniki, jak zużycie paliwa, emisje CO₂, czas dostawy czy zużycie surowców. Za ich pomocą można testować nowe technologie, w tym pojazdy elektryczne, alternatywne paliwa i systemy zarządzania energią w magazynach. Warto też zwrócić uwagę na to, że ekonomia może iść w parze z ekologią (Grabińska i in., 2022).

Coraz częściej słyszy się o problemach związanych z wprowadzeniem skutecznej ochrony środowiska oraz z rosnącym naciskiem na zrównoważony rozwój podczas dyskusji i konferencji dotyczących logistyki. Z jednej strony firmy muszą dobrze funkcjonować i przynosić dochody, z drugiej jednak oczekuje się od nich zmniejszenia negatywnego wpływu na środowisko – dążenie do równowagi w tym zakresie wymaga jednak nowatorskiego myślenia i odpowiednich narzędzi do podejmowania decyzji. Tę funkcję mogą spełniać symulacje komputerowe, pozwalające nie tylko znaleźć tzw. wąskie gardła, w których warto wprowadzić usprawnienia, ale także przewidzieć możliwe negatywne skutki proponowanych rozwiązań. W artykule skupiono się na opisie możliwości, jakie daje symulacja komputerowa podczas projektowania zrównoważonych łańcuchów dostaw, a także na popularyzacji integracji celów ekologicznych i ekonomicznych przedsiębiorstw.

3. Rodzaje symulacji komputerowych

Na potrzeby artykułu przyjęto następujący, często stosowany podział symulacji komputerowych (za: Głowacki, 2024).

1. Ze względu na przewidywalność zdarzeń:
 - symulacje stochastyczne – wykorzystujące generatory liczb (najbardziej znana jest metoda Monte Carlo);
 - symulacje deterministyczne – charakteryzujące się powtarzającymi się wynikami.
2. Ze względu na upływ czasu:
 - symulacje z czasem dyskretnym;
 - symulacje z czasem ciągłym;
 - symulacje zdarzeń dyskretnych.
3. Ze względu na formę danych wyjściowych:
 - symulacje statyczne;
 - symulacje dynamiczne;
 - symulacje interaktywne;
 - symulacje nieinteraktywne.

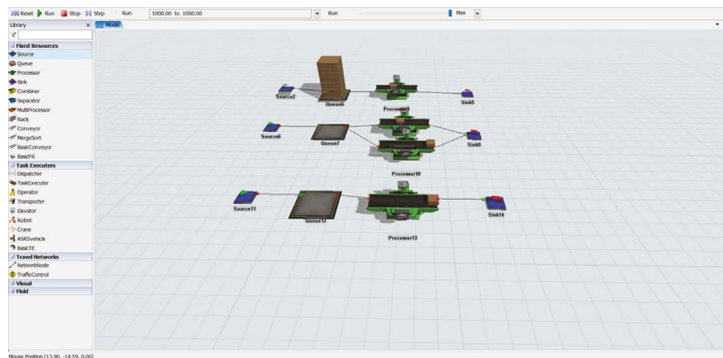
Podziały te pozwalają na wybór odpowiedniego rodzaju symulacji, która najlepiej zaprezentuje analizowane zagadnienie. Należy jednak pamiętać, że w modelach symulacji komputerowych czasem trudno dostrzec wyraźne granice między różnymi kategoriami (np. symulacja może być zarazem stochastyczna, interaktywna i dynamiczna). Ten podział nie uwzględnia również dynamicznie rozwijających się w ostatnim czasie nurtów, takich jak *machine learning* (uczenie maszynowe), przez co konieczne będzie rozszerzenie klasyfikacji.

4. Symulacje magazynowe

Na rynku można znaleźć wiele oprogramowań służących do symulowania pracy magazynu. Firmy, dążąc do jak największej wydajności produkcji i procesów magazynowych, skupiają się na optymalnym wykorzystaniu maszyn oraz na niemarnotrawieniu surowców, np. energii elektrycznej. W takim wypadku mniejsze zużycie przynosi korzyści zarówno ekonomiczne, jak i ekologiczne (Stajniak, 2020).

Rys. 1. Symulacja przeprowadzona w programie FlexSim

Źródło: opracowanie własne.



