



Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București

**Facultatea TRANSPORTURI
ȘCOALA DOCTORALĂ TRANSPORTURI
Domeniul de doctorat
INGINERIA TRANSPORTURILOR**

REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT

**CERCETĂRI PRIVIND DIMINUAREA RISCURILOR IN
SISTEMELE DE TRANSPORT MULTIMODAL DE MĂRFURI**

**RESEARCH ON RISK MITIGATION IN MULTIMODAL
FREIGHT TRANSPORT SYSTEMS**

**Doctoral Supervisor:
Prof. univ. mat. ec. Doina - Eufrosina CARP**

**Doctorand Ing.:
Nicolae – Ovidiu ȘTEFANOV**

**BUCUREȘTI
2026**

CUPRINS

LISTA ABREVIERILOR	VIII
LISTA FIGURILOR	X
LISTA TABELELOR	XI
CAPITOLUL 1. INTRODUCERE	1
1.1 Necesitatea și oportunitatea cercetării	1
1.2 Importanța cercetării pentru transportul multimodal	3
1.3 Stadiul cercetărilor în domeniul riscurilor asociate transportului multimodal de mărfuri	5
1.4 Obiective generale și specifice ale cercetării	8
1.5 Metodologia cercetării	9
1.6 Structura tezei	11
CAPITOLUL 2. RISCURILE ASOCIATE TRANSPORTULUI MULTIMODAL DE MĂRFURI	13
2.1 Definiții și clarificări conceptuale	13
2.1.1 Riscuri în transporturi	13
2.1.2 Riscuri în transportul multimodal	17
2.1.3 Riscuri asociate operațiunilor de transport intermodal	22
2.1.4 Fiabilitatea transportului multimodal	23
2.2 Clasificarea riscurilor în transportul multimodal	24
2.2.1 Disfuncționalități generale asociate riscurilor în transporturile de mărfuri	24
2.2.2 Tipologia riscurilor în transportul multimodal	25
2.2.3 Clasificarea riscurilor în transportul intermodal și terminale de transfer	27
2.2.4 Clasificarea riscurilor pe componente modale ale rutei de transport multimodal	29
2.2.4.1 Riscurile care se manifestă în componenta rutieră	29
2.2.4.2 Riscurile asociate componentei feroviare a transportului multimodal	30
2.2.4.3 Riscurile asociate componentei maritime a transportului multimodal	31
2.2.4.4 Riscurile asociate transportului pe căi navigabile interioare în cadrul rutei multimodale	32
2.2.4.5 Riscurile specifice transportului aerian în cadrul rutei de transport multimodal	35
2.3 Cadrul legislativ aplicabil gestionării riscurilor în transporturi	35
2.3.1 Reglementări naționale	35
2.3.2 Reglementări internaționale	36
CAPITOLUL 3. METODE DE EVALUARE A RISCURILOR ȘI MĂSURI DE DIMINUARE ÎN TRANSPORTUL MULTIMODAL	39
3.1 Managementul riscurilor în transportul multimodal	39
3.2 Metode teoretice de evaluare a riscurilor utilizate în transportul multimodal	42
3.2.1 Modelul FMEA (Failure Modes and Effects Analysis)	42
3.2.2 Modelul de evaluare a riscurilor pe bază de punctaj (Risk assessment scoring model)	43
3.2.3 Modelul analizei arborilor de defecte (Fault Tree Analysis - FTA)	44
3.2.4 Modelul probabilistic al arborilor dinamici de defecte (Dynamic Fault Tree) ...	47
3.3 Soluții de reducere a riscurilor în transportul multimodal	49
3.3.1 Metode de reducere a riscurilor în transportul multimodal integrat	49

3.3.1.1 Soluții de diminuare a riscurilor operaționale	50
3.3.1.2 Metode de reducere a riscurilor tehnologice	51
3.3.1.3 Soluții pentru reducerea riscurilor tehnice	52
3.3.1.4 Metode de reducere a erorilor umane	53
3.3.1.5 Aplicarea modelării și simulării pentru reducerea riscurilor	55
3.3.1.6 Metode pentru reducerea riscurilor determinate de amenințările de securitate	58
3.3.2 Soluții de diminuare a riscurilor pentru transportul intermodal și în punctele de transbordare	60
3.3.2.1 Soluții care se aplică în transportul intermodal	60
3.3.2.2 Soluții de reducere a riscurilor în terminalele de transbordare	63
3.4 Studii de caz privind aplicarea modelelor de evaluare a riscurilor	65
3.4.1 Aplicarea metodei mediei ponderate în analiza riscurilor multimodale	65
3.4.1.1 Fundamentare metodologică a metodei mediei ponderate	65
3.4.1.2 Ipoteze de lucru și domeniul de aplicabilitate	67
3.4.1.3 Sursele utilizate și metodologia de atribuire a ponderilor	67
3.4.1.4 Constrângeri și limitări ale metodei	69
3.4.1.5 Aplicarea formulei de calcul a mediei ponderate în evaluarea riscurilor	69
3.4.1.6 Determinarea probabilității unui eveniment compus utilizând probabilitatea evenimentului complementar	78
3.4.2 Aplicarea modelului pe bază de scor în evaluarea riscurilor din transportul multimodal	79
3.4.2.1 Ipoteze de aplicare	79
3.4.2.2 Structura și sursele de date utilizate	79
3.4.2.3 Tratarea incertitudinilor și lipsa datelor	80
3.4.2.4 Evaluarea riscurilor prin metoda scorurilor	81
3.4.2.5 Constrângeri operaționale și interpretarea rezultatelor	82
3.4.3 Aplicarea modelului Dynamic Fault Tree	89
3.4.3.1 Ipoteze de lucru	89
3.4.3.2 Structura modelului și sursele de date utilizate	90
3.4.3.3 Analiza relațiilor cauzale și organizarea structurală a arborelui DFT	91
3.4.3.4 Construcția matricei de adiacență pentru ipoteza de coliziune	94
3.4.3.5 Evaluarea traseelor logice DFT și calculul probabilităților pe fiecare ipoteză	95
3.4.3.6 Reprezentarea grafică a arborelui DFT	97
CAPITOLUL 4. SOLUȚII DE DIMINUARE A RISCURILOR – STUDII DE CAZ	99
4.1 Soluții de reducere a riscurilor operaționale, tehnice și tehnologice în terminalul DP World	99
4.1.1 Descrierea problemei	99
4.1.2 Rute alternative pe componenta rutieră a transportului multimodal între portul Constanța Sud și terminalul Curtici	101
4.1.3 Identificarea riscurilor operaționale, tehnologice și tehnice	103
4.1.4 Capacitatea interfețelor de transfer și raportul de îngustare a fluxului de mărfuri	107

4.1.5 Evaluarea efectelor riscurilor și a timpilor de revenire a sistemului de operare portuară prin simulare cu evenimente discrete - terminalul DP World Constanța Sud	113
4.1.5.1 Considerente generale privind modelarea proceselor de manipulare și transport în cadrul unui terminal de containere	113
4.1.5.2 Dezvoltarea modelului de simulare	114
4.1.5.3 Impactul fiabilității echipamentelor de manipulare asupra performanței operaționale a terminalului DP. World – Constanța Sud	122
4.1.6 Concluzii	129
4.2 Soluții de reducere a riscurilor în transportul multimodal pe ruta portul Constanța Sud – terminalul Curtici	131
4.2.1 Descrierea problemei	131
4.2.2 Rute alternative pe componenta rutieră a transportului multimodal între portul Constanța Sud și terminalul Curtici	134
4.2.2.1 Analiza structurii de conectivitate a rețelei rutiere și a variantelor de parcurs	136
4.2.2.2 Aplicarea metodei SAW în evaluarea nivelului de risc al componentei rutiere	143
4.2.3 Analiza riscurilor asociate exploatării componentei feroviare a rutei de transport multimodal Constanța Sud – Curtici	149
4.2.3.1 Prezentarea rutelor feroviare de marfă și a riscurilor acestora	149
4.2.3.2 Evaluarea rerutării feroviare în scenarii de indisponibilitate a segmentelor..	152
4.2.3.3 Determinarea scorurilor de risc prin metoda SAW pentru componenta feroviară	161
4.2.4 Diminuarea riscurilor prin îmbunătățirea fluxurilor multimodale ce includ componenta de transport fluvial	165
4.2.5 Concluzii	178
CAPITOLUL 5. CONCLUZII	181
5.1 Considerații finale și rezultate	181
5.2 Contribuții originale	183
5.3 Direcții pentru cercetări viitoare	187
BIBLIOGRAFIE	189
ANEXA 1. Statistici privind incidentele/accidentelor de navigație	200
ANEXA 2. Sintetizarea informațiilor despre evenimentele și factorii ce au determinat incidentele și accidentele maritime	202
ANEXA 3. Strategii de diminuare a riscurilor aferente componentelor transportului multimodal	208
ANEXA 4. Caracteristici logistice și riscuri asociate pentru rutele intermodale rutiere portul Constanta Sud – terminalul Curtici	209
ANEXA 5. Informațiile tehnice ale terminalului DP World - Constanța Sud	210
ANEXA 6 A. Chestionar de evaluare a riscurilor - transport maritim	214
ANEXA 6 B. Chestionar de evaluare a riscurilor - transport rutier	215
ANEXA 6 C. Chestionar de evaluare a riscurilor - transport feroviar	216

CAPITOLUL 1 INTRODUCERE

1.1 Necesitatea și oportunitatea cercetării

În contextul intensificării schimburilor comerciale și al integrării rețelelor logistice internaționale, transportul multimodal de mărfuri a devenit o componentă esențială a sistemelor moderne de transport, însă funcționarea acestuia este influențată de multiple categorii de riscuri asociate componentelor modale și operațiunilor de transfer din cadrul rutelor de transport multimodal. În aceste condiții, cercetarea este orientată către evaluarea acestor riscuri și către identificarea unor soluții de diminuare a lor în sistemele de transport multimodal de mărfuri.

Necesitatea cercetării derivă din faptul că disfuncționalitățile tehnice, blocajele de trafic, erorile umane sau condițiile climatice pot afecta funcționarea fiecărui mod de transport, iar prin efect de propagare pot compromite întregul flux multimodal de mărfuri, cu consecințe directe asupra siguranței, costurilor și fiabilității operaționale în transportul multimodal de mărfuri.

Oportunitatea cercetării este determinată de structura actuală a transportului de mărfuri din România, caracterizată prin predominanța transportului rutier, capacități limitate ale infrastructurii feroviare și portuare, congestii operaționale în nodurile logistice majore și corelarea insuficientă a componentelor modale, situație care amplifică riscurile de discontinuitate a fluxurilor de transport și impune evaluarea acestora și fundamentarea unor soluții de diminuare a riscurilor în transportul multimodal de mărfuri.

1.2 Importanța cercetării pentru transportul multimodal de mărfuri

Importanța cercetării în domeniul transportului multimodal este determinată de modul în care riscurile apărute pe segmentele individuale de transport se transmit prin operațiunile de transbordare către etapele succesive ale procesului de transport.

În exploatare, succesiunea operațiunilor de încărcare, descărcare și preluare între modurile de transport, precum și corelarea capacităților de transport și manipulare, condiționează continuitatea rutei de transport multimodal, iar apariția unor vulnerabilități locale la nivelul punctelor de transfer generează discontinuități cu efect asupra întregii rute de transport.

1.3 Stadiul cercetărilor în domeniul riscurilor asociate transportului multimodal de mărfuri

Literatura de specialitate privind riscurile asociate transportului multimodal de mărfuri abordează cu precădere riscuri specifice segmentelor individuale de transport și riscuri generate în procesele de transbordare, în timp ce analiza riscului la nivel de rută de transport multimodal, considerată ca ansamblu funcțional integrat, este tratată limitat.

Tabelul 1.1 sintetizează literatura de specialitate relevantă utilizată în teză, aceasta constituind baza pentru fundamentarea cadrului de cercetare utilizat și pentru dezvoltarea modelului aplicat de evaluare și diminuare a riscurilor în transportul multimodal de mărfuri.

Tabelul 1.1 Stadiul cercetărilor din literatura de specialitate în domeniul analizei riscurilor din transportul multimodal de mărfuri

Direcția de cercetare	Subiect analizat	Tipuri de riscuri tratate	Referințe reprezentative
Fundamentare conceptuală și structurare a sistemelor de transport	- definirea cadrului conceptual pentru riscuri în transporturi; - structurarea elementelor sistemului de transport utilizate în analiză.	riscuri tratate la nivel conceptual și sistemic.	(Raicu, 2007), (Heckmann, 2015), (Abdulahi și Luo, 2020), (Kramberger et al., 2018).
Funcționare și exploatare în transportul multimodal	- proces de funcționare în condiții reale de exploatare; - mecanisme de propagare a abaterilor în exploatare.	- riscuri operaționale; - riscuri tehnologice; - riscuri asociate factorului uman.	(Raicu, 2022), (Goel, 2016), (Sellner și Vyslouzilova, 2019), (Bartle, 2021).
Performanță și vulnerabilitate în rețele de transport	- sensibilitatea funcționării la variații de cerere și capacitate; - vulnerabilitatea la perturbări în rețea.	- riscuri operaționale; - riscuri de mediu.	(Chen, 2023), (Gbadegoye, 2025).
Riscuri pe rute de transport multimodal	- manifestarea riscurilor pe trasee multimodale; - efecte asupra continuității transportului.	- riscuri operaționale; - riscuri tehnologice.	(Dini, 2024), (Kengpol, 2014), (Bilato, 2022).
Riscuri la interfețe de transbordare între moduri de transport	- proces de transbordare și coordonare între moduri; - discontinuități la interfața de transfer.	- riscuri de transbordare; - riscuri operaționale; - riscuri asociate factorului uman.	(Popa, 2016), (Russo, 2006), (Chang, 2019), (Bínová, Heralová, 2017).
Fiabilitatea subsistemelor de manipulare și transbordare a unităților de încărcare	- funcționarea subsistemelor tehnice; - fiabilitatea acestora în exploatare.	- riscuri tehnice; - riscuri tehnologice.	(Müller, 2020), (Guan, 2013), (Fraga-Lamas, 2017).
Managementul riscurilor în transportul multimodal	- influența erorilor umane asupra funcționării sistemelor; - corelarea factorului uman cu evenimente nedorite.	- riscuri asociate factorului uman; - riscuri operaționale.	(Soares, 2001), (Galierikova, Sosedova, 2018), (Ma, 2022), (Bogalecka, 2024).
	- influența condițiilor de mediu asupra funcționării; - efecte asupra continuității transportului.	riscuri de mediu.	(Makarova, 2023), (Göçmen, Erol, 2018), (Ferguson, 2025).
	- cuantificarea riscurilor; - scorarea și ierarhizarea acestora.	aplicabil conform nivelului de analiză.	(Liao, 2023), (Kaewfak, 2024)(Cieśla, 2018), (Timofeeva, 2023), (Nitsenko, 2020).

Analiza literaturii de specialitate evidențiază predominanța evaluărilor de risc realizate la nivel unimodal, cu integrare limitată a interdependențelor dintre modurile de transport la nivelul rutelor de transport multimodal.

1.4 Obiective generale și specifice ale cercetării

I. Obiectivul general:

Obiectivul general al cercetării constă în dezvoltarea și aplicarea unor metode de evaluare și diminuare a riscurilor în sistemele de transport multimodal de mărfuri, prin analizarea acestora la nivelul componentelor de transport, al interfețelor de transbordare și al rutei de transport multimodal, în vederea asigurării continuității proceselor de transport în condiții operaționale reale.

II. Obiective specifice:

1. Cercetarea vulnerabilităților și deficiențelor asociate transportului multimodal de mărfuri, prin raportarea acestora la structura proceselor de transport, la succesiunea operațiunilor dintre moduri și la funcționarea interfețelor de transfer, astfel încât riscurile identificate să fie corelate direct cu condițiile operaționale reale;
2. Identificarea și clasificarea riscurilor relevante pentru transportul multimodal de mărfuri, prin diferențierea riscurilor de natură operațională, tehnică, tehnologică și umană, în raport cu componentele de transport și cu etapele procesului multimodal, pe baza datelor statistice și a documentațiilor tehnico-operaționale utilizate în teză;
3. Evaluarea riscurilor identificate prin utilizarea metodei mediei ponderate, în vederea stabilirii nivelurilor relative de risc aferente categoriilor și subcategoriilor analizate, cu respectarea condițiilor de comparabilitate între modurile de transport și a constrângerilor impuse de structura datelor disponibile;
4. Aplicarea unui model de evaluare a riscurilor pe bază de scor pentru cuantificarea expunerii la risc generate de vulnerabilități și deficiențe și pentru evaluarea impactului riscurilor materializate asupra continuității proceselor de transport multimodal, prin raportarea rezultatelor la funcționarea rutelor analizate;
5. Cercetarea relațiilor cauzale dintre evenimentele generatoare de risc în transportul multimodal de mărfuri, prin utilizarea metodei Fault Tree Analysis și a modelului Dynamic Fault Tree, în scopul reprezentării structurii logice a producerii evenimentelor nedorite și al evidențierii condițiilor în care acestea pot conduce la perturbări ale proceselor de transport;
6. Analizarea riscurilor specifice în cadrul activităților de transbordare și manipulare dintr-un terminal de containere, prin modelare cu evenimente discrete și utilizarea indicatorilor INCI și BOR pentru evaluarea influenței asupra gradului de utilizare a resurselor și a capacității de operare, în vederea fundamentării măsurilor de diminuare a riscurilor care pot afecta continuitatea proceselor de transfer multimodal.
7. Cercetarea riscurilor asociate unei rute de transport multimodal, prin evaluarea pe bază de scor utilizând metoda SAW la nivelul componentelor rutieră și feroviară, în scopul fundamentării măsurilor de diminuare a expunerii relative la risc generate de vulnerabilitățile și deficiențele identificate, cu impact asupra continuității proceselor de transport multimodal în condiții operaționale reale.

CAPITOLUL 2

RISURILE ASOCIATE TRANSPORTULUI MULTIMODAL DE MĂRFURI

Capitolul 2 stabilește cadrul conceptual utilizat în cercetarea riscurilor asociate transportului multimodal de mărfuri, prin clarificarea noțiunilor, delimitărilor și clasificărilor adoptate în teză. Sunt analizate definițiile riscului, incertitudinii, vulnerabilităților și deficiențelor,

așa cum sunt acestea formulate în literatura de specialitate pentru domeniul transporturilor, în vederea stabilirii unui cadru terminologic unitar.

Capitolul structurează tipologiile de riscuri specifice transportului multimodal și intermodal în raport cu componentele de transport și cu procesele de transbordare, constituind baza conceptuală necesară aplicării metodelor de evaluare cantitativă dezvoltate ulterior.

2.1. Definiții și clarificări conceptuale

2.1.1. Riscuri în transporturi

Ministerul Transporturilor din România tratează riscul ca posibilitatea apariției unui eveniment nedorit asociat activităților de transport, caracterizat printr-o probabilitate de producere și un impact asupra siguranței, continuității și performanței sistemului de transport (**Strategia de transport intermodal în România, MT, 2011**).

În literatura de specialitate este realizată o delimitare explicită între conceptele de risc și incertitudine. Riscul se referă la evenimente pentru care rezultatele nu sunt cunoscute cu certitudine, dar probabilitățile de apariție pot fi determinate sau estimate, fiind asociate cu efecte negative asupra desfășurării proceselor de transport. Incertitudinea caracterizează situațiile în care sunt necunoscute atât rezultatele, cât și probabilitățile corespunzătoare, ceea ce exclude tratarea acestora prin metode probabilistice clasice.

Riscurile sunt evenimente cunoscute în probabilitate, de obicei asociate cu rezultate negative, în timp ce incertitudinea descrie situații sau rezultate imprevizibile, fără probabilități determinate și care pot influența performanța lanțurilor de aprovizionare (**Heckmann et al., 2015**).

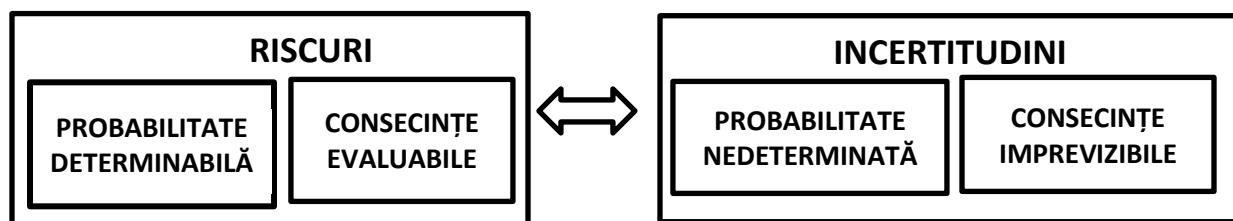


Figura 2.1 Delimitări între riscuri și incertitudini în cercetarea sistemelor de transport multimodal (Sursa: Autorul)

În literatura de specialitate sunt prezentate modele matematice de evaluare a riscului diferențiate prin structura relațiilor, parametrii utilizați și nivelul de formalizare, analiza comparativă evidențiind abordări distincte de cuantificare, cu aplicabilitate variabilă în evaluarea și gestionarea riscurilor din sistemele de transport.

Tabelul 2.4 Elemente comparative ale modelelor matematice de evaluare a riscului în transporturi

Sursa Criteriu analizat	Russo et al. (2006)	Finochenko et al. (2021)	Sapori et al. (2014)
Relație matematică	$R = P \times M$	$R = X_{max} + \sum_{i=1}^n X_i \times \left(\frac{8-X_{max}}{8(n-1)}\right)$	$R = T \times V \times C$
Parametri utilizați	• Probabilitate eveniment (P); • Magnitudine consecință (M).	• Scor maxim variabilă dominantă; • Scoruri variabile asociate; • Coeficient de normalizare; • Număr variabile.	• Probabilitate declanșator (T); • Vulnerabilitate sistem (V); • Severitate consecință (C).
Tratarea vulnerabilității	Nu este introdusă explicit.	Reflectată indirect prin scorurile variabilelor analizate.	Introdusă explicit ca parametru distinct.

Sursa Criteriu analizat	Russo et al. (2006)	Finochenko et al. (2021)	Sapori et al. (2014)
Domeniu de aplicare	Evaluare generală a riscului în transporturi.	Evaluarea condițiilor de muncă în exploatarea feroviară.	Evaluarea riscului în sisteme de transport cu analiză a expunerii sistemice.
Structura datelor de intrare	• Valoare numerică a probabilității; • Indicator numeric pentru consecințe.	• Scoruri numerice ale variabilelor operaționale; • Limită superioară a scalei de punctaj utilizată în metodologie; • Număr variabile cercetate.	• Probabilitatea factorului declanșator; • Vulnerabilitatea sistemului; • Magnitudinea consecințelor.

2.1.2 Riscuri în transportul multimodal

Riscurile în transportul multimodal se manifestă în cadrul unor sisteme logistice integrate, caracterizate prin succesiunea coordonată a mai multor moduri de transport sub o responsabilitate operațională unitară. Specificitatea riscului din transportul multimodal de mărfuri derivă din interdependența funcțională dintre segmentele de transport, noduri și operațiunile logistice, precum și din propagarea efectelor unui eveniment perturbator la nivelul întregii rute de transport.

În acest cadru, vulnerabilitățile structurale și operaționale ale componentelor transportului multimodal se exprimă prin disfuncționalități de exploatare, iar materializarea acestora, în condiții determinate, conduce la apariția riscurilor la nivelul rutei de transport.

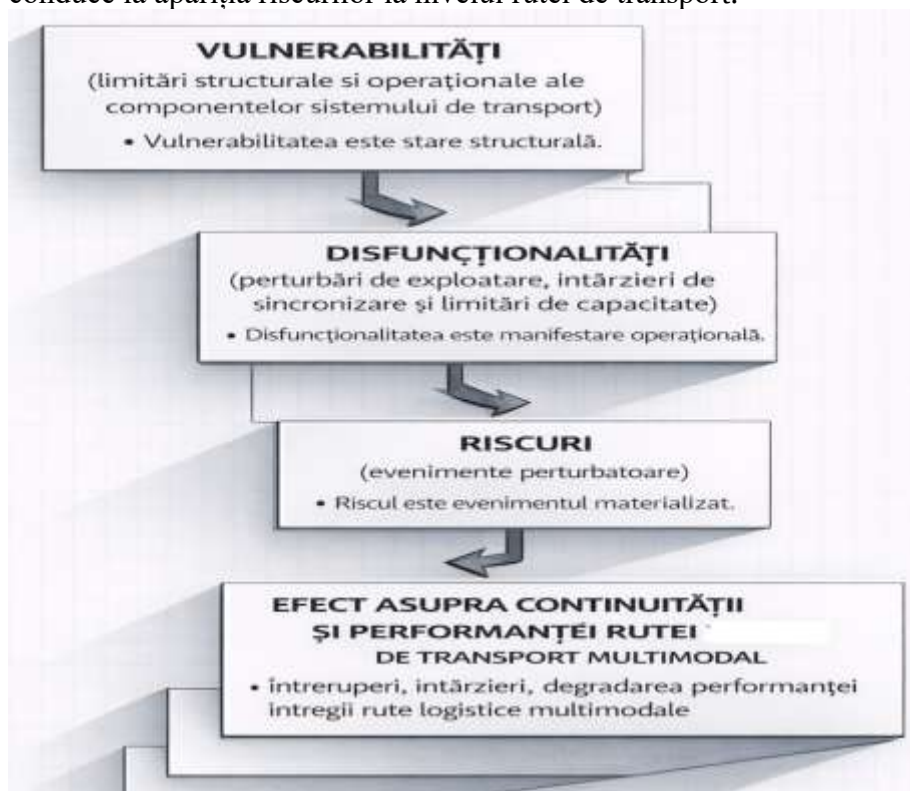


Figura 2.2 Reprezentarea logică a lanțului causal vulnerabilitate – disfuncționalitate – risc în transportul multimodal de mărfuri

(Sursa: Autorul)

Cercetarea disfuncționalităților în transportul multimodal și intermodal impune delimitarea modului de manifestare a acestora în raport cu structura operațională a fluxului de transport și cu particularitățile transferului între modurile rutiere, feroviare, maritime, fluviale sau aeriene.

Tabelul 2.5 Delimitarea conceptuală a disfuncționalităților în transportul multimodal și intermodal

Element de analiză	Transport multimodal	Transport intermodal
Configurația fluxului de transport	Sucesiune a două sau mai multe moduri de transport, coordonate sub responsabilitate unică, pe o rută continuă origine – destinație.	Sucesiune a mai multor moduri de transport utilizând aceeași unitate de încărcare, fără manipularea conținutului.
Mecanism operațional	Transfer al mărfurilor între moduri prin operațiuni distincte de încărcare, descărcare și preluare.	Transfer al unității de încărcare între moduri prin operațiuni de transbordare mecanizată.
Puncte critice de manifestare	Terminale multimodale, porturi maritime sau fluviale, stații feroviare de marfă puncte de trecere rutier-feroviar.	Terminale de containere, platforme de transbordare, instalații de manipulare containerizată.
Cauze ale disfuncționalităților	• Necorelarea programelor de circulație între modurile de transport; • Restricții de infrastructură pe un segment de transport; • Limitări ale echipamentelor de manipulare.	• Întreruperea operațiunilor de transbordare; • Defectarea echipamentelor de manipulare și neconcordanța între modurile de transport; • Congestii locale în terminale.
Efecte asupra rutei de transport	• Întreruperea continuității secvenței modale de transport; • Creșterea duratei totale de transport; • Redistribuirea forțată a fluxului pe rute alternative.	• Întârzierea transferului unității de încărcare; • Blocaj local în terminal; • Acumulare temporară de unități de încărcare în zona de transfer.

