



MINISTERUL EDUCAȚIEI

Universitatea Națională de Știință și Tehnologie
POLITEHNICA București

Școala Doctorală în Transporturi

Rezumatul tezei de abilitare

Titlu: *Logistică portuară inteligentă: modelare bazată pe simulare și planificare adaptată la dinamica riscurilor în transportul multimodal*

Autor: Conf. univ. dr. Cătălin Popa

În conformitate cu prevederile cadrului normativ în vigoare (Ordinul ministrului educației nr. 3998/2024 pentru aprobarea Metodologiei de acordare a atestatului de abilitare) prezenta teză de abilitare prezintă în mod sintetic și documentat principalele rezultate științifice originale, respectiv realizările profesionale ale candidatului în cercetarea științifică și didactică, reflectând evoluția carierei academice, științifice și profesionale, respectiv direcțiile principale de dezvoltare ale candidatului, în domeniul Ingineriei Transporturilor. Lucrarea urmărește prezentarea realizărilor profesionale obținute de candidat, cu scopul de a proba originalitatea și relevanța contribuțiilor academice, științifice și profesionale, pentru fundamentarea potențialului de dezvoltare a carierei universitare în sfera conducerii lucrărilor de doctorat.

Din punct de vedere structural, teza de abilitare este dezvoltată pe perspectiva interdisciplinară a trei tendințe transformatoriale esențiale care modelează în prezent evoluția sistemelor moderne de transport, respectiv: digitalizarea infrastructurii logistice, necesitatea tot mai stringentă de gestionare a riscurilor de mediu și complexitatea coordonării integrate a lanțurilor de transport multimodal, într-un context dinamic și marcat de incertitudine. Porturile maritime, considerate în trecut simple noduri statice de infrastructură în cadrul lanțurilor logistice în transportul multimodal, funcționează în prezent sub forma unor centre adaptive, bazate pe date, reziliente din punct de vedere ecologic, capabile să integreze inteligența artificială în timp real, pentru coordonarea automatizată și planificarea proactivă a proceselor operaționale.

Prezenta teză, plasată în cadrul acestei paradigme contemporane, propune un cadru comprehensiv pentru dezvoltarea logisticii portuare inteligente, prin unificarea modelării bazate pe simularea discretă a fluxurilor de operare, teoria firelor de așteptare, respectiv pe analiza hibridă a riscurilor și a strategiilor sustenabile de guvernare digitală. Cercetarea este centrată pe studii de caz din porturile românești de la Marea Neagră - Constanța și Midia, combinând în cadrul unor articole științifice publicate în jurnale cu factor de impact relevant, modelarea teoretică cu studii de caz empirice, explorând modul în care sistemul de transport maritim, ca parte integrantă din sistemul logistic intermodal, poate fi îmbunătățit prin instrumente precum digital twin, simulări predictive sau optimizare inteligentă a proceselor. Prin ancorarea investigației atât în modelare tehnică, cât și în alinierea la politicile publice, teza urmărește să ofere o contribuție semnificativă literaturii de specialitate din ingineria transporturilor, dar și o bază solidă de revizuire a suportului decizional asigurat pentru autoritățile publice și planificatorii din domeniul transporturilor, în vederea gestionării provocărilor impuse prin inițiativele Green Deal sau prin programul pentru Europa Digitală ale Uniunii Europene, în implementarea și dezvoltarea inteligentă a coridoarelor TEN-T.

Obiectivele și contribuțiile tematice

Scopul general al prezentei teze de abilitare este centrat pe prezentarea relevanței contribuțiilor academice și științifice ale candidatului prin proiectarea, validarea și aplicarea unui cadru metodologic solid din perspectivă științifică și viabil din punct de vedere operațional pentru logistica portuară inteligentă (*Smart Port Logistics*). Acest cadru este conceput să integreze modelarea bazată pe simulare, procesul de adoptare a deciziilor fundamentate pe risc și instrumentele digitale de transformare inteligentă a sistemelor de transport multimodal, teza urmărind să răspundă unor provocări critice ale domeniului logistic contemporan, cum ar fi: creșterea complexității operațiunilor în transporturile intermodale, vulnerabilitatea lanțurilor logistice la disfuncțiuni

operaționale sau sistemice, fragmentarea practicilor instituționale și nevoia stringentă de integrare ecologică și tehnologică în guvernanta portuară pentru o dezvoltare sistemică și societală durabile. Valoarea științifică a tezei constă în intenția științifică de a contribui la dezvoltarea viziunii actuale asupra portului modern, evoluat într-un sistem tehnic și tehnologic inteligent, cu valențe fizice, cibernetice și sistemice, definit drept interfață dinamică între infrastructură, baze date dinamice, abordare de risc și cadrul de reglementare. Pentru atingerea acestui obiectiv, cercetarea este structurată în jurul a cinci direcții majore, fiecare reprezentând o contribuție tematică și metodologică distinctă în domeniul ingineriei sistemelor de transport și al logisticii inteligente, prezentate după cum urmează.

