MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE

Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București

Școala doctorală:

Antreprenoriat, Ingineria și Managementul Afacerilor

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

Cadru conceptual bazat pe inteligența artificială (AI) pentru lanțurile logistice: Integrarea transportului maritim, portuar și urban

AI-based framework for logistic chains: Integrated maritime, port and urban transport

Conducător de doctorat:
Prof. dr. ing. ec. Cezar SCARLAT

Student doctorand:
Nistor ANDREI

BUCUREȘTI
2025

LISTA FIGURILOR

Figura 1.1. Diagrama flux – cauză, problemă, soluție. Sursa: autorul. 10
Figura 2.1. Interacțiunea tehnologiilor digitale moderne. Sursa: Tapscott (2021) 13
Figura 2.2. Evoluția transformării digitale în transporturi. Sursa: autorul. 14
Figura 3.1. Nava Yara Birkeland. Sursa:(Yara.com, 2021)**Error! Bookmark not defined.**
Figura 3.2. Roboți autonomi de transport containere (AGV) în Portul Rotterdam. Sursa:(Port of Rotterdam, 2024). .....**Error! Bookmark not defined.**
Figura 4.1. Camioane autonome Einride. Sursa: Westerheide (2025).**Error! Bookmark not defined.**
Figura 4.2. Roboți autonomi Starship, așteptând comenzi în fața unei băcănii. Sursa: Obe (2022). .....**Error! Bookmark not defined.**
Figura 5.1. Cadrul conceptual propus. Sursa: autorul. 19
Figura 5.2. Componentele VTS și interacțiunile dintre acesta și subcomponente. Sursa: Andrei, Scarlat și Ioanid (2024). 20
Figura 5.3. Cerințele de acoperire ale senzorilor de la prova. Sursa: Andrei, Scarlat și Ioanid (2024). .....**Error! Bookmark not defined.**
Figura 5.4. Arhitectura propusă pentru rețeaua neuronală recurentă. Sursa: Scarlat, Ioanid și Andrei (2023). .....**Error! Bookmark not defined.**
Figura 5.5. Diagrama de flux care ilustrează algoritmul de calcul și procesul în fiecare strat al RNN propusă. Sursa: Andrei, Scarlat și Ioanid (2024). .....**Error! Bookmark not defined.**
Figura 5.6. Arhitectura propusă pentru rețeaua federată. Sursa: Andrei et. al. (2024). .....**Error! Bookmark not defined.**
Figura 5.7. Exemplu de rețea multimodală în care sunt integrate vehicule autonome. Sursa: Andrei, Scarlat și Ioanid (2024). .....**Error! Bookmark not defined.**
Figura 5.8. Rețeaua rutieră utilizată în simularea nr. 1 .....**Error! Bookmark not defined.**
Figura 5.9. Rețeaua rutieră utilizată în simularea nr. 2. .....**Error! Bookmark not defined.**
Figura 5.10. Exemplu de sistem de semaforizare, la începutul simulării. ..... **Error! Bookmark not defined.**
Figura 6.1. Utilizarea modurilor de transport în simulare. Sursa: captură MATSim. **Error! Bookmark not defined.**
Figura 6.2. Comparație a nivelului de congestie înainte și după optimizare. Sursa: captură Python (Genetic algorithm).....**Error! Bookmark not defined.**
Figura 6.3. Viteza medie per ora de plecare, rezultată în scenariul cu control cu timp fix. .....**Error! Bookmark not defined.**
Figura 6.4. Viteza medie pe ora de plecare, rezultată în scenariul cu control adaptiv. .....**Error! Bookmark not defined.**
Figura 6.5. Niveluri orare de congestie și estimări de viteză „live”, furnizate de TomTom. .....**Error! Bookmark not defined.**
Figura 6.6. Agenți aflați în circulație, pe ore: control cu timp fix vs. control adaptiv al semafoarelor. .....**Error! Bookmark not defined.**

LISTA TABELELOR

Tabelul 3.1. Gradele de autonomie conform Comitetului Maritim de Standardizare. Sursa: MSC (2022). .....**Error! Bookmark not defined.**

Tabelul 5.1. Comparație între sistemele logistice tradiționale și sistemele logistice multimodale integrate bazate pe AI, propuse. Sursa: interpretarea autorului asupra rezultatelor simulărilor. .....**Error! Bookmark not defined.**

Tabelul 5.2 Indicatori de performanță portuară în cadrul programării tradiționale vs. AI (perioadă de 30 de zile). Sursa datelor: rezultatele simulării SimPy.**Error! Bookmark not defined.**

Tabelul 6.1. Legătura dintre întrebările de cercetare și contribuțiile capitolelor la atingerea obiectivelor de cercetare. 21

LISTA ABREVIERILOR

3D	Tridimensional
5G	Fifth generation
AAWA	Advanced Autonomous Waterborne Applications
AGV	Autonomous Ground Vehicle
AI	Artificial Intelligence
AIS	Automatic Identification System
AJOT	American Journal of Transportation
AM	Antemeridian
AOC	Ashore Operations Center
AR	Augmented Reality
ASV	Autonomous Surface Vehicle
BBC	British Broadcast Corporation
CCTV	Closed Circuit Television
CO_2	Carbon Dioxide
COLREG	Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea
CPU	Central Processing Unit
DFFAS	Designing the Future of Full Autonomous Ship Project
DGPS	Differential Global Positioning System
EDI	Electronic Data Interchange
ENC	Electronic Nautical Charts
EO	Electro-Optic
ERP	Electronic Road Pricing
EV	Electric Vehicle
FAA	Federal Aviation Administration
FPGA	Field Programmable Gate Array
GA	Genetic Algorithm
GDPR	General Data Protection Regulation
GIS	Geographic Information System
GLONASS	Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GPU	Graphics Processing Unit
IMO	International Maritime Organization
IR	Infrared
ISO	International Organization for Standardization
IT	Information Technology
ITS	Intelligent Transport System
KPI	Key Performance Indicator
LA	Los Angeles

LB	Los Angeles Bay
LIDAR	Light Detection and Ranging
LTE	Long-Term Evolution
MAS	Mayflower Autonomous Ship
MASS	Maritime Autonomous Surface Ship
MOBI	Mobility Open Blockchain Initiative
MPA	Maritime Port Authority
MSC	Maritime Safety Committee
MW	Megawatt
NOx	Nitrogen Oxides
OT	Operational Technology
PM	Postmeridian
POLA	Port of Los Angeles
PSA	Port of Singapore Authority
RFID	Radio Frequency Identification
RL	Reinforcement Learning
RNN	Recurrent Neural Network
ROC	Remote Operation Center
SAR	Synthetic Aperture Radar
SOLAS	Safety of Life at Sea
SUA	Statele Unite ale Americii
TEU	Twenty-foot Equivalent Unit
TIC	Tehnologia Informației și Calculatoare
TX	Texas
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UE	Uniunea Europeană
V2I	Vehicle to Infrastructure
V2V	Vehicle to Vehicle
V2X	Vehicle to Everything
VCAS	Vessel Collision Avoidance System
VHF	Very High Frequency
VR	Virtual Reality
VRP	Vehicle Routing Problem
VTOL	Vertical Takeoff and Landing
VTS	Vessel Traffic System