FlexSim jest oprogramowaniem, które wykorzystuje się do symulowania procesów produkcyjno-magazynowych. Oprogramowanie to daje możliwość przewidzenia zatorów produkcyjnych, nieefektywnej pracy urządzeń i marnotrawienia energii.

Dzięki symulacji możemy zauważyć, że w pierwszej linii, licząc od góry, pojawił się zator. Procesor nie jest w stanie obsłużyć wystarczającej liczby paczek, przez co utworzyła się kolejka. Można to rozwiązać na dwa sposoby. Pierwszym jest dodanie drugiej takiej samej maszyny, która pozwoli na podwojenie możliwości operacyjnych. Drugie rozwiązanie to podwojenie mocy przerobowej pojedynczego urządzenia. O wyborze najprawdopodobniej zdecyduje to, która opcja okaże się bardziej ekonomiczna. Osoba korzystająca z programu może samodzielnie obliczyć, jakie będzie zużycie energii elektrycznej zależnie od zastosowanego rozwiązania. Dzięki temu można ocenić, jakie skutki dla środowiska spowoduje wdrożenie danej opcji.

5. Optymalizowanie tras przejazdów

Jedną z najczęściej wykonywanych symulacji jest symulacja przejazdu wyznaczonymi trasami. Każdego dnia używa jej wiele osób korzystających z systemów nawigacyjnych, takich jak Google Maps. Warto zaznaczyć, iż ta aplikacja umożliwia wybranie drogi, na której według obliczeń algorytmu statystyczny pojazd zużyje najmniej paliwa. Duże firmy mogą stosować bardziej specjalistyczne oprogramowanie do planowania tras i zarządzania flotą pojazdów, co może pozwolić na redukcję emisji szkodliwych spalin.

5.1. Symulacja spalania na trasie

Symulowanie spalania na trasie może być użyteczne w ograniczaniu wpływu transportu na środowisko. Rozwinięte algorytmy potrafią policzyć, ile paliwa zostanie zużyte na danej trasie, a także pod jakim obciążeniem średnio będzie działał silnik spalinowy. Poniżej przedstawiono łatwy sposób na obliczenie zużycia paliwa, z którego można skorzystać na podstawie danych udostępnionych przez producenta pojazdu.

Z obliczeń wykonanych na podstawie danych uwzględnionych na rys. 2 wynika, że na dystansie 20 km przejazdu cyklem niskim samochód spali 1,9 l paliwa. Jeśli przejazd odbędzie się trasą dłuższą o 5 km, to przy jeździe w cyklu mieszanym samochód spali ok. 1,6 l. Długość trasy wzrosła o 25% przy jednoczesnym spadku spalania o 0,3 l na każde 100 km. Zmiana cyklu zazwyczaj wynika z wyboru trasy o mniejszym natężeniu ruchu lub o większej przepustowości (np. przejazd obwodnicą zamiast drogą miejską).

Zużycie paliwa	
Cykl	Wh/km
Mieszany (wartość wazona)	166.0
Cykl	l/100km
Mieszany (wartość wazona)	1.4
Niski	9.5
Średni	6.0
Wysoki	5.4
Bardzo wysoki	6.7
Mieszany	6.5

Rys. 2. Przykładowe dane spalania auta osobowego

Źródło: (Kornacki, 2023).

W dokładniejszej analizie należałoby uwzględnić emisje spalin przy konkretnych obrotach silnika oraz opory ruchu. Przykładowym programem służącym inżynierom może być Sim center Flamaster software. Oprogramowanie to pozwala już na poziomie projektowania silnika symulować jego pracę, oceniając jego sprawność i spalanie podczas obciążenia (Siemens, 2024)

5.2. Zużycie opon, tarcz hamulcowych i innych elementów generujących zanieczyszczenie

Jednym z kluczowych obszarów, w których możemy minimalizować negatywny wpływ na środowisko, jest eksploatacja pojazdów, a zwłaszcza wynikające z niej emisje pyłów i innych cząstek. Te z kolei są związane szczególnie ze zużyciem opon, tarcz hamulcowych oraz elementów zawieszenia.