(Sursa: Autorul)

Relația (2.1) propusă de **(Russo et al., 2006)** poate fi extinsă și în contextul transportului multimodal:

$$R = P \times V \times N \quad (2.4)$$

unde:

- P : probabilitatea apariției evenimentului perturbator;
- V : vulnerabilitatea lanțului de transport multimodal;
- N : expunerea mărfurilor și a infrastructurii logistice la risc.

Potrivit **(Sapori et al., 2014)**, vulnerabilitatea exprimă probabilitatea ca o componentă a rețelei logistice (ex.: terminal feroviar, port, nod rutier, aeroport) să fie afectată funcțional de un eveniment perturbator, cum ar fi o defecțiune tehnică, o eroare umană sau o condiție climatică severă. Așadar aceasta reflectă gradul de rezistență structurală și operațională a sistemului în fața unei amenințări identificate, iar un nivel ridicat de vulnerabilitate implică un potențial crescut de întrerupere a fluxului logistic, de pierderi materiale și de blocaj în transportul multimodal.

În perioada desfășurării cercetărilor doctorale, modelul probabilistic de evaluare a riscului exprimat prin relația (2.4) a fost aplicat și detaliat într-o lucrare elaborată împreună cu alți autori **(Popa et al., 2025)**, în cadrul căreia contribuția autorului prezentei teze a vizat dezvoltarea și utilizarea acestui model pentru analiza riscurilor operaționale asociate transportului multimodal, incluzând componentele umane, tehnice și de mediu..

În literatura de specialitate, formalizarea riscului în transportul multimodal poate fi structurată în două tipuri metodologice distincte:

- Model funcțional probabilitate – impact (MF–PI): bazat pe relația funcțională dintre probabilitate și impact, aplicat etapelor lanțului multimodal, fundamentat în **(Bínová & Heralová, 2017)**;
- Model cantitativ segmentar ponderat (MC–SP): presupune cuantificarea segmentară a riscului și combinarea ponderată a componentelor probabilitate – impact – coeficient structural, tratat de **(Nitsenko et al., 2020)**.

În continuare, cele două formalizări sunt analizate comparativ în tabelul 2.6:

Tabelul 2.6 *Tratarea riscului în transportul multimodal – analiză comparativă*

Parametrii cercetării	MF-PI (Bínová & Heralová, 2017)	MC-SP (Nitsenko et al., 2020)
Structura matematică	$R = f(P, I)$ (2.13)	$R = \sum_{i=1}^n P_i \times I_i \times W_i$, (2.14)
Structura conceptuală	Probabilitate (P) $\times$ Impact (I)	Probabilitate segmentară $\times$ Impact economic $\times$ Coeficient structural
Definirea probabilității	Probabilitate estimată pe baza frecvenței evenimentelor din lanțul de transport.	Probabilitate estimată statistic pentru fiecare segment (raport incidente/curse sau distribuții probabilistice adaptate).
Tratarea incertitudinii	Evaluare semi-cantitativă, fundamentată pe date statistice și analiză operațională.	Modelare stocastică, utilizare distribuții empirice, metode fuzzy și simulări Monte Carlo pentru intervale probabilistice.
Definirea impactului	Impactul (I) este definit ca efect asupra continuității transportului multimodal (întârzieri, costuri suplimentare, etc).	Impactul (I_i) $I_i = C_m \times D_i \times S_m$ (2.15) este cuantificat în funcție de valoarea mărfii, durata suplimentară și sensibilitatea acesteia.
Domeniul de cercetare	Etape critice din lanțul multimodal (transbordare, manipulare, depozitare intermediară).	Segment individual al rutei de transport multimodal și ulterior agregare la nivel de rută de transport multimodal.
Formă de compunere a riscului	Relație funcțională între probabilitate și impact, fără formalizare numerică rigidă.	$W_i = w_0 + \delta_t$, (2.16) unde: w_0 este ponderea de bază și δ_t este un coeficient de penalizare pentru vulnerabilitate operațională.
Diferențiere între moduri de transport	Tratarea riscului este realizată prin analiza etapelor funcționale ale lanțului de transport multimodal, corespunzătoare succesiunii modurilor de transport.	Tratarea riscului este realizată prin evaluarea separată a fiecărui segment al rutei de transport multimodal și prin aplicarea coeficienților de ponderare (W_i).
Nivel de formalizare	Formalizare funcțională, orientată operațional.	Model cantitativ explicit, integrabil în analiză multicriterială cost – risc.
Finalitate decizională	Identificarea și prioritizarea etapelor operaționale critice (manipulare, transbordare, depozitare) în vederea reducerii pierderilor și a creșterii fiabilității	Fundamentarea alegerii rutei de transport multimodal prin integrarea riscului într-o funcție obiectiv de tip cost–risc: $\min (\lambda_1 \times C_{total} + \lambda_2 \times R_{total})$ (2.17)

(Sursa: Autorul)

Compararea celor două modele evidențiază abordări diferite ale relației vulnerabilități – disfuncționalități – riscuri în cadrul transportului multimodal relevă faptul că în cazul modelului MF-PI utilizat de către (Bínová & Heralová, 2017), cercetarea este realizată la nivelul etapelor funcționale ale lanțului multimodal, cu focalizare asupra disfuncționalităților generate de interfața modurilor de transport, iar în cazul modelului MC-SP (Nitsenko et al., 2020), riscul este formalizat prin determinarea probabilității și a impactului pentru fiecare segment al rutei de transport multimodal, vulnerabilitatea fiind reflectată prin coeficienți de ponderare structurală.

2.1.3 Riscuri asociate operațiunilor de transport intermodal

În cadrul prezentei cercetări, analiza riscurilor asociate transportului intermodal este orientată asupra operațiunilor de transfer și coordonare dintre modurile de transport implicate.

Pentru asigurarea comparabilității, sursele din tabelul 2.7 din literatura de specialitate sunt prezentate în funcție de modul de definire a probabilității și a impactului, de integrare a vulnerabilității și de mecanismul de determinare a riscului în transportul intermodal:

Tabelul 2.7 Elemente comparative privind tratarea riscurilor în transportul intermodal

Criteriul analizei	A1 (Nitsenko et al., 2018)	A2 (Galierikova și Sosedova, 2018)	A3 (Kramberger et al., 2018)	A4 (Maslarić et al., 2016)
Obiectul cercetării	Modelarea riscului integral al transportului multimodal și utilizarea lui pentru selectarea rutei și a modurilor de transport (ex. combină riscuri financiare și asociate transbordării).	Transportul intermodal de mărfuri periculoase: cadrul legal, fluxul intermodal (rutier – maritim) și deficiențele care conduc la materializarea riscurilor.	Terminal intermodal interior utilizat ca instrument de extindere a zonei de influență portuare, fundamentat pe un model de alegere a portului bazat pe atractivitate portuară – distanță de transport.	Managementul riscurilor în lanțul de aprovizionare intermodal; cadru holistic pentru identificare și clasificare a riscurilor.
Structura sistemică analizată	• Sistemul multimodal ca ansamblu de subsisteme (moduri de transport, puncte de transfer UTI, depozitare temporară, suport informațional); • Riscuri evaluate pe etape de transport și noduri.	Noduri și interfețe ale lanțului intermodal (port, terminale) unde au loc activități de transbordare și controale.	• Sistem port –hinterland (coridoare intermodale; terminal interior) tratat prin modelare de alegere a portului; • Include analiza de sensibilitate la fluctuații ale fluxurilor de marfă.	• Transportul intermodal ca rețea de operatori–activități – resurse alocate; • Locurile specializate de transfer al unităților de încărcare sunt cele mai critice puncte ale lanțului logistic.
Tipologia riscurilor	• Riscuri economice tratate stocastic (variații tarifare) și riscuri operaționale de transbordare tratate prin logică fuzzy; • Riscuri legislative în etapa de transport feroviar.	Riscuri operaționale asociate interfeței modale: erori de etichetare a unităților de încărcare, scurgeri de substanțe, asigurare necorespunzătoare a încărcăturii, erori umane și cauze tehnice.	Riscuri economice și operaționale determinate de dezechilibre comerciale și de variații ale fluxurilor de marfă, cu impact asupra fezabilității transportului intermodal	Riscuri interne (tehnice, tehnologice, operaționale) și riscuri externe (naturale, de securitate, financiare, politice), cu efect asupra stabilității fluxurilor de transport intermodal.
Metode de evaluare a riscurilor	Risc total determinat prin combinarea riscurilor evaluate separat pe etape ale transportului intermodal, utilizând modele probabilistice pentru riscurile economice și modele de tip logică fuzzy pentru riscurile operaționale de transbordare.	Cercetarea incidentelor raportate în nodurile de transfer, corelată cu examinarea cadrului normativ și a cauzelor operaționale la interfața de transbordare.	Model de selecție a portului bazat pe programare liniară și metoda ierarhizării analitice (AHP), cu integrarea unei analize de sensibilitate la variația fluxurilor de marfă.	• Revizuire de literatură structurată în cadrul ISCRM (Intermodal Supply Chain Risk Management) cu identificarea și structurarea riscurilor prin modelul PESTEL (factori politici, economici, sociali, tehnologici, de mediu și legislativi); • Evaluarea fiecărui risc pe baza probabilității de apariție, duratei manifestării și severității impactului.

2.2 Clasificarea riscurilor în transportul multimodal

2.2.1 Disfuncționalități care generează riscuri în transportul multimodal de mărfuri

Disfuncționalitățile reprezintă nivelul operațional de manifestare a vulnerabilităților sistemului de transport multimodal și constituie cadrul pentru evaluarea riscurilor, prin determinarea probabilității de apariție și a impactului asupra performanței operaționale a lanțului de transport. Clasificarea disfuncționalităților (D.1 - D.6) este realizată în funcție de natura proceselor și resurselor afectate și de efectele acestora asupra parametrilor operaționali ai transportului multimodal, după cum sunt sintetizate în tabelul 2.8:

Tabelul 2.8 *Disfuncționalități ale lanțului de transport multimodal care generează riscuri*

Cod	Tip de disfuncționalitate	Descrierea disfuncționalităților din transportul multimodal de mărfuri	Exemple de manifestare
D.1.	Disfuncționalități operaționale	Perturbări apărute în desfășurarea proceselor curente de exploatare a transportului, care afectează succesiunea și coordonarea activităților operaționale.	Întârzieri în livrare, erori de manipulare, disfuncționalități în planificarea operațiunilor.
D.2.	Disfuncționalități tehnologice	Limitări sau defecțiuni ale sistemelor tehnologice și informatice utilizate în gestionarea transportului, cu impact asupra controlului și monitorizării fluxurilor.	Defecțiuni ale sistemelor IT, erori software, indisponibilitatea sistemelor de comunicații.
D.3.	Disfuncționalități tehnice	Defecțiuni ale infrastructurii și echipamentelor fizice, care conduc la degradarea capacității de transport sau la întreruperea temporară a funcționării rețelei.	Avarii ale vehiculelor, degradarea infrastructurii rutiere sau feroviare.
D.4.	Disfuncționalități determinate de condițiile de mediu	Influențe externe generate de condițiile meteorologice, care afectează siguranța și regularitatea exploatării sistemelor de transport.	Furtuni, ceață densă, temperaturi extreme care limitează operarea transportului.
D.5.	Disfuncționalități asociate factorului uman	Erori sau decizii necorespunzătoare ale personalului implicat în exploatarea sistemelor de transport, cu impact asupra siguranței și coordonării operaționale.	Neatenție, oboseală, lipsa instruirii adecvate, decizii greșite în situații critice.
D.6.	Disfuncționalități de securitate	Evenimente care afectează integritatea bunurilor, a echipamentelor sau a personalului, influențând desfășurarea normală a fluxurilor de transport.	Furturi, vandalism, acte de sabotaj, contrabandă.

Sursa: Adaptare după Kaewfak et al. (2024) și Nitsenko et al. (2020)

2.2.2 Tipologia riscurilor în transportul multimodal

Clasificarea riscurilor în prezenta cercetare este realizată pe baza a două criterii complementare:

- natura riscului (operațional, tehnic, tehnologic, uman, juridic, economic, de mediu);
- nivelul de manifestare în sistemul de transport (nivel sistemic multimodal, nivel interfață intermodală, nivel componentă modală în cadrul transportului multimodal).

Riscurile în transportul multimodal derivă din vulnerabilitățile structurale și organizaționale ale sistemului și se manifestă, preponderent, sub forma unor riscuri de natură operațională, tehnologică, tehnică, umană sau de mediu, la nivelul coordonării dintre moduri, al interfețelor modale și al mecanismelor de integrare între operatorii de transport.

Tabelul 2.9 *Categorii de riscuri asociate transportului multimodal de mărfuri*

Cod risc	Tipologia riscului	Element analizat	Mecanisme de generare a riscului	Manifestare operațională la nivel sistemic
R.M.1	Operațional	• Riscuri de coordonare operațională; • Riscuri în operațiunile de transfer și transbordare; • Riscuri generate de fragmentarea operațională; • Riscuri asociate capacității și congestiei în noduri de transport.	• Sincronizare necorelată între modurile de transport; • Deficiențe în transferul între moduri de transport; • Integrare incompletă a segmentelor de transport; • Suprasolicitarea infrastructurii nodurilor multimodale.	• Nealinierile orarelor între moduri de transport; • Întârzieri la transferul unităților de încărcare; • Discontinuități între segmentele rutei de parcurs; • Congestie portuară și timpuri mari de așteptare pentru operare.

Cod risc	Tipologia riscului	Element analizat	Mecanisme de generare a riscului	Manifestare operațională la nivel sistemic
R.M.2	Tehnic	• Riscuri asociate interoperabilității tehnice; • Riscuri privind integritatea fizică a unităților de încărcare; • Riscuri privind disponibilitatea echipamentelor critice.	• Incompatibilități între infrastructuri și echipamente; • Solicitări repetate la schimbarea modului de transport; • Indisponibilitatea utilajelor în terminale.	• Terminale neadaptate transferului intermodal; • Deteriorarea containerelor și a bunurilor transportate; • Indisponibilitatea macaralelor sau a utilajelor de manipulare.
R.M.3	Tehnologic	• Riscuri legate de integrarea tehnologică a sistemelor informatice și de monitorizare a transportului multimodal; • Riscuri privind continuitatea sistemelor informatice; • Riscuri privind calitatea datelor și trasabilitatea mărfurilor.	• Incompatibilitate între sistemele informatice; • Întreruperea platformelor de management; • Inconsistență în schimbul de date operaționale între operatorii de transport.	• Lipsa accesului la date în timp real; • Blocaj al sistemului informatic al nodului de transport; • Discrepanțe între statusul real și cel raportat al unității de încărcare.
R.M.4	Uman	• Riscuri privind resursa umană specializată; • Riscuri de coordonare decizională între operatori; • Erori umane în exploatarea sistemelor tehnice.	• Nivel neuniform de calificare a personalului; • Decizii operaționale necorelate; • Utilizare improprie a echipamentelor logistice.	• Operare necorespunzătoare a utilajelor; • Suprapunerea programărilor de operare; • Introducerea eronată a datelor în sistem.
R.M.5	Juridic	• Riscuri asociate delimitării responsabilităților contractuale; • Riscuri privind conformitatea procedurală și documentară; • Riscuri privind condiționările de operare în terminale.	• Structurare contractuală necorelată; • Proceduri aplicate diferit între moduri; • Cerințe locale impuse în terminale.	• Dispute privind răspunderea la schimbarea modului de transport; • Documente neconcordante la punctele de transfer;
R.M.6	Securitate	• Riscuri de securitate în nodurile multimodale; • Riscuri privind integritatea lanțului de custodie a mărfii; • Riscuri privind securitatea informațională operațională.	• Vulnerabilitate la intervenții externe deliberate; • Control insuficient al accesului.	• Furt în terminal; • Acces neautorizat în zona de transfer; • Alterarea datelor de monitorizare în timp real a transportului.
R.M.7	Economic	• Riscuri privind impactul sistemic asupra costurilor implicate de transportul multimodal.	• Ineficiențe generate de întârzieri și congestii; • Penalități contractuale;	• Costuri de staționare; • Penalități pentru depășirea termenelor și creșterea costului rutei de parcurs.
R.M.8	Mediu	• Riscuri privind conformitatea cu cerințele de mediu în terminale și pe segmentele de transport integrate.	• Restricții operaționale generate de reglementări de mediu; • Condiționări privind emisii și manipularea anumitor tipuri de marfă.	• Condiționarea accesului la infrastructura multimodală prin ferestre operaționale prestabilite. • Condiții speciale de operare în porturi.

Sursa: Adaptare după Cieřla (2018) și Bínová & Heralová (2017).

2.2.3 Clasificarea riscurilor în transportul intermodal și în punctele de transfer

Clasificarea riscurilor intermodale (R.I.1 - R.I.8) este realizată în funcție de natura disfuncționalităților care pot conduce la materializarea riscurilor în punctele de transfer, având un

caracter operațional și constituind suportul pentru etapele de evaluare și cuantificare dezvoltate în capitolele următoare, conform structurii sintetizate în tabelul 2.10:

Tabelul 2.10 Categorii de risc care apar în transportul intermodal și în terminalele de transbordare

Cod risc	Tipologia riscului	Element analizat	Descrierea riscului
R.I.1	Operațional	• Riscuri operaționale în punctele de transfer marfă; • Riscuri privind coordonarea operațională între moduri; • Riscuri privind infrastructura și capacitatea nodurilor intermodale; • Riscuri privind fiabilitatea serviciilor intermodale.	• Procesele de transbordare generează vulnerabilități asociate sincronizării fluxurilor; • Programarea necorelată a ferestrelor operaționale conduce la decalaje temporale; • Integrarea insuficientă a serviciilor afectează continuitatea lanțului intermodal (Kramberger et al., 2018).
R.I.2	Tehnic	• Riscuri asociate echipamentelor de manipulare și vehiculelor modale; • Riscuri privind sistemele tehnice ale infrastructurii intermodale.	• Defecțiunile echipamentelor reduc capacitatea de operare; • Indisponibilitatea vehiculelor generează întârzieri la transfer; • Disfuncționalitățile tehnice afectează stabilitatea exploatarei (Hilmola & Szekely, 2006).
R.I.3	Tehnologic	• Riscuri privind interoperabilitatea sistemelor informatice din terminale; • Riscuri privind erorile software și automatizarea defectuoasă; • Riscuri cibernetice.	• Deficiențele de interoperabilitate afectează schimbul de date între moduri; • Erorile software reduc vizibilitatea fluxurilor; • Vulnerabilitățile cibernetice perturbă controlul operațional (Göçmen & Erol, 2018).
R.I.4	Uman	• Riscuri generate de erori de operare în terminale; • Riscuri privind comunicarea și coordonarea personalului; • Riscuri privind nivelul de pregătire profesională.	• Erorile de manipulare afectează integritatea unităților de transport; • Comunicarea deficitară produce necorelări între moduri; • Nivelul insuficient de pregătire influențează siguranța operațională (Galierikova & Sosedova, 2018).
R.I.5	Juridic	• Riscuri privind armonizarea legislativă modală; • Riscuri privind documentația și responsabilitățile contractuale.	• Neconcordanțele legislative generează blocaje procedurale (Autoritatea Națională a Vămirilor, 2023); • Ambiguitățile contractuale favorizează litigii operaționale (Flodén, 2007).
R.I.6	Securitate	• Riscuri privind securitatea fizică în terminale; • Riscuri privind accesul neautorizat.	• Furtul sau sabotajul perturbă continuitatea operațională; • Protecția insuficientă crește expunerea la incidente deliberate (Gencer & Gök, 2023).
R.I.7	Economic	• Riscuri privind costurile operaționale și volatilitatea prețurilor; • Riscuri privind taxele și riscurile valutare.	• Fluctuațiile costurilor influențează structura financiară a lanțului intermodal; • Instabilitatea tarifelor afectează predictibilitatea economică (Hilmola & Szekely, 2006).
R.I.8	Mediu	• Riscuri privind impactul ecologic al operațiunilor intermodale; • Riscuri privind conformitatea cu cerințele de mediu.	• Emisiile și poluarea fonică generează constrângeri de exploatare; • Cerințele de conformitate influențează organizarea operațiunilor intermodale (Göçmen & Erol, 2018).

CAPITOLUL 3

METODE DE EVALUARE A RISCURILOR ȘI MĂSURI DE DIMINUARE ÎN TRANSPORTUL MULTIMODAL

3.1 Managementul riscului în transportul multimodal

Managementul riscului în transportul multimodal este abordat ca proces operațional, orientat spre identificarea, evaluarea și diminuarea efectelor disfuncționalităților asupra performanței transportului, în special asupra timpilor de livrare, continuității fluxurilor și utilizării eficiente a capacităților disponibile. În acest context, analiza riscurilor este raportată la procesele de exploatare, resursele utilizate și restricțiile operaționale ale sistemului de transport.

Riscurile se manifestă ca efect al disfuncționalităților care afectează fluxurile de transport, capacitatea de procesare a infrastructurii și coordonarea operațiunilor între modurile de transport (Ouedraogo et al., 2022).

3.2 Modele teoretice de evaluare a riscurilor în sistemele de transport multimodal

În această teză sunt analizate modele consacrate precum analiza modurilor de defectare și a efectelor acestora (Failure Mode and Effects Analysis – FMEA), modelele de evaluare pe bază de scor, analiza arborilor de defecte (Fault Tree Analysis – FTA) și extensiile probabilistice dinamice ale acestora (Dynamic Fault Tree – DFT).

Modelele sunt prezentate pentru delimitarea cadrului utilizat în domeniu și pentru fundamentarea selecției instrumentelor de evaluare adoptate în cercetare. În cadrul tezei, metodele sunt tratate diferențiat în funcție de rolul lor: unele au caracter conceptual, fiind utilizate pentru structurarea riscurilor conform literaturii de specialitate, iar altele sunt aplicate operațional pentru evaluarea cantitativă a riscurilor și susținerea măsurilor de diminuare dezvoltate în studiile de caz.

3.2.2 Modelul de evaluare a riscurilor pe bază de punctaj (Risk assessment scoring)

În cadrul etapei de evaluare a riscurilor în transportul multimodal, metoda de evaluare a riscurilor pe bază de scor (Tummala & Schoenherr, 2011) este utilizată pentru a ierarhiza numeric riscurile identificate, în funcție de probabilitatea de apariție și impactul asupra sistemului de transport. Metoda este aplicată în cadrul tezei ca etapă de evaluare statică, premergătoare analizelor structurale detaliate, având rolul de a evidenția riscurile cu impact major asupra continuității și performanței operaționale a transportului multimodal.

Aceasta funcționează prin identificarea evenimentelor de risc din procesele de transport, atribuirea pentru fiecare dintre acestea a unui nivel de probabilitate de apariție și a unui nivel al impactului operațional, urmată de combinarea acestor evaluări într-un scor care reflectă severitatea riscului.

3.3 Soluții de reducere a riscurilor în transportul multimodal

3.3.1 Metode de reducere a riscurilor în transportul multimodal integrat

Metodele de diminuare a riscurilor sunt concepute pentru a reduce atât probabilitatea de apariție a evenimentelor negative, cât și impactul acestora.

3.3.1.1 Soluții de diminuare a riscurilor operaționale

Reducerea riscului operațional la nivelul rutei de transport multimodal, exprimat prin probabilitatea depășirii capacității de procesare și a pragurilor admise ale timpului de transfer în nodurile de transbordare, se realizează prin măsuri de organizare și coordonare a fluxurilor, cu

evaluarea impactului asupra timpilor de procesare și a gradului de utilizare a capacității operaționale a nodului de transfer (numărul și performanța echipamentelor de manipulare, disponibilitatea personalului operativ, programul efectiv de funcționare) **(Popa et al., 2016)**.

Tabelul 3.6 Metode pentru reducerea riscurilor operaționale în transportul multimodal

Nr. crt.	Soluții de reducere a riscurilor operaționale (R.M.1)	Conținut
1.	Implementarea unui sistem digital de management al operațiunilor pentru sincronizarea activităților (Curtea de Conturi Europeană, 2023) .	Utilizarea aplicațiilor informatice pentru planificarea și coordonarea operațiunilor la nivelul rutei de transport multimodal, asigurând corelarea transferurilor între moduri și reducerea conflictelor de programare între operațiuni.
2.	Instruirea periodică a personalului și implementarea procedurilor standardizate de operare (Popescu, 2016) .	Se implementează programe de formare continuă pentru personal, orientate spre reducerea erorilor în manipularea mărfurilor și aplicarea unor standarde unitare de operare.
3.	Eficientizarea fluxurilor de trafic și utilizarea tehnologiilor de monitorizare în timp real (mt.ro, 2020) .	Monitorizarea fluxurilor de vehicule și unități de încărcare în nodurile de transfer ale rutei multimodale, prin senzori și sisteme video, cu scopul reducerii timpilor de procesare.
4.	Utilizarea echipamentelor adecvate și implementarea unor protocoale stricte de manipulare (UNTRR, 2016) .	Asigurarea compatibilității echipamentelor utilizate în transferul între moduri și aplicarea unor proceduri unitare pentru creșterea fiabilității operațiunilor.
5.	Implementarea sistemelor de urmărire și trasabilitate (track and trace) pentru monitorizarea în timp real (Oficiul pentru Publicații al Uniunii Europene, 2023) .	Tehnologii de identificare automată (RFID, coduri QR) pentru urmărirea mărfurilor pe parcursul transferului între moduri de transport.
7.	Implementarea sistemelor de programare a sosirii camioanelor pentru a evita aglomerația și a îmbunătăți eficiența (Gopalakrishnan & Gupta, 2023) .	Stabilirea intervalelor orare de acces în nodurile rutei multimodale pentru controlul fluxului și limitarea depășirii capacității de procesare.

3.3.1.2 Metode de reducere a riscurilor tehnologice

Diminuarea riscurilor tehnologice (R.M.3) în transportul multimodal de mărfuri este realizată prin măsuri care acționează asupra modului de utilizare și integrare a sistemelor tehnologice și informatice în procesul de transport, respectiv asupra mecanismelor de control, monitorizare și coordonare digitală care susțin funcționarea acestuia.