MULȚUMIRI

Doresc să prezint profunda mea recunoștință domnului Prof. univ. dr. ing. ec. Cezar SCARLAT pentru încrederea acordată, pentru exigența metodologică și pentru disponibilitatea de a mă ghida cu răbdare în toate etapele cercetării. Mulțumesc doamnelor profesoare din comisia de îndrumare pentru comentariile atente, întrebările lămuritoare și recomandările care au contribuit decisiv la clarificarea și consolidarea argumentelor acestei teze. Sunt deosebit de îndatorat domnului Prof. univ. dr. Florin POPESCU pentru recomandarea inițială și pentru sfatul, simplu și hotărâtor, de a urma studiile doctorale; sprijinul domniei sale a contat atât profesional, cât și uman. În mod special, mulțumesc soției mele, Raluca ANDREI și familiei pentru sprijinul necondiționat, pentru răbdarea cu care au acceptat absențele și pentru încurajarea constantă care m-a ajutat să duc la bun sfârșit această cercetare. Le adresez, totodată, mulțumiri tuturor celor care au sprijinit acest demers și pe care, fără intenție, nu i-am menționat nominal.

INTRODUCERE

Lanțurile globale de aprovizionare trec printr-o etapă de transformare profundă, determinată de schimbări simultane în mai multe dimensiuni fundamentale. Pe de o parte, expansiunea accelerată a comerțului electronic a generat presiuni intense asupra rețelelor logistice, care sunt nevoite să asigure livrări mai rapide, mai fiabile și mai personalizate. Pe de altă parte, preocupările tot mai accentuate privind sustenabilitatea impun o regândire a operațiunilor tradiționale, în vederea reducerii amprentei de carbon, optimizării consumului de resurse și alinierea la noi cerințe de reglementare.

În acest context complex, transportul maritim continuă să dețină un rol strategic, asigurând aproximativ 90% din volumul total de mărfuri la nivel mondial (Lau et al., 2024). Cu toate acestea, performanța acestui sector nu poate fi analizată izolat. Livrarea eficientă a bunurilor depinde din ce în ce mai mult de sincronizarea întregului lanț logistic, de la mișcările navelor pe mare, până la manipularea în porturi și distribuția finală în medii urbane aglomerate. Fără o coordonare eficientă între aceste segmente, apar pierderi de timp, acumulări de costuri și emisii inutile care contravin obiectivelor de sustenabilitate și eficiență.

Teza explorează atât fundamentele tehnologice ale acestei integrări, cât și provocările practice asociate guvernanței datelor, interoperabilității și adoptării industriale. Din punct de vedere metodologic, soluția propusă este testată printr-o combinație de modelare și simulare. Platformele MATSim și SimPy sunt utilizate pentru a construi scenarii logistice realiste, în care sunt modelate interacțiunile dintre nave autonome, terminale portuare digitalizate și rețele de distribuție urbană. Simulările permit compararea performanțelor obținute cu cele ale abordărilor tradiționale, neintegrate, pe baza unor indicatori relevanți precum timpii de tranzit, nivelul de congestie, gradul de utilizare a flotei sau capacitatea de reacție la perturbări neprevăzute.

Prin această cercetare se urmărește demonstrabilitatea unei integrări inteligente a segmentelor logistice, de la mare la oraș, într-un cadru unificat, bazat pe date și susținut de algoritmi adaptivi. Rezultatele obținute oferă dovezi privind fezabilitatea tehnologică a unui astfel de model și conturează perspective clare pentru implementarea sa în practică. În plus, analiza subliniază rolul esențial al inteligenței artificiale nu doar ca instrument de automatizare, ci ca facilitator al unei guvernanțe logistice predictive, dinamice și transparente.

Cadrul conceptual propus reprezintă o contribuție la reconceptualizarea logisticii moderne, în care deciziile operaționale nu sunt luate în silozuri, ci în rețele interconectate care comunică și se adaptează în timp real. Această viziune reflectă nevoia tot mai acută de mobilitate multimodală inteligentă, în care resursele sunt distribuite eficient, impactul asupra mediului este minimizat, iar colaborarea între actorii logistici devine un factor determinant al competitivității și sustenabilității.

CAPITOLUL 1 OBIECTIVELE CERCETĂRII ȘI PREZENTAREA GENERALĂ A TEZEI

1.1 Motivație și context

Lanțurile globale de aprovizionare se confruntă cu provocări din ce în ce mai complexe în timp ce se străduiesc să satisfacă cererea tot mai mare de livrare rapidă, fiabilă și durabilă a bunurilor. Comerțul electronic își continuă expansiunea rapidă, obligând furnizorii de servicii logistice să își adapteze rețelele pentru a face față volumelor în creștere și așteptărilor consumatorilor pentru o livrare aproape instantanee. În același timp, transportul maritim reprezintă aproximativ 90% din volumul total de mărfuri, subliniind rolul esențial al sectorului în conectarea piețelor internaționale (Lau et al., 2024; World Bank, 2020). Cu toate acestea, multe etape ale lanțurilor logistice actuale (de la transportul în largul mării până la distribuția urbană către la clientul final) rămân fragmentate, neexistând o coordonare în timp real și un cadru general de gestionare.

O abordare cuprinzătoare, de la un capăt la altul, a logisticii - care valorifică inteligența artificială (AI), fluxurile de date ale internetului obiectelor (IoT) și transparența bazată pe blockchain - poate determina câștiguri semnificative de eficiență. Prin sincronizarea tuturor etapelor de expediere, de la sosirea navei la terminalele portuare până la livrarea finală la ușă, companiile reduc timpul de staționare, aglomerația și emisiile. Această integrare răspunde, de asemenea, preocupărilor tot mai mari ale părților interesate cu privire la durabilitate. Organismele de reglementare și consumatorii solicită din ce în ce mai mult lanțuri de aprovizionare mai ecologice, care să limiteze emisiile de carbon și să protejeze sănătatea publică prin zone urbane decongestionate și cu poluare redusă. Soluțiile maritime autonome, în combinație cu inovațiile pentru livrarea finală, cum ar fi dronele și vehiculele terestre autonome, au potențialul de a răspunde acestor așteptări.