Podczas hamowania dochodzi do tarcia klocków hamulcowych o tarcze hamulcowe. Jednocześnie opony trą o nawierzchnię, po której porusza się pojazd. Skutkiem jest powstawanie drobin metali, gumy i innych substancji chemicznych. Te cząstki, określane mianem *non-exhaust emissions*, stanowią znaczną część zanieczyszczeń generowanych przez pojazdy drogowe. Szacuje się, że w Europie stanowią one około 20-50% pyłów PM10 i PM2.5 związanych z transportem drogowym (Grigoratos i Martini, 2015, s. 2491–2504).

Szczególną uwagę zwrócono na rolę symulacji w modelowaniu zużycia elementów eksploatacyjnych pojazdów oraz przewidywaniu skutków środowiskowych. Symulacje te mogą obejmować:

1. Modelowanie zużycia opon i hamulców – ta symulacja umożliwia oszacowanie tempa degradacji materiałów w różnych warunkach (np. zależnie od rodzaju nawierzchni, wagi ładunku, warunków pogodowych) (Nowak i Śleszyński, 2020, s. 45–58).

2. Analizę rozkładu emisji przestrzennych – pozwala ona zidentyfikować obszary szczególnie narażone na koncentrację pyłów, co ma znaczenie przy projektowaniu tras transportowych.
3. Oceny cyklu życia (LCA) – uwzględniają one pełen cykl użytkowania pojazdów – od produkcji po recykling (Bureau Veritas, 2024).

Dzisiejsza technologia umożliwia wprowadzenie w życie niektórych rozwiązań, takich jak systemy odzysku energii podczas hamowania – pojazdy elektryczne i hybrydowe wykorzystują wówczas hamowanie rekuperacyjne, co ogranicza zużycie tradycyjnych tarcz hamulcowych. Można również regularnie monitorować stan opon i układu hamulcowego. Zintegrowane systemy telematyczne w pojazdach pozwalają na bieżąco śledzić zużycie poszczególnych komponentów (por. European Environment Agency (EEA), 2021; Szarata i Karoń, 2021, s. 5–15.)

6. Symulacja drogi morskiej

Logistyka morska, podobnie jak transport kołowy, musi brać pod uwagę wiele czynników w celu odpowiedniego działania. Jednym z nich, najbardziej niebezpiecznym dla środowiska naturalnego, jest zanieczyszczenie go spalinami wydzielanymi podczas codziennej pracy statków. „W celu oceny wpływu zanieczyszczeń emitowanych w spalinach statków [...] konieczne jest zastosowanie mniej lub bardziej złożonego systemu modelowania, w którego skład powinny wejść następujące moduły:

- moduł emisji zanieczyszczeń,
- moduł rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w atmosferze, czyli ich transportu, dyfuzji i przemian chemicznych w atmosferze, z uwzględnieniem procesów wymywania w chmurach oraz suchej i mokrej depozycji,
- moduł meteorologiczny, powiązany z systemem przetwarzania, analizy i asymilacji danych meteorologicznych,
- moduł emisji, a więc rozkładu stężeń w określonym obszarze przestrzeni atmosferycznej”.

Wielkość emisji powodowanych przez statki podczas spalania paliwa, a co za tym idzie, powodowany przez nie negatywny wpływ na środowisko zależą od wielu czynników. Mogą to być na przykład:

- wielkość silnika,
- rodzaj silnika,
- liczba silników na jednostce,
- wszystkie wielkości opisujące silniki (moment obrotowy, prędkość obrotowa itp.),
- ekologiczne rozwiązania, które zostały zaimplementowane w danej jednostce,
- prędkość jednostki,
- zużycie paliwa jednostki (Pawlak, 2011).

6.1. Metody symulacji dróg morskich

Podczas zdobywania odpowiedniego doświadczenia, jak również wymaganych certyfikatów, młodzi marynarze często korzystają z symulatorów, które są w stanie dostarczyć odpowiedzi na pytania dotyczące bezpiecznej eksploatacji drogi wodnej, np. czy akwen jest odpowiednio

przystosowany do przyjęcia jednostek, jaka głębokość toru wodnego powinna być zachowana, jednostki jakich parametrów mogą się po takich torach wodnych przemieszczać oraz jak zniwelować negatywny wpływ transportu morskiego na środowisko. Oczywiście symulacje komputerowe w przypadku wyznaczania dróg morskich mogą okazać się dość kosztowne, ale są dokładne, czego nie można powiedzieć o metodach analitycznych – bardziej ekonomicznych, aczkolwiek obciążonych ryzykiem niedokładności.