1. *Modelarea și optimizarea proceselor logistice portuare utilizând tehnica modelării proceselor de business - Business Process Modeling Notation (BPMN)* - acest obiectiv vizează modelarea formală a fluxurilor de lucru din domeniul serviciilor portuare prin utilizarea metodologiei de modelare *Business Process Modeling Notation (BPMN)*, o metodă fezabilă pentru aplicare în studiile vizând transportul maritim, transportul intermodal sau în general, sectorul serviciilor logistice. Aplicând BPM la operațiuni logistice complexe, precum transbordul produselor petroliere, operarea mărfurilor generale sau exportul de animale vii, candidatul propune un cadru riguros și facil de modelare a transporturilor pe baza fluxurilor operaționale discrete, care evidențiază interdependențele, ineficiențele și vulnerabilitățile proceselor identificate în fluxurile de operare maritimă și portuară. Contribuția științifică constă în valorizarea metodologiei BPM pentru dezvoltarea unui instrument sistemic de modelare discretă în ingineria proceselor logistice din transporturi, facilitând trecerea prin cartografierea descriptivă, la simularea predictivă și prescriptivă în operațiunile portuare intermodale și multimodale.

2. *Dezvoltarea unor modele de planificare a transportului multimodal sensibile la risc* - constă în dezvoltarea unor funcții obiectiv cost-risc care să permită includerea probabilistică a disfuncțiilor (defecțiuni tehnice sau tehnologice de infrastructură și suprastructură, întârzieri în trafic, evenimente geopolitice), care intervin în deciziile privind rutele de transport multimodal. Aceste modele contribuie la planificarea logistică portuară, marcate de dificultatea de a cuantifica și internaliza incertitudinea în lanțurile de transport multimodal. Contribuția științifică constă în integrarea analizei cantitative a riscurilor în modelarea transportului multimodal, contribuind la dezvoltarea unor metode riguroase privind planificarea lanțurilor logistice reziliente și sustenabile. Cadrul de cercetare a fost extins prin includerea unor aplicații privind modelul firelor de așteptare și simulările stochastice pentru procesele de operare la dană, urmărindu-se realizarea unei legături explicite între intensitatea traficului și scenariile de întârziere în operare, pe de o parte, respectiv costurile asociate emisiilor de carbon și penalitățile reglementate prin sistemul de comercializare a certificatelor de emisii al Uniunii Europene (EU-ETS), pe de altă parte, integrând astfel riscul operațional cu expunerea la externalitățile de mediu.

3. *Simularea riscurilor de mediu care afectează sistemele portuare* - al treilea obiectiv vizează valorizarea dimensiunii de mediu în analiza vulnerabilității infrastructurii de operare portuară în transportul intermodal, cu accent pe gestionarea deversărilor de hidrocarburi în regiunea Mării Negre. Folosind platformele GNOME și ADIOS2, candidatul a urmărit modelarea dinamicii, degradarea și impactul costier al poluării marine cu hidrocarburi în diverse scenarii meteo și hidrologice, contribuind la asigurarea unui suport tehnic integrat pentru deciziile de tip sustenabil și rezilient în transporturile multimodale. Contribuția științifică constă în integrarea modelării de risc ecologic privind poluarea în proiectarea sistemelor logistice de transport multimodal, susținând atât reacția predictivă, cât și planificarea strategiilor de dezvoltare durabilă pe termen lung, în sensul asigurării unor lanțuri logistice sustenabile. Pe lângă modelarea scenariilor de poluare marină, cercetările întreprinse integrează modelarea emisiilor generate în port, utilizând date empirice de trafic și analiza comportamentului tehnic și tehnologic al navelor. Prin simularea unor scenarii de adoptare a tehnologiilor Cold Ironing și prin cuantificarea reducerilor de emisii în termeni financiari, candidatul a urmărit introducerea unei noi variabile de analiză a performanței operaționale din perspectiva dezvoltării durabile, care să susțină atât strategiile de reducere a impactului de mediu, cât și alinierea la politicile europene aplicabile porturilor europene.