O astfel de integrare poate fi modelată ca o problemă de optimizare multi-obiectiv, în care sistemul logistic urmărește minimizarea simultană a timpului de tranzit, emisiilor și costurilor:

$$U = \propto \cdot T + \beta \cdot E + \gamma \cdot C \quad (1.1)$$

unde T este timpul total de livrare, E reprezintă emisiile de CO_2, iar C este costul operațional. Valorile α, β, γ exprimă importanța relativă atribuită fiecărui criteriu, în funcție de obiectivele companiei sau ale legiuitorului.

În acest context, există o oportunitate clară de a dezvolta un cadru unificator care să îmbine autonomia maritimă cu digitalizarea porturilor și optimizarea logisticii urbane (în special prin reducerea timpului de livrare). Prin integrarea acestor fluxuri de cercetare separate în mod tradițional - prin analize avansate, algoritmi AI, actualizări în timp real bazate pe IoT și partajarea sigură a datelor - sistemele logistice devin mai adaptabile, transparente și durabile. Această teză

își propune să demonstreze modul în care un cadru conceptual convergent, bazat pe AI, poate răspunde nevoii urgente de eficiență și reziliență în întregul spectru logistic, de la mare la oraș.

1.2 Enunțarea problemei

În ciuda progreselor notabile înregistrate în automatizarea maritimă, digitalizarea porturilor și soluțiile bazate pe inteligența artificială pentru livrările către clientul final, lanțul logistic rămâne în mare parte fragmentat. Multe eforturi de cercetare și inițiative industriale se concentrează pe îmbunătățirea anumitor segmente, cum ar fi transportul maritim autonom sau transportul pe ultimul kilometru bazat pe drone, dar nu reușesc să creeze un plan coerent „de la un capăt la altul”. Această fragmentare conduce la procese dezarticulate, în care datele și eforturile de optimizare între operațiunile logistice maritime, portuare și terestre presupun un consum considerabil de resurse și coordonare. În Figura 1.1 este propus un cadru logistic integrat, bazat pe inteligență artificială, care rezolvă problema fragmentării lanțului logistic.

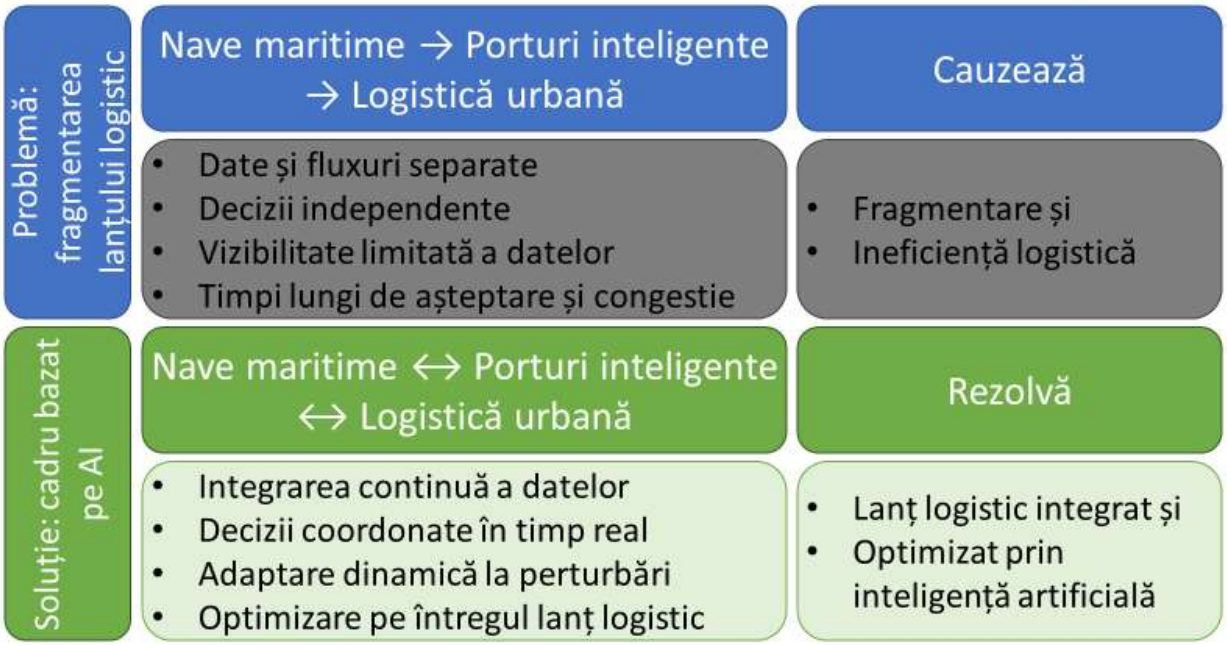


Figura 1.1. Diagrama flux – cauză, problemă, soluție. Sursa: autorul.

1.3 Obiectivele cercetării

Abordarea fragmentării care persistă între operațiunile maritime autonome, digitalizarea porturilor și logistica pe ultimul kilometru necesită o regândire holistică a întregului lanț de aprovizionare. În timp ce tehnologiile avansate s-au dovedit fiecare promițătoare în domeniile lor respective, un cadru cuprinzător care unește perfect aceste elemente de la navă la țărm și dincolo de acesta rămâne subdezvoltat.

Pentru atingerea eficienței operaționale într-un sistem logistic integrat, se urmărește minimizarea unei funcții de cost global:

$$\min_{x \in X} C(x) = \sum_{i=1}^{n} c_i(x_i) \quad (1.2)$$

unde *x* este vectorul deciziilor logistice (ex. rutare, programare, alocare de resurse), iar $c_i(x_i)$ reprezintă costul asociat fiecărei componente din lanț. Această formulare reflectă nevoia de coordonare algoritmică în timp real, susținută de inteligență artificială.

Având în vedere acest cadru conceptual, am dezvoltat și testat modele de simulare pentru a valida și perfecționa sistemul propus. Aceste modele utilizează simulări bazate pe agenți - folosind platformele MATSim și SimPy - pentru a reproduce modul în care navele autonome, operațiunile portuare și flotele de ultimă oră răspund la factori precum vremea, traficul și cererea fluctuantă. Prin integrarea tehnicilor de învățare automată (algoritmi genetici, învățare prin consolidare profundă), mediul de simulare a evaluat rapiditatea și eficiența cu care lanțul logistic se poate adapta la perturbări sau la schimbarea condițiilor.