„Głównymi parametrami drogi wodnej z punktu widzenia bezpieczeństwa manewrowania statkiem są:

- wymiary akwenu w płaszczyźnie poziomej – szerokość i długość akwenu oraz jego kształt,
- wymiar akwenu w płaszczyźnie pionowej – bezpieczna głębokość rzutuująca w konsekwencji na zapas wody pod stępką statku maksymalnego” (Gucma i Montewka, 2002).

7. Symulacja zmiany środków transportu z drogowego na kolejowy

Zmiana modalna w transporcie towarowym, polegająca na przeniesieniu ładunków z dróg na kolej, jest jednym z kluczowych elementów strategii Unii Europejskiej w zakresie zrównoważonego transportu. Główne cele obejmują redukcję emisji gazów cieplarnianych, obniżenie kosztów zewnętrznych transportu, takich jak zanieczyszczenie powietrza czy korki, oraz poprawę efektywności energetycznej systemu transportowego.

Największym wyzwaniem jest dostosowanie infrastruktury kolejowej do rosnących potrzeb sektora logistycznego. Badania przeprowadzone w Holandii pokazują, że potencjał modalny (*Modal Shift Potential*, MSP) dla niektórych korytarzy transportowych wynosi nawet 48%, ale rzeczywista realizacja tego potencjału zależy m.in. od możliwości łączenia ładunków, dostępności usług kolejowych i konkurencyjności kosztów (Jonkeren i in., 2023).

Dodatkowo istnieją bariery regulacyjne i operacyjne, takie jak brak standaryzacji technicznej oraz różnice w procedurach operacyjnych między państwami członkowskimi UE, co utrudnia płynne przeniesienie ładunków z transportu drogowego na kolej (Takman i Gonzalez-Aregal, 2021).

8. Badania nad modalnym przejściem w Europie Północno-Zachodniej

Symulacje przeprowadzone w ramach projektu badawczego w regionie Europy Północno-Zachodniej wykazały, że zmiana modalna może znacznie zmniejszyć negatywne skutki transportu. W największym stopniu udało się zredukować emisje CO₂, hałas i zatory. W symulacji uwzględniono takie zmienne, jak: odległość, waga ładunku, przepustowość korytarzy kolejowych. Wyniki pokazały, że na niektórych trasach emisje CO₂ można zredukować nawet o 50%, co wynika z większej efektywności energetycznej kolei w porównaniu z transportem drogowym. Jednakże wykazano, że ograniczenia infrastrukturalne i koszty przeładunków stanowią istotne wyzwanie dla wdrożenia tych zmian (por. Jonkeren i in., 2021; European Environment Agency (EEA), 2022).

9. Ocena wpływu na środowisko

Nietrudno zauważyć, jak dużą wagę przykładą się w przedsiębiorstwach do działań ekologicznych, zgodnych z naturą, minimalizujących negatywny wpływ na środowisko. Również w logistyce można zaobserwować taką tendencję – w transporcie towarów drogą lądową, morską oraz powietrzną wprowadza się systemy, które mają zniwelować negatywny wpływ na środowisko naturalne. W związku z tym wykorzystuje się także symulacje pozwalające sprawdzić, jak dane rozwiązanie będzie oddziaływać na ekonomikę transportu, ale również to, czy nie wpłynie ono negatywnie na środowisko.

Pozytywne zmiany dla środowiska są następujące:

- minimalizacja śladu węglowego;
- ograniczenie zużycia zasobów naturalnych;
- promowanie alternatywnych technologii;
- zmniejszenie nacisku na lokalne ekosystemy;
- ulepszenie zarządzania odpadami;
- długoterminowe planowanie zrównoważonego rozwoju.

Podsumowując, należy stwierdzić, że symulacje w logistyce dodatkowo wpływają nie tylko na środowisko, ale również na sam proces transportowy, pozwalając zaplanować wszystkie części łańcucha dostaw w sposób optymalny ze względów ekonomiczno-środowiskowych.