4. *Evaluarea fiabilității sistemelor multimodale de transport prin dezvoltarea unor modele hibride de analiză de risc* - al patrulea obiectiv vizează contribuția candidatului la dezvoltarea unui cadru analitic hibrid care combină Fault Tree Analysis (FTA) și logica fuzzy pentru evaluarea defecțiunilor sistemice în activitatea portuară și în funcționarea lanțurilor de transport multimodal. Această metodologie poate permite cuantificarea probabilităților de întrerupere a lanțurilor logistice în transporturile multimodale, integrând simultan diverse incertitudini de ordin calitativ, precum comportamentul operatorilor, lacunele în fluxul de date, inconsistențele

organizaționale sau ineficiența ori inconsistența fluxurilor operaționale. Contribuția științifică constă în dezvoltarea unui set de instrumente trans-metodologice și inter-disciplinare, pentru diagnosticarea riscurilor logistice în transportul multimodal și în operarea portuară, făcând legătura între modelarea sistemelor rigide și raționamentele incerte, într-un cadru coerent și replicabil prin tehnologiile moderne de tip digital twin.

5. *Proiectarea și implementarea tehnologiilor digital twin în transportul multimodal și operarea portuară* - cel de-al cincilea obiectiv, cu caracter integrator, constă în sinteza modelelor operaționale, de mediu și de risc într-un prototip digital twin, capabil să simuleze scenarii logistice portuare în timp real și să sprijine guvernanta adaptivă în transporturile multimodale și operarea portuară, oferind consistență conceptului de port inteligent (Smart Port). Centrat în stadiul prezent, cu predilecție spre guvernanta portuară, modelul propus este proiectat modular și scalabil, adaptabil la constrângeri de infrastructură, limitări decizionale politice și la complexitatea decizională operațională sau administrativă, în răspunderea autorităților administrative. Contribuția științifică constă în formularea unei propuneri de prototip conceptual de digital twin în guvernanta portuară sustenabilă, aplicabil în domeniului logisticii portuare și al logisticii transportului multimodal, care unifică rezultatele de simulare discretă cu fluxurile de date reale în administrația portuară, prin asigurarea unui suport decizional complex, inteligent și adaptiv, racordat la imperativele dezvoltării durabile.

În ansamblu, aceste cinci obiective urmăresc să ofere un răspuns integrat la fragmentarea metodologică adesea prezentă în cercetarea științifică din domeniul logisticii transporturilor maritime, vizând extinderea cunoașterii în domenii precum modelarea proceselor, analiza riscurilor și simularea de mediu ca elemente adaptive în procesul decizional, demonstrând cum aceste domenii tehnice, tehnologice sau operaționale, pot fi combinate interoperabil, pentru a sprijini transformarea digitală și inovația în procesele decizionale și de guvernanta din sistemele portuare ca noduri esențiale în logistica transporturilor multimodale. Această sinteză între designul conceptual, modelarea empirică și validarea aplicată conferă tezei profunzime științifică, originalitate și relevanță transdisciplinară, poziționând-o ca o contribuție semnificativă la dezvoltarea infrastructurii inteligente și a sistemelor de transport sustenabil.

Structura tezei

Structura tezei de abilitare reflectă o arhitectură de cercetare de factură logic secvențială, desfășurată pe parcursul a nouă capitole, fiecare corespunzând unui nivel analitic distinct și contribuind la dezvoltarea unui cadru coerent, bazat pe simulare și fundamentat pe analiză de risc pentru logistica portuară inteligentă, fiind susținut de articole științifice din portofoliul candidatului. Argumentul științific avansează de la contextualizare și conceptualizare, la construcția metodologică, modelarea aplicată și integrarea în cadrul de guvernanta, contribuțiile științifice fiind dezvoltate progresiv pe parcursul capitolelor tezei, validate prin cercetări empirice și articole științifice publicate.

Capitolul 1 – Introducere. Acest capitol stabilește cadrul general al cercetării, identificând problema principală, legată de complexitatea tot mai mare a sistemelor logistice portuare și vulnerabilitatea lor la disfuncționalități operaționale, riscuri de mediu și provocările digitale. Sunt definite obiectivele generale ale cercetării, iar analiza este plasată în contextul strategic al porturilor Constanța Sud și Midia, în relație cu inițiativele politice și strategice ale UE în domeniul transporturilor maritime și al dezvoltării durabile. Contribuția științifică constă în formularea a cinci obiective de cercetare transversale și încadrarea tezei în contextul politicilor operaționale, digitale și de dezvoltare durabilă a transporturilor europene, oferind o bază de cercetare pentru analiza sistemică din capitolele următoare.