Mecanismul de reducere a riscurilor tehnologice constă în întreruperea lanțului de propagare dintre apariția disfuncționalităților tehnologice (D.2) la nivelul sistemelor de control și apariția indisponibilităților funcționale ale procesului de transport, prin identificarea anticipată a abaterilor informaționale și prin menținerea funcționării sistemelor în regimuri tehnologice controlate. Prin aceste măsuri, riscul este diminuat ca urmare a limitării probabilității ca o disfuncționalitate tehnologică (D.2) să se transforme într-o întrerupere a transportului multimodal de mărfuri.

3.3.1.3 Soluții pentru reducerea riscurilor tehnice

Reducerea riscurilor tehnice (R.M.2) în transportul multimodal de mărfuri se realizează prin intervenții aplicate asupra vulnerabilităților tehnice ale infrastructurii și echipamentelor de transport, care se manifestă prin disfuncționalități (D.3) de ordin mecanic, electric sau funcțional în procesele de exploatare.

Mecanismul de diminuare constă în controlul stării tehnice și al disponibilității funcționale, prin care este limitată probabilitatea apariției defectelor și este redus riscul ca o disfuncționalitate tehnică (D.3) să se materializeze într-o avarie cu impact asupra continuității procesului de transport.

Tabelul 3.8 Metode de reducere a riscurilor tehnice în procesul de transport multimodal

Metode de reducere a riscurilor tehnice (R.M.2)	Conținut
1. Întreținere și inspecție.	Aplicarea programelor structurate de verificare și întreținere pentru menținerea echipamentelor în condiții de funcționare conforme cu specificațiile tehnice ale producătorului, reducând probabilitatea apariției defectărilor funcționale necontrolate.
2. Utilizarea echipamentelor și infrastructurii conforme standardelor tehnice.	Selectarea și exploatarea echipamentelor proiectate pentru solicitările mecanice și funcționale specifice fluxurilor multimodale, cu creșterea fiabilității constructive și reducerea ratei defectărilor structurale (Janic, 2017) .
3. Redundanță funcțională.	Implementarea configurațiilor cu componente de rezervă (alimentare, comunicații, echipamente de manipulare) pentru asigurarea continuității operaționale în cazul defectării unei componente individuale.
4. Instruirea personalului angajat în terminalele de mărfuri.	Reducerea incidenței defectărilor generate de exploatarea necorespunzătoare prin calificarea personalului privind utilizarea, reglajul și întreținerea echipamentelor tehnologice.
5. Monitorizare continuă a parametrilor de funcționare.	Supravegherea permanentă a variabilelor critice (vibrații, temperatură, sarcină, presiune) pentru identificarea deviațiilor față de regimul tehnic stabilit și intervenția înaintea degradării funcționale.
6. Mentenanță preventivă adaptată regimului real de exploatare.	Corelarea intervalelor și tipurilor de intervenții tehnice cu starea efectivă a echipamentelor și istoricul de funcționare, reducând probabilitatea defectărilor premature sau a uzurii accelerate.
7. Audit tehnic periodic al echipamentelor și infrastructurii.	Evaluarea sistematică a conformității structurale și funcționale a echipamentelor și infrastructurii utilizate, cu identificarea defectelor latente și eliminarea acestora înainte de materializarea avariilor.

(Sursa: Autorul)

3.3.2 Soluții de reducere a riscurilor pentru transportul intermodal și în punctele de transbordare

3.3.2.1 Soluții care se aplică în transportul intermodal

Soluțiile de diminuare a riscurilor în transportul intermodal (R.I.1 - R.I.8) sunt fundamentate pe analiza proceselor de transfer al unităților de transport și pe coordonarea operațională dintre modurile de transport implicate, întrucât discontinuitățile și pierderile de performanță apar preponderent la nivelul punctelor de schimbare a modului de transport. Stabilitatea funcționării transportului intermodal este condiționată de corelarea capacităților de preluare, manipulare și expediere, precum și de sincronizarea temporală a operațiunilor aferente fiecărui mod de transport.

În acest context, măsurile de reducere a riscurilor sunt definite ca intervenții tehnico-operaționale aplicate asupra succesiunii operațiunilor de transfer, asupra planificării și programării resurselor operative utilizate în punctele de transbordare (echipamente de manipulare și personal operativ), precum și asupra sistemelor informaționale de management și control operațional.

Aceste intervenții limitează disfuncționalitățile generate de necorelarea capacităților, de variațiile de disponibilitate a resurselor și de deficiențele de sincronizare, reducând probabilitatea apariției evenimentelor de risc cu impact asupra continuității transportului intermodal:

1. Standardizarea succesiunii operațiilor tehnologice de transfer ale unităților de încărcare;
2. Determinarea și alocarea necesarului de echipamente și personal operativ pe baza duratei ciclului de transfer al unităților de încărcare;
3. Controlul accesului la punctul de transfer al unităților de încărcare în funcție de capacitatea de servire;
4. Introducerea unei marje de timp operaționale în programarea transferului și controlul variabilității timpilor;
5. Utilizarea parametrilor de exploatare specifici componentelor sistemului de transport în planificarea transferului intermodal;
6. Sistem informatic de suport pentru coordonarea transferului, trasabilitatea unităților de încărcare și actualizarea operațională;
7. Control tehnic al resurselor și competență operațională pentru funcțiile critice de transfer;

3.3.2.2 Soluții de reducere a riscurilor în terminalele de transbordare

În terminalele de transbordare, reducerea riscurilor este realizată prin măsuri aplicate direct asupra proceselor operaționale de manipulare, stocare temporară și transfer al unităților de încărcare între modurile de transport deservite. Din punct de vedere operațional, aceste măsuri vizează configurarea și controlul fluxurilor interne de mișcare, corelarea capacităților de manipulare cu volumele de trafic și utilizarea coordonată a resurselor tehnice și umane implicate în operare.

Intervențiile sunt formulate la nivel local al terminalului și acționează asupra succesiunii operațiunilor de transbordare, asupra alocării echipamentelor de manipulare și a personalului operativ, precum și asupra regimului de exploatare al infrastructurii terminale. Prin aplicarea acestor măsuri este limitată apariția disfuncționalităților operaționale și tehnice, fiind redusă probabilitatea materializării riscurilor umane și operaționale cu impact asupra continuității transferului intermodal.

1. Controlul capacității operaționale a interfețelor terminalului;
2. Controlul succesiunii operațiunilor de manipulare;
3. Adaptarea utilizării echipamentelor la sarcina operațională;
4. Organizarea circulației interne și separarea fluxurilor operaționale;
5. Integrarea stocării temporare a unităților de încărcare în fluxul operațional al terminalului;
6. Configurarea regimului de exploatare al resurselor critice ale terminalului;
7. Controlul tehnic al echipamentelor de manipulare;
8. Monitorizarea operațiunilor terminalului și controlul abaterilor față de planificarea operațională.

3.4 Studii de caz privind aplicarea modelelor de evaluare a riscurilor

3.4.1 Aplicarea metodei mediei ponderate în analiza riscurilor multimodale

3.4.1.1 Fundamentare metodologică a metodei mediei ponderate

Evaluarea cantitativă a riscurilor în transportul multimodal de mărfuri (R.M.1 - R.M.8) presupune prelucrarea unui volum semnificativ de date provenite din surse tehnice, instituționale și statistice, care nu sunt întotdeauna comparabile între ele din punct de vedere al preciziei, frecvenței sau metodologiei de colectare.

Sursele de date utilizate acoperă intervale temporale diferite, ca urmare a modului specific de raportare și actualizare caracteristic fiecărei instituții sau lucrări de specialitate; această eterogenitate temporală este inerentă analizelor de siguranță în transporturi și este gestionată prin criterii de selecție și ponderare, fără a afecta comparabilitatea relativă a rezultatelor.

Mecanismul de ponderare a surselor stabilește contribuția relativă a valorilor procentuale raportate de fiecare sursă la rezultatul agregat, fără modificarea valorilor inițiale și fără aplicarea unor transformări statistice asupra datelor de intrare. Prin această structură de calcul este limitată influența disproporționată a surselor caracterizate prin volum ridicat de date, dar cu relevanță metodologică redusă pentru obiectivul cercetării, fiind asigurată integrarea valorilor procentuale provenite din surse diferite într-o relație matematică unitară și comparabilitatea rezultatelor analizei.

Din punct de vedere teoretic, utilizarea mediei ponderate este pe deplin fundamentată în statistică, fiind consacrată ca extensie formală a mediei aritmetice în situațiile în care observațiile nu au aceeași relevanță sau reprezentativitate. Această abordare este prezentată și validată în lucrări de referință precum (Hogg et al., 2019) și (Neter et al., 2005) și este utilizată în mod explicit în aplicații de analiză a riscurilor din sisteme de transport complexe (Sauerberg et al., 2024).

Modelul de calcul al mediei ponderate are la bază relația matematică (3.13) utilizată de (Popa et al., 2025) și are ca obiectiv determinarea unei valori numerice agregate pentru fiecare subcategorie de risc, exprimată procentual, ajustată în funcție de gradul de compatibilitate metodologică a surselor de date utilizate.

Valorile procentuale specifice fiecărei subcategorii sunt prelucrate prin aplicarea mediei ponderate, unde ponderea w_i reflectă nivelul de adecvare tehnică și metodologică al sursei în raport cu obiectivul cercetării, conform relației (3.13). Valorile rezultate reprezintă indicatori statistici agregați ai expunerii relative la risc între subcategoriile de risc analizate și nu probabilități de apariție ale evenimentelor de risc:

$$M = \frac{\sum_{i \in V} (v_i \times w_i)}{\sum_{j \in W} (w_j \times f(w_j))}, \quad (\text{Popa et al., 2025}) \quad (3.13)$$

unde:

- M = media ponderată a valorilor procentuale;
- v_i = valoarea procentuală a fiecărei subcategorii;
- w_i = factorul de ponderare atribuit surselor în funcție de amploarea și precizia datelor furnizate de sursă;
- n = numărul de surse identificate (ex.: în componenta maritimă $n \in \{1, \dots, 16\}$);
- V = mulțimea surselor care menționează subcategoriile de risc analizate; (ex.: în componenta maritimă, $V \subseteq \{S1, \dots, S16\}$);
- W = setul ponderilor distincte (w_j);
- frecvența lui w_j : $f(w_j)$ = numărul de surse asociate fiecărei ponderi distincte (w_j).

Spre deosebire de metodele bazate pe medii simple, care atribuie aceeași pondere tuturor surselor, metoda utilizată asigură o agregare ponderată controlată a valorilor procentuale, prin aplicarea unei funcții de ponderare w_i , stabilită conform unor criterii prestabilite: recunoaștere instituțională, indexare academică, actualitatea datelor, rigoare metodologică și gradul de aplicabilitate directă în contextul cercetării. Fiecărei ponderi îi corespunde o frecvență de apariție în cadrul setului de date, notată $f(w_j)$, utilizată exclusiv pentru echilibrarea contribuțiilor numerice ale surselor în structura relației (3.13), conform tabelelor 3.14, 3.16 și 3.18.

3.4.1.3 Sursele utilizate și metodologia de atribuire a ponderilor

Fiecărei surse i-a fost asociat un scor ingineresc justificat, sub forma unei ponderi numerice întregi $w_i \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$, conform unei grile de evaluare.

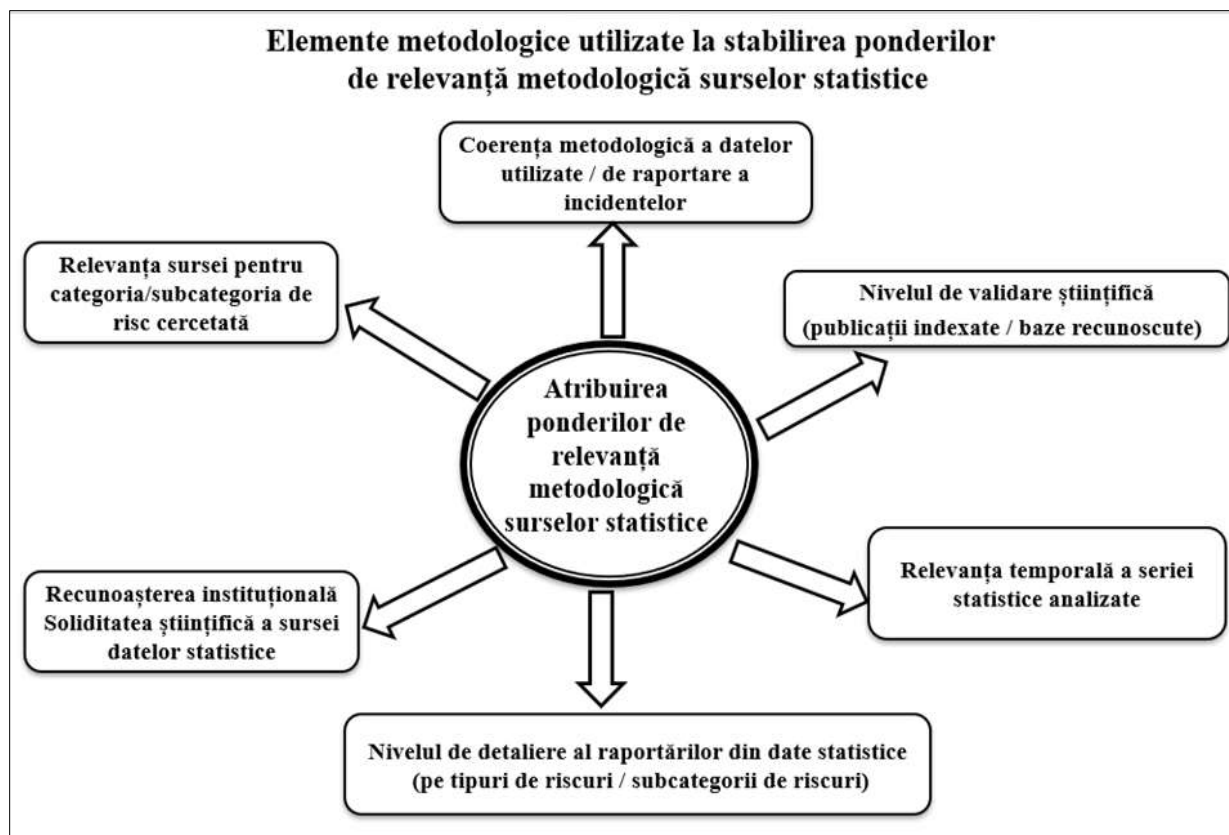


Figura 3.5 Criterii metodologice de atribuire a ponderilor surselor statistice (Sursa: Autorul).

3.4.1.5 Aplicarea formulei de calcul a mediei ponderate în evaluarea riscurilor

În această etapă a analizei se aplică relația matematică de calcul a mediei ponderate (relația 3.26), în vederea determinării indicatorilor numerici agregați corespunzători fiecărei subcategorii de risc asociate componentelor maritime, rutiere și feroviare ale transportului multimodal de mărfuri.

Scopul aplicării relației este obținerea unor valori procentuale comparative, care reflectă contribuția relativă a factorilor generatori de risc, în funcție de frecvența raportării și adecvarea metodologică a surselor de date utilizate.

A. Identificarea și tratarea riscurilor în componenta maritimă:

În cazul componentei maritime, riscurile analizate sunt cuantificate pe baza valorilor din tabelul 3.14, determinate prin medie ponderată conform relației (3.13), unde ponderea fiecărei surse reflectă gradul de adecvare metodologică și instituțională al acesteia, iar valorile procentuale utilizate exprimă frecvențele relative ale factorilor generatori de risc raportate în cadrul cazuisticii analizate.

În continuare am calculat, cu aceeași metodă matematică a mediei ponderate pentru celelalte subcategorii de risc analizate în cadrul componentei maritime obținând următoarele valori precizate în tabelul 3.14:

Tabelul 3.14 Indicatori procentuali calculați prin medie ponderată pentru subcategoriile factorilor generatori de risc asociate cauzisticii accidentelor maritime

Risc principal	Subcategorii de risc	Punctaj surse și procente de risc	Media ponderată $M = \frac{\sum_{i \in V} (v_i \times w_i)}{\sum_{j \in W} (w_j \times f(w_j))}$
Tehnice (mijlocul de transport) R.M.2	M.2.1: Întreținere inadecvată	S1 (5): 65,0%; S2 (5): 57,02%; S3 (5): 48,33%; S13 (4): 18,6%; S15 (4): 38,3%.	46,93 %
	M.2.2: Defecțiuni tehnice	S2 (5): 62,0%; S10 (5): 40,0%; S12 (5): 24,0%; S15 (4): 22,0%.	37,79 %
	M.2.3: Design defectuos	S3 (5): 30,0%; S10 (5): 66,0%;	48,00 %
	M.2.4: Vârsta navei	S13 (4): 29,1%; S14 (4): 28,8%; S15 (4): 26,3%; S16 (4): 24,1%.	27,08 %
	M.2.5: Vârsta echipamentului	S5 (4): 38,95%; S10 (5): 36,1%; S13 (4): 35,6%; S15 (4): 33,6%.	36,06 %
Factorul uman R.M.4	M.4.1: Comportamentul uman	S1 (5): 53,6%; S2 (5): 51,17%; S3 (5): 61,2%; S4 (4): 42,33%; S5 (4): 41,66%; S6 (4): 45,82%.	49,97 %
	M.4.2: Neglijența personalului	S1 (5): 48,12%; S2 (5): 53,48%; S3 (5): 58,19%; S7 (1): 28,0%.	51,68 %
	M.4.3: Pregătire profesională inadecvată	S1 (5): 37,6%; S2 (5): 45,38%; S7 (1): 21,19%; S8 (2): 26,72%.	37,66 %
	M.4.4: Oboseală	S1 (5): 32,16%; S4 (4): 43,7%; S9 (3): 31,85%; S10 (5): 54,3%; S14 (4): 37,1%.	40,53 %
	M.4.5: Comunicare deficitară	S1 (5): 28,32%; S3 (5): 39,92%; S6 (4): 27,16%; S8 (2): 14,81%; S9 (3): 12,08%.	27,14 %
	M.4.6: Încălări ale regulilor și procedurilor	S1 (5): 68,95%; S3 (5): 58,18%; S10 (5): 52,1%; S15 (4): 38,6%.	55,29 %

Mediu R.M.8	M.8.1: Vizibilitate	S1 (5): 46,7%; S7 (1): 16,81%; S8 (2): 19,95%; S11 (2): 8,66%; S15 (4): 6,75%.	32,47 %
	M.8.2: Condiții de lumină	S3 (5): 63,66%; S5 (4): 31,83%; S9 (3): 27,4%; S14 (4): 5,66%; S15 (4): 1,66%.	41,85 %
	M.8.3: Starea mării	S1 (5): 70,33%; S3 (5): 48,8%; S6 (4): 37,16%; S10 (5): 3,66%; S15 (4): 1,72%.	49,54 %
	M.8.4: Condiții de vânt	S2 (5): 64,4%; S8 (2): 31,3%; S11 (2): 20,4%.	47,27 %

(Sursa: Autorul)

Pe baza valorilor prezentate în tabelul 3.14, rezultă următoarele constatări:

1. Subcategoriile de riscuri „Vârsta navei” și „Comunicare deficitară” înregistrează valori procentuale reduse ale indicatorilor calculați prin medie ponderată, respectiv 27,08% și 27,14%, în raport cu celelalte subcategorii analizate din componenta maritimă;
2. Subcategoriile de riscuri „Neglijența personalului” și „Încălări ale regulilor și procedurilor” prezintă valori procentuale ridicate ale indicatorilor calculați, respectiv 51,68% și 55,29%, ceea ce evidențiază o contribuție relativ mai mare a factorului uman în cadrul cazuisticii analizate.

B. Identificarea și tratarea riscurilor în modul de transport rutier:

Evaluarea riscurilor asociate componentei rutiere în cadrul transportului multimodal este fundamentată pe integrarea unor surse statistice oficiale, selectate și ponderate în funcție de relevanța, actualitatea și comparabilitatea metodologică a datelor (Popa et al., 2025).

Această structură de selecție a surselor permite utilizarea coerentă a informațiilor statistice în procesul de evaluare a impactului riscurilor rutiere, asigurând o bază de date consistentă pentru analiza și ierarhizarea riscurilor în cadrul sistemului de transport multimodal.

Prin aplicarea relației de calcul a mediei ponderate (3.13), au fost determinate, pentru fiecare subcategorie de risc aferentă transportului rutier de marfă, valori medii ponderate, calculate pe baza ponderilor de relevanță atribuite surselor și a frecvenței de apariție a acestora în setul de date analizat.

Tabelul 3.16 Valorile medii ponderate ale riscurilor asociate transportului rutier

Categorie de risc	Subcategorie de risc	Cod	Surse și procente de risc (%)	Media ponderată (%) $M = \frac{\sum_{i \in V} (v_i \times w_i)}{\sum_{j \in W} (w_j \times f(w_j))}$
Operațional R.M.1	Supraîncărcarea / blocarea traficului	R.1.1	S1=38; S2=35; S3=32; S4=30.	34,18
	Lipsa semnalizării adecvate	R.1.2	S1=30; S2=32; S3=28; S4=25.	29,06
Tehnic R.M.2	Defecțiuni tehnice și mecanice ale vehiculelor	R.2.1	S1=50; S2=48; S3=44; S4=42.	46,47
	Probleme la sistemele de frânare	R.2.2	S1=35; S2=30; S4=28.	31,21

Categorie de risc	Subcategorie de risc	Cod	Surse și procente de risc (%)	Media ponderată (%) $M = \frac{\sum_{i \in V} (v_i \times w_i)}{\sum_{j \in W} (w_j \times f(w_j))}$
Tehnologic R.M.3	Infrastructură degradată	R.3.1	S1=32; S2=30; S3=27; S4=25.	28,88
	Proiectare necorespunzătoare a infrastructurii	R.3.2	S1=30; S2=25; S3=25; S4=27.	26,94
	Calitatea materialelor folosite în construcția infrastructurii	R.3.3	S1=25; S2=20; S3=20; S4=23.	22,18
	Întreținere deficitară a infrastructurii	R.3.4	S1=40; S2=35; S3=30; S4=28.	33,94
Factorul uman R.M.4	Erori umane în operarea vehiculelor	R.4.1	S1=60; S2=55; S3=50; S4=48; S5=25; S6=28.	49,75
	Vârsta șoferilor (22–30 ani)	R.4.2	S1=50; S2=40; S3=30; S4=28.	38,35
	Vârsta șoferilor (30–50 ani)	R.4.3	S1=30; S2=25; S3=20; S4=18.	23,94
	Vârsta șoferilor (peste 50 ani)	R.4.4	S1=40; S2=35; S3=32; S4=30.	34,76
	Experiența șoferilor (0–5 ani)	R.4.5	S1=60; S2=45; S3=50; S4=40.	49,12
	Starea de sănătate precară a șoferilor	R.4.6	S1=80; S2=25; S3=20; S4=22; S5=31.	38,68
Mediu R.M.8	Condiții meteorologice nefavorabile	R.8.1	S1=34; S2=30; S3=28; S4=26.	29,88
	Condiții dificile de trafic (ploi, ninsoare, ceață)	R.8.2	S1=35; S2=30; S3=25; S4=27.	29,85
	Vizibilitate redusă	R.8.3	S1=28; S2=25; S3=22; S4=22; S6=18.	24,28

(Sursa: Autorul)

Analiza valorilor medii ponderate prezentate în tabelul 3.16 indică faptul că subcategoriile de risc cu cele mai ridicate valori ale indicatorului procentual calculat prin metoda mediei ponderate în componenta rutieră sunt asociate factorului uman, respectiv erorile în operarea vehiculelor (49,75%) și lipsa experienței șoferilor (49,12%).

C. Identificarea și tratarea riscurilor în modul de transport feroviar:

Evaluarea riscurilor aferente componentei feroviare se bazează pe un set de surse de date oficiale, europene și naționale, utilizate pentru cuantificarea subcategoriilor de risc asociate infrastructurii și exploatării feroviare (Popa et al., 2025).

Tabelul 3.18 prezintă valorile medii ponderate calculate pentru principalele subcategorii de risc aferente transportului feroviar de mărfuri, structurate pe categorii și subcategorii de risc.

Tabelul 3.18 Valorile riscurilor și subriscurilor asociate componentei feroviare

Categorie de risc	Subcategorie de risc	Cod	Surse și procente de risc (%)	Media ponderată (%) $M = \frac{\sum (v_i \times w_i)}{\sum_{j \in W} (w_j \times f(w_j))}$
RISURI OPERAȚIONALE R.M.1	Infrastructură degradată	F.1.1	S1: 40; S2: 38; S3: 35; S4: 33.	37,14
	Deficiențe în managementul siguranței operaționale	F.1.2	S1: 50; S2: 45; S3: 42; S4: 40.	45,21

Categorie de risc	Subcategorie de risc	Cod	Surse și procente de risc (%)	Media ponderată (%) $M = \frac{\sum (v_i \times w_i)}{\sum_{j \in W} (w_j \times f(w_j))}$
	Coliziuni între trenuri	F.1.3	S1: 25; S2: 22; S3: 20.	22,58
RISCURI TEHNICE R.M.2	Defecțiuni la sistemul de frânare	F.2.1	S1: 35; S2: 30; S3: 28.	31,42
RISCURI TEHNOLOGICE R.M.3	Uzura șinelor	F.3.1	S1: 35; S2: 32; S3: 30; S4: 28.	31,93
	Deficiențe în întreținerea podurilor și tunelurilor	F.3.2	S1: 30; S2: 28; S3: 27; S4: 25.	28,00
	Defecțiuni tehnice ale materialului rulant	F.3.3	S1: 45; S2: 40; S3: 38.	41,42
FACTORUL UMAN R.M.4	Eroare umană (erori în operarea vehiculelor)	F.4.1	S1: 55; S2: 50; S3: 48; S4: 45.	47,20
FACTORUL UMAN R.M.4	Vârsta mecanicilor (peste 50 ani)	F.4.2	S1: 35; S2: 32; S3: 30.	32,58
	Lipsa de experiență a mecanicilor (0–5 ani)	F.4.3	S1: 45; S2: 40; S3: 38.	41,42
MEDIU R.M.8	Condiții meteorologice nefavorabile	F.8.1	S1: 30; S2: 28; S3: 25; S5: 5.	26,08
	Vizibilitate redusă – condiții meteorologice (ceată, ploi)	F.8.2	S1: 25; S2: 23; S3: 22.	21,85

(Sursa: Autorul)

3.4.2 Aplicarea modelului pe bază de scor (Risk assessment scoring model) în evaluarea riscurilor din transportul multimodal

Evaluarea riscurilor asociate componentelor modale maritime (R.M.2, R.M.4, R.M.8), rutiere (R.M.1, R.M.2, R.M.3, R.M.4, R.M.8) și feroviare (R.M.1, R.M.2, R.M.3, R.M.4, R.M.8) ale unei rute de transport multimodal se realizează prin aplicarea modelului matematic de evaluare pe bază de scor (*Risk Assessment Scoring Model*), propus de (**Tummala și Schoenherr, 2011**), pe baza unei grile probabilitate – impact utilizate pentru ierarhizarea riscurilor.