1.4 Întrebări de cercetare

Pornind de la discuția privind modul în care un cadru logistic de la un capăt la altul, bazat pe inteligență artificială, ar putea unifica operațiunile maritime, portuare și pe ultimul kilometru, această cercetare încearcă să abordeze un set de întrebări esențiale care analizează atât dimensiunile tehnologice, cât și cele manageriale ale unui astfel de sistem integrat. Prima și cea mai importantă este întrebarea privind *modul în care inteligența artificială poate armoniza în mod eficient navele maritime autonome, operațiunile portuare digitalizate și fluxurile de distribuție terestră într-o rețea coerentă (Q1)*.

Strâns legată de aceste preocupări tehnice este o a doua întrebare, la fel de importantă: *în ce fel pot algoritmii avansați de optimizare - cum ar fi învățarea prin consolidare (reinforcement learning) sau algoritmii genetici (genetic algorithms) - să transforme deciziile logistice zilnice și să se adapteze dinamic la perturbări(Q2)*?

O a treia întrebare majoră se învârte în jurul peisajului organizațional și politic mai larg. Se ridică problema *modului în care autoritățile portuare, companiile de transport maritim și operatorii de pe ultimul kilometru pot structura guvernanța, protocoalele de securitate cibernetică și acordurile de partajare a datelor într-un mod care să încurajeze implicarea colectivă*. În consecință, este necesar să se stabilească *modul în care directivele politice - cum ar fi plafoanele de emisii, taxele de congestionare sau reglementările internaționale privind transportul maritim - ar putea influența ritmul și amploarea transformării digitale (Q3)*.

În cele din urmă, studiul se întreabă *cum poate fi măsurat succesul într-un ecosistem care acoperă marea liberă, terminalele de coastă, rețelele rutiere urbane și, în cele din urmă, ușile clienților. Prin identificarea și rafinarea principalilor indicatori de performanță - de la timpul mediu de așteptare la dană până la timpul de livrare finală și amprenta de carbon - cercetarea poate măsura adevăratul impact al unei arhitecturi integrate în comparație cu abordările tradiționale, izolate (Q4)*.

CAPITOLUL 2 TRANSFORMAREA DIGITALĂ ÎN TRANSPORTURI

Transformarea digitală reprezintă procesul integrării tehnologiilor digitale în toate aspectele activității unei organizații, având drept scop îmbunătățirea fundamentală a modului în care aceasta operează și oferă valoare clienților săi. În industria serviciilor de transport, transformarea digitală se manifestă prin introducerea și utilizarea intensivă a instrumentelor digitale, cum ar fi inteligența artificială (AI), internetul obiectelor (IoT), blockchain și tehnologiile geospațiale, pentru a optimiza fluxurile operaționale și a spori eficiența și sustenabilitatea logisticii.

Tehnologiile geospațiale (precum GPS și sistemele de informații geografice, GIS) stau la baza multor inovații în domeniul transporturilor, permițând navigarea precisă, urmărirea activelor și analiza spațială. Împreună, AI, IoT, blockchain și tehnologiile geospațiale formează coloana vertebrală a transformării digitale a transporturilor, sprijinind o tranziție către sisteme de mobilitate mai inteligente, mai integrate și mai durabile (vezi Figura 2.1).

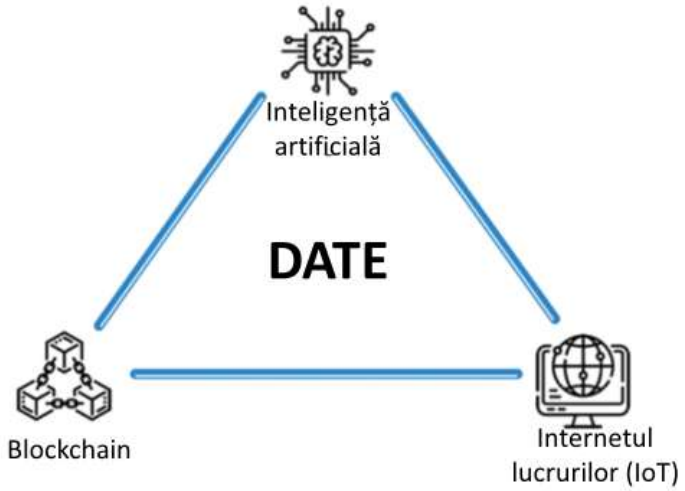


Figura 2.1. Interacțiunea tehnologiilor digitale moderne. Sursa: Tapscott (2021)

2.1 Tendințe generale în digitalizarea transporturilor

În sectorul transporturilor, au apărut mai multe tendințe generale de digitalizare, care marchează o evoluție a modului în care sunt furnizate și gestionate serviciile de transport. În ultimele câteva decenii, industria a trecut prin mai multe faze ale transformării digitale (Scarlat et al., 2023):

Digitalizare 1.0:
Planificare simplă a rutelor, optimizare statică, digitalizare parțială.
Digitalizare 2.0:

Monitorizare în timp real prin IoT, senzori telematici, mentenanță predictivă.
Digitalizare 3.0:
Date geospațiale precise, platforme digitale de partajare date, vizibilitate lanț logistic.
Digitalizare 4.0:
Inteligență artificială, machine learning, decizii adaptive și autonome, integrare totală a datelor.

Figura 2.2. Evoluția transformării digitale în transporturi. Sursa: autorul.

Algoritmii de inteligență artificială utilizați în logistica urbană rezolvă frecvent probleme de rutare a vehiculelor (VRP), în care obiectivul este minimizarea costului total al distanțelor sau timpilor parcurși de o flotă:

$$min \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} d_{ij} \cdot x_{ij} \quad (2.1)$$

unde d_{ij} reprezintă distanța (sau timpul de călătorie) între locațiile i și j, iar $x_{ij} \in \{0,1\}$ indică dacă ruta este utilizată (= 1 dacă ruta este folosită, 0 altfel). O astfel de formulă reflectă modul în care sistemele AI aleg traseele optime în timp real, în funcție de trafic, cerere și alte constrângeri.

CAPITOLUL 3 TRANSPORTUL MARITIM PE DISTANȚE LUNGI

Transportul maritim este coloana vertebrală a comerțului mondial, transportând marea majoritate a mărfurilor internaționale. Peste 90% din volumul comerțului mondial de mărfuri este transportat pe mare, subliniind importanța critică a transportului maritim pentru economia globală (MSC, 2022). Cu toate acestea, sectorul logisticii maritime tradiționale se confruntă cu provocări semnificative în ceea ce privește eficiența, costurile și durabilitatea.