Capitolul 2 – Cadrul teoretic. Capitolul 2 configurează arhitectura conceptuală a tezei definind conceptul de Smart Port Logistics, un model de guvernanta portuară teoretic, consolidat pe patru niveluri funcționale, care integrează procese operaționale, infrastructura de date, instrumente de simulare și platformele de sprijin decizional. Sunt analizate conceptele de bază din literatura de specialitate privind dinamica conceptului Industria 4.0, digital twin și guvernanta riscului adaptat la realitățile tehnologice și operaționale din portul maritim Constanța. Contribuția științifică rezidă din formularea conceptului "Smart Port Logistics" în sfera guvernantei portuare, oferind un cadru scalabil și reproductibil pentru proiectarea porturilor ca sisteme integrate, adaptive și guvernate digital.

Capitolul 3 – Cadrul metodologic. Această secțiune valorizează în principal metoda de modelare a fluxurilor de operare Business Process Modeling (BPM) pentru optimizarea proceselor logistice din terminalele portuare, incluzând expedierea mărfurilor în sistem multimodal, transferul produselor petroliere, transbordul

mărfurilor generale și exportul de animale vii. Logica de simulare este extinsă prin integrarea modelelor teoretice a firelor de așteptare calibrate pe baza datelor empirice privind traficul navelor în Portul Constanța, în scopul evaluării gradului de congestie a traficului în terminale, a nivelului de utilizare a infrastructurii și a întârzierilor asociate staționării navelor în așteptare în arealul portuar. Rezultatele acestor simulări au fost utilizate ulterior pentru estimarea consumului de combustibil, a emisiilor și a impactului economic, în corelație cu politicile de tarifarare EU-ETS. Scenariile reale sunt modelate și simulate pentru a identifica ineficiențele și riscurile de neconformitate tehnologică sau de reglementare la nivel operațional, demonstrând cum modelarea fluxurilor de lucru poate fi extinsă pentru a revela atât disfuncționalitățile procesuale, cât și costurile de mediu. Capitolul evidențiază modul în care modelarea proceselor poate depăși nivelul descriptiv, devenind un instrument activ de simulare și optimizare, contribuind la optimizarea deciziilor operaționale și strategice în transportul multimodal.

Capitolul 4 – Planificare logistică fundamentată pe riscuri în transportul multimodal. Capitolul dezvoltă modele discrete care integrează factori de risc definiți probabilistic în optimizarea rutelor și a costurilor de operare în sisteme de transport multimodal, pentru a anticipa și reduce impactul disfuncționalităților în lanțurile logistice multimodale. Contribuția științifică constă în introducerea unui model de planificare logistică rezilientă, bazat pe integrarea riscului în instrumente decizionale și de guvernare pentru transportul intermodal, aplicabil în portul maritim Constanța.

Capitolul 5 – Optimizarea proceselor logistice prin simulare. Acest capitol aplică metodologia de modelare a proceselor logistice din terminalele portuare, incluzând expedierea mărfurilor, operarea produselor petroliere, transbordul mărfurilor generale, expediția de bunuri sau exportul de animale vii și. De asemenea, capitolul abordează un studiu de caz de modelare operațională, pe modelul operării mărfurilor vrac în Portul Constanța, prin aplicarea metodei firele de așteptare, utilizând date privind traficul navelor din perioada 2021–2023. Modelul estimează nivelul de congestie portuară, lungimea firelor de așteptare și variabilitatea serviciilor în condiții stohastice, corelat cu analiza scenariului de tip Cold Ironing, prin care se evaluează potențialul de reducere a emisiilor prin adoptarea alimentării de la țărm în timpul operării în port. Prin cuantificarea emisiilor de CO₂ și a costurilor operaționale bazate pe consumul de combustibil, raportate la prețurile actuale din cadrul Sistemului de comercializare a certificatelor de emisii al Uniunii Europene (ETS-Emission Trading System), capitolul evidențiază modul în care simularea fluxurilor logistice poate susține atât optimizarea operațională, cât și conformarea la politicile de mediu în guvernarea portuară. Această abordare duală de modelare, leagă eficiența proceselor portuare de strategiile de decarbonizare demonstrând că planificarea logistică bazată pe simulare poate funcționa ca instrument dinamic în evaluarea eficienței utilizării infrastructurii navale și portuare pentru adaptarea reglementărilor din domeniul sustenabilității transportului maritim și al operării portuare.