10. Ocena danego produktu

Najlepszym przykładem adaptacji ekologii do transportu i logistyki jest zielona logistyka, czyli koncepcja zaimplementowania świadomości ekologicznej do codziennych zadań związanych z transportem dóbr z punktu A do punktu B. Pozwala ona na wykorzystanie zrównoważonych rozwiązań mających pozytywny wpływ na środowisko naturalne przy niewielkim wzroście kosztów.

Przykłady zielonej logistyki stanowią:

- transport intermodalny;
- redukcja śladu węglowego;
- wykorzystanie zielonej energii;
- recykling i zarządzanie opakowaniami;
- zrównoważone zarządzanie łańcuchem dostaw (Truck Van, 2024).

11. Jak wykonać dobrą symulację?

Symulację rozumie się jako imitowanie rzeczywistości w celu sprawdzenia danego rozwiązania w praktyce. „Symulacje są zazwyczaj oparte na komputerach, wykorzystujących model generowany przez oprogramowanie, aby zapewnić wsparcie dla decyzji menedżerów i inżynierów, a także w celach szkoleniowych. Techniki symulacyjne pomagają w zrozumieniu i eksperymentowaniu, ponieważ modele są zarówno wizualne, jak i interaktywne” (TWI Global, 2024). Dobrą symulacją możemy więc nazywać model, w którym przejrzyście widać wszystkie jego cechy,

zarówno te korzystne dla osoby przeprowadzającej symulację, jak również te negatywne, które wpływać mogą na pojmowanie całego procesu (np. wykorzystanie większej liczby silników do szybszego poruszania się statków, a co za tym idzie – do skrócenia czasu dostarczania towarów).

Kluczowe aspekty dobrej symulacji stanowią:

- dokładne określenie przeznaczenia symulacji;
- odpowiednie przygotowanie danych, których wykorzystanie będzie niezbędne;
- wybór optymalnego modelu symulacji;
- zdefiniowanie parametrów;
- zdefiniowanie zmiennych;
- przeprowadzenie wstępnych badań/prób;
- weryfikacja oraz analiza wyników;
- wdrożenie modelu;
- monitorowanie funkcjonowania modelu w rzeczywistości.

Dobra symulacja powinna być przejrzysta dla odbiorców, wyniki powinny być przedstawione w sposób jasny, transparentny, a co najważniejsze – powinna mieć odzwierciedlenie w realnym życiu i być odpowiedzią na już występujący problem.

12. Podsumowanie

Od wielu lat prowadzone są badania, których celem jest określenie najkorzystniejszego rozwiązania połączenia zarówno najbardziej efektywnego dbania o środowisko naturalne, jak i najszybszego i ekonomicznie opłacalnego transportu towarów. Logistycy tworzą modele, których zadaniem jest zbadanie, jak najlepiej można wykorzystać potencjał transportu morskiego, lądowego oraz lotniczego wraz z magazynowaniem, starając się w tym samym czasie zniwelować negatywne oddziaływanie na środowisko naturalne. Pomocne w tym działaniu okazują się symulacje, które pozwalają na dokładne przygotowanie modeli oraz oszacowanie wyników. Dzięki nim firmy zarówno transportowe, jak i centra logistyczne mogą wybrać strategię, która pozwoli im połączyć chęć zysku z chęcią dbania o środowisko naturalne.

„Kwestie emisji szkodliwych składników [...] oraz ich rozprzestrzeniania się i transportu w atmosferze niosą istotne wyzwania ekonomiczne, ekologiczne, technologiczne oraz zdrowotne w szerokiej skali – od lokalnej po globalną. Jednakże badania i modelowanie tych zjawisk powinny być prowadzone kompleksowo – analizowane powinny być nie tylko wskaźniki emisji związków szkodliwych w spalinach statków, ale również zjawiska rozprzestrzeniania się smugi zanieczyszczeń, z uwzględnieniem zachodzących procesów fizykochemicznych i przemian fotochemicznych oraz warunków meteorologicznych” (Pawlak, 2011).