Tabelul 3.19 Scoruri de risc pentru transportul maritim, rutier și feroviar

MOD DE TRANSPORT	Cod risc principal	Categorie risc	Cod subcategorie risc	p (%)	P	I	R	Zonă
MARITIM	R.M.2	Tehnic	M.2.1	46,93	3	4	12	Galben
			M.2.2	37,79	3	4	12	Galben
			M.2.3	48,00	3	3	9	Galben

MOD DE TRANSPORT	Cod risc principal	Categorie risc	Cod subcategorie risc	p (%)	P	I	R	Zonă
MARITIM			M.2.4	27,08	2	3	6	Verde
			M.2.5	36,06	3	3	9	Galben
	R.M.4	Factor uman	M.4.1	49,97	3	4	12	Galben
			M.4.2	51,68	4	4	16	Roșu
			M.4.3	37,66	3	3	9	Galben
			M.4.4	40,53	3	4	12	Galben
			M.4.5	27,14	2	3	6	Verde
			M.4.6	55,29	4	4	16	Roșu
	R.M.8	Mediu	M.8.1	32,47	3	3	9	Galben
			M.8.2	41,85	3	3	9	Galben
			M.8.3	49,54	3	4	12	Galben
	R.M.1	Operațional	M.8.4	47,27	3	3	9	Galben
			R.1.1	34,18	3	4	12	Galben
			R.1.2	29,06	2	3	6	Verde
RUTIER	R.M.2	Tehnic	R.2.1	46,47	3	4	12	Galben
			R.2.2	31,21	3	4	12	Galben
	R.M.3	Tehnologic	R.3.1	28,88	2	3	6	Verde
			R.3.2	26,94	2	3	6	Verde
			R.3.3	22,18	2	2	4	Verde
			R.3.4	33,94	3	4	12	Galben
	R.M.4	Factor uman	R.4.1	49,75	3	4	12	Galben
			R.4.2	38,35	3	3	9	Galben
			R.4.3	23,94	2	2	4	Verde
			R.4.4	34,76	3	3	9	Galben
			R.4.5	49,12	3	3	9	Galben
			R.4.6	38,68	3	3	9	Galben
	R.M.8	Mediu	R.8.1	29,88	2	3	6	Verde
			R.8.2	29,85	2	3	6	Verde
			R.8.3	24,28	2	2	4	Verde
FEROVIAR	R.M.1	Operațional	F.1.1	37,14	3	4	12	Galben
			F.1.2	45,21	3	4	12	Galben
			F.1.3	22,58	2	5	10	Galben
	R.M.2	Tehnic	F.2.1	31,42	3	4	12	Galben
	R.M.3	Tehnologic	F.3.1	31,93	3	3	9	Galben
			F.3.2	28,00	2	3	6	Verde
			F.3.3	41,42	3	4	12	Galben
	R.M.4	Factor uman	F.4.1	47,20	3	4	12	Galben
			F.4.2	32,58	3	3	9	Galben
			F.4.3	41,42	3	3	9	Galben
	R.M.8	Mediu	F.8.1	26,08	2	3	6	Verde
			F.8.2	21,85	2	2	4	Verde

(Sursa: Autorul)

3.4.2.5. Constrângeri operaționale și interpretarea rezultatelor

Analiza scorurilor de risc obținute pentru fiecare mod de transport relevă necesitatea adoptării unor măsuri specifice de reducere a riscurilor, formulate astfel încât să contribuie efectiv

la diminuarea probabilității de apariție a riscului și/sau a impactului acestuia în cadrul sistemului de transport multimodal.

Tabelul 3.20 Scoruri de risc și măsuri de diminuare pentru componenta maritimă a transportului multimodal

Cod risc evaluat	Scor risc	Măsură de reducere a riscului	Aplicare tehnică (descriere operațională)	Componenta scorului influențată
M.4.1 Comportament uman	12	- Instruire periodică pe manevre portuare și situații de urgență; - Supraveghere operațională prin verificări și evaluări periodice ale performanței în serviciu.	- stabilirea responsabilităților pe posturi pentru manevră (punte/mașină) înainte de intrarea în port; - aplicarea evaluărilor periodice după manevre critice, cu consemnări; - introducerea registrului de observații operaționale și a măsurilor corective aferente.	P
M.4.2 Neglijența personalului	16	- Utilizarea listelor de verificare înainte de manevră; - Controlul respectării procedurilor de operare în intervalele critice.	- utilizarea checklist-urilor „pre-arrival” și „before departure” pentru punte și mașină; - verificarea completării checklist-urilor de către ofițerul responsabil; - introducerea verificării încrucișate (confirmare de către a doua persoană) pentru pași critici;	P
M.4.3 Pregătire profesională inadecvată	9	- Program de instruire periodică pentru personalul implicat în manevre; - Evaluarea competențelor prin testări și exerciții planificate.	- definirea tematicilor minime pentru manevră (comenzi, comunicare, situații anormale); - derularea exercițiilor planificate și consemnarea rezultatelor; - reinstruire ținută pentru personalul cu rezultate sub pragul intern impus de companie.	P
M.4.4 Oboseală	12	- Planificarea carturilor astfel încât posturile critice să fie acoperite cu personal odihnit; - Verificarea timpilor de muncă/odihnă înainte de manevră.	- planificarea carturilor în funcție de ora estimată a manevrei; - verificarea registrului de ore de odihnă înainte de începerea manevrei; - confirmarea aptitudinii pentru serviciu a personalului implicat în manevră.	P
M.4.5 Comunicare deficitară	6	- Disciplină de comunicații la manevră (canal dedicat și confirmare); - Standardizarea mesajelor pentru comenzi critice.	- stabilirea canalului VHF de lucru și a responsabilităților înainte de manevră; - folosirea unei liste de verificare pentru schimbul inițial de informații pilot-comandant.	P
M.4.6 Încălcări reguli/proceduri	16	- Controlul aplicării procedurilor în manevră prin verificări interne; - Analiza incidentelor și acțiuni corective documentate.	- introducerea verificărilor periodice pe manevre (audit intern operațional); - raportarea abaterilor și stabilirea măsurilor corective cu responsabil și termen; - revizuirea procedurilor dacă se constată abateri repetate.	P
M.8.1 Vizibilitate redusă	9	- Aplicarea pragurilor operaționale pentru continuarea manevrei; - Utilizarea procedurilor de veghe întărită la navigația în vizibilitate redusă.	- verificarea vizibilității raportate (VTS/observație la bord) înainte și în timpul manevrei; - asigurarea posturilor suplimentare de observare pe punte, dacă este cazul; menținerea evidențelor: buletin meteo/VTS și consemnări în jurnal.	I

Cod risc evaluat	Scor risc	Măsură de reducere a riscului	Aplicare tehnică (descriere operațională)	Componenta scorului influențată
M.8.2 Condiții de lumină	9	- Asigurarea iluminatului operațional în zonele de lucru; - Verificarea stării echipamentelor de iluminat.	- verificarea funcționării iluminatului pe punte și în zonele de manevră; - înlocuirea/reamplasarea corpurilor de iluminat nefuncționale înainte de operațiuni; - introducerea verificării în checklist-ul pre-manevră.	I
M.8.3 Starea mării	12	- Controlul condițiilor meteo pentru manevră. - Restricții operaționale în funcție de nivelul valurilor și a curenților.	- verificarea avertizărilor meteo și a observațiilor locale înainte de manevră; - aplicarea restricțiilor portuare (limitări de manevră) la depășirea pragurilor operaționale impuse.	I
M.8.4 Condiții de vânt	9	- Controlul nivelurilor de severitate ale vântului pentru manevră; - Ajustarea planului de manevră în vânt lateral.	- verificarea vântului din măsurători locale și prognoză înainte de manevră; - aplicarea restricțiilor portuare și a limitărilor operaționale interne (viteze/unghiuri).	I
M.2.1 Întreținere inadecvată	12	- Mentenanță planificată pentru echipamente critice; - Verificări funcționale înainte de manevră.	- planificarea intervențiilor conform programului de mentenanță; - executarea probelor funcționale ale echipamentelor înainte de manevră; - introducerea interdicției de manevră dacă testele critice nu sunt conforme.	P
M.2.2 Defecțiuni tehnice	12	- Testarea sistemelor esențiale ale navei înainte de manevră. - Măsuri corective imediate la constatarea unor neconformități.	- test de cârmă și verificarea modurilor de comandă principal/rezervă; - verificarea alarmelor și a indicatoarelor pentru sistemele critice ale navei; - remediarea tehnică înainte de manevră sau reprogramarea manevrei.	P
M.2.3 Design defectuos	9	Verificări de conformitate privind modificările structurale și dotările navei;	- verificarea documentației tehnice la modificări structurale ale navei sau echipări noi; - executarea recepțiilor tehnice și a probelor după intervenții sau înainte de punere în exploatare.	P
M.2.4 Vârsta navei	6	- Planificarea intervențiilor în funcție de uzură; - Creșterea frecvenței verificărilor pentru sisteme critice.	- stabilirea unui program de verificări suplimentare pentru echipamentele critice; - prioritizarea intervențiilor de reparație/înlocuire pe baza constatărilor; - monitorizarea neconformităților repetate și corelarea cu intervențiile.	P
M.2.5 Vârsta echipamentului	9	- Înlocuire planificată a echipamentelor cu uzură avansată; - Verificări tehnice periodice ale echipamentelor critice pentru siguranța exploatării.	- inventarierea echipamentelor critice și stabilirea pragurilor de înlocuire; - programarea verificărilor periodice și a reviziilor; - înlocuirea echipamentelor cu neconformități repetate; - menținerea evidențelor: registru echipamente și fișe mentenanță.	P

(Sursa: Autorul)

În coloana „Componenta scorului influențată”, marcasele *P* și *I* indică variabila din modelul de scor asupra căreia acționează măsura de diminuare a riscurilor, respectiv *P* pentru reducerea probabilității de materializare a riscului prin controlul condițiilor de producere (organizare, proceduri, verificări, competențe, conformitate tehnică, mentenanță și probe), iar *I* pentru

reducerea impactului prin impunerea pragurilor operaționale, restricțiilor de exploatare și măsurilor de limitare a consecințelor.

Modelul de prezentare utilizat în tabelul 3.20, prin corelarea scorului de risc cu măsurile de diminuare, aplicarea tehnică a acestora și componenta scorului influențată, este menținut în mod similar și pentru componentele rutieră (tabelul 3.21) și feroviară (tabelul 3.22) ale transportului multimodal de mărfuri.

3.4.3 Aplicarea modelului Dynamic Fault Tree

3.4.3.1 Ipoteze de lucru

Modelarea prin metoda Dynamic Fault Tree (DFT) are ca obiect evaluarea scenariului de coliziune dintre nava portcontainer MSC ANDRIANA III și o altă navă aflată în Dana 123 a Portului Constanța, în timpul manevrei de acostare asistate de remorcherul BSV Rusia, prin integrarea factorilor umani, tehnici și climatici identificați în studiu, respectiv oboseala echipajului (M.1.4), comunicarea deficitară (M.1.5), eșecul funcțional al asistenței remorcherului în manevră (M.3.1), defecțiunile sistemului de guvernare al navei (M.3.2), vizibilitatea redusă (M.2.2) și condițiile de vânt nefavorabile (M.2.5).

Obiectivul principal constă în estimarea probabilității evenimentului precursor prin modelarea logică a cauzelor multiple, dependente temporal și logic, utilizând porți dinamice specifice metodei Dynamic Fault Tree.

3.4.3.2 Structura modelului și sursele de date utilizate

Se utilizează metoda Dynamic Fault Tree (DFT) pentru a reprezenta relațiile dinamice și condiționate dintre evenimente de bază precum: erori umane (oboseală - M.1.4 sau pregătire insuficientă a personalului – M.1.3), defecțiuni tehnice (avarie sistem de guvernare a navei portcontainer – M.3.2), condiții meteo extreme (furtună - M.2.5, vizibilitate redusă – M.2.2) și eșecul coordonării cu remorcherul prin comunicare deficitară (M.1.5) ceea ce determină o asistență defectuasă a acestuia la nava portcontainer în timpul manevrei de acostare (defecțiune funcțională asistență manevră – M.3.1).

Tabelul 3.23 Tipuri de porți logice utilizate în analiza DFT al studiului de caz

Poartă logică	Simbol grafic	Interpretarea aplicării în studiu	Exemplu
OR		Reprezintă riscuri alternative, oricare dintre ele poate conduce la evenimentul precursor.	Neglijență (M.1.2) sau lipsă de pregătire personal (M.1.3). Alternativ, vizibilitate redusă (M.2.2) sau condiții de vânt nefavorabile (M.2.5) constituie cauze de abatere de la traiectoria de manevră.
AND		Reprezintă riscuri concomitente, care trebuie să apară împreună.	Oboseala (M.1.4) și comunicarea deficitară (M.1.5); concomitent, condițiile de vânt (M.2.5) pot acționa ca factori de mediu care amplifică abaterea de manevră.
PAND		Reprezintă riscuri în succesiune critică strictă.	Oboseala (M.1.4) urmată de comunicare deficitară (M.1.5), deoarece degradarea vigilenței precede transmiterea/recepția eronată a ordinelor;
FDEP		Activarea unui eveniment declanșator conduce automat la activarea unui eveniment dependent.	Eveniment declanșator: comunicare deficitară (M.1.5); eveniment dependent: deficiență funcțională a asistenței remorcherului în manevră (M.3.1), în sensul că ordinele de împingere/tragere sunt recepționate eronat, iar asistența devine ineficientă în menținerea traiectoriei navei;

(Sursa: Autorul)

3.4.3.3 Analiza relațiilor cauzale și organizarea structurală a arborelui DFT

Formulă generală pentru poarta OR între 2 evenimente independente:

$$P_{OR}(A,B) = P(A) + P(B) - P(A) \times P(B) \quad (3.17)$$

În această structură, riscurile M.1.4 și M.1.5 sunt modelate prin porți OR și PAND, dependența dintre M.1.5 și M.3.1 este redată prin poarta FDEP, iar combinarea riscurilor M.3.2, M.2.2 și M.2.5 este realizată prin poarta AND, astfel încât modelul să reflecte succesiunea, condiționarea și acțiunea simultană a evenimentelor care conduc la scenariul de coliziune.

Combinarea riscurilor în structura DFT a fost realizată prin modelarea relațiilor logice dintre evenimentele de bază M.1.4, M.1.5, M.3.1, M.3.2, M.2.2 și M.2.5. Evenimentele M.1.4 și M.1.5 au fost asociate prin poarta OR pentru definirea evenimentului intermediar M1, cu probabilitatea $P(M1) = 0,57$, iar succesiunea critică M.1.4 $\rightarrow$ M.1.5 a fost modelată prin poarta PAND, rezultând $P_{PAND} = 0,11$. Dependența funcțională dintre M.1.5 și M.3.1 a fost redată prin poarta FDEP, cu probabilitatea $P_{FDEP} = 0,12$, iar combinarea simultană a riscurilor M.3.2, M.2.2 și M.2.5 a fost modelată prin poarta AND, rezultând $P_{AND} = 0,05$.

Evenimentul agregat asociat scenariului de coliziune a fost determinat prin poarta OR aplicată celor trei mecanisme E1, E2 și E3, obținându-se $P_{total} = 0,257$, respectiv aproximativ 0,26. Rezultatul evidențiază că scenariul analizat este determinat de acțiunea combinată a riscurilor M.1.4, M.1.5, M.3.1, M.3.2, M.2.2 și M.2.5, cu contribuție cumulată a secvențelor umane, a dependenței funcționale și a condiționărilor tehnico-climatice.

3.4.3.4 Evaluarea traseelor logice DFT și calculul probabilităților pe fiecare ipoteză

Scopul acestei etape este determinarea probabilității producerii evenimentului precursor (coliziune) prin evaluarea traseelor logice dinamice din structura arborelui DFT, utilizând valorile riscurilor din tabelul 3.14, porțile dinamice (PAND, FDEP, AND) și relații matematice pentru combinații de evenimente.

Evaluarea traseelor logice DFT a fost realizată prin calculul independent al ipotezelor E_1 , E_2 și E_3 , pe baza valorilor asociate riscurilor M. 1.4, M. 1.5, M. 3.1, M. 3.2, M. 2.2 și M. 2.5.

Pentru E_1 , succesiunea critică M. 1.4 $\rightarrow$ M. 1.5 a fost modelată prin poarta PAND:

$$P_{PAND} = P(M. 1.4) \times P(M. 1.5) = 0,11 \quad (3.28)$$

Pentru E_2 , dependența funcțională M. 1.5 $\rightarrow$ M. 3.1 a fost evaluată prin poarta FDEP:

$$P_{FDEP} = P_{trigger} \times P_{dependent} = P(M. 1.5) \times P(M. 3.1) = 0,27 \times 0,46 = 0,12 \quad (3.29)$$

unde:

- $P_{trigger}$: probabilitatea ca evenimentul declanșator să aibă loc;
- $P_{dependent}$: probabilitatea ca evenimentul dependent să apară în absența declanșatorului.

Pentru E_3 , combinația simultană M. 3.2 $\wedge$ M. 2.2 $\wedge$ M. 2.5 a fost modelată prin poarta AND:

$$P_{AND} = P(M. 3.2) \times P(M. 2.2) \times P(M. 2.5) = 0,37 \times 0,32 \times 0,47 = 0,05 \quad (3.30)$$

Probabilitatea totală de coliziune:

Relația completă aferentă porții logice OR între evenimente independente este utilizată pentru determinarea probabilității totale de coliziune, fiind justificată în contextul unor trasee logice distincte și fără suprapuneri structurale majore. Relația de tip OR permite integrarea probabilistică finală într-o formulare coerentă, în condiții de independență logică și absență a corelațiilor temporale (Vesely et al., 1981):

$$P_{total} = 1 - \prod_{i=1}^3 (1 - P_i) = 1 - (1 - 0,11)(1 - 0,12)(1 - 0,05) = 1 - 0,73 = 0,27 \quad (3.31)$$

Concluzie: Rezultatul obținut reprezintă o valoare numerică de sinteză care integrează contribuțiile mecanismelor de manifestare a riscului, modelate prin porțile logice Dynamic Fault

Tree utilizate în analiză, respectiv: poarta PAND, pentru combinarea factorilor umani (oboseala echipajului (M.1.4) și comunicarea deficitară (M.1.5)), poarta FDEP, pentru relația de dependență funcțională dintre comunicare (M.1.5) și disponibilitatea remorcherului (M.3.1), și poarta AND, pentru combinația dintre riscul tehnic și condițiile de mediu (pierderea controlului cârmei (M.3.2), vizibilitate redusă (M.2.2) și vânt lateral (M.2.5)).

3.4.3.6 Reprezentarea grafică a arborelui DFT

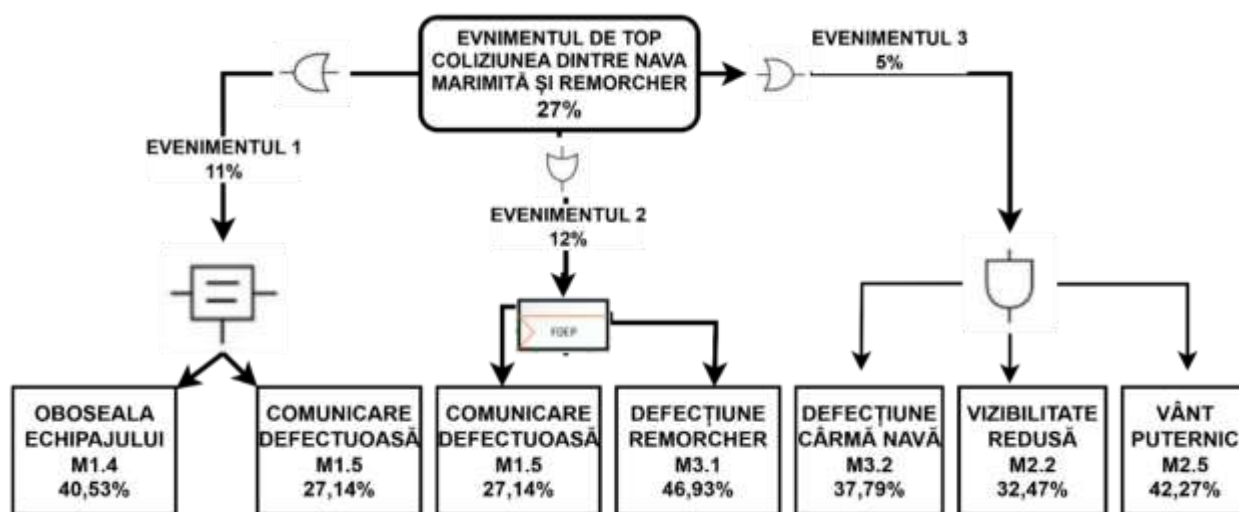


Figura 3.8 Arborele de defecțiuni dinamic (DFT) pentru evenimentul final – coliziunea dintre o navă maritimă și un remorcher în timpul manevrei de acostare în terminalul DP World – Portul Constanța Sud (Sursa: Autorul)

CAPITOLUL 4

SOLUȚII DE DIMINUARE A RISCURILOR – STUDII DE CAZ

4.1 Soluții de reducere a riscurilor operaționale, tehnice și tehnologice în terminalul DP World

4.1.1 Descrierea problemei

Terminalul DP World Constanța Sud reprezintă un nod de transfer intermodal și multimodal cu rol de interfață între fluxurile maritime din Marea Neagră și conexiunile terestre și fluviale integrate în rețeaua europeană de transport.

Funcționarea terminalului depinde de corelarea continuă a echipamentelor, resurselor și succesiunii operaționale, ceea ce conduce la apariția unor categorii distincte de riscuri, respectiv riscuri operaționale (R.I.1), riscuri tehnice (R.I.2), riscuri tehnologice (R.I.3) și riscuri meteorologice (R.I.8), fiecare cu efect direct asupra continuității fluxului logistic. În aceste condiții, identificarea măsurilor de diminuare a riscurilor R.I.1, R.I.2, R.I.3 și R.I.8 este necesară pentru limitarea blocajelor operaționale și pentru menținerea continuității funcționale a terminalului.

4.1.3 Identificarea riscurilor operaționale, tehnologice și tehnice

În cazul terminalului DP World Constanța Sud, vulnerabilitățile sistemului sunt asociate configurării operaționale a zonei de operare la cheu, disponibilității și fiabilității echipamentelor

de manipulare, precum și modului de integrare funcțională a acestora în sistemul de operare al terminalului. Aceste vulnerabilități se manifestă prin disfuncționalități în succesiunea operațiunilor de descărcare și încărcare a navelor (D.1), prin necorelări între productivitatea macaralelor de cheu și capacitatea de preluare și evacuare a containerelor din zonele de stocare temporară (D.2), precum și prin utilizarea ineficientă a resurselor operative (D.3).

În condițiile în care productivitatea macaralelor de cheu nu este corelată cu capacitatea de manipulare și transfer din zonele de stocare temporară, se produc acumulări locale de unități de încărcare, care conduc la disfuncționalități operaționale (D.1) și la limitarea capacității efective de operare a navei, generând riscuri operaționale (R.I.1) cu impact direct asupra timpilor de staționare la cheu și asupra continuității procesului de transport multimodal. În același timp, riscurile tehnologice (R.I.3) și riscurile tehnice (R.I.2) sunt asociate performanței și fiabilității macaralelor de cheu, acestea având un rol determinant în capacitatea operațională globală a terminalului.

4.1.4 Capacitatea interfețelor de transfer și raportul de îngustare a fluxului de mărfuri

Cadrul metodologic pentru evaluarea capacității interfețelor de transfer din terminalul de transbordare DP World Constanța Sud, constă în secțiunea limitativă de capacitate a unei interfețe în care capacitatea efectivă a interfeței (dană–navă, platformă depozitare–modul de transport feroviar și platformă–componenta rutieră) este mai mică decât capacitățile subsistemelor adiacente (cheu, platformă depozitare containere, poartă rutieră, rampă feroviară), limitând debitul total și amplificând riscul de congestie și întârzieri (**Notteboom & Rodrigue, 2022**).

Pentru a evalua gradul de utilizare a infrastructurii portuare și a identifica zonele susceptibile de a deveni puncte de restricție, se utilizează indicatori cantitativi care includ raportul de ocupare la dană (BOR - Berth Occupancy Ratio), utilizat pentru măsurarea gradului de încărcare a infrastructurii de acostare (**ABPmer, 2019**), analiza limitărilor fizice privind numărul de macarale ce pot opera simultan pe aceeași navă, generate de constrângerea de non-crossing (**Lu et al., 2012**), precum și un indicator de comparație între capacitatea interfețelor de evacuare și ritmul de operare la dană.

Raportul Berth Occupancy Ratio (BOR) exprimă procentual gradul de utilizare efectivă a infrastructurii de acostare într-un interval de timp definit, raportând durata totală în care dana este operativ ocupată la durata totală disponibilă pentru operare în perioada analizată.

$$BOR = \frac{T_0}{T_t} \times 100\%, \text{ (**ABPmer, 2019**)} \quad (4.1)$$

unde: T_0 este timpul efectiv în care dana e ocupată (de la acostare până la plecare, include și formalitățile efectuate de către autorități dacă se fac la dană) iar T_t reprezintă timpul total disponibil al danei în perioada aleasă (ex: 24 h/zi sau 8.760 h/an).

Pentru o singură dană, indicatorul BOR evidențiază două situații operaționale distincte: în ipoteza unei zile de operare cu ocupare continuă rezultă $BOR = 100\%$, ceea ce indică utilizarea integrală a danei și potențial risc de așteptare la acostare în cazul creșterii traficului. În schimb, la nivel săptămânal, o ocupare de 24 ore din 168 ore conduce la $BOR = 14,29\%$, reflectând un grad redus de utilizare și existența unei capacități disponibile semnificative.

Indicatorul de comparație între interfețe (INCI - Intermodal Interface Capacity Index):

În continuarea modelării se procedează la obținerea valorii indicatorului de comparație între interfețe (INCI), care este calculat ca raport între capacitatea interfeței analizate (zona de transfer al unităților de marfă) și ritmul maxim de operare la dană, conform conceptului de corelare a capacităților subsistemelor portuare (**adaptare după: Rodrigue, 2020**).

$$\text{Relația utilizată este: } INCI_x = \frac{C_x}{C_{dană,maxim}}, \quad (4.4)$$

unde: C_x este capacitatea interfeței analizate (containere/oră), determinată din date operaționale reale, $C_{dană,maxim}$ este capacitatea maximă de operare la dană (containere/oră), calculată pe baza productivității macaralelor de cheu și a constrângerilor fizice de operare iar INCI este adimensional (fără unitate de măsură), pentru că este un raport de capacități.

Interpretare rezultate: valori ale indicatorului $INCI < 1$ indică faptul că interfața analizată are o capacitate inferioară capacității maxime de operare la dană și, prin urmare, poate constitui un punct de restricție în fluxul de marfă; valori $INCI \geq 1$ arată că interfața dispune de o capacitate cel puțin egală cu cea a danei, nefiind un factor limitativ pentru aceasta.