Capitolul 6 – Riscuri de mediu și capacitatea de răspuns în situații de criză. Utilizând soluțiile software GNOME și ADIOS2, autorul simulează diverse scenarii de degradare a mediului și de impact costier privind scurgerile de petrol, rezultatele fiind utilizate pentru optimizarea procesului de planificare a răspunsului în situațiile de criză și incident de mediu în porturile românești, fiind validate prin articole științifice publicate în jurnale cu factor de impact relevant. Contribuția științifică vizează integrarea modelării de mediu în proiectarea sistemelor logistice portuare inteligente, oferind o perspectivă multidimensională asupra guvernării riscurilor, sub forma unui model inovativ de simulare ecologică aplicate direct la operațiunile portuare aferente porturilor din România.

Capitolul 7 – Digital twin și guvernarea portuară inteligentă. În acest capitol sintetizând cercetările anterioare, candidatul propune proiectarea și implementarea unui prototip digital twin, care colectează, integrează și prelucerează date operaționale, modele de simulare și algoritmi decizionali într-o platformă de guvernare portuară unificată, cu capabilități de planificare sustenabilă și în timp real a operării multimodale de mărfuri în porturi și în lanțurile logistice de transport. Contribuția științifică se referă la propunerea și validarea acestui model funcțional digital twin, adaptat contextului portuar adaptat la economia sustenabilă și inteligentă, în sprijinul conceptelor moderne privind designul infrastructurii inteligente de transport și a guvernării digitale în transportul multimodal.

Capitolul 8 – Sinteză generală și recomandări privind guvernarea inteligentă a sistemului portuar și a transporturilor multimodale. Capitolul reunește rezultatele metodologice, operaționale și ecologice integrate într-un cadru strategic pentru guvernare și acțiune instituțională, fiind formulate recomandări privind integrarea formulelor digitale de administrare portuară, respectiv armonizarea reglementărilor, în cadrul integrat de cooperarea regională conform. Contribuția științifică vizează propunerea unor politici de guvernare inteligentă

armonizate cu strategiile UE, bazată pe date operaționale reale, care să ofere un mecanism practic de transpunere a modelelor academice în instrumente de guvernare, corelat conceptului Integrated Maritime Policy – EU Integrated Maritime Services (EU-IMS).

Capitolul 9 – Concluzii și direcții viitoare de cercetare. Capitolul final sintetizează contribuțiile teoretice rezultate din dezvoltarea tezei și propune direcții de cercetare academică viitoare, prin proiecte de cercetare doctorală axate pe implementarea AI în logistică, modelarea riscurilor cibernetice, evaluarea sustenabilității ecologice și asigurarea interoperabilității transfrontaliere și regionale în logistica transporturilor multimodale. Contribuția științifică poate fi valorizată prin cercetări viitoare în logistica sistemelor de transport multimodal prin modelarea riscurilor, modelarea ecologică sustenabilă și adoptarea tehnologiilor digital twin, demonstrând scalabilitatea și aplicabilitatea pe termen lung a rezultatelor propuse prin teza de abilitare.

Metodologie

Fundamentul metodologic al tezei de abilitare reflectă integrarea modelării proceselor cu ingineria sistemelor portuare în analiza și evaluarea riscurilor, ancorate atât în cadrul conceptual cât și în domeniul operațional al logisticii transportului multimodal, cu aplicabilitate directă în guvernarea și administrarea porturilor maritime. Metodologia a fost elaborată în concordanță cu cerințele academice specifice redactării tezelor de abilitare, asigurând claritate în designul cercetării și o abordare procesuală logică între capitole, cu validarea prin studii de caz empirice și diseminare științifică relevantă, în jurnale cu factor de impact relevant. Logica cercetării evoluează într-un mod progresiv, de la identificarea problemei și fundamentarea teoretică, la simularea aplicată, validarea rezultatelor și sinteza politicilor de guvernare publică, fiecare capitol contribuind metodologic la un domeniu specific din cadrul conceptual general, într-o abordare procesuală cumulativă, bazată pe studii de caz, care susțin prin rezultatele obținute tema centrală a transformării digitale în logistica portuară inteligentă, modelată pe variabile pe risc, sustenabilitate și eficiență operațională.

În centrul metodologiei se află o strategie de modelare multi-stratificată, concepută pentru a reflecta caracterul multidimensional al sistemelor portuare moderne inteligente. Teza introduce și operaționalizează conceptul de Smart Port Logistics, definit ca o arhitectură conceptuală care ghidează alegerea metodelor și a instrumentelor de cercetare pe patru niveluri interconectate: procese operaționale, arhitecturi de date, modele de simulare discretă a fluxurilor de operare și sisteme de sprijin decizional, fiecărui instrument metodologic fiindu-i atribuit un rol clar în sistem, maximizând trasabilitatea, reproductibilitatea și transferabilitatea interdisciplinară a modelului propus.