Bibliografia

- European Environment Agency. (2021). *Non-Exhaust Emissions from Road Transport* (EEA Technical Report). Copenhagen.
- European Environment Agency. (2022). *Rail and Modal Shift in the EU: Assessment of Trends and Environmental Benefits* (EEA Technical Report). <https://www.eea.europa.eu/publications/transport-and-environment-report-2022/transport-and-environment-report/view>
- Głowacki, M. (2024). *Modelowanie – opis zagadnień fizycznych i geometrycznych*. Pobrano 4 grudnia 2024 z <https://home.agh.edu.pl/^glowacki/docs/matwykl/SysInfPrzem/Modelowanie.pdf>
- Grabińska, A., Pawełoszek, I., Ziora, L. (2022). *Informatyczne wspomaganie procesów logistycznych*. Politechnika Częstochowska.
- Grigoratos, T., Martini, G. (2015). Brake Wear Particle Emissions: A Review. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(4), 2491–2504. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3696-8>
- Gucma, L., Montewka, J. (2002). Porównanie metod analitycznych określania parametrów dróg wodnych z metodą symulacyjną. *Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Morskiej*, 65, 133–146.
- Jonkeren, O., Friso, K., Hek, L. (2023). Changes in External Costs and Infrastructure Costs Due to Modal Shift in Freight Transport in North-Western Europe. *Journal of Shipping and Trade*, 8.
- Kornacki, J. (2023). *WLTP – co to właściwie znaczy i jak zinterpretować wyniki?*. Pobrano 2 grudnia 2024 z <https://automotyw.com/wltp-co-to-wlasciwie-znaczy-i-jak-zinterpretowac-wyniki/>
- Nowak, M., Śleszyński, J. (2020). Modelowanie emisji niezwiązanych ze spalaniem w kontekście logistyki miejskiej. *Logistyka*, 3, 45–58.
- Pawlak, M. (2021). Modelowanie emisji szkodliwych składników spalin morskich silników okrętowych w celu oceny wpływu emitowanych zanieczyszczeń na jakość powietrza atmosferycznego. *Prace Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni*, 40, 45–53.
- Stajniak, M. (2020). Modelowanie i symulacja w notacji BPMN jako czynnik kształtujący efektywność procesów logistycznych. *Logistyka*, 3, 2511–2525.
- Szarata, A., Karoń, G. (2021). Wpływ zrównoważonej logistyki na środowisko miejskie. *Transport Miejski i Regionalny*, 4, 5–15.
- Takman, J., Gonzalez-Aregal, M. (2024). A Review of Public Policy Instruments to Promote Freight Modal Shift in Europe: Evidence from Evaluations. *Transport Reviews*, 44. <https://doi.org/10.1080/01441647.2023.2279219>
- TWI Global. (2024). *What is Simulation?* Pobrano 28 listopada 2024 z <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-simulation>
- Truck Van. (2024). *Ekologia w logistyce – jak dbać o środowisko w transporcie?*. Pobrano 28 listopada 2024 z <https://truck-van.pl/rynek/ekologia-w-logistyce-jak-dbac-o-srodowisko-w-transporcie/>
- Bureau Veritas. (2024). *Ocena cyklu życia (LCA) – jaki dokładnie wpływ na środowisko ma produkt?*. Pobrano 12 grudnia 2024 z <https://www.bureauveritas.pl/magazine/ocena-cyklu-zycia-lca-jaki-dokladnie-wplyw-na-srodowisko-ma-produkt>
- Siemens. (2024). *Simcenter Flomaster*. Pobrano 27 listopada 2024 z <https://plm.sw.siemens.com/pl-PL/simcenter/systems-simulation/flomaster/>

Sustainable Logistics: From Concept to Implementation – How Simulations Enable Predicting the Impact on the Planet

■ **Abstract:** The article presents the types and applications of simulations in logistics, focusing on their potential to support transformation towards more sustainable and efficient practices. The authors review the most important simulation techniques, including process modelling, scenario analysis, and resource optimization, while discussing their application in key areas of logistics such as warehousing, transportation, and supply chain management. The examples provided illustrate how simulation tools can be used to model real-life logistics operations to identify potential improvements and reduce costs and emissions. The article describes specific types of software designed for simulating logistics processes, such as systems supporting warehouse design and optimization, transport route planning, and fleet management. The authors also present case studies on the use of these tools in both simple operational simulations and more complex strategic analyses, which help predict the outcomes of introducing new technological solutions or changes in logistics processes.

■ **Keywords:** transportation, computer simulation, sustainable development