Pentru evaluarea comparativă a interfețelor portuare (feroviară și rutieră) față de zona de operare la dană, este necesar să se stabilească mai întâi ritmul maxim de operare la dană și ritmul mediu pe escală, utilizând date operaționale reale.

Ritmul de referință la dană este 54 cont./oră (2 macarale QC $\times$ 27 cont./oră/QC), iar ritmul mediu pe escală, raportat la 20 ore operare efectivă din 24 ore ocupare, este 45 cont./oră; simultaneitatea macaralelor pe aceeași navă este limitată din considerente geometrice și de siguranță (**DP World Romania, 2024; Lu et al., 2012**).

Interfața feroviară: dispune de 2 utilaje RMG $\times$ 15 cont./oră, deci 30 cont./oră, rezultând un indicator $INCI_{feroviar} = \frac{30}{54} = 0,56$ și un decalaj de capacitate față de dană de 24 cont./oră, cu tendință de acumulare pe platformă.

Interfața rutieră: se evaluează prin capacitatea efectivă la porți (camioane/oră reală de lucru) și se compară cu ritmul mediu pe escală la dană; indicatorul normalizat al interfeței (INCI) se calculează explicit cu relația de bază (4.67).

Pentru datele din terminal, echilibrul fără acumulare pe platformă impune un debit rutier de ≈ 15 cont./oră ($\approx 300 - 330$ cont./zi la 20 - 22 ore/zi), ceea ce corespunde unui prag minim $INCI_{rutier,minim} \approx 0,28$; sub acest nivel apar stocuri și creșteri ale timpilor de așteptare iar pestea acest prag valoric fluxul rutier este aliniat cu operarea navei.

Tabelul 4.5 Măsurile tehnice de diminuare a riscurilor, pe categorii de transfer, în terminalul DP World

Categoria de transfer	Riscuri principale	Măsurile de diminuare a riscurilor
Nava maritimă → zona de operare la dană (cheu)	• Secvențiere neadecvată pe bay-uri generează debit simultan peste capacitatea platformei (R.I.1); • Indisponibilitatea unei macarale de cheu STS/QC prelungește staționarea la dană (R.I.2); • Condiții meteorologice nefavorabile suspendă operarea la cheu (R.I.8); • Întârzieri ale echipelor de lashing/de-lashing încetinesc ciclurile operaționale (R.I.4); • Aglomerarea platformei de cheu limitează circulația vehiculelor ITV și crește riscul operațional (R.I.1); • Nealinieria planului de depozitare de la navă cu conexiunile terestre produce blocaje în terminal (R.I.1).	• Plannerul navei optimizează secvența pe bay-uri (compartimente de depozitare ale navei) pentru debit uniform către terminal; • Dispeceratul alocă redundant STS/QC și activează macara mobilă portuară MHC (Mobile Harbor Crane) în caz de avarie; • Conducerea terminalului aplică procedurile pentru vreme nefavorabilă și reprogramează conexiunile terestre; • Șeful de cheu sincronizează lashing/de-lashing și manipularea capacelor de hambar (hatch covers) cu graficul macaralelor; • Coordonatorul de trafic definește rute unidirecționale pentru ITV pe platformă; • Plannerul integrează ferestrele feroviare și rutiere în planul pe bay-uri.

Categoria de transfer	Riscuri principale	Măsuri de diminuare a riscurilor
Zona de operare la dană → componenta de transport feroviar (platformă feroviară)	• Creșterea stocului în curte blochează benzile aferente liniilor feroviare (R.I.1); • Nerespectarea ferestrelor feroviare amână plecarea trenurilor (R.I.1); • Manevrele suplimentare cu RTG cresc timpii de pregătire la linii (R.I.1); • Suprasolicitarea macaralelor RMG reduce fiabilitatea (R.I.2); • Neconcordanțele documentare (liste vagoane, poziții) întârzie încărcarea pe vagon (R.I.3); • Manevrele feroviare nefinalizate la timp blochează frontul de încărcare (R.I.1).	• Echipa de planificare stabilește ferestre feroviare imediat după începutul operării la dană; • Conducerea terminalului organizează prearanjarea pe vagon și poziție în benzi marcate la sol (coduri pe destinații); • Supervizorul alocă un RTG „feeder” dedicat alimentării RMG pe durata ferestrei; • Serviciul de mentenanță programează întreținerea RMG în afara ferestrelor și asigură piese critice (spreader, role, cabluri, senzori); • Echipa de operare utilizează două linii în paralel, unde infrastructura permite, pentru reducerea duratei transbordărilor.
Zona de operare la dană → componenta de transport rutier (platformă rutieră / porți camioane)	• Cozi la porți și blocaje în curte din cauza accesului necontrolat (R.I.1); • Debit rutier neuniform produce suprasarcină în curte (R.I.1); • Manevre repetitive RTG și traversări lungi cresc timpii de ciclu (R.I.1); • Nesincronizări ale fluxului de marfă în intervale suprapuse (R.I.1); • Incidente în intersecții interne cu trafic dens (R.I.4 dacă sunt generate de erori de operare / coordonare).	• Operatorul terminalului implementează programarea pe intervale (ferestre) pentru camioane, sincronizată cu operarea la dană; • Serviciul porți instituie benzi cu prioritate și verificare documentară prealabilă în zona de pre-poartă (prefiltru); • Managementul extinde ținut programul porților în zilele cu trafic ridicat și acordă prioritate camioanelor conexe trenurilor zilei; • Conducerea terminalului delimitează zone „truck-first” lângă porți și prepoziționează loturile pe intervale orare; • Supervizorul alocă un RTG dedicat camioanelor în orele de sarcină maximă.
Managementul platformei de depozitare – transferul mărfurilor între dană și componentele terestre de transport	• Ocuparea excesivă a stivelor și benzilor reduce mobilitatea echipamentelor (R.I.1); • Numărul ridicat de manevre repetitive crește riscul operațional (R.I.1); • Traseele lungi ale RTG și RS cresc timpii de ciclu (R.I.1); • Vizibilitatea insuficientă asupra loturilor critice întârzie evacuarea (R.I.3 dacă este legată de sistem informatic; R.I.1 dacă este pur organizatorică).	• Conducerea operațională definește praguri de ocupare și aplică planuri de degajare etapizate; • Plannerul curții reconfigurează temporar spațiile de depozitare ale containerelor pentru a lărgi fronturile feroviar/rutier și a scurta traseele de deplasare; • Conducerea terminalului separă stivele pe moduri de transport și pe destinații („tren în ziua curentă”/„rutier”)

(Sursa: Autorul)

4.1.5 Evaluarea efectelor riscurilor și a timpilor de revenire a sistemului de operare portuară prin simulare cu evenimente discrete – terminalul DP World Constanța Sud

În vederea realizării modelului de simulare de tip discret a fost utilizat aplicația informatică *Arena Rockwell*, o platformă dezvoltată pentru simulări de procese, având capacitatea de a genera și gestiona entități de simulare care interacționează cu resursele, inclusiv acelea asociate cu stațiile de servire (Roșca et al., 2025).

Modelul propus este o simulare cu evenimente discrete a operațiunilor unui terminal de containere la sosirea navei, care reproduce fluxul navă → dană → platformă de depozitare → ieșiri ca sistem discret, stocastic, cu resurse limitate. Procesele și interdependențele sunt formalizate prin blocuri logice; resursele includ danele, macaralele de cheu și vehiculele interne, cu date primare din C.S.C.T. – DP World, Constanța Sud. Simularea în *Arena (Rockwell)* mapează procesele,

rulează pe intrări calibrate pe date reale și permite implementarea politicilor de control într-o variantă reproductibilă (Kelton, Sadowski & Zupick, 2015; Law, 2015).

Fiabilitatea macaralelor este modelată ca alternanță între starea de disponibilitate („up”) și cea de indisponibilitate („down”), guvernată de indicatorii: $F(t)$ – funcția de defectare, $R(t)$ – funcția de fiabilitate, $\lambda(t)$ – rata defecțiunilor, MTBF – timpul mediu între defecțiuni, MTTR – timpul mediu de reparare (Târcolea et al., 1989), surprinzând trecerile între stări staționare și tranzitorii și efectul reparațiilor asupra debitului. Procesul de verificare – validare utilizează teste consacrate pentru staționaritate și convergență (Schruben et al., 1983; Heidelberger & Welch, 1983; Geweke, 1992). Indicatorii raportați reprezentând rezultate ale modelului de simulare cu evenimente discrete (Arena/Rockwell), rulat pe scenariile definite și calibrat cu datele operaționale ale terminalului DP World - Constanța Sud, sunt: fluxul de manipulare la dană (containere/oră), mărimea cozilor (navă/containere) și timpurile de așteptare ale navelor/TEU-urilor.

Tabelul 4.10 *Scenariile de simulare*

ID scenariu	Descriere
S00	Toate macaralele de cheu sunt funcționale. Durata simulării este de 365 de zile. Perioada de încălzire (warm-up), în care nu se înregistrează date, este de 5 zile.
S11	La fel ca în S00. După 30 de zile, o macara de cheu devine indisponibilă/defectă timp de 24 de ore.
S17	La fel ca în S00. După 30 de zile, o macara de cheu devine indisponibilă/defectă timp de 7 zile.
S114	La fel ca în S00. După 30 de zile, o macara de cheu devine indisponibilă/defectă timp de 14 zile.
S21	La fel ca în S11. După 30 de zile, o altă macara de cheu devine indisponibilă/defectă timp de 24 de ore.
S27	La fel ca în S11. După 30 de zile, o altă macara de cheu devine indisponibilă/defectă timp de 7 zile.
S214	La fel ca în S11. După 30 de zile, o altă macara de cheu devine indisponibilă/defectă timp de 14 zile.

(Sursa: Autorul)

Seria de timp a așteptării navelor și densitatea acestora sunt ilustrate în figura 4.5:

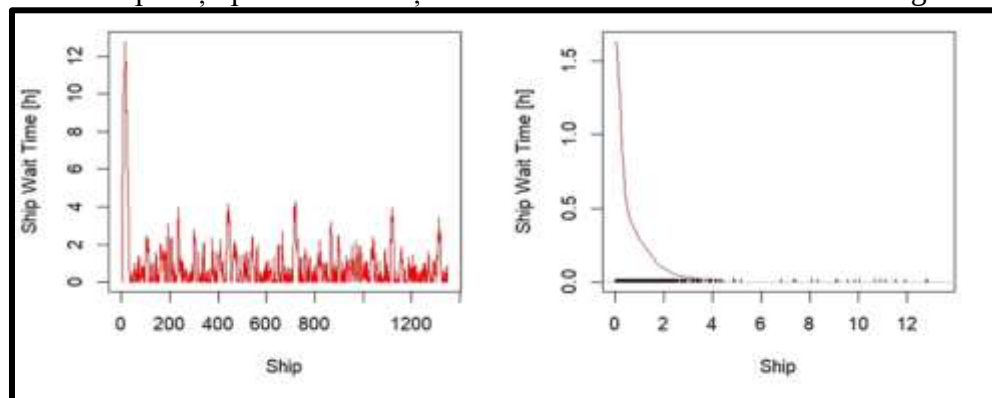


Figura 4.5 *Seria de timp a așteptării navelor (valori și densitate)*

(Sursa: Autorul)

Efectul indisponibilităților macarelelor QC: la o macara QC oprită 7 zile, seria devine staționară după ~102 nave; la o macara QC oprită 14 zile, după ~418 nave; la două macarale QC oprite 14 zile, seria nu este staționară (valoarea testului Heidelberg–Welch, $p = 0,02$, probabilitatea, sub ipoteza nulă de staționaritate, de a obține date cel puțin la fel de extreme; $p < 0,05 \Rightarrow$ este respinsă staționaritatea seriei timpilor de așteptare ai navelor la dană) și necesită rulare mai lungă pentru atingerea echilibrului sistemului analizat.

Pentru diferite scenarii, în care un număr variabil de macarale sunt indisponibile pentru diverse perioade de timp, rezultatele sunt ilustrate în figurile 4.7 - 4.12:

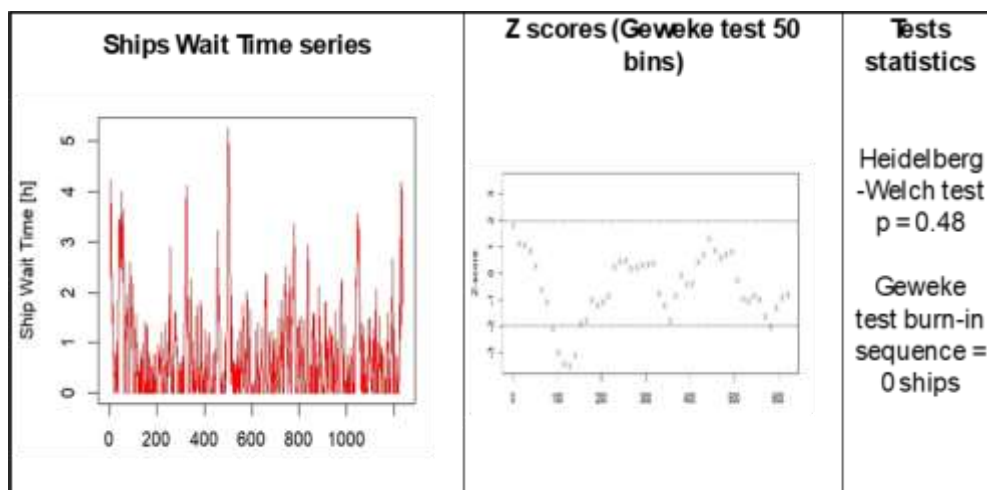


Figura 4.7 *Seria timpilor de așteptare a navelor pentru defectarea unei macarale – întrerupere de o zi (Sursa: Autorul)*

Aceste rezultate arată, cantitativ, cum scăderea disponibilității macaralelor QC mută sistemul din starea staționară (SS) în stări tranzitorii (TS1–TS3) și crește timpul de așteptare al navelor, furnizând baza pentru măsuri operaționale de diminuare a riscului (programare zone de depozitare a containerelor, reconfigurare resurse, mentenanță preventivă).

Interpretarea rezultatelor simulării: Defectarea scurtă a unei macarale are efect moderat; portul își revine rapid. Indisponibilitatea prelungită (14 zile) a unei macarale mărește timpii de așteptare, însă sistemul se stabilizează. Când două macarale sunt oprite 14 zile, seria timpilor de așteptare devine nestabilă; fără măsuri de remediere, se acumulează în așteptare pentru operare nave portcontainer și se blochează fluxurile de containere.

În ceea ce privește fiabilitatea echipamentelor, calculul indicatorilor MTBF/MTTF și utilizarea funcțiilor de distribuție permit modelarea defecțiunilor conform realității. Un indicator MTBF mai mare reflectă o probabilitate mai mică de defecțiune; valoarea indicatorilor de fiabilitate este utilizată pentru a stabili programul de mentenanță preventivă și durata de reparare pentru fiecare macara.

4.1.6 Concluzii

Modelul a fost implementat în programul informatic ARENA Rockwell și s-a concentrat pe macaralele de cheu, echipamente critice pentru manipularea containerelor, evaluând tranziția sistemului între starea de echilibru și stările tranzitorii generate de defectări. În completarea simulării discrete, au fost aplicate metoda BOR și indicatorul INCI pentru cuantificarea gradului de utilizare a danei și corelarea capacităților interfețelor critice.

Rezultatele au demonstrat că defectarea macaralelor de cheu are un impact semnificativ asupra timpilor de așteptare ai navelor și asupra continuității operațiunilor portuare. Pentru defectări de scurtă durată, sistemul revine la echilibru, în timp ce pentru întreruperi de 14 zile sistemul nu mai atinge staționaritatea, necesitând măsuri corective rapide pentru a evita colapsul operațional. Testele Heidelberg-Welch și Geweke au confirmat momentul în care sistemul se stabilizează sau continuă să fie afectat de perturbări majore, iar valorile BOR și INCI au evidențiat depășirea pragului de saturație la dană și transformarea interfețelor feroviare și rutiere în puncte de restricție.

4.2 Soluții de reducere a riscurilor în transportul multimodal pe ruta portul Constanța Sud – terminalul Curtici

4.2.1 Descrierea problemei

Ruta de transport multimodal dintre Portul Constanța Sud și terminalul Curtici funcționează pe baza integrării componentelor terestre rutieră și feroviară, a căror exploatare este condiționată de capacitatea infrastructurii utilizate și de stabilitatea regimului operațional pe segmentele componente. În acest context, performanța rutei este influențată de disfuncționalități de exploatare care apar pe ambele componente, cu efecte asupra continuității fluxului de transport.

Disfuncționalitățile identificate sunt generate de limitări funcționale ale infrastructurii, de restricții temporare impuse de lucrări de întreținere sau modernizare și de condiții de exploatare variabile, inclusiv cele determinate de factori de mediu. Acestea afectează capacitatea efectivă de circulație și stabilitatea timpilor de parcurs, atât pe segmentele rutiere, cât și pe cele feroviare, în funcție de specificul fiecărei componente ale transportului multimodal.

4.2.2 Rute alternative pe componenta rutieră a transportului multimodal între portul Constanța Sud și terminalul Curtici

În regimuri de exploatare neuniformă a infrastructurii, componenta rutieră a rutei de transport multimodal Portul Constanța Sud – Curtici este afectată de disfuncționalități operaționale, deficiențe tehnologice și vulnerabilități structurale care, prin propagare la nivel de rută, constituie surse de risc pentru continuitatea și eficiența transportului multimodal.

4.2.2.1 Analiza structurii de conectivitate a rețelei rutiere și a variantelor de parcurs

Pentru a descrie structural conectivitatea rețelei rutiere asociate variantelor analizate, se utilizează două reprezentări matriceale standard: matricea de adiacență și matricea distanțelor, care permit formalizarea explicită a legăturilor funcționale dintre noduri și constituie suportul analitic pentru identificarea rutelor alternative în situații de indisponibilitate a unor segmente (R.M.1), respectiv pentru evaluarea efectelor asupra continuității rutei și asupra opțiunilor de diminuare a riscurilor.

Cercetarea este realizată în regim operațional dependent de stare, corespunzător parcurgerii rutei de transport de către mijlocul de transport rutier, în care disponibilitatea segmentelor de infrastructură este evaluată pe parcursul deplasării și poate varia ca urmare a concretizării unor disfuncționalități locale. În acest cadru, rerutarea traficului rutier este abordată ca măsură operațională de menținere a continuității funcționării rutei de transport multimodal, prin redistribuirea fluxurilor pe segmentele rutiere rămase disponibile.

Pentru componenta rutieră a rutei de transport multimodal portul Constanța Sud – terminalul Curtici, a fost utilizată prestația de transport (TEU·km) care a permis evaluarea mecanismului de evacuare a containerelor din terminal către rețeaua terestră și identificarea modului în care modificarea parcursului rutier influențează volumul activității de transport la nivelul întregii rute de transport multimodal.

Tabelul 4.18 Analiza costurilor și prestației de transport (TEU·km) pentru 1 TEU transportat

Parametrii	Traseu 1	Traseu 2	Traseu 3
Preț combustibil (lei/litru) (omvpetrom.com, 2024)	6,5	6,5	6,5
Consumul vehiculului (litri/km) (IRTU, 2023)	0,3	0,3	0,3
Amortizare vehicul (lei/km) (UNTRR, 2022)	0,5	0,5	0,5
Întreținere și reparații (lei/km) (UNTRR, 2022)	0,4	0,4	0,4
Salarii și beneficii (lei/km) (UNTRR, 2022)	0,6	0,6	0,6

Parametrii	Traseu 1	Traseu 2	Traseu 3
Taxe rutiere (lei/km) (IRTU, 2023)	0,3	0,3	0,3
Număr de containere (TEU)	1	1	1
Curs valutar (1 Euro = 4,96 RON) (BNR, 2024)	4,96	4,96	4,96
Distanța (km) (Google Maps, 2024)	823	854	849
Cost combustibil per km (lei): $Cost_{comb./km} = Consum_{vehicul} \left(\frac{litri}{km} \right) \times Preț_{comb.} \left(\frac{lei}{km} \right)$	1,95	1,95	1,95
Cost adițional per km (lei) (amortizare/km + Intreținere/km + Salarii/km + Taxe/km)	1,80	1,80	1,80
Cost total per km (convoi) (lei) $C_{mediu\ total/km\ (convoi)} = C_{combustibil/km} + C_{adițional/km}$	3,75	3,75	3,75
Cost total 1TEU pe ruta k (lei/TEU): $Cost_{TEU,k} = d_k \times C_{t/km}$	3086,25 lei/TEU	3202,50 lei/TEU	3183,75 lei/TEU
Cost total 1TEU pe ruta k (EURO/TEU):	622,23 EUR/TEU	645,67 EUR/TEU	641,89 EUR/TEU
Prestația de transport (TEU×km)	823	854	849

4.2.2.2 Aplicarea metodei SAW în evaluarea nivelului de risc al componentei rutiere

În continuarea cercetării riscurilor asociate lanțului de transport multimodal Portul Constanța Sud – Terminalul Curtici, se aplică metoda multicriterială Simple Additive Weighting (SAW, cunoscută și ca Weighted Sum Method, WSM) propusă de (**Sigalingging et al., 2024**), pentru a obține indicatorul de risc al fiecărei rute rutiere alternative.

Metoda SAW calculează un coeficient compozit de risc specific fiecărei alternative de rută, pe baza valorilor medii ale celor cinci categorii de risc definite pentru segmentul rutier, operațional R.1, tehnic R.2, tehnologic R.3, uman R.4 și de mediu R.8, prezentate anterior în tabelul 3.16.

Sursa (**Sigalingging et al., 2024**) propune următoarea relație pentru agregarea scorurilor normalizate, scorul total de risc pentru o rută alternativă i fiind obținut prin suma ponderată a scorurilor normalizate aferente fiecărei categorii de risc :

$$V_i = \sum_{j=1}^n w_j \times r_{ij} , \quad (4.30)$$

unde:

- V_i : valoarea agregată (scorul total al riscului) pentru ruta alternativă i ;
- r_{ij} : valoarea normalizată a riscului cercetat pe criteriul j (categorie de risc: operațional, tehnic, tehnologic, uman, mediu), pentru ruta i ;
- w_j : ponderea atribuită criteriului j , determinată pe baza valorilor medii ponderate rezultate din cercetarea anterioară a riscurilor (prezentate în tabelul 3.16 pentru segmentul rutier);
- n : numărul de criterii (5 categorii de risc: operațional, tehnic, tehnologic, uman, mediu).

Fiecare rută între Portul Constanța Sud și terminalul Curtici este considerată o alternativă i , iar valorile inițiale $X_{i,j}$ reprezintă nivelurile procentuale ale riscului pentru criteriul j , preluate din tabelul 3.16.

Transformarea valorilor inițiale ale riscului, exprimate în procente pentru fiecare rută și criteriu, într-un format comparabil pe o scară comună, se realizează prin aplicarea relației propusă de (**Vafaei et al., 2022**) și (**Taherdoost, 2023**):

$$r_{ij} = \frac{X_{max,j} - X_{i,j}}{X_{max,j} - X_{min,j}} \in [0, 1] \quad (4.32)$$

Rezultatul se exprimă pe o scară standardizată cu limite între 0 și 1, unde:

- valoarea 1 corespunde rutei cu cea mai avantajoasă situație (cel mai mic risc în raport cu celelalte alternative);
- valoarea 0 corespunde rutei cu cea mai nefavorabilă situație (cel mai mare risc dintre alternativele analizate).

În fiecare caz se determină explicit extremele $X_{min,j}$ și $X_{max,j}$ pentru a asigura trasabilitatea completă a modelării.

Tabelul 4.19 Valorile normalizate r_{ij} pentru cele trei rute rutiere și cele cinci criterii (tipuri de riscuri)

Criteriu (j) / Risc	Ruta <i>i</i>	$X_{i,j}$ (Valoare risc %)	$X_{max,j}$	$X_{min,j}$	ΔX_j	r_{ij}
Operațional (Congestie/blocarea traficului) R.1.1	X ₁	38	38	32	6	0
	X ₂	35	38	32	6	0,50
	X ₃	32	38	32	6	1,00
Tehnic (Defecțiuni tehnice și mecanice ale vehiculelor) R.2.1	X ₁	50	50	44	6	0
	X ₂	48	50	44	6	0,33
	X ₃	44	50	44	6	1,00
Tehnologic (Întreținere deficitară a infrastructurii) R.3.4	X ₁	40	40	30	10	0
	X ₂	35	40	30	10	0,50
	X ₃	30	40	30	10	1,00
Criteriu (j) / Risc	Ruta <i>i</i>	$X_{i,j}$ (Valoare risc %)	$X_{max,j}$	$X_{min,j}$	ΔX_j	r_{ij}
Uman (Erori umane în operarea vehiculelor) R.4.1	X ₁	60	60	50	10	0
	X ₂	55	60	50	10	0,50
	X ₃	50	60	50	10	1,00
Mediu (Condiții meteorologice nefavorabile) R.8.1	X ₁	34	34	28	6	0
	X ₂	30	34	28	6	0,66
	X ₃	28	34	28	6	1,00

(Sursa: Autorul)

În continuarea aplicării metodei SAW (Simple Additive Weighting) se procedează la determinarea parametrului w_j (ponderea atribuită criteriului factor de risc j), adică se determină importanța fiecăruia dintre cele 5 tipuri de risc în scorul final, metodologia de lucru fiind următoarea: se extrag mai întâi pentru fiecare categorie de risc (operațional, tehnic, tehnologic, uman, mediu) valorile mediei ponderate ale subcategoriilor de risc din tabelul 3.16 și se determină media aritmetică a acestora, rezultând un singur număr $\overline{M}_j$ pe categoria de risc. Ulterior se transformă cele 5 valori $\overline{M}_j$ în ponderi printr-o normalizare la sumă 1:

$$w_j = \frac{\overline{M}_j}{\overline{M}_{op.} + \overline{M}_{tehn.} + \overline{M}_{tehnologic} + \overline{M}_{uman} + \overline{M}_{mediu}}, \text{ (Hwang \& Yoon, 1981; Taherdoost, 2023) } \quad (4.37)$$

unde:

- fiecare w_j este între 0 și 1 și reprezintă proporția din total atribuită categoriei j ;

$$\overline{M}_j = \frac{\sum M_{subcateg.risc}}{N_{subcateg.risc}}, \quad (4.38)$$

unde:

- $\sum M_{subcateg.risc}$ este suma valorilor subcategoriilor de riscuri pentru categoria de risc j , iar $N_{subcateg.risc}$ este numărul acestora (extrase din tabelul 3.12).

În continuare se ponderează cu relația:

$$w_j = \frac{\overline{M}_j}{\sum_k \overline{M}_k}, \quad (4.39)$$

unde:

- k reprezintă toate categoriile de risc luate în considerare (operațional, tehnic, tehnologic, uman, mediu);
- $\sum_k \bar{M}_k$: este suma mediilor tuturor categoriilor de risc k ;
- $\bar{M}_k$: este media valorilor subcategoriilor de risc din categoria k (se exprimă în procente).