Un instrument-cheie utilizat pe întreg parcursul cercetării este metoda de modelare discretă a fluxurilor de operare, folosit pentru a analiza fluxurile logistice din punct de vedere operațional, cu obiectivul de a identifica ineficiențele pentru a simula configurațiile alternative de procese și resurse alocate. Diagramele de procese pot funcționa ca modele executabile în cadrul modelelor digital twin, integrate în medii de simulare care optimizează fluxul de mărfuri, alocarea resurselor și fluxul operațional tehnic și tehnologic, în special în domenii sensibile, precum exportul de mărfuri generale, operarea produselor petroliere, operarea containerelor sau operarea animale. În completarea modelării proceselor logistice, candidatul a adoptat o abordare hibridă de evaluare a riscurilor, care combină analiza arborelui de defecțiuni (FTA) cu logica fuzzy, acest model permițând cuantificarea probabilităților de defecțiune, incluzând incertitudinile de tip calitativ - utilizarea logicii fuzzy îmbunătățește capacitatea de interpretare și face ca acest model să fie fezabil pentru scenarii de operare în logistica multimodală, în care metodele clasice de estimare a riscurilor sunt dificile.

În mod corelat, pentru a aborda riscurile de mediu în guvernarea portuară integrată, în cazul scenariilor de deversări de produse petroliere în Marea Neagră, teza utilizează instrumentele GNOME și ADIOS2 pentru a simula dispersia și degradarea poluanților, simulările fiind configurate cu date geospațiale, meteorologice și hidrologice reale, colectate din zonele costiere aferente porturilor românești Constanța Sud și Midia. Metodologia include variații de scenarii, prognoza impactului și analize de sensibilitate, oferind perspective robuste asupra pregătirii guvernării portuare pentru managementul crizelor ecologice și de mediu. În contextul sustenabilității candidatul a utilizat teoria firelor de așteptare pentru modelarea traficului de navele în portul maritim Constanța corelat cu reflectarea emisiilor de CO₂ și calculul costurilor operaționale, estimate pentru diferite stări ale sistemului de așteptare, stabilindu-se o legătură cantitativă între eficiența portuară și alinierea politicilor portuare la politicile de mediu.

Modelele propuse, bazate pe diagramele de procese sau orientate spre analiza riscului (operaționale, tehnice, umane sau de mediu), au fost propuse spre integrare într-o platformă de simulare dezvoltată în Python, care include panouri de control dinamice, rularea de scenarii și implementarea unor sisteme de alertare predictivă utile în guvernanta portuară inteligentă. Aceste instrumente au menirea de a operaționaliza modelele studiate și au la baza logica digital twin, valorizată în etapa finală a cercetării. Modelul digital twin este semnificativ din punct de vedere metodologic, datorită faptului că sintetizează toate componentele Smart Port Logistics într-un sistem integrat de suport decizional și guvernanta portuară, capabil de adaptare, învățare și aliniere la politicile naționale sau comunitare. Fiecare model sau set de instrumente propus în metodologia lucrării a fost aplicat în studii de caz reale și au fost diseminate în reviste științifice cu factor de impact relevant, asigurând validare externă, transparență și rigoare academică. Metodologia abordată în cadrul tezei de abilitare poate astfel oferi un model replicabil pentru viitoare lucrări doctorale, dar și o bază solidă pentru colaborări interdisciplinare în domeniile ingineriei transporturilor, modelării de mediu și guvernantei digitale.

Impactul și contribuțiile științifice ale candidatului

Teză de abilitare aduce o contribuție relevantă, multidimensională și inter-disciplinară, în domeniul ingineriei și logisticii transporturilor multimodale, oferind modele aplicabile și instrumente operaționale ce sprijină transformarea digitală a ecosistemelor portuare. Originalitatea abordării constă în dezvoltarea și integrarea unor cadre metodologice moderne într-o arhitectură de sistem funcțională și adaptivă, capabilă să răspundă provocărilor actuale și emergente din infrastructura portuară europeană. Din perspectivă teoretică, teza dezvoltă conceptul integrat de *Smart Port Logistics*, sistematizând operațiunile portuare pe patru niveluri sinergice: procese operaționale, sisteme de date, modele de simulare și instrumente decizionale - această structură decizională stratificată și modulară poate acționa ca o punte între arhitectura digitală a sistemelor portuare și teoria managementului logistic în transporturile multimodale, permițând atât analiza detaliată a proceselor, cât și modelarea proceselor la nivel operațional în folosul îmbunătățirii guvernantei portuare. Modelul propus poate fi aplicabil în administrarea porturilor multimodale, cu capabilități instituționale și niveluri tehnologice diverse, oferind o logică modulară pentru cercetări viitoare în domeniul guvernantei porturilor inteligente.