În cadrul acestei lucrări, accentul va fi pus pe transportul maritim pe distanțe mari (*deep-sea shipping*), deoarece acesta reprezintă segmentul cel mai relevant pentru lanțurile logistice globale, concentrând aproximativ 90% din volumul comerțului mondial. Justificarea acestei concentrări rezidă în faptul că optimizarea acestui tip de transport poate avea un impact semnificativ asupra eficienței întregului lanț logistic, în special datorită potențialului mare de reducere a costurilor și emisiilor prin implementarea tehnologiilor avansate și soluțiilor bazate pe inteligența artificială.

Din perspectiva consumului energetic, AI poate ajusta automat viteza și traiectoria unei nave pentru a minimiza utilizarea de combustibil, ținând cont de eficiența echipamentelor și de condițiile de navigație. Consumul total de energie poate fi exprimat astfel:

$$E = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{P_i}{\eta_i} \cdot t_i \right) \quad (3.1)$$

unde P_i este puterea medie consumată pe segmentul i, η_i este eficiența operațională (în funcție de tipul motorului, sarcină, condiții), iar t_i este durata acelui segment. Această relație arată că AI poate reduce consumul prin selecția optimă a vitezei și ajustarea traiectoriei pentru a evita condițiile nefavorabile.

CAPITOLUL 4 TRANSPORTUL URBAN ȘI LIVRAREA CĂTRE CLIENTUL FINAL

Sistemele de transport urban și logistica pe ultimul kilometru sunt supuse unei presiuni tot mai mari în orașele moderne. Urbanizarea rapidă și intensificarea livrărilor electronice contribuie la congestionarea cronică a traficului, la creșterea poluării și la ineficiența livrărilor. Transportatorii urbani de marfă se confruntă cu provocări zilnice, cum ar fi zonele de descărcare limitate, timpii de așteptare îndelungați la punctele de livrare și străzile orașului blocate (Fioravanti et al., 2023).

În concluzie, transportul urban și logistica ultimului kilometru se află în pragul unei revoluții digitale majore. Convergența inteligenței artificiale, a IoT, a automatizării și a altor tehnologii emergente permite orașelor să depășească provocările tradiționale legate de transport și să construiască sisteme de mobilitate mai eficiente, durabile și centrate pe utilizator. Studiile de caz și discuțiile din acest capitol ilustrează atât potențialul imens al acestei transformări digitale, cât și considerentele atente pe care le necesită. În viitor, este imperativ ca factorii de decizie politică, părțile interesate din industrie și cercetătorii să continue să colaboreze în vederea implementării de soluții inovatoare, adaptării cadrelor de reglementare și monitorizării rezultatelor. Printr-o orientare atentă, transformarea digitală va rezolva problemele actuale ale transportului urban și va debloca noi posibilități pentru modul în care oamenii și mărfurile se vor deplasa în orașele de mâine, ducând la medii urbane mai inteligente, mai curate și mai locuibile pentru toți.

Acest capitol demonstrează cum algoritmii avansați de optimizare, susținuți de fluxuri de date în timp real, pot transforma logistica urbană și livrarea pe ultimul kilometru, oferind răspuns concret la Q2. Prin sincronizarea informațiilor provenite din porturi cu operațiunile last-mile, se contribuie direct la armonizarea întregului lanț logistic maritim-portuar-urban (Q1). Capitolul evidențiază, totodată, rolul cadrelor de reglementare urbane (zone cu emisii reduse, taxe de congestie, protocoale de partajare a datelor) conturând premisele unei guvernanțe colaborative (Q3). Nu în ultimul rând, sunt definiți indicatori cheie (timp de livrare, cost pe kilometru, emisii CO_2) care stabilesc baza empirică pentru evaluarea performanței arhitecturii integrate în capitolele următoare (Q4).

CAPITOLUL 5 CADRUL INTEGRAT PROPUS ȘI MODUL DE IMPLEMENTARE

Acest capitol definește un cadru integrat care conectează segmentele maritim, portuar și urban într-o singură logică operațională. Cadrul se sprijină pe trei componente: colectarea și interoperabilitatea datelor din teren, un strat de decizie care utilizează algoritmi de învățare automată, și un strat de execuție care aplică politicile de control în timp real. În zona maritim-portuară, coordonarea traficului și a manevrelor se bazează pe o arhitectură în care centrul de operațiuni de la țărm planifică și validează trasee, iar navele autonome gestionează senzori de bord complementați de senzori de la țărm. În zona urbană, aceeași logică se traduce prin controlul adaptiv al semafoarelor și prin rutarea flotelor astfel încât să fie reduse întârzierile și variațiile bruște ale fluxurilor. Cadrul e gândit pentru o implementare treptată peste infrastructuri existente, cu parametri puțini, dar expliciți, ce pot fi calibrați local.

Figura 5.1 ilustrează cadrul conceptual pentru un cadru logistic maritim-urban integrat, subliniind interacțiunile dintre navele autonome, porturile inteligente și distribuția urbană bazată pe inteligență artificială în cadrul unei rețele multimodale. Figura prezintă un flux logistic integrat, în care fiecare verigă, începând cu nava autonomă, continuând cu portul inteligent și depozitul central, și culminând cu distribuția multimodală, este conectată la un server central *cloud*.

Prin conectarea tuturor acestor segmente la aceeași platformă *cloud*, datele sunt monitorizate și procesate în mod unitar, permițând adaptarea rapidă la schimbări (de pildă, recalcularea rutelor camioanelor sau reprogramarea orarului macaralelor din port atunci când nava are întârziere).