Tabelul 4.20 Ponderile w_j calculate pentru fiecare categorie de risc pe baza mediilor subcategoriilor acestora

Categorie risc	$M_{subcateg.}$ (%)	$N_{subcateg.}$	$\bar{M}_j = \frac{\sum M_{subcateg.risc}}{N_{subcateg.risc}}$ (%)	$\sum_k \bar{M}_k$ (%)	$w_j = \frac{\bar{M}_j}{\sum_k \bar{M}_k}$ (%)
Operațional	34,18; 29,06	2	31,62	165,54	0,19
Tehnic	46,47; 31,21	2	38,84	165,54	0,23
Tehnologic	33,94; 28,88; 26,94; 22,18	4	27,985	165,54	0,16
Uman	49,75; 38,35; 23,94; 34,76; 49,12; 38,68	6	39,10	165,54	0,23
Mediu	29,88; 29,85; 24,28	3	28,0033	165,54	0,16

(Sursa: Autorul)

În etapa finală a aplicării metodei SAW (Simple Additive Weighting), se determină scorul total V_i pentru fiecare rută rutieră analizată cu relația (4.30), pe baza valorilor normalizate r_{ij} și a ponderilor w_{ij} corespunzătoare fiecărei categorii de risc. Acest pas permite identificarea rutei cu cel mai redus nivel agregat de risc (valoare totală ponderată a riscului) și stabilirea clasamentului final, necesar pentru luarea deciziilor de diminuare a riscurilor specifice din rutele cercetate.

Tabelul 4.21 Scoruri totale V_i și ierarhia rutelor rutiere conform metodei SAW

Rută	$V_i = \sum_{j=1}^n w_j \times r_{ij}$	Ierarhia rutelor conform metodei SAW
X₁	0	3
X₂	0,48	2
X₃	1,00	1

(Sursa: Autorul)

Rezultatele obținute arată că ruta X₃ obține cel mai bun scor ($V_i = 1,00$), indicând faptul că, după aplicarea ponderilor și normalizarea valorilor de risc, aceasta are cea mai scăzută valoare totală ponderată a riscului dintre toate alternativele. Ruta X₂ se poziționează intermediar ($V_i = 0,48$), iar ruta X₁ prezintă cea mai ridicată valoare totală ponderată a riscului ($V_i = 0$).

4.2.3 Analiza riscurilor asociate exploataării componentei feroviare a rutei de transport multimodal Constanța Sud – Curtici

4.2.3.1 Prezentarea rutelor feroviare de marfă și a riscurilor acestora

Componenta feroviară analizată este tratată ca parte integrantă a rutei de transport multimodal dintre Portul Constanța Sud și Curtici, având rolul de a prelua fluxurile de marfă containerizată după realizarea operațiunilor de transbordare în terminalul portuar DP World Constanța Sud. În acest cadru, sistemul feroviar asigură continuitatea fluxului de transport între interfața maritim – terestră și destinațiile terestre finale, performanța sa operațională influențând direct rezultatul global al rutei multimodale.

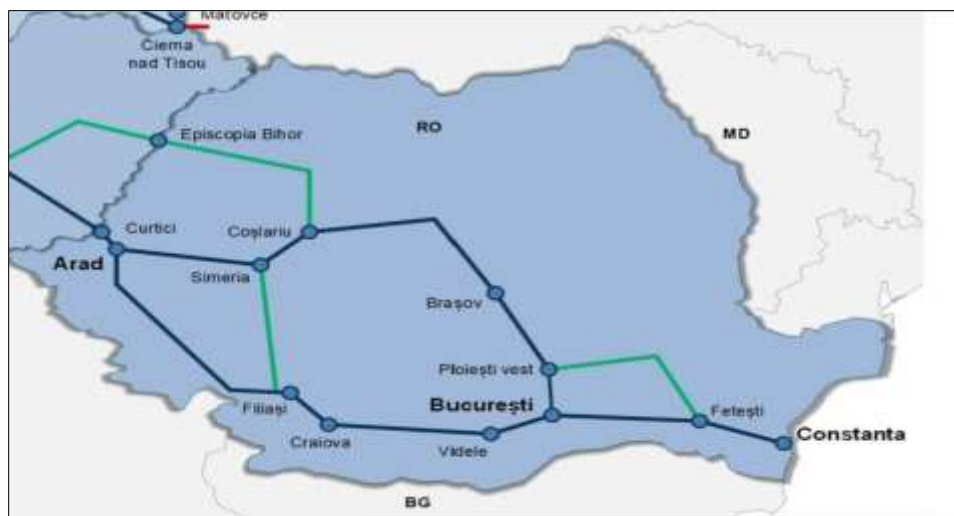


Figura 4.13 Rutele de transport feroviar cuprinse între portul Constanța Sud și terminalul Curtici (Arad) (Sursa: Autorul)

Ruta 1: Constanța Sud (A) – București Nord (B) – Brașov (C) – Sighișoara (D) – Teiuș (E) – Simeria (F) – Arad (G) – Curtici (H) (Magistralele CFR 800, 300 și 200);

Ruta 2: Constanța Sud (A) – București Nord (B) – Roșiori Nord (I) – Craiova (J) – Drobeta Turnu Severin (K) – Caransebeș (L) – Timișoara (M) – Arad (G) – Curtici (H) (Magistralele CFR 800, 900).

Tabelul 4.24 Vulnerabilități, deficiențe, riscuri și mecanisme de diminuare pentru componenta feroviară a rutei de transport multimodal Constanța Sud – Curtici

Categoria de risc	Vulnerabilități	Deficiențe	Soluții de reducere a riscurilor	Efect tehnic
Operaționale (întârzieri de circulație, pierderi de capacitate a circulației) R.F.1	• sensibilitate la variația capacității de circulație a infrastructurii feroviare; • dependență de intervalele orare de circulație disponibile pentru trenurile de marfă, stabilite prin graficul de circulație; • capacitate redusă de reprogramare a circulației trenurilor de marfă în condiții de modificare a exploatării.	• restricții temporare de circulație pe intervale de linie; • limitări ale capacității de circulație feroviară în stații de parcur; • timpi de așteptare suplimentari în exploatare.	• programarea circulației trenurilor de marfă în funcție de capacitatea de circulație disponibilă a infrastructurii feroviare; • corelarea orelor de plecare din terminalul portuar cu ferestrele de preluare ale rețelei feroviare; • ajustarea operativă a graficului de circulație.	• reducerea variației timpilor de parcur feroviar; • creșterea stabilității exploatării feroviare.
Tehnice (defecțiuni ale materialului rulant) R.F.2	• dependență de starea tehnică a materialului rulant utilizat; • lipsa redundanței de tracțiune pe relații feroviare de transport marfă.	• opriri tehnice neplanificate în parcur; • indisponibilitatea temporară a locomotivei alocate.	• verificări tehnice operaționale înainte de expedierea trenurilor de marfă; • planificarea resurselor de tracțiune cu rezervă operațională.	• creșterea fiabilității circulației feroviare; • continuitatea transportului feroviar.
Tehnologice (limitări ale infrastructurii) R.F.3	• dependență de starea tehnică a suprastructurii căii ferate; • prezența sectoarelor de linie cu restricții permanente de viteză.	• limitarea vitezei comerciale feroviare; • creșterea duratei efective de parcur pe segmente afectate.	• alocarea trenurilor de marfă pe trasee cu grafic prestabilit, pe secțiuni cu capacitate limitată; • introducerea unor rezerve de timp operaționale pentru absorbția restricțiilor temporare de circulație.	• menținerea timpilor de parcur în limitele graficului de circulație; • creșterea previzibilității timpilor de sosire.

Categoria de risc	Vulnerabilități	Deficiențe	Soluții de reducere a riscurilor	Efect tehnic
Umane (erori de exploatare) R.F.4	• dependență de interacțiunea dintre factorul uman și sistemele de dirijare a circulației; • dependență de transmiterea informațiilor operative în timp real între structurile implicate în circulație.	• întâzieri generate de necorelarea deciziilor operative în noduri feroviare; • perturbări locale ale circulației ca urmare a aplicării deficitare a procedurilor operaționale.	• menținerea deciziilor operative în limitele atribuțiilor personalului de mișcare și de dirijare a circulației; • transmiterea în timp util a modificărilor de circulație către personalul din stațiile de parcurs.	• reducerea timpilor suplimentari de staționare; • limitarea întâzierilor nejustificate în exploatarea trenurilor de marfă.
Mediu (condiții meteorologice limitative) R.F.8	• expunere a infrastructurii feroviare la fenomene meteorologice severe și la temperaturi extreme specifice regimului sezonier.	• restricții temporare de circulație; • reducerea vitezei de exploatare feroviară.	• corelarea circulației trenurilor de marfă cu prognoza meteorologică operațională; • adaptarea graficului de circulație pe secțiunile de drum expuse.	• limitarea variațiilor neplanificate ale timpilor de parcurs în exploatarea curentă.

(Sursa: Autorul)

4.2.3.2 Evaluarea rerutării feroviare în scenarii de indisponibilitate a segmentelor

Pentru componenta feroviară a rutei cuprinse între terminalul DP World și terminalul Curtici sunt definite variantele de parcurs printr-o succesiune ordonată de puncte operaționale corespunzătoare stațiilor și nodurilor feroviare de tranzit. Fiecărui segment feroviar dintre două puncte consecutive i și j îi este asociată o distanță d_{ij} (km), astfel încât lungimea totală a fiecărei variante de rută rezultă prin însumarea distanțelor segmentare componente.

Pentru componenta feroviară, prestația (TEU·km) permite cuantificarea volumului activității de transport realizate prin rețeaua feroviară în cadrul rutei de transport multimodal și integrarea analizei acestui segment de transport în evaluarea globală a funcționării sistemului de transport dintre terminalul DP World Constanța și terminalul Curtici.

Tabelul 4.26 Determinarea timpilor, costurilor și a costului specific raportat la prestația pentru ruta feroviară 1 (calcul pentru 1 TEU transportat)

Segment	Distanță (km)	Viteză (km/h)	Timp (ore)	Prestația de transport (TEU·km)	Cost (euro)	Cost asociat condițiilor de exploatare (euro/TEU) π_{ij}	Cost total (euro)
1. Constanța – București	225	16	14,06	225	562,50	56,25	618,75
2. București – Brașov	166	16	10,38	166	415,00	41,50	456,50
3. Brașov – Sighișoara	129	16	8,06	129	322,50	32,25	354,75
4. Sighișoara – Teiuș	123	16	7,69	123	307,50	30,75	338,25
5. Teiuș – Simeria	73	16	4,56	73	182,50	18,25	200,75
6. Simeria – Arad	134	16	8,38	134	335,00	33,50	368,50
7. Arad – Curtici	46	16	2,88	46	115,00	11,50	126,50
Total Ruta 1	896	–	56,00	896	2240,00	224,00	2464,00

(Sursa: Autorul)

Potrivit tabelului 4.26, determinarea timpilor și costurilor pe segmente feroviare evidențiază concentrarea unei ponderi semnificative din timpul total și din costul total al rutei pe un număr redus de segmente, caracterizate prin distanțe mari și durate de parcurs ridicate. Această

concentrare indică segmentele cu sensibilitate operațională crescută, în care apariția restricțiilor de circulație generează simultan întârzieri cumulative și creșteri corespunzătoare ale costului total de transport prin efectul de acumulare. Valorile obținute delimitează segmentele critice din perspectiva performanței operaționale, contribuind la aplicarea soluțiilor de diminuare a riscurilor prin rerutare și prin limitarea propagării întârzierilor și a creșterilor de cost la nivel de rută.

Tabelul 4.27 Determinarea timpilor, costurilor și a costului specific raportat la prestația pentru ruta feroviară 2 (calcul pentru 1 TEU transportat)

Segment	Distanță (km)	Viteză (km/h)	Timp (ore)	Prestația de transport (TEU·km)	Cost (euro)	Cost exploatare (euro) π_{ij}	Cost total (euro)
1. Constanța Sud – București Nord	225	16	14,06	225	562,50	56,25	618,75
2. București Nord – Roșiori Nord	101	16	6,31	101	252,50	25,25	277,75
3. Roșiori Nord – Craiova	118	16	7,38	118	295,00	29,50	324,50
4. Craiova – Drobeta Turnu Severin	109	16	6,81	109	272,50	27,25	299,75
5. Drobeta Turnu Severin – Caransebeș	132	16	8,25	132	330,00	33,00	363,00
6. Caransebeș – Timișoara	95	16	5,94	95	237,50	23,75	261,25
7. Timișoara – Arad	54	16	3,38	54	135,00	13,50	148,50
8. Arad – Curtici	46	16	2,88	46	115,00	11,50	126,50
Total Ruta 2	880	–	55,00	880	2200,00	220,00	2420,00

(Sursa: Autorul)

În cadrul rutei de transport multimodal dintre terminalul DP World Constanța și terminalul Curtici, componenta feroviară asigură transferul fluxurilor feroviare de containere pe distanță medie și lungă, iar prestația de transport reprezintă parametru de referință pentru cuantificarea volumului de transport realizat pe rețeaua feroviară. Mecanismele de reducere a riscurilor pe componenta feroviară sunt analizate prin identificarea variantelor de rerutare pe segmente alternative ale rețelei, însoțite de redistribuirea fluxurilor feroviare de containere către trasee cu disponibilitate de capacitate. Evaluarea soluțiilor se realizează prin analiza capacității acestora de a susține realizarea aceleiași prestații a rutei feroviare în condiții de restricții de circulație sau disfuncționalități, fără întreruperea transferului feroviar către terminalul Curtici.

Modelarea blocajelor și utilizarea rutelor feroviare alternative:

În continuarea determinării distanțelor, timpilor și costurilor aferente componentelor feroviare analizate, structura fiecărei rute este reprezentată formal prin intermediul teoriei grafurilor și prin utilizarea unui model multiflux (D'Ariano & Hemelrijk, 2006), în vederea descrierii relațiilor de conectivitate dintre punctele operaționale și a analizării posibilităților de continuitate a transportului în condiții de perturbare a circulației feroviare.

Abordarea implică o cercetare dinamică a riscurilor, concentrându-se pe mecanismele de generare și propagare a acestora în rețea, fără a presupune cunoașterea prealabilă a apariției lor. În situația blocării unei muchii, rerutarea se realizează prin selectarea unei secvențe alternative de muchii existente în graf, pentru care parametrii de distanță, timp și cost sunt deja definiți.

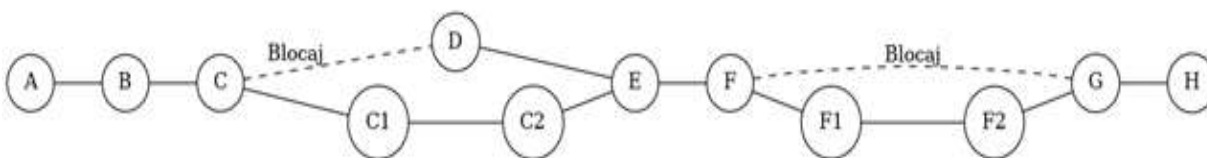


Figura 4.14 Graful rutei 1 cu alternative de parcurgere a traseului la blocarea unor muchii (Sursa: Autorul)

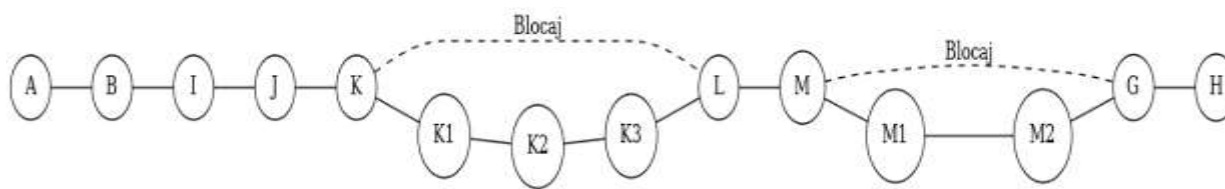


Figura 4.15 Graful rutei 2 cu alternativele de parcurgere a traseului la blocarea unor muchii
(Sursa: Autorul)

În vederea evaluării soluțiilor de reducere a riscurilor asociate blocării segmentelor feroviare din cadrul rutei de transport multimodal analizate, structura de conectivitate a componentei feroviare este descrisă prin utilizarea matricilor de adiacență și de timp. Aceste instrumente permit formularea stărilor de disponibilitate ale infrastructurii feroviare și transpunerea vulnerabilităților și deficiențelor de exploatare în modificări ale conectivității rețelei de transport și ale duratelor de parcurs.

Matricea de adiacență pentru ruta 1: Matricea de adiacență $V = [v_{ij}]$ descrie relațiile de conectivitate dintre punctele operaționale ale rutei 1.

Dacă există o legătură directă între două stații i și j , elementul v_{ij} va fi 1, altfel va fi 0 (absența unei conexiuni sau blocarea segmentului de drum respectiv). Pe lângă nodurile de pe ruta principală (A, B, C, ... H), matricea include și noduri suplimentare pentru variantele de deviere introduse în scenariile de blocaj: Nodurile C_1 și C_2 reprezintă puncte operaționale asociate ramificației din zona din zona Sibiu – Vințu de Jos, iar F_1 și F_2 sunt puncte intermediare pe devierea rutei spre Deva – Timișoara.

Matricea de timp T pentru ruta 1: Matricea timpilor de parcurs $T_{Ruta\ 1} = T_{ij}$ permite transpunerea vulnerabilităților și deficiențelor infrastructurii feroviare în indicatori măsurabili la nivel de rută. Asocierea fiecărui segment feroviar $i \rightarrow j$ cu un timp de transport T_{ij} exprimă condițiile efective de exploatare, reflectând limitările de capacitate, restricțiile de viteză și dependența de ferestrele de circulație ale trenurilor de marfă.

Calculul întârzierilor în caz de blocaj pe ruta 1(segmentul Brașov – Sighișoara): în cazul indisponibilizării segmentului feroviar Brașov–Sighișoara, continuitatea exploatării pe componenta feroviară este menținută prin activarea variantei alternative Brașov–Sibiu–Vințu de Jos–Teiuș. Blocajul este asociat deficiențelor de exploatare generate de lucrări de modernizare și restricții de infrastructură, amplificate de vulnerabilități de mediu, respectiv alunecări de teren și condiții meteorologice severe, care determină materializarea riscului operațional de pierdere a continuității circulației pe segmentul analizat.

Ruta alternativă are 246 km și conduce la un timp de parcurs de 15,38 ore, față de 129 km și 8,06 ore pe ruta inițială, rezultând o întârziere totală $\Delta T = 7,32$ ore, respectiv o creștere a duratei de transport cu aproximativ 90,82%. Rezultatul evidențiază impactul direct al blocajului asupra continuității fluxului feroviar și justifică introducerea rutei alternative ca măsură de reducere a efectului riscului operațional.

4.2.3.3 Determinarea scorurilor de risc prin metoda SAW pentru componenta feroviară

Evaluarea comparativă a rutelor feroviare alternative este realizată prin aplicarea metodei SAW, utilizând exclusiv cele două rute feroviare definite și analizate anterior. Metoda este utilizată ca instrument de sinteză decizională, având rolul de a integra, într-o valoare unitară, nivelurile de expunere la riscuri corespunzătoare fiecărei rute, în raport cu obiectivul de diminuare a riscurilor în transportul multimodal.

Tabelul 4.29 Determinarea valorilor normalizate ale riscului pentru fiecare criteriu de risc și rută feroviară

Criteriu (subrisc)	Rută	$X_{i,j}$ (%)	$X_{max.}$	$X_{min.}$	ΔX	r_{ij}
Operațional (F3: deficiențe management siguranță)	X1	50	50	45	5	0,00
	X2	45	50	45	5	1,00
Tehnologic (F2: defecțiuni material rulant)	X1	45	45	40	5	0,00
	X2	40	45	40	5	1,00
Tehnic (F2.1: defecțiuni la sistemul de frânare)	X1	35	35	30	5	0,00
	X2	30	35	30	5	1,00
Uman (F4: erori în operare)	X1	55	55	50	5	0,00
	X2	50	55	50	5	1,00
Mediu (F5: condiții meteo nefavorabile)	X1	30	30	28	2	0,00
	X2	28	30	28	2	1,00

(Sursa: Autorul)

Scorul total V_i pentru fiecare rută feroviară se determină conform relației (4.30), rezultând $V_{X1} = 0$ și $V_{X2} = 1$.

Interpretarea rezultatelor: Rezultatele obținute indică diferențe clare între cele două rute feroviare din perspectiva expunerii cumulate la risc. Ruta X_2 înregistrează valori normalizate superioare pentru toate criteriile analizate, ceea ce reflectă o expunere mai redusă la vulnerabilități și deficiențe operaționale, tehnice, tehnologice, umane și de mediu. Ruta X_1 se caracterizează prin niveluri mai ridicate ale expunerii la risc, asociate în principal deficiențelor de infrastructură, frecvenței mai mari a defecțiunilor tehnice și unei vulnerabilități sporite la perturbări operaționale.

Tabelul 4.30 Vulnerabilități, deficiențe și riscuri pe componentele rutei Constanța Sud – Curtici

Elemente analizate	Terminalul DP World	Componenta rutieră	Componenta feroviară	Terminalul Curtici
Vulnerabilități	- Concentrarea finalizării manipulării portuare într-un interval temporal restrâns (unități disponibile simultan pentru expediție); - Variabilitatea ritmului de descărcare la cheu.	- Variabilitatea timpilor de parcurs pe segmentul rutier; - Perturbări locale de circulație pe traseu; - Dependența de starea tehnică a vehiculului rutier în exploatare; - Limitarea ajustării momentului sosirii în raport cu intervalul de recepție al terminalului.	- Punctualitatea intervalului orar de expediție stabilit prin graficul de circulație; - Limitări de capacitate pentru manevră și formarea trenurilor; - Timpi mari de manevră la formarea garniturilor feroviare; - Durată ridicată de ocupare a liniilor feroviare destinate formării și staționării.	- Sensibilitatea procesului de formare a trenurilor la sosirile rutiere; - Limitarea capacității zonei de stocare temporară; - Limitarea capacității de ocupare a liniilor feroviare destinate manevrei trenurilor.
Deficiențe	- decalaj între finalizarea manipulării portuare și inițierea transportului terestru (D.1); - abatere a orei de trecere prin poarta rutieră față de ora planificată (D.1); - Utilizarea neuniformă a debitului de ieșire prin poarta terminalului (D.1).	- Abaterea orei efective de sosire la Curtici față de intervalul de recepție stabilit de terminal (D.1); - Întârzieri nerecuperabile pe segmentul rutier (D.1); - Indisponibilizare tehnică temporară a vehiculului rutier pe traseu (D.3).	- Pierderea intervalului programat de expediție ca urmare a nefinalizării la timp a formării/încărcării (D.1); - Creșterea timpilor de manevră și ocuparea prelungită a liniilor de formare (D.1); - Utilizarea neuniformă a capacității de ocupare/eliberare a liniilor de manevră și formare a convoiului feroviar (D.1).	- Acumularea unităților de transport intermodal în zona de transfer și stocare temporară (D.1); - Depășirea timpilor maxim admiși de ocupare a liniilor și echipamentelor (D.1); - Creșterea timpilor de staționare ai unităților peste intervalele admise operațional (D.1);

Elemente analizate	Terminalul DP World	Componenta rutieră	Componenta feroviară	Terminalul Curtici
Riscuri specifice	• R.I.1: necorelarea temporală între manipularea portuară și expediția terestră; • R.I.2: acumularea unităților de transport intermodal în curte/zona de stocare temporară; • R.I.3: propagarea întârzierilor către segmentele rutier și feroviar; • R.I.4: ocuparea prelungită a resurselor de transfer (echipamente de manipulare, zone de stocare); • R.R.1: depășirea intervalului programat de preluare rutieră din terminal; • R.F.1: pierderea posibilității de preluare/expediție feroviară conform graficului de circulație.	- R.R.1: variația timpilor de parcurs și depășirea intervalului de recepție la terminalul Curtici; • R.R.2: întreruperea parcursului ca urmare a indisponibilizării tehnice a vehiculului rutier; • R.R.3: disfuncționalități ale sistemelor de coordonare a transportului; • R.R.8: restricții temporare de circulație generate de condiții meteorologice; • R.I.3: transferul întârzierilor rutiere către procesul de transfer și expediție feroviar; • R.1.3: perturbări ale traficului rutier generate de lucrări de întreținere, restricții temporare de circulație sau incidente pe infrastructura de traseu; • R.4.7: nerespectarea perioadelor de odihnă.	• R.F.1: pierderea expediției conform programării din graficul de circulație; • R.F.2: indisponibilizarea temporară a materialului rulant sau defectarea locomotivei în faza de expediție; • R.F.3: defectarea sistemelor de semnalizare și control al circulației care restricționează capacitatea de exploatare; • R.F.8: restricții de circulație generate de condiții meteorologice severe; • R.I.1: necorelarea temporală dintre recepția rutieră și disponibilitatea intervalului de expediție feroviară; • R.I.2: acumularea unităților de transport intermodal în zona de transfer sau de stocare temporară; • R.I.3: propagarea întârzierilor asupra procesului de formare și expediție feroviară.	• R.I.1: necorelarea temporală între sosirea rutieră a unităților de transport intermodal la terminalul Curtici și formarea trenurilor; • R.I.2: acumularea unităților în zona de stocare temporară; • R.I.3: transmiterea întârzierilor către expediția feroviară; • R.F.1: pierderea expediției conform graficului de circulație; • R.F.1: ocuparea prelungită a liniilor de formare; • R.F.2: indisponibilizarea temporară a materialului rulant; • R.R.1: depășirea intervalului de recepție din cauza întârzierilor rutiere.
Mecanisme de aplicare a soluțiilor de diminuare a riscurilor	• alocarea plecărilor rutiere pe intervale corelate cu destinația și conexiunea feroviară; • Distribuirea uniformă a fluxului de ieșire prin poartă; • corelarea finalizării manipulării cu disponibilitatea transportului terestru.	• Planificarea plecării în raport cu intervalele de recepție ale terminalelor; • Rerutare la apariția restricțiilor. • Menținerea preventivă pentru limitarea evenimentelor tehnice; • Introducerea unor rezerve de timp la plecare pentru absorbția variațiilor de parcurs.	• Rezerve operaționale de timp în graficul de circulație; • Flexibilizarea secvenței de formare a trenurilor; • Alocarea liniilor în funcție de succesiunea operațiilor de transfer; • Dimensionarea resurselor de tracțiune și manevră în raport cu fluxul efectiv de unități livrate din segmentul rutier.	• organizarea transferului în funcție de timpii de ocupare și intervalele de expediție; • limitarea timpilor de ocupare pentru stocare și liniile feroviare; • introducerea unui interval de rezervă în succesiunea operațiilor.
Efect asupra capacității de recepție, manipulare și expediție în lanțul de transport multimodal	• Reducerea variațiilor bruște ale alimentării terestre; • Limitarea acumulării abaterilor temporale la origine; • Creșterea predictibilității sosirilor pe componenta rutieră.	• Stabilizarea fluxului de intrare în terminalul Curtici; • Reducerea probabilității de depășire a capacității de recepție și manipulare.	• Creșterea capacității de absorbție a abaterilor; • Reducerea situațiilor în care pierderea intervalului de expediție produce acumulări și staționări.	• Menținerea capacității efective de proces a transferului; • Evitarea acumulărilor și a creșterii staționării unităților de încărcare și de transport.