Pe plan metodologic, teza propune hibridizarea modelării prin simulare, analiza integrată a riscurilor și designul digital twin, combinând modelarea diagramelor de procese cu arborii de defecțiuni (FTA), logica fuzzy, instrumentele de simulare ecologică (GNOME, ADIOS2), teoria firelor de așteptare sau modelările stohastice, cercetarea demonstrând cum pot fi modelate holistic sistemele logistice de transport multimodal complexe, incerte și interdependente. Fuziunea dintre metodele cantitative și calitative permite atât modelarea probabilităților măsurabile, cât și a incertitudinilor epistemice, o abordare importantă pentru sistemele logistice supuse perturbărilor, modificărilor normative sau riscurilor de poluare ori climatice, mai ales în sfera guvernării și administrării porturilor.

Un alt element de contribuție personală este reprezentat de propunerea dezvoltării graduale și modulare a unui model digital twin, adaptat realităților operaționale din porturile românești de la Marea Neagră, conceput pentru implementare în medii cu constrângeri de date, fragmentate în fluxul decizional instituțional sau cu diversitate tehnologică ridicată. Modelul promovează monitorizarea proceselor în timp real, analiza predictivă și planificarea bazată pe scenarii, demonstrând că modelarea digital twin poate funcționa atât ca reprezentare tehnică a fluxului de procese, cât și ca un instrument strategic de guvernanta logistică integrată, aplicabilă în conceptul Smart Port Logistics.

Teza urmărește să contribuie semnificativ și la literatura emergentă privind integrarea riscului ecologic și de poluare în guvernanta portuară din perspectiva dezvoltării sustenabile a afacerilor de transport maritim și operare portuară. Prin includerea simulărilor incidentelor de poluare marină în procesele de planificare logistică, se permite o optimizare duală privind minimizarea efectelor asupra mediului marin și costier, respectiv menținerea continuității fluxurilor operaționale. Această abordare sprijină integrarea monitorizării de mediu în strategiile de transport multimodal, aliniind managementul logisticii la obiectivele de sustenabilitate și reziliență climatică.

Din perspectiva relevanței în raport cu politicile publice, cercetarea întreprinsă este aliniată la principalele cadre strategice ale Uniunii Europene (EU Green Deal, Strategia pentru Mobilitate Inteligentă și Durabilă, Politica TEN-T sau Programul Europa Digitală), iar modelele dezvoltate sunt interoperabile, oferind atât capabilități de monitorizare a conformității cu cadrul legislativ comunitar aplicabil, cât și alinierea la instrumentele de planificare strategică. Astfel, teza urmărește să răspundă unor aspecte problematice, identificate în evaluările specializate din

domeniul transporturilor europene, cum ar fi lipsa platformelor digitale interoperabile, necesitatea unor simulări predictive pentru managementul crizelor sau integrarea riscurilor de mediu în instrumentele de guvernare portuară integrată în logistica transportului multimodal.

Din punct de vedere aplicativ, rezultatele cercetării propun soluții relevante în ceea ce privește eficiența operațională, reducerea riscurilor și asigurarea suportului dinamic în procesul de adoptare a deciziilor strategice și operaționale la nivelul porturilor moderne. Spre exemplu, modelele de simulare aplicate proceselor de operare portuară permit identificarea întârzierilor, blocajelor de proces sau a alocării nejudicioase a resurselor, modelele de planificare logistică informată privind riscurile pot sprijini deciziile de rutare în mod rezilient și sustenabile, iar simulările de mediu au permis o planificare direcționată și proactivă a răspunsurilor în caz de urgență. Ca rezultat aplicativ, modelul digital twin bazat pe Python integrează simularea evenimentelor discrete, logica fuzzy și prognoza scenariilor într-un instrument modular de sprijin decizional, în timp real, dedicat autorităților portuare în viziunea unei guvernări portuare inteligente.

Teza oferă soluții conceptuale sau metodologice ce pot fi utilizate în dezvoltarea ulterioară a sistemelor de transport, infrastructurii inteligente și a guvernării maritime, impactul rezultatelor vizând dezvoltarea unor modele teoretice în logistica inteligentă și guvernarea porturilor moderne, introducerea unor metodologii integrate pentru simulare, analiză a riscurilor și modelare sustenabilă, furnizarea unor instrumente validate și aplicabile pentru autoritățile portuare, planificatori și factori decizionali sau deschiderea unor noi direcții pentru cercetarea doctorală și interdisciplinară, la intersecția dintre inginerie, managementul operațional și sustenabilitate.