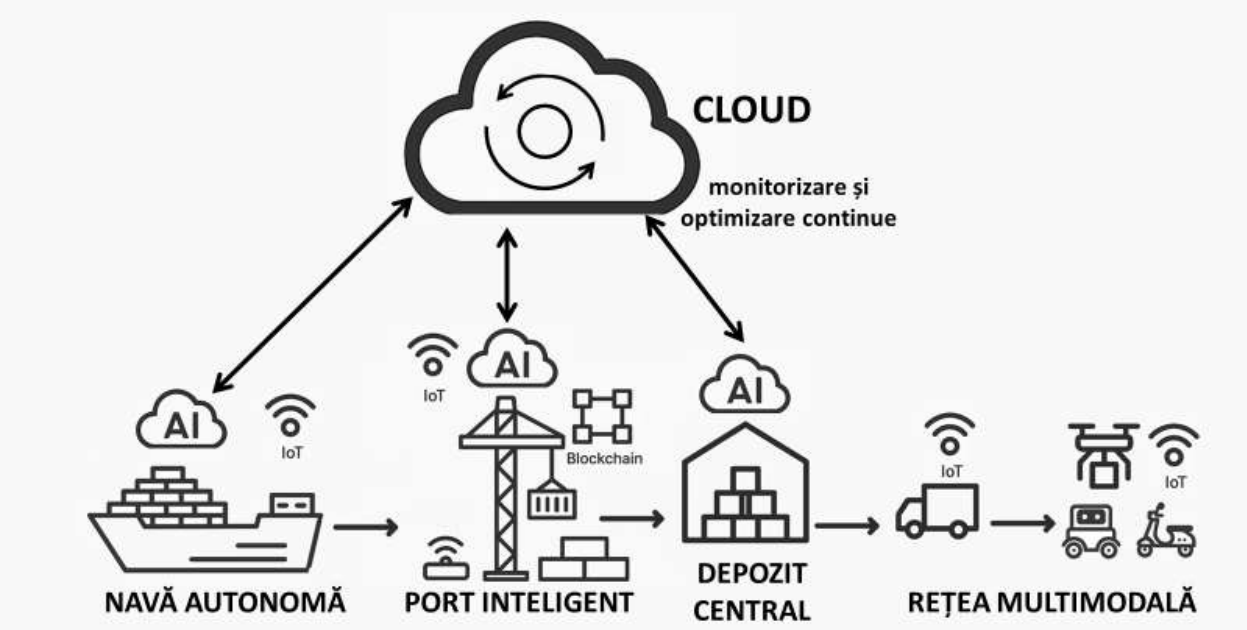


Figura 5.1. Cadrul conceptual propus. Sursa: autorul.

Figura 5.2 ilustrează componentele unui Sistem de Trafic Naval (VTS - Vessel Traffic System) și legăturile de date dintre acestea, evidențiind canalele de comunicare pentru datele neprocesate de la senzori și pentru datele procesate, instrucțiuni, comenzi și feedback (Andrei et al., 2024).

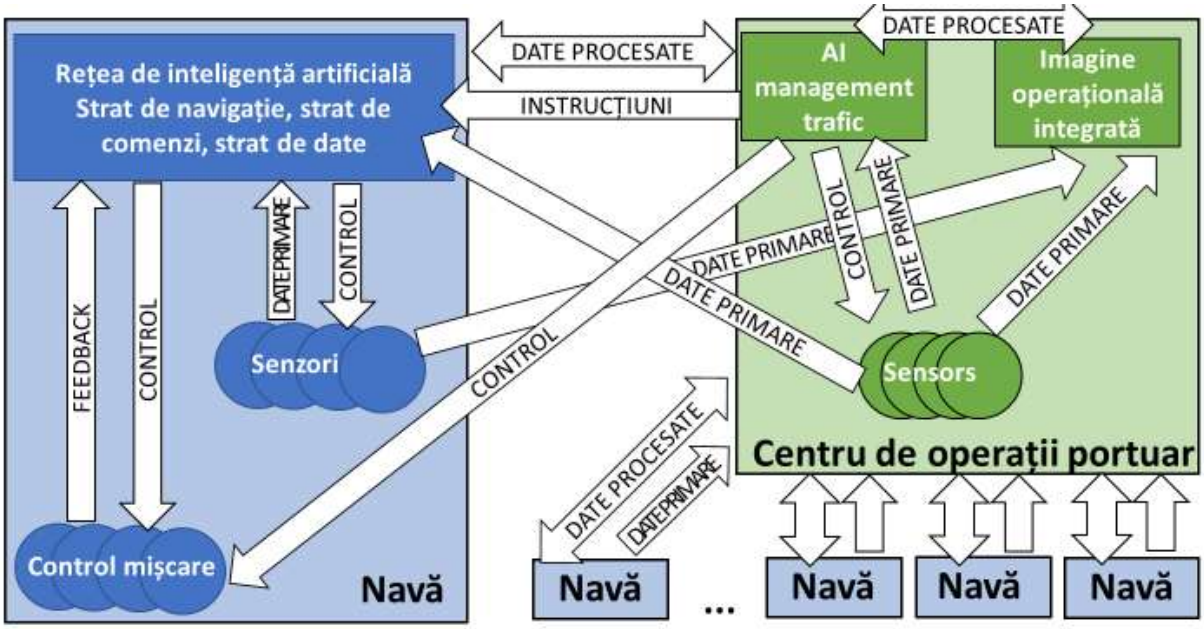


Figura 5.2. Componentele VTS și interacțiunile dintre acesta și subcomponente. Sursa: Andrei, Scarlat și Ioanid (2024).

CAPITOLUL 6 CONCLUZII GENERALE ȘI PERSPECTIVE ULTERIOARE DE CERCETARE

6.1 Principalele constatări și răspunsuri la întrebările de cercetare

Acest capitol consolidează perspectivele obținute în urma analizei desfășurate care cuprinde analiza literaturii de specialitate, cadrul conceptual, metodologia, rezultatele empirice și discuția și demonstrează modul în care aceste constatări răspund întrebărilor de cercetare inițiale formulate în Capitolul 1. Prin sintetizarea dovezilor din experimentele de simulare, corelate cu exemplele din lumea reală și dezvoltările teoretice, se confirmă măsura în care un cadru logistic integrat bazat pe inteligența artificială poate oferi într-adevăr o mai mare eficiență, reziliență și durabilitate în lanțurile de aprovizionare moderne. Pentru a facilita urmărirea riguroasă a îndeplinirii obiectivelor, Tabelul 6.1 sintetizează legătura directă dintre fiecare întrebare de cercetare (Q1–Q4), secțiunile relevante din teză și gradul în care acestea au fost atinse.

Tabelul 6.1. Legătura dintre întrebările de cercetare și contribuțiile capitolelor la atingerea obiectivelor de cercetare.

Întrebarea	Contribuții relevante	Capitol, pagină care răspunde	Grad de îndeplinire
Q1	Fundament teoretic al transformării digitale și interoperabilității	Cap. 2, Sec. 2.1–2.3, pp. 11–23, Cap. 3, Sec. 3.1, pp. 31–34	Îndeplinit
	Integrarea maritim-portuară (nave autonome și porturi inteligente)	Cap. 3, Sec. 3.2–3.3, pp. 34–43	
	Sincronizarea timp de sosire și descărcare navă cu flotele terestre	Cap. 4, Sec. 4.2, pp. 60–61	
	Cadrul conceptual AI integrat și arhitectura multimodală	Cap. 5, Sec. 5.1–5.2, pp. 74–111	
Q2	Rolul AI și ML în decizii logistice	Cap. 2, Sec. 2.4, pp. 23–28	Îndeplinit
	Optimizarea rutelor maritime (GA, RL)	Cap. 3, Sec. 3.4, pp. 44–49	
	Optimizarea last-mile (VRP, RL)	Cap. 4, Sec. 4.3–4.4, pp. 62–68	
	Simulări MATSim & SimPy, rezultate empirice	Cap. 5, Sec. 5.2.–5.3, pp. 99–115	
Q3	Cadru de reglementare pentru nave autonome	Cap. 3, Sec. 3.1–3.2, pp. 31–37	Îndeplinit, necesită proiecte pilot
	Reguli urbane (zone cu emisii reduse, taxe de congestie) și mobilitate inteligentă	Cap. 4, Sec. 4.2, pp. 60–61	