(Sursa: Autorul)

4.2.4 Diminuarea riscurilor prin îmbunătățirea fluxurilor multimodale ce includ componenta de transport fluvial

În cadrul acestui subcapitol sunt analizate fluxurile de transport multimodal de marfă care integrează componenta de transport fluvial pe relația Constanța Sud – Giurgiu, precum și conexiunile rutiere și feroviare aferente acestora. Rețeaua de transport cuprinsă între portul DP World Constanța Sud și terminalul Curtici este formalizată prin reprezentarea sub forma unui graf orientat, iar evaluarea configurațiilor de transport se realizează prin definirea unei matrice de adiacență și a unei matrice de timp, utilizate în cadrul unei funcții obiectiv de minimizare a duratei totale. Această structură permite cuantificarea impactului blocajelor asupra duratei rutei și identificarea configurațiilor de transport care reduc expunerea la risc în lanțul multimodal analizat.

Nodurile rețelei și distanțele corespunzătoare segmentelor de traseu sunt prezentate în tabelul 4.31.

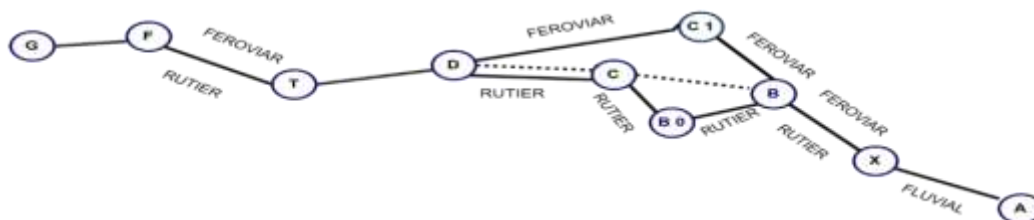


Figura 4.16 Ruta 1 cu blocaje (nodurile B – C) și rute alternative
(Sursa: Autorul)

Tabelul 4.31 Distanțele pentru fiecare segment de transport ruta cuprinsă între port Constanța Sud – terminalul Curtici:

Segment	Distanță (km)
Portul Constanța Sud – Portul Giurgiu (fluvial) A→X	355 km
Portul Giurgiu – București (rutier) X→B	63 km
București – Pitești (rutier) B→C	110 km
Pitești – Sibiu (rutier) C→D	172 km
Sibiu – Timișoara (rutier) D→T	233 km
Timișoara – Arad (rutier) T→F	87 km
Arad – Curtici (rutier) F→G	60 km
Total distanță rutieră / rută	725 km / 1080 km
Segment	Distanță (km)
Giurgiu – București (feroviar) X→B	65 km
București – Pitești (feroviar) B→C	112 km
Pitești – Sibiu (feroviar) C→D	175 km
Sibiu – Timișoara (feroviar) D→T	238 km
Timișoara – Arad (feroviar) T→F	118 km
Arad – Curtici (feroviar) F→G	45 km
Total distanță feroviară / rută	753 km / 1108 km

Sursa: Adaptare după Ministerul Transporturilor (2022), CNAIR (2022) și CFR Marfă (2021).

În ipoteza unei reprezentări grafice complete a rețelei, în care fiecărui arc (i, j) îi este asociată o durată $t_{i,j}$, voi utiliza modelul de tip Travelling Salesman Problem (TSP) (Ding, 2020). Modelarea TSP are ca scop determinarea unei succesiuni optime de parcurgere a nodurilor rețelei astfel încât durata totală de deplasare pe traseu să fie minimă, fiecare nod fiind vizitat o singură dată.

Se introduc variabile binare de decizie $x_{i,j}$, definite astfel încât:

$$x_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{dacă arcul } (i,j) \text{ este inclus în tur} \\ 0, & \text{în caz contrar} \end{cases} \quad \forall (i,j) \in A \quad (4.54)$$

$$\text{Parametrizarea timpilor pe arce: } t_{i,j} = \frac{d_{i,j}}{v_m} \quad \forall (i,j) \in A \text{ aparținând modului } m. \quad (4.55)$$

Funcția obiectiv a modelului selectează combinația de segmente pentru care suma duratelor este minimă, sub condiția ca fiecare nod să aibă exact o intrare și o ieșire și să nu apară sub-cicluri independente:

$$\min Z = \sum_{(i,j) \in A} t_{i,j} x_{i,j} \quad (4.56)$$

Modelul este supus următoarelor constrângeri structurale, care asigură existența unui traseu unic de la nodul A (Portul Constanța Sud) la nodul G (Curtici), cu parcurgerea fiecărui nod intermediar o singură dată:

- Pentru nodul de origine A:

$$\sum_{j:(A,j) \in A} x_{Aj} = 1, \quad \sum_{i:(i,A) \in A} x_{iA} = 0 \quad (4.57)$$

Relația (4.57) indică că se pleacă o singură dată din nodul A și nu se revine în A.

- Pentru nodul de destinație G:

$$\sum_{i:(i,G) \in A} x_{iG} = 1, \quad \sum_{j:(G,j) \in A} x_{Gj} = 0 \quad (4.58)$$

Relația (4.58) indică că se ajunge o singură dată în nodul G și nu se pleacă din G.

Modelarea blocajelor pe segmentele de traseu: Pentru analiza blocării unor segmente de drum pe rutele majore, în dinamica apariției acestora, se utilizează formalizarea prin teoria grafurilor, prin reprezentarea rețelei sub forma unui graf orientat. Determinarea rerutării cu întârziere minimă se realizează prin definirea unei matrice de adiacență și a unei matrice de timp, construite pe aceeași structură de selecție a arcelor utilizată în modelarea de tip TSP (**adaptare după Ding, 2020**).

Blocaj pe segmentul rutier București – Pitești: Modelarea blocajului se realizează prin redefinirea timpului pe arcul afectat $t_{Blocaj BC} = \infty$ și recalcularea funcției obiectiv, pornind de la relația generală de minimizare a duratei totale (4.56) $\min Z_T = \sum t_{ij} x_{ij}$, care conduce la forma particularizată:

$$\min Z_{T Blocaj} = \infty \times x_{BC} + t_{BB0} \times x_{BB0} + t_{B0C} \times x_{B0C} \quad (4.76)$$

Rezultă dezactivarea arcului blocat $x_{BC} = 0$ și selectarea traseului alternativ $x_{BB0} = 1$, cu durata asociată $Z_{T Blocaj} = 2,21$ ore , valoare care rezultă direct din aplicarea relației (4.70).

Analiza costurilor pentru rutele fluvial-rutieră și fluvial-feroviară pe traseul cuprins între portul Constanța Sud – terminalul Curtici:

În continuare se determină costul total de transport pentru fiecare rută, pe baza costurilor unitare specifice modului de transport și a distanțelor corespunzătoare segmentelor selectate. Costul total al unei rute se exprimă ca sumă a costurilor pe arce, la care se adaugă costul de transbordare activat în nodul X (**Li et al., 2023**):

$$C_T = \sum_{(i,j) \in A} \alpha_{m(i,j)} d_{i,j} x_{i,j} + \beta_x z_x \quad (4.94)$$

unde:

- $\alpha_{m(i,j)}$ = cost unitar pe modul arcului (i, j) (€/TEU · km);
- d_{ij} = distanța fiecărui segment de traseu din rută (km);
- β_x = costul de transbordare pentru 1 TEU în nodul X (€/TEU);
- $z_x \in \{0, 1\}$ - activarea transbordării în nodul X, definită prin relația următoare:

$$z_x = \sum_{j:(X,j) \in A} x_{Xj}, \quad z_x \in \{0, 1\} \quad (4.95)$$

unde dacă traseul pleacă din nodul X pe componenta terestră, transbordarea este activă o singură dată.

Valorile utilizate pentru costurile specifice sunt:

- Cost prestație transport fluvial: 0,08 €/TEU·km (**UNCTAD, 2023**);
- Cost prestație transport rutier: 0,12 €/TEU·km (**Upply, 2023**);
- Cost prestație transport feroviar: 0,05 €/TEU·km (**Upply, 2023; DHL, 2023**);
- Cost de transbordare per TEU în nodul X: $\beta_x = 80$ €/TEU (**Ocean Network Express, 2024**).

Rezultă că valorile totale din tabelul 4.32 reprezintă aplicarea directă, numerică, a relației (4.94) pentru variante predefinite, cu $x_{ij} \in \{0, 1\}$ și $z_x = 1$:

Tabelul 4.32 Determinarea costurilor pe segmente pentru rutele fluvial–rutieră și fluvial–feroviară (€/TEU)

Ruta	Segment	α [€/TEU·km]	d [km]	β [€/TEU]	Cost segment [€/TEU]
Ruta 1 (Fluvial + Rutier)	Fluvial Constanța – Giurgiu	0,08	355	–	28,4
Ruta 1 (Fluvial + Rutier)	Transbordare în portul Giurgiu	–	–	80	80,0
Ruta 1 (Fluvial + Rutier)	Rutier Giurgiu–Curtici	0,12	725	–	87,0
Total			1080		$C_T = 195,4$
Ruta 1 (Fluvial + Feroviar)	Fluvial Constanța–Giurgiu	0,08	355	–	28,4
Ruta 1 (Fluvial + Feroviar)	Transbordare în portul Giurgiu	–	–	80	80,0
Ruta 1 (Fluvial + Feroviar)	Feroviar Giurgiu–Curtici	0,05	753	–	37,65
Total			1108		$C_T = 146,05$

(Sursa: Autorul)

Pe baza rezultatelor obținute în tabelul 4.32 se determină indicatorii celor două variante de traseu, prezentați în tabelul 4.33:

Tabelul 4.33 Sinteza comparativă a rutelor fluvial–rutieră și fluvial–feroviară între Constanța Sud – Curtici

Rută	Distanță (km)	Timp (ore)	Cost (€/TEU)	Prestația de transport (TEU·km)
Ruta fluvial-rutier	355 + 725	22,19 + 10,36	28,4 + 80 + 87,0	
Total	1080 km	32,55 ore	$C_T = 195,4$ €/TEU	1080 (TEU·km)
Ruta fluvial-feroviar	355 + 753	22,19 + 9,41	28,4 + 80 + 37,65	
Total	1108 km	31,6 ore	$C_T = 146,05$ €/TEU	1108 (TEU·km)

(Sursa: Autorul)

Notă: Prestația de transport (W) a fost determinată ca produs între cantitatea transportată (Q) și distanța totală parcursă (D), conform relației $W = Q \times D$, pentru $Q = 1$ TEU.

Pe baza valorilor determinate în tabelul 4.32 și sintetizate în tabelul 4.33, rezultă că varianta de traseu fluvial – feroviar prezintă un cost total de transport mai redus comparativ cu varianta fluvial – rutieră. Costul total de transport pentru 1 TEU pe varianta fluvial – feroviară este de 146,05 €/TEU, comparativ cu 195,4 €/TEU pentru varianta fluvial – rutieră, ceea ce conduce la o diferență de 49,35 €/TEU în favoarea utilizării transportului feroviar pe segmentul terestru.

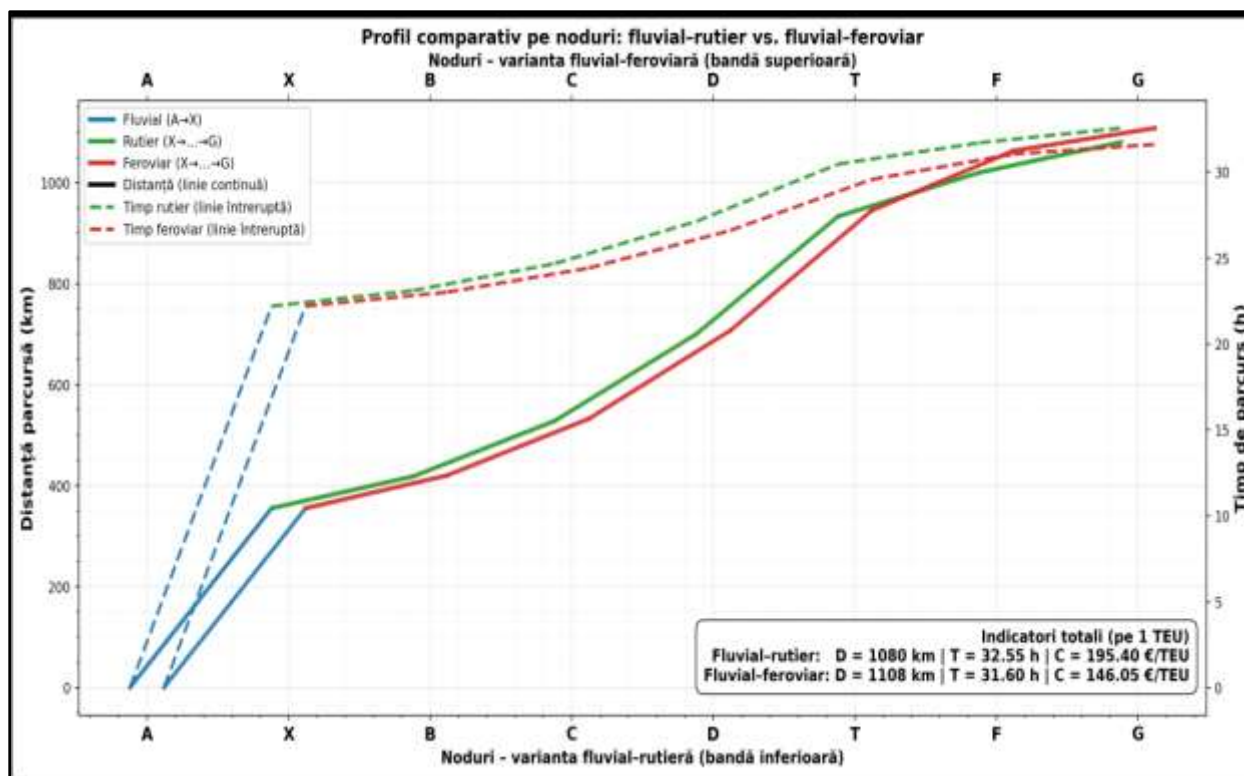


Figura 4.17 Reprezentarea comparativă a traseelor fluvial-rutier și fluvial-feroviar între Constanța Sud și Curtici

(Sursa: Autorul)

Tabelul 4.34 Riscuri asociate rutei de transport multimodal Constanța Sud - Curtici și mecanisme tehnice de diminuare a acestora

Cod risc / Tip risc	Măsurile de diminuare a riscului	Metode de implementare operațională
R.M.1 – risc operațional multimodal: pierderea continuității fluxului de transport multimodal ca urmare a necorelării capacităților între componentele fluvială, rutieră și feroviară	• redistribuirea fluxurilor de transport prin activarea porturilor fluviale Cernavodă, Medgidia și Drobeta Turnu Severin; • utilizarea rutelor alternative ale rețelei TEN-T pentru redistribuirea fluxurilor de marfă; • corelarea capacităților de transport ale componentelor modale.	• coordonarea fluxurilor de transport de către operatorii logistici și administratorii infrastructurii; • introducerea programării transporturilor multimodale pe intervale de operare; • utilizarea platformelor de planificare logistică pentru redistribuirea fluxurilor.
R.M.2 – risc tehnologic multimodal: disfuncționalități ale sistemelor de coordonare și schimb de informații între modurile de transport	• implementarea sistemelor de schimb electronic de date între operatorii de transport; • introducerea sistemelor integrate de monitorizare a transporturilor multimodale; • utilizarea sistemelor de management al transportului multimodal.	• operarea sistemelor informatice de către operatorii logistici și administratorii infrastructurii; • utilizarea platformelor de monitorizare a transporturilor containerizate; • integrarea sistemelor de management logistic ale operatorilor de transport.
R.M.3 – risc de mediu multimodal: reducerea capacității de transport pe rutele multimodale ca urmare a variațiilor hidrologice ale Dunării	• executarea lucrărilor de dragaj pentru menținerea adâncimii navigabile; • redistribuirea fluxurilor de transport către porturi fluviale alternative; • adaptarea capacității convoaielor fluviale la condițiile hidrologice.	• realizarea lucrărilor de dragaj de către administrațiile fluviale; • coordonarea navigației prin dispeceratele de navigație; • reorganizarea convoaielor fluviale în funcție de nivelul apei.

Cod risc / Tip risc	Măsurile de diminuare a riscului	Metode de implementare operațională
R.I.1 – risc operațional intermodal (terminal Giurgiu): blocaj operațional în zona de transbordare containerelor între transportul fluvial și transportul rutier / feroviar	- reorganizarea fluxurilor de manipulare a containerelor în terminal; - introducerea programării operațiunilor de transbordare; - creșterea capacității de manipulare prin utilizarea echipamentelor suplimentare.	- coordonarea operațiunilor de manipulare de către operatorul terminalului; - planificarea operațiunilor de încărcare și descărcare prin dispeceratul terminalului; - mobilizarea echipamentelor suplimentare în perioadele de trafic intens.
R.I.2 – risc tehnic intermodal (terminalul Giurgiu): defectarea echipamentelor de manipulare utilizate în procesul de transbordare	- efectuarea lucrărilor de mentenanță preventivă a echipamentelor de manipulare; - utilizarea echipamentelor de rezervă pentru manipularea containerelor; - monitorizarea indicatorilor de fiabilitate ai echipamentelor.	- realizarea programelor de mentenanță tehnică a echipamentelor; - organizarea intervențiilor tehnice pentru echipamentele defecte; - monitorizarea timpilor de funcționare fără defectare și a duratelor de remediere a echipamentelor de manipulare.
R.I.3 – risc operațional intermodal: acumularea unităților de transport intermodal în zona de stocare temporară din terminalul Giurgiu	- extinderea spațiilor de stocare temporară pentru containere; - redistribuirea fluxurilor către porturi fluviale alternative; - creșterea ritmului de evacuare a containerelor din terminal.	- reorganizarea zonelor de depozitare din terminal; - coordonarea transportului rutier și feroviar pentru evacuarea containerelor; - utilizarea terminalelor fluviale alternative pentru redistribuirea fluxurilor.
R.R.1 – risc operațional rutier (unimodal): congestie a traficului rutier pe sectoarele critice ale coridorului logistic	- devierea traficului de marfă pe infrastructura rutieră de mare capacitate; - introducerea intervalelor dedicate transportului de marfă;	- stabilirea rutelor de deviere prin dispoziții ale CNAIR; - implementarea semnalizării temporare pentru devierea traficului; - monitorizarea fluxurilor prin centrele regionale de management al traficului.
R.F.1 – risc operațional feroviar (unimodal): întreruperea circulației trenurilor de marfă pe sectorul feroviar al rutei multimodale	- devierea trenurilor pe rute feroviare alternative; - reorganizarea graficului de circulație al trenurilor de marfă; - utilizarea liniilor de depășire pentru reducerea timpilor de staționare.	- reprogramarea traseelor prin dispeceratele CFR Infrastructură; - actualizarea mersului trenurilor pentru operatorii feroviari; - coordonarea circulației trenurilor prin centrele de dirijare a traficului.
R.Fl.1 – risc climatic fluvial (unimodal): scăderea adâncimii navigabile a șenalului Dunării	- executarea lucrărilor de dragaj pentru menținerea adâncimii navigabile; - modernizarea ecluzelor pentru reducerea timpilor de tranzit; - redistribuirea fluxurilor fluviale către porturi interioare.	- realizarea lucrărilor de dragaj de către administrațiile fluviale; - implementarea programelor de modernizare a ecluzelor; - coordonarea navigației prin dispeceratele administrației canalelor navigabile.

(Sursa: Autorul)

CAPITOLUL 5 CONCLUZII

5.1 Considerații finale și rezultate

Capitolul 1 stabilește cadrul cercetării prin definirea obiectivelor, ipotezelor, setului de date și criteriilor de evaluare, precum și prin sintetizarea metodelor utilizate pentru analiza și diminuarea riscurilor în transportul multimodal.

Capitolul 2 prezintă baza teoretică prin definirea și clasificarea riscurilor (operaționale, tehnice, tehnologice, umane) în raport cu vulnerabilitățile infrastructurale, constrângerile de exploatare și condițiile externe, precum și cadrul normativ utilizat în analiză.

Capitolul 3 tratează evaluarea riscurilor prin raportare la vulnerabilități și deficiențe, stabilind sursele de risc și regulile de cuantificare a expunerii. Se utilizează media ponderată pentru agregarea valorilor pe componente (maritim, feroviar, rutier), modelul de scor pentru compararea indicatorilor de expunere și DFT pentru modelarea unui eveniment de coliziune, prin definirea porților PAND, FDEP și AND și a probabilităților asociate.

Capitolul 4 aplică metodologia pe studii de caz, în logica lanțului de transport între terminalul DP World Constanța Sud și terminalul Curtici, utilizând rezultatele unei etape ca date de intrare pentru etapa următoare.

Terminalul DP World este analizat ca interfață de transfer, prin integrarea evaluării multicriteriale cu simularea (Arena), iar rezultatele sunt utilizate pentru formularea de măsuri privind reducerea timpilor de restabilire, optimizarea alocării echipamentelor și introducerea redundanței pentru echipamentele critice. Pe baza simulării sunt aplicate metodele INCI și BOR pentru evaluarea utilizării resurselor și dimensionarea rezervelor operaționale.

Rețeaua de transport este modelată prin matrici de adiacență, distanță și timp, iar configurațiile de rută sunt analizate prin model TSP pentru determinarea succesiunilor de segmente cu durată și cost reduse.

Evaluarea SAW este aplicată pentru componentele rutieră și feroviară, prin normalizare min-max inversă și agregare ponderată, rezultând ierarhizarea variantelor de rută în funcție de expunerea la riscuri.

Soluțiile de diminuare vizează corelarea temporală a fluxurilor: programarea plecărilor rutiere în raport cu capacitatea terminalelor, sincronizarea sosirilor cu ferestrele de preluare din Curtici, introducerea rezervelor de timp în graficele feroviare și limitarea timpilor de ocupare a liniilor și echipamentelor, cu efect asupra reducerii staționărilor și a discontinuităților la interfața rutier-feroviar.

5.2 Contribuții originale

În Capitolul 1 este elaborat un tabel sinteză structurat pe domenii, tipuri de risc și metode validate, utilizat ca instrument de selecție metodologică. Pe această bază sunt selectate și adaptate metode de evaluare (scoring, DFT, evaluare multicriterială, simulare discretă), rezultând un cadru metodologic unitar, cu criterii de risc definite și proceduri de prelucrare replicabile.

În Capitolul 2 sunt formalizați parametrii și procedurile de evaluare, prin definirea coerentă a categoriilor de riscuri (operaționale, tehnice, tehnologice, umane, climatice) și stabilirea unei proceduri de normalizare și ponderare, care permite comparabilitatea între moduri de transport și integrarea rezultatelor în cercetările ulterioare.

Capitolul 3 dezvoltă o bază metodologică unitară prin corelarea evaluării cantitative cu modelarea logică dinamică. Rezultatele metodei de scoring sunt utilizate ca parametri de intrare în modelul DFT, permițând identificarea nivelului de expunere la risc și a succesiunilor critice de evenimente.

În Capitolul 4 este realizată aplicarea secvențială a metodelor pe studii de caz corelate, în care rezultatele unei etape sunt utilizate ca date de intrare pentru etapa următoare. Cercetarea este structurată pe lanțul de transport între DP World Constanța Sud și Curtici, tratând unitar interfața portuară și propagarea riscurilor pe componentele terestre. Pentru terminalul DP World Constanța Sud este realizată integrarea evaluării riscurilor cu simularea discretă, prin transpunerea relației

vulnerabilitate–deficiență–risc în indicatori operaționali (timpuri de așteptare, utilizare resurse, capacitate). Modelul de simulare Arena Rockwell este utilizat pentru cuantificarea efectelor riscurilor operaționale, tehnice și tehnologice asupra timpilor de așteptare, gradului de utilizare a resurselor și capacității de manipulare, iar rezultatele sunt utilizate prin indicatorii INCI și BOR pentru fundamentarea măsurilor de reducere a timpilor de restabilire a continuității operațiunilor de transbordare în terminal.

Pentru ruta Constanța Sud – Curtici este realizată evaluarea componentelor rutieră și feroviară prin metoda SAW, pe baza criteriilor de risc definite, și formularea de măsuri orientate către limitarea creșterii timpilor, pierderilor de capacitate și discontinuităților la interfața rutier–feroviară. Pentru configurațiile care includ componenta fluvială este utilizat modelul TSP pentru determinarea succesiunilor de noduri ale traseului și compararea variantelor de parcurs pe relația Constanța Sud – Giurgiu – Curtici.

Rezultatele cercetării sunt diseminate prin publicații în reviste și conferințe internaționale, confirmând relevanța metodologică și aplicabilitatea în transportul multimodal de mărfuri.