Direcții viitoare de cercetare

Teză de abilitare este centrată pe formularea unui cadru coerent pentru logistica portuară inteligentă, oferind în subsidiar fundamentarea unei agende de cercetare științifică multidisciplinară, fezabilă pentru valorificarea în cadrul programelor doctorale, cu referință la abordarea sistemică adoptată bazată pe modelarea discretă a fluxurilor de operare, analiza ecologică și guvernarea digitală, sugerând mai multe direcții tematice de cercetare cu potențial semnificativ.

Activitatea de cercetare desfășurată în ultimii ani evidențiază trei direcții majore care fundamentează viziunea strategică a candidatului pentru dezvoltarea viitoare a cercetării în domeniul logisticii navale și portuare, într-un context operațional, sustenabil și de securitate.

Prima direcție vizează **modelarea proceselor logistice** în operațiunile navale și portuare, prin utilizarea unor instrumente avansate de modelare și simulare a proceselor, care să permită reprezentarea dinamică și optimizarea fluxurilor logistice reale, contribuind la reconceptualizarea porturilor ca sisteme integrate și inteligente de procese, decizii și actori interdependenți, care să susțină tranziția de la decizii intuitive la planificare predictivă bazată pe date. În acest context, cercetarea poate integra dimensiuni socio-tehnice, investigând impactul automatizării și al inteligenței artificiale asupra forței de muncă în domeniul logisticii transporturilor, în sectorul naval și portuar.

A doua direcție se concentrează pe **modelarea riscurilor pentru sustenabilitate și reziliență**, care să promoveze integrarea evaluării riscurilor multiple – operaționale, tehnologice, naturale, umane sau cibernetice – în guvernarea portuară inteligentă, cu relevanță în administrarea modernă a porturilor românești. În acest context, cercetarea dezvoltă un cadru logistic conform, agil și capabil să prevină și să gestioneze riscurile în timp real. De asemenea, candidatul va urmări integrarea principiilor de logisticii sustenabile în digitalizarea diagramelor de procese, cu accent pe strategia de decarbonizare, contribuind astfel la conformarea cu reglementările europene în vigoare.

A treia direcție propusă este axată pe **transporturile militare și logistica navală**, într-un cadru adaptat noilor realități ale războiului hibrid și politicii comune de apărare a Uniunii Europene, cu valorizarea transferului de inovații din sectorul civil către cel militar (utilizarea vehiculelor autonome/drone, aplicații AI și tehnologii blockchain) în sprijinul procesului decizional militar și al integrării lanțurilor de aprovizionare militare cu economia națională și structurile aliate.

Prin aceste trei direcții, cercetarea candidatului poate oferi un cadru coerent, interdisciplinar și aplicabil pentru transformarea logisticii navale și portuare, în concordanță cu cerințele sustenabilității, digitalizării și securității operaționale contemporane.

Concluzie

Teza de abilitare oferă o viziune complexă asupra evoluției transporturilor multimodale și a logisticii portuare integrate, către un model centrat pe reziliență, inteligență operațională și durabilitate. Prin îmbinarea modelării empirice cu planificarea bazată pe simularea și modelarea deciziilor instituționale, cercetarea întreprinsă utilizează determinismul tehnologic tradițional asociat conceptului de „port inteligent” și urmărește formularea unui cadru holistic, aplicabil și aliniat la politicile comunitare pentru dezvoltarea viitoare a infrastructurii logistice maritime a UE în mod sustenabil. Rezultatele cercetării candidatului propun o abordare integrată, în care modelele operaționale, ecologice și decizionale sunt articulate într-o arhitectură funcțională, susținută de instrumente de simulare valorizate de o platformă digitală adaptivă, demonstrând că porturile moderne nu pot fi modernizate doar prin investiții în infrastructură fizică, ci necesită și o transformare profundă a modului în care datele, procesele și riscurile sunt modelate și guvernate în timp real, în mod integrat.

Contribuțiile personale, cumulate cu experiența profesională a candidatului definită de-a lungul a 3 decenii de activitate profesională și academică în domeniul logisticii transportului maritim, nu se limitează la potențialul avansării cunoașterii teoretice în domeniul logisticii navale și portuare, ci pot contribui la identificarea unor soluții pentru autoritățile portuare, operatorii multimodali și factorii decizionali implicați în guvernarea inteligentă a porturilor românești.