	Infrastructură conectată (IoT) și protocoale de date,	Cap. 4, Sec. 4.5, pp. 68–72	
	noduri portuare și blockchain	Cap. 5, Sec. 5.4, pp. 115–116	
Q4	Definirea KPI preliminari	Cap. 4, Sec. 4.3, pp. 62–65 Cap. 5, Sec. 5.2.5, pp. 106–108	Îndeplinit
	Evaluare multi-obiectiv	Cap. 5, Sec. 5.3, pp. 111–115, Tab. 5.2 și Fig. 5.10, pp. 113–114	

6.2 Contribuția pentru mediul academic

Pornind de la principalele constatări și implicațiile acestora, această subsecțiune prezintă modul în care cadrul logistic integrat, bazat pe inteligența artificială, propus în această teză, aduce noi perspective și face progrese în discursul academic actual în mai multe moduri.

În ceea ce privește integrarea holistică a inteligenței artificiale în mai multe moduri de transport, cercetările anterioare au vizat adesea moduri de transport izolate (de exemplu, maritim sau urban pe ultimul kilometru) și nu un flux continuu de la port la distribuția în oraș. Studiile care investighează optimizarea bazată pe inteligența artificială se concentrează frecvent fie pe programarea navelor, fie pe rutarea rutieră, rareori făcând legătura între acestea într-un singur cadru. Prin integrarea operațiunilor maritime, portuare și de ultim kilometru într-o platformă decizională unificată bazată pe AI, teza demonstrează modul în care sinergiile interdomenii (de exemplu, coordonarea în timp real între orele de sosire în porturi și programele de livrare din aval) îmbunătățesc semnificativ eficiența generală. Aceasta extinde literatura privind logistica multimodală prin validarea empirică a faptului că soluțiile integrate de inteligență artificială depășesc performanțele sistemelor separate, optimizate local.

În timp ce conceptul de sincromodalitate (selectarea dinamică a modurilor optime pe baza datelor în timp real) a apărut în teoria logisticii, studiile practice sau bazate pe simulare care cuantifică câștigurile de performanță ale unui sistem sincromodal condus de AI au fost limitate. Cercetarea furnizează dovezi bazate pe simulări care demonstrează reduceri substanțiale ale timpului de tranzit, ale timpului de așteptare și ale congestionării odată ce modurile sunt coordonate prin intermediul unor algoritmi AI avansați. Acest lucru validează premisa teoretică a sincromodalității, demonstrând modul în care datele senzorilor în timp real, analiza predictivă și controlul autonom pot fi combinate cu succes. Studiul face astfel ca teoriile în domeniul logisticii sincromodale să treacă de la cadrele conceptuale la rezultate tangibile, bazate pe date.

Multe soluții de rutare sau programare bazate pe inteligență artificială publicate se concentrează pe contexte la scară mai mică sau cu un singur mod (de exemplu, doar pentru problema rutării vehiculelor pe ultimul kilometru). Rețelele logistice din lumea reală, care implică

mai mulți agenți, drumuri aglomerate, constrângeri portuare și sosiri incerte, introduc niveluri de complexitate adesea considerate prea mari sau prea dificile din punct de vedere al calculului pentru metode avansate precum algoritmii genetici sau învățarea prin consolidare. Teza arată că tehnicile compozite de inteligență artificială (algoritmi genetici pentru optimizarea rutelor, simulare bazată pe agenți pentru dinamica traficului și ingestia datelor în timp real pentru perturbări) pot gestiona scenarii mai complexe. Prin ajustarea atentă a acestor algoritmi la date reale de transport (inclusiv programe maritime și rețele rutiere urbane), cercetarea demonstrează că optimizarea la scară largă este fezabilă și produce îmbunătățiri robuste, semnificative din punct de vedere statistic. Această constatare extinde domeniul metodelor de inteligență artificială aplicabile în situații realiste, de la un capăt la altul al lanțului de aprovizionare.

Literatura de specialitate privind AI în logistică ocolește uneori dimensiunile umane și organizaționale, în special alinierea politicilor, implicarea părților interesate și adaptarea forței de muncă. Cu toate acestea, acești factori determină frecvent succesul sau eșecul inovațiilor AI. Această cercetare analizează aspectele legate de politică, reglementare și colaborare, evidențiind modul în care standardizarea datelor, reglementările clare pentru sisteme autonome și implicarea tuturor părților interesate susțin extinderea soluțiilor integrate de AI. Prin sintetizarea perspectivelor rezultate din constatările empirice, studiul contribuie la baza de cunoștințe interdisciplinare, subliniind faptul că implementarea reală depinde de mai multe lucruri și nu doar de disponibilitatea software-ului sau hardware-ului; aceasta necesită, de asemenea, o disponibilitate instituțională și socială.

6.2.1 Semnificația științifică globală

Prin abordarea acestor șase domenii, teza depășește limitele cunoștințelor actuale privind logistica bazată pe inteligența artificială. Ea reunește operațiunile maritime, portuare și urbane într-o singură platformă, integrează indicatori de performanță pentru durabilitate alături de KPI operaționali și demonstrează empiric câștigurile obținute din optimizarea avansată, la scară largă, a AI atât în simulări, cât și în contexte reale. Acest accent dublu pe amploarea conceptuală (sinergie multimodală, durabilitate) și validarea practică (dovezi clare din proiecte implementate, implicații politice) sporește rigoarea academică a studiului și relevanța în lumea reală.

În concluzie, teza contribuie cu un cadru conceptual robust, fundamentat empiric, care avansează discuțiile teoretice privind sincromodalitatea, optimizarea AI și logistica integrată și oferă, de asemenea, căi practice pentru adoptarea în industrie. Astfel, ea îmbogățește literatura de specialitate prin furnizarea de dovezi de concept pentru o soluție AI de la un capăt la altul (de la nave maritime autonome la dispeceratul dinamic pe ultimul kilometru) subliniind în același timp elementele socio-tehnice necesare pentru a transforma această abordare holistică într-o realitate.

6.3 Contribuția pentru mediul industrial

Pe lângă valoarea teoretică și metodologică, cercetarea de față aduce o serie de contribuții concrete și relevante pentru mediul industrial și logistic. Prin simularea realistă a interacțiunii dintre transportul maritim autonom, operațiunile portuare digitalizate și logistica urbană avansată,

lucrarea oferă o direcție aplicabilă pentru actorii din industrie interesați de optimizarea sistemelor multimodale.

Un prim aport practic constă în validarea funcțională a unui cadru logistic integrat, utilizând două platforme de simulare recunoscute: MATSim (pentru modelarea mobilității multimodale) și SimPy (pentru fluxuri discrete și scenarii portuare). Prin aceste simulări, se demonstrează în mod sistematic că este posibilă coordonarea eficientă a resurselor logistice în medii complexe, în care cererea este variabilă, iar condițiile de transport pot suferi perturbări neprevăzute. Scenariile construite au inclus nu doar dimensiunea tehnologică, ci și factori operaționali precum congestia urbană, timpii de acostare în porturi și sincronizarea între moduri de transport.

Al doilea tip de contribuție se referă la optimizarea sincronizată a operațiunilor. Cadrul propus permite operatorilor din lanțul logistic să urmărească simultan mai multe obiective – reducerea timpului de tranzit, a costurilor și a emisiilor – fără a sacrifica stabilitatea sistemului. Spre deosebire de soluțiile tradiționale, care optimizează izolat fiecare segment (ex. doar portul sau doar transportul urban), arhitectura prezentată în această lucrare oferă o viziune de ansamblu, în care deciziile sunt luate în funcție de întregul flux de transport, nu de părți individuale.

În al treilea rând, contribuția vizează scalabilitatea și adaptabilitatea soluției la contexte industriale reale. Arhitectura propusă este modulară, permițând implementări progresive, în funcție de gradul de maturitate digitală al organizației sau de resursele disponibile. De exemplu, un port regional poate adopta inițial componentele AI pentru programarea navelor, urmând ca ulterior să integreze datele din rețelele urbane adiacente. În același mod, un operator de logistică urbană poate beneficia de datele predictive provenite din port, adaptând din timp rutarea flotei în funcție de estimările de descărcare sau întârzieri.

O a patra contribuție se referă la utilizarea inteligenței artificiale ca suport decizional adaptiv. Prin integrarea datelor în timp real (IoT, sisteme geospațiale, semnalizări portuare), AI poate ghida deciziile de alocare a resurselor, rutare, încărcare și prioritizare a transporturilor. Această capacitate de reacție inteligentă este deosebit de utilă în contextul industrial actual, marcat de volatilitate, congestie și cerințe logistice personalizate.

Nu în ultimul rând, cadrul propus este aliniat cu prioritățile strategice ale industriei logistice europene, în special în ceea ce privește digitalizarea lanțurilor de aprovizionare și tranziția către mobilitate cu emisii scăzute. Atât Pactul Verde European (European Green Deal), cât și strategiile recente pentru transport inteligent încurajează interoperabilitatea, trasabilitatea și adoptarea soluțiilor bazate pe date în domeniul logistic. Cercetarea de față oferă un exemplu concret de integrare a acestor principii într-o arhitectură funcțională, aplicabilă în medii logistice diverse.

Contribuțiile acestei lucrări nu se limitează la explorarea conceptuală, ci oferă direcții clare pentru adoptarea în practică a unui model logistic inteligent, eficient și sustenabil, capabil să răspundă provocărilor din mediul industrial actual.

6.4 Observații finale

Această teză a explorat potențialul logisticii integrate bazate pe inteligența artificială de a transforma modul în care sunt coordonate operațiunile maritime, portuare și urbane, demonstrând câștigurile de eficiență și beneficiile în materie de sustenabilitate care apar atunci când datele și deciziile sunt cu adevărat unificate între moduri. Prin combinarea experimentelor de calcul, a cunoștințelor teoretice și a analizei studiilor de caz, studiul ilustrează faptul că algoritmii avansați și schimbul de date în timp real pot depăși multe dintre ineficiențele care afectează transportul tradițional. Studiul demonstrează modul în care utilizarea strategică a inteligenței artificiale poate ajuta rețelele logistice să se adapteze mai rapid la perturbări, să reducă timpii de inactivitate și să minimizeze amprenta asupra mediului.

Constatările susțin concluzia că o singură platformă inteligentă, care încorporează elemente precum nave autonome, terminale automatizate, optimizarea rutelor pe bază de inteligență artificială și date securizate prin blockchain - poate orchestra fluxurile de mărfuri pentru a obține îmbunătățiri remarcabile în ceea ce privește costurile, viteza și fiabilitatea. Deși aceste rezultate subliniază promisiunea logisticii integrate, ele evidențiază, de asemenea, importanța unei infrastructuri solide, a colaborării părților interesate și a unor reglementări favorabile. Tranziția către sistemele bazate pe inteligență artificială necesită mai mult decât excelență algoritmică: aceasta necesită alinierea culturii organizaționale, a cadrului de reglementare și a investițiilor în tehnologie. Numai cu aceste elemente de sprijin se pot materializa la scară largă în lumea reală beneficiile teoretice documentate în simulări și proiecte pilot controlate.

Privind în perspectivă, agenda de cercetare trebuie să abordeze barierele practice și întrebările deschise care rămân. Proiectele viitoare ar putea aprofunda coordonarea descentralizată a AI, soluțiile avansate de învățare prin consolidare sau flotele complet electrice pentru a optimiza lanțurile de aprovizionare neutre din punct de vedere al emisiilor de carbon. De asemenea, trecerea la implementări pilot reale, în care autoritățile portuare, transportatorii și agențiile municipale experimentează în mod colectiv programarea bazată pe date, va testa durabilitatea și acceptarea de către părțile interesate a unor astfel de cadre sub presiuni operaționale reale.

În concluzie, această lucrare este atât o afirmare a potențialului de transformare al AI în domeniul logisticii, cât și un apel la acțiune pentru profesioniștii din industrie și factorii de decizie politică. Prin demonstrarea faptului că o abordare integrată aduce beneficii măsurabile în ceea ce privește costurile, capacitatea și durabilitatea, aceasta ne invită să ne imaginăm un viitor apropiat în care transportul de marfă nu este doar mai rapid și mai ieftin, ci și mai curat și mai rezistent. Realizarea acestei viziuni va necesita o colaborare interdisciplinară continuă, acorduri transparente de partajare a datelor și dorința de a investi în infrastructuri digitale avansate. Cu eforturi concertate, logistica bazată pe inteligența artificială poate deveni o piatră de temelie a viitoarelor lanțuri de aprovizionare, permițând o circulație adaptabilă, mai eficientă și mai responsabilă din punct de vedere social a mărfurilor în întreaga lume.