Articolele publicate reflectă direcțiile centrale ale tezei și sunt prezentate în continuare:

- *"Modelling solutions for cost optimization in multimodal transports considering the operational risk variables"*, Popa et al., (2025), Research journal Transport - Vilnius Gediminas Technical University, (Wos, SCIE, Q2), menționat în bibliografia tezei la numărul 134, abordează analiza reducerii riscurilor în transportul multimodal printr-o metodologie integrată de evaluare probabilistică a riscurilor operaționale și financiare, combinată cu modelarea matematică a costurilor, având ca scop îmbunătățirea rutelor de transport și diminuarea impactului economic al factorilor de risc;
- *"Assessing the influence of equipment reliability over the activity inside maritime container terminals through discrete-event simulation"*, Roșca et al., (2025), Systems journal, (WoS, Q1), menționat în bibliografia tezei la numărul 147, analizează impactul fiabilității echipamentelor asupra activității terminalelor maritime de containere prin simulare cu evenimente discrete, evidențiind modul în care identificarea și modelarea scenariilor de defectare pot contribui la reducerea riscurilor operaționale și tehnologice, precum și la îmbunătățirea rezilienței terminalelor;
- *"A Hybrid Fault Tree – Fuzzy logic model for risk analysis in multimodal freight transport"*, Popa et al., (2025), Systems journal, (MDPI, WoS, Q2), menționat în bibliografia tezei la numărul 138, abordează riscurile aferente componentelor rutieră, feroviară și maritimă din transportul multimodal printr-un model integrat Fault Tree – Fuzzy Logic, demonstrând că integrarea metodelor FTA și DFT cu logica fuzzy permite estimarea scorurilor de risc pe baza incertitudinilor legate de factori umani, tehnici și de mediu, ceea ce susține modelarea cantitativă și ierarhizarea riscurilor aplicate în transportul multimodal de marfă;
- *"Risk-based optimization of multimodal oil product operations through simulation and workflow modeling"*, Popa et al., (2025), Logistics journal, (MDPI, WoS, Q2), menționat în bibliografia tezei la numărul 139, realizează o evaluare cantitativă a riscurilor operaționale în cadrul unui sistem de transport multimodal, prin calculul probabilităților de producere a evenimentelor de risc, precum erori umane, defecțiuni tehnice și factori de mediu. Cercetarea utilizează o agregare ponderată a datelor statistice pentru a identifica și ierarhiza categoriile de risc cu impact major. În evaluare sunt integrați parametrii fundamentali ai riscului – probabilitatea, vulnerabilitatea și expunerea sistemului la riscuri, expunerea fiind asociată valorii medii a mărfurilor, echipamentelor și infrastructurii potențial afectate de evenimentele de risc.
- *"Case study of risk assessment in maritime operations applying the fault tree analysis method"*, Ștefanov et al., (2025), Research journal Transport published by Vilnius Gediminas Technical

University, (WoS, Q2), menționat în bibliografia tezei la numărul 164, aplică metoda Fault Tree Analysis (FTA) pentru evaluarea efectelor producerii unor riscuri în operațiunile maritime, oferind un cadru analitic pentru identificarea și prevenirea factorilor critici care pot duce la incidente în transportul maritim, contribuind astfel la diminuarea riscurilor și creșterea siguranței operaționale;

- *"Multimodal livestock operations analysis using the business process modelling. Case study of Romanian Black Sea ports"*, Popa et al., *Economies*, 2025, (MDPI, WoS, Q2), menționat în bibliografia tezei la numărul 133, analizează riscurile în transportul multimodal, identificând blocajele de trafic și ineficiențele din lanțul logistic prin simulări software, propunând strategii de eficientizare pentru reducerea întârzierilor, creșterea fiabilității echipamentelor și îmbunătățirea proceselor operaționale în terminalele portuare;

- *"Environmental risk assessment in the background of armed conflict in the Black Sea area"*, N.O. Ștefanov, L. Rauca, *Transnav, The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 2023, (WoS, Q3), menționat în bibliografia tezei la numărul 165, abordează riscurile operaționale, de securitate și de mediu asupra transportului maritim în zona Mării Negre, oferind un cadru metodologic comparabil pentru analiza riscurilor în transportul multimodal;

- *"Study of the risk analysis associated with multimodal maritime transport"*, O. Ștefanov et al., *Technium*, 2022, (BDI), menționat în bibliografie la numărul 166, prezintă metodologia analizei riscurilor multimodale, utilizând metode probabilistice și de eficientizare;

- *"Considerations for risk mitigation in the international carriage of goods by sea"*, O. Ștefanov, G. M. Apetroaei, *SEA-CONF 2021*, (BDI), menționat în bibliografie la numărul 164, propune strategii de reducere a riscurilor în transportul maritim internațional, ca parte a transportului multimodal de mărfuri, inclusiv analiza riscurilor operaționale și economice;

- *"Multimodal transport – Risk and environment"*, O. Ștefanov et al., *Technium*, 2021, (BDI), menționat în bibliografie la numărul 168, studiază interacțiunea dintre riscurile de mediu și cele operaționale în transportul multimodal, oferind un model pentru evaluarea impactului riscurilor.

5.3 Limite și direcții pentru cercetări viitoare

Cercetarea este realizată pe ruta de transport multimodal Portul Constanța Sud – Terminalul Curtici și asupra operațiunilor de transbordare din terminalul DP World Constanța Sud. În aceste condiții, rezultatele sunt valabile pentru configurația analizată și nu sunt transferabile direct către alte rute, în care infrastructura, reglementările și condițiile de exploatare pot diferi.

Metoda de evaluare pe bază de scor și modelul Dynamic Fault Tree (DFT) sunt aplicate pe baza unor date statistice și tehnice din surse validate. Structura relațiilor dintre evenimente este construită prin ipoteze privind independența sau succesiunea logică a riscurilor, ceea ce condiționează nivelul de precizie al modelului în situații în care aceste ipoteze nu sunt respectate în exploatare.

Simulările realizate în platforma Arena sunt dezvoltate pe seturi de date și scenarii definite, fără includerea unor variații majore neplanificate, precum condiții meteorologice extreme, avarii de infrastructură sau blocaje simultane în mai multe puncte critice ale sistemului.

Modelele sunt calibrate pentru condițiile actuale de infrastructură și reglementare din România, iar modificările legislative, tehnologice sau operaționale impun actualizarea parametrilor și a ipotezelor utilizate. Pe această bază, direcțiile de dezvoltare ulterioară vizează extinderea cadrului metodologic prin integrarea unor seturi de date la nivel internațional pentru compararea practicilor de gestionare a riscurilor, utilizarea tehnologiilor digitale pentru monitorizarea și controlul operațiunilor și dezvoltarea unor modele predictive pentru anticiparea variațiilor de trafic și a perturbărilor, cu validare în condiții reale de exploatare.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Abdulahi E., Luo F., (2020), "Literature review of multimodal transportation risk management system", International Journal of Academic Multidisciplinary Research, 4(11), 119–127;
- [2] ABPmer, (2019), "Berth Occupancy Study: Port of London", Section 4.1, pp. 10–11;
- [3] Acebes F., González-Varona J. M., López-Paredes A., Pajares J., (2024), "Beyond probability-impact matrices in project risk management: A quantitative methodology for risk prioritisation", Humanities and Social Sciences Communications, 11(670), pg. 3-5;
- [4] Administrația Porturilor Maritime Constanța, (2023), Raport anual de activitate 2023, Constanța, <https://www.portofconstantza.com>
- [5] Allianz Global Corporate & Specialty, (2023), "Safety and Shipping Review 2023", [https://commercial.allianz.com/content/dam/onemarketing/commercial/commercial/reports/AGC S-Safety-Shipping-Review-2023.pdf](https://commercial.allianz.com/content/dam/onemarketing/commercial/commercial/reports/AGC-S-Safety-Shipping-Review-2023.pdf)
- [6] Ambrosino D., Sciomachen A., (2018), "Shipping liner company stowage plans: an optimization approach", EWGT/EURO -2016. AISC, vol. 572, pp. 405–420. Springer;
- [7] American Bureau of Shipping, (2003), "Guide for Risk Evaluations for the Classification of Marine-Related Facilities", Houston, TX: American Bureau of Shipping, <https://ww2.eagle.org>
- [8] APM Terminals, (2024), "Port Sea Port container terminal specifications", <https://www.apmterminals.com/poti>
- [9] Autoritatea Navală Română, (2024), "Raport privind evenimentele de navigație aferent anului 2023", <https://portal.rna.ro/despre-noi/rapoarte-%C8%99i-studii>
- [10] Autoritatea Națională a Vămirilor, (2023), "Lista amenințărilor, riscurilor și soluțiilor posibile", https://www.customs.ro/assets/pdf/gabim//Lista_amenintari_riscuri_si_solutii_posibile_vf.pdf
- [11] Banca Mondială - World Bank Water Data, (2019), "World Bank Water Data 2019", Washington, DC: World Bank, <https://databank.worldbank.org/source/water>
- [12] Bartle J. R., Lutte R. K., Leuenberger D. Z., (2021), "Sustainability and Air Freight Transportation: Lessons from the Global Pandemic", Sustainability, 13(7), 3738. <https://doi.org/10.3390/su13073738>
- [13] Banca Națională a României, (2024), <https://www.cursbnr.ro/arhiva-curs-bnr-2024-04-05>
- [14] Bilato G. A., Rocco C. D., Azevedo A. T., (2022), "Planning routes in road freight minimizing logistical costs and accident risks", <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.09728>
- [15] Bínová H., Heralová D., (2017), "Risks in transportation of items in multimodal transport", pp. 229–242, <https://www.researchgate.net/publication/316281124>
- [16] Bo L., Xi M., Hongman L., Deyang C., Hongbo D., (2023), "Challenges of decarbonizing global maritime container shipping toward net-zero emissions", NPJ Ocean Sustainability, 2, 11. <https://doi.org/10.1038/s44183-023-00018-6>
- [17] Bogalecka M., (2024), "Collision and Contact – Analysis of accidents at sea", TransNav, The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 18(1), 75-85;
- [18] Bromiley P., McShane M., Nair A., Rustambekov E., (2015), "Enterprise risk management: review, critique, and research directions", Long Range Planning;
- [19] CFR, (2024), "Raport de activitate Compania Națională de Căi Ferate pentru anul 2023", pag. 33-35;
- [20] CFR, (2021), "Strategia de dezvoltare a infrastructurii feroviare 2021 - 2025, Anexa 10", Compania Națională de Căi Ferate CFR SA., pag. 38 - 40;

- [21] Chang C.H., Xu J., Zaili Y., (2019), “*Selection of effective risk mitigation strategies In container shipping operations*”, Maritime Business Review, Vol. 4. No. 4, pp. 413-431;
- [22] Chang T., Lee Y., Park J., (2021), “*Discrete event simulation for port terminal operations*”, Journal of Logistics Research, 10(2), 45-63. <https://doi.org/10.1016/j.logres.2021.04.005>
- [23] Charlebois P., Griffiths W., (2024), “*FSO SAFER oil spill risk Addressing the threat of a deteriorating super tanker*”, International Oil Spill Conference Proceedings, 2024 (1), 176. <https://doi.org/10.7901/2169-3358-2024.1.176>
- [24] Chen X., Yu M., Lin Y., (2023), “*Resilience improvement and risk management of multimodal transport logistics in the post-covid-19 era: The case of tir-based sea-road multimodal transport logistics*”, Sustainability, 15(7), 6041, <https://doi.org/10.3390/su15076041>
- [25] Chen Y., Zhang L., (2023), “*Risk assessment of marine accidents with Fuzzy Bayesian Networks and causal analysis*”, Ocean & Coastal Management, 232;
- [26] Chowdhury M. N., Shafi S., Arzaman A. F. M., Teoh B. A., (2024), “*Navigating human factors in maritime safety: A review of risks and improvements in engine rooms of ocean-going vessels*”, International Journal of Safety and Security Engineering, 14(1), 1-14. <https://doi.org/10.18280/ijssse.140101>
- [27] Christidis P., Ibáñez Rivas J. N., (2012), “*Measuring Road Congestion*”, Luxembourg: Publications Office of the European Union, <https://doi.org/10.2791/15282>
- [28] Christopher M., (2015), “*Logistics & Supply Chain Management: Creating value-adding networks*”, FT Press, 3rd Edition;
- [29] Cieśla M., (2018), “*Multimodal Transport Risk Assessment with Risk Mapping*”, ResearchGate;
- [30] Comisia Europeană, (2023), “*Transport in the European Union: Current Trends and Issues. Directorate-General for Mobility and Transport*”, <https://transport.ec.europa.eu>
- [31] Comisia Europeană, (2024), “*Road Safety Report 2024: Progress and Challenges*”, Brussels: European Commission, https://ec.europa.eu/transport/road_safety
- [32] Comitetul Național pentru Supravegherea și Dezvoltarea Feroviară (CNSDF), (2021), “*Viteza comercială în transportul multimodal: Analiză și statistici*”, <https://www.cnsdf.ro/rapoarte/viteza-comerciala-transport-multimodal-2021.pdf>
- [33] Compania Națională de Administrare a Infrastructurii Rutiere, (2024), CNAIR, “*Raport de evaluare privind activitatea directorilor*”, <https://www.mt.ro/web14/documente/interes-public/rapoarte/2024/Raport%20evaluare%20activitate%20directori%20CNAIR.pdf>
- [34] Consiliul Concurenței – CNSDF & CSDN, (2025), “*Transportul multimodal de mărfuri în România – potențial ridicat, utilizare redusă*”, Economica.net., https://www.economica.net/transportul-multimodal-de-marfuri-in-romania-are-un-potential-ridicat-dar-in-prezent-utilizarea-este-redusa-studiu-consiliul-concurenței_831031.html
- [35] Cruz C.O., Marques R.C., (2012), “*Risk-sharing in seaport terminal concessions*”, Transport Reviews Journal, Vol. 32, No. 4, pp. 455-471;
- [36] Curtea de Conturi Europeană, (2023), “*Raportul special 08/2023: Transportul intermodal de marfă*”, Luxembourg: Oficiul pentru Publicații al Uniunii Europene;
- [37] D'Ariano A., Hemelrijk R., (2006), “*Designing a Multi-Agent System for Cooperative Train Dispatching*”, IFAC Proceedings, <https://pdf.sciencedirectassets.com/314898/1-s2.0-S1474667015X60800/1-s2.0-S1474667015359188/main.pdf>
- [38] Derse O., Göçmen P. E., (2019), “*Risk assessment in multimodal transportation: a case study*”, Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 8(2), 629-642. <https://dergipark.org.tr>

- [39] Det Norske Veritas, (2022), DNV, *"Maritime Safety Report 2012-2022"*, <https://www.dnv.com/maritime/publications/maritime-safety-report-2012-2022-download/>
- [40] Ding L., (2020), *"Multimodal transport information sharing platform with mixed time window constraints based on big data"*, *IEEE Access*, 8, 36388–36402. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2975295>
- [41] Dini N., Yaghoubi S., Bahrami H., (2024), *"Route selection of periodic multimodal transport for logistics company: An optimisation approach"*, *Transportation Research Procedia*, 74, 259–274, <https://www.researchgate.net/publication/379662047>
- [42] Disk.com, (2023), *"Logistics automation trends: Opportunities and uncertainties in 2024"*, [Disk.com/Logistics automation trends: opportunities and uncertainties in 2024/2023](https://www.disk.com/en/logistics-automation-trends-opportunities-and-uncertainties-in-2024/)
- [43] DP World, (2020), *"DP WORLD Constanța - Terminal Presentation"*, DP World Constanța, <https://www.dpworld.com/constanta>
- [44] DP World, (2023), *"Annual report for 2022"*, <https://www.dpworld.com/constanta>
- [45] Dugan J. B., Bavuso S. J., Boyd M. A., (1992), *"Dynamic fault-tree models for fault-tolerant computer systems"*, *IEEE Transactions on Reliability*, 41(3), 363–377, <https://doi.org/10.1109/24.159800>
- [46] Economedia, (2024), *"CNAIR ratează legătura „cap-coadă” Craiova – București pe drum de mare viteză și în 2024: ultimii 12 kilometri ai Drumului Expres Craiova – Pitești, abia în prima parte din 2025"*, Economedia, <https://economy.ro/cnair-rateaza-legatura-cap-coada-craiova-bucuresti-pe-drum-de-mare-viteza-si-in-2024-in-ciuda-promisiunilor-repetate-ultimii-12-kilometri-ai-drumului-expres-craiova>
- [47] Elsayed A., Elsayed D., (2012), *"Reliability Engineering"*, Wiley, Chapter 2;
- [48] European Environment Agency - EEA, (2021), *"European Maritime Transport Environmental Report"*, Publications Office of the European Union, <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/maritime-transport>
- [49] European Environment Agency, (2023), *"Impact of weather on transport infrastructure in Eurasia"*, European Climate Report, p. 45, <https://www.eea.europa.eu>
- [50] European Maritime Safety Agency, (2020), *"Safety analysis of data reported in EMCIP: Analysis on marine casualties and incidents involving container vessels"*, <https://www.emsa.europa.eu/publications/item/4276-safety-analysis-of-data-reported-in-emcip-analysis-on-marine-casualties-and-incidents-involving-container-vessels.html>
- [51] European Maritime Safety Agency, (2022), *"Safety analysis of EMCIP data – Navigation accidents – Summary report"*, (V1.0), EMSA, <https://www.emsa.europa.eu/accident-investigation-publications/safety-analysis.html#8203>
- [52] European Maritime Safety Agency, (2023), *"Annual overview of marine casualties and incidents 2023"*, <https://www.emsa.europa.eu/publications/item/5052-annual-overview-of-marine-casualties-and-incidents.html#8203>
- [53] European Parliament and Council of the European Union, (2013), Regulation (EU) No 1315/2013 of 11 December 2013 on Union guidelines for the development of the trans-European transport network and repealing Decision No 661/2010/EU, Official Journal of the European Union, L 348, 20.12.2013, pp. 1–128;
- [54] European Railway Agency, (2023), *"Annual Report on Railway Safety and Interoperability in the EU 2023"*, https://www.era.europa.eu/content/annual-report-railway-safety-and-interoperability-eu-2023_en
- [55] European Road Safety Observatory – ERSO, (2018), *"Annual Accident Report 2018"*, <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2671159>

- [56] European Union Aviation Safety Agency - EASA, (2021), "Key risk areas and safety issues", European Plan for Aviation Safety (EPAS) 2021–2025, (Vol. III), https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/epas_2021_2025_vol_three_final.pdf
- [57] Eurostat, (2023), "Road Safety Statistics: Accidents and Mortality in Europe 2023", Luxembourg: Publications Office of the European Union, <https://ec.europa.eu/eurostat>
- [58] Eurostat, (2025), <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20250416>
- [59] Ferguson M., Sharmin A., Camur M., Li X., (2025), "A Review on Intermodal Transportation and Decarbonization: An Operations Research Perspective", <https://doi.org/10.4>
- [60] Finochenko T. A., Dergacheva L. V., Yaitskov I. V., (2021), "Risk Management in Transportation Safety System", Transportation Research Procedia, https://www.researchgate.net/publication/349936710_Risk_Management_in_Transportation_Safety_System
- [61] Flodén J., (2007), "Modelling Intermodal Freight Transport – The Potential of Intermodal Transport Systems in Sweden", Doctoral dissertation, University of Gothenburg, <https://gupea.ub.gu.se/handle/2077/4437>
- [62] Fraga-Lamas P., Fernández-Caramés T. M., Castedo L., (2017), "Towards the Internet of Smart Trains: A Review on Industrial IoT-Connected Railways", Sensors, 17(6), 1457. <https://doi.org/10.3390/s17061457>
- [63] Freightos, (2023), "Freight Shipping Rates, Quotes and Costs", <https://www.freightos.com>
- [64] Galierikova A., Sosedova J., (2018), "Intermodal transportation of dangerous goods", 65(3), 8–11, <https://doi.org/10.17818/NM/2018/3.8>
- [65] Garcia M., (2020), "Enhancing Operational Efficiency; Reducing Errors and Downtime; Improving Safety and Real-Time Monitoring", Smart Infrastructure and Safety Journal, 18(1), 33–48. <https://doi.org/10.1000/sisj.2020.11223>
- [66] Gbadegoye J., Camur M. C., Li X., (2025), "A Two-Stage Stochastic Model for Road-Rail Intermodal Freight Transportation Under Demand and Capacity Uncertainty", <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.17510>
- [67] Gencer C., Gök M. Ş., (2023), "Security vulnerabilities in multimodal and intermodal logistics chains: A systematic review", Logistics, 7(2), 31. <https://doi.org/10.3390/logistics7020031>
- [68] Geweke J., (1992), "Evaluating the accuracy of sampling-based approaches to calculating posterior moments in Bayesian Statistics 4", ed. JM Bernardo, JO Berger, AP Dawid and AFM Smith, Clarendon Press, Oxford, UK., 169–193;
- [69] Goel A., Gruhn V., (2016), "Fleet monitoring system for advanced tracking of commercial vehicles", Systems, Man and Cybernetics for SMC;
- [70] Göçmen E., Erol R., (2018), "The problem of sustainable intermodal transportation: A case study of an international logistics company, Turkey", Sustainability, 10(11), 4268. <https://doi.org/10.3390/su10114268>
- [71] Gopalakrishnan S., Gupta R., (2023), "Analysis of the barriers to multimodal freight transport and their impact on operational efficiency. European Transport Research Review", 15(2), 614.
- [72] Gosling S., Li J. D., Martinez A., Miguel M., (2023), "Digital logistics: Technology race gathers momentum", McKinsey & Company, <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/>
- [73] Grdinic J. N., (2016), "Improving Safety at Sea Through the Compliance with the International Maritime Safety Codes", Journal of Maritime Research, 13(1), 5–14;
- [74] Guan W., Liu H., (2022), "Agent-Based simulation in intermodal transport: A case study on freight flow optimization", Transportation Science, 56(3), 789–812;

- [75] Hassel M., Asbjørnslett B. E., Hole L. P., (2021), “*Underreporting of maritime accidents to vessel accident databases*”, Accident Analysis & Prevention;
- [76] Heckmann I., Comes T., Nickel S., (2015), “*A critical review on supply chain risk – Definition, measure and modeling*”, Omega, 52, 119-132;
- [77] Heidelberger P., Welch P.D., (1983), “*Simulation run length control in the presence of an initial transient*”, Opns Res., Vol. 31, 1109-44, <https://doi.org/10.1287/opre.31.6.11>
- [78] Hilmola O.P., Szekely B., (2006), “*Supply chain management in the European Union: Transport-related risks and their management*”, International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 36(4), 336–361. <https://doi.org/10.1108/096000030610672041>
- [79] Hogg R. V., McKean J., Craig A. T., (2019), “*Introduction to Mathematical Statistics*”, 8th ed., Pearson, pg. 60–78;
- [80] Hwang C.-L., Yoon K., (1981), “*Multiple attribute decision making: Methods and applications*”, Springer, <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>
- [81] ICAO (International Civil Aviation Organization), (2018), “*Safety Management Manual*”, 4th ed., ICAO Doc 9859;
- [82] Institutul Național de Statistică, (2021), “*Anuarul Statistic al României 2021*”, București: INS România; <http://www.insse.ro>
- [83] International Group of P&I Clubs, (2020), “*Report on P&I claims involving vessels under pilotage (1999-2019)*”, <https://www.igpandi.org/article/pilotage-report/>
- [84] International Maritime Organization, (2001), “*Standard Marine Communication Phrases (SMCP)*”, IMO Publishing, Secțiunea 3., <https://www.imo.org/en/OurWork/Safety>
- [85] International Maritime Organization, (2022), “*Weather Impact Report*”, IMO Publishing, pg. 77;
- [86] International Maritime Organization, (2021), “*Guidelines on maritime cyber risk management*”;
- [87] International Maritime Organization, (2020), “*International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS)*”, [https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-\(SOLAS\),-1974.aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-(SOLAS),-1974.aspx)
- [88] International Maritime Organization, (1998), “*International Safety Management (ISM) Code and Guidelines on Implementation*”, <https://www.imo.org/en/OurWork/HumanElement/ISMCode.aspx>
- [89] International Maritime Organization, (2017), “*Convenția internațională privind standardele de pregătire, certificare și serviciu de cart pentru navigatori (STCW), inclusiv amendamentele de la Manila din 2010*”, <https://www.imo.org/en/OurWork/HumanElement/Pages/STCW-Convention.aspx>
- [90] International Organization for Standardization, (2018), ISO 31000:2018, “*Risk management – Guidelines*”;
- [91] International Road Transport Union (IRTU), (2023), “*Romania: driving restrictions(>7.5 t) due to heat waves on 21 and 22 August 2023, between 11:00 and 20:00*”, <https://www.iru.org/intelligence/flash-info/romania-driving-restrictions-75-t-due-heat-waves-21-and-22-august-2023-between-1100-and-2000>
- [92] International Road Transport Union (IRTU), (2023), <https://www.iru.org/Reports> on European Transport Risks and Challenges
- [93] Ivanov D., (2021), “*Supply Chain Viability and the COVID-19 Pandemic: A Conceptual and Formal Generalisation of Four Major Adaptation Strategies*”, International Journal of Production Research, 59(12), 3535–3552. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1890852>

- [94] Janic M., (2017), “*Modelling the full costs of a intermodal and road freight transport network*”, Transportation research Part D - Transport and Environment, Vol. 12 Issue 1;
- [95] Jithin T., Antriksh K., (2021), “*Loss reduction and cost optimization in road transportation*”, National Institute of Industrial Engineering, Mumbai;
- [96] Kabir S., (2017), “An overview of fault tree analysis and its application in model-based dependability analysis”, Expert Systems with Applications, 114–135, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.01.058>
- [97] Kaewfak K., Pharino C., Ouppara N., (2024), “*Advanced analytical methods for risk mitigation in multimodal freight transport*”, Symmetry, 16(10), 1394. <https://doi.org/10.3390/sym16101394>
- [98] Kelton W. D., Sadowski R. P., Zupick N. B., (2015), “*Simulation with Arena (6th ed.)*”, New York: McGraw-Hill Education, <https://www.mheducation.com/highered/product/simulation-arena-kelton-sadowski/M9780073401317.html>
- [99] Kengpol A., (2014), “*The development of a framework for route selection in multimodal transportation*”, International Journal of Logistics Management, 25(2), 224–252, <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/ijlm-05-2013-0064>
- [100] Konecranes, <https://www.konecranes.com/ro/macarale-industriale/tehnologia-macaralelor>
- [101] Kostrzewski M., Melnik R., (2021), “*Risk-based Decision Making in Railway Systems: A Fuzzy Logic Approach*”, Journal of Rail Transport Planning & Management, 18, 100276. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2021.100276>
- [102] Kougioumtzoglou I. A., (2023), “*A Statistical Analysis of Ship Accidents (1990–2020) Focusing on Hull Failure*”, Journal of Marine Science and Engineering, <https://www.mdpi.com/2077-1312/12/1/122>
- [103] Kramberger T., Pustai I., Lep M., (2018), “*Intermodal transportation risk assessment*”, Safety and Reliability – Safe Societies in a Changing World (pp. 3201–3208), CRC Press, <https://doi.org/10.1201/9781351174664-401>
- [104] Kuznetsov A., Sokolov A., (2022), “*Methodology for assessing the risk of incidents during passenger transportation*”, International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(23), 15832;
- [105] Lasota M., Jacyna M., Szaciłło Ł., (2024), “*Fault tree method as a decision-making tool for risk analysis in the road transport of dangerous goods*”, Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport, 123, 137–151, <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2024.123.11>
- [106] Lemke C., Schulte F., Brandt T., (2023), “*Monte Carlo simulation for railway freight risk assessment*”, (2023), Computers in Transport, 34, 112–130;
- [107] Liao R., Liu W., Yuan Y., (2023), “*Resilience improvement and risk management of multimodal transport logistics in the Post-COVID-19 Era: The case of TIR-based sea – road multimodal transport logistics*”, Sustainability, 15(7), 6041, <https://doi.org/10.3390/su15076041>
- [108] Liu C.T., Hwang S.L., Lin I.K., (2023), “*Safety analysis of combined FMEA and FTA with computer software assistance*”, IFAC Proceeding, Vol. 46, pp. 2151–2155;
- [109] Lovett A. H., Dick C. T., Barkan C. P. L., (2015), “*Determining Freight Train Delay Costs on Railroad Lines in North America*”, Rail Transportation and Engineering Center (RailTEC), University of Illinois at Urbana-Champaign, 2-6;
- [110] Lu C., Han X., Xi B., Erera A. L., (2012), “*Yard crane scheduling in a container terminal for the non-crossing constraint*”, Computers & Operations Research, 39(12), 2916–2927, <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.12.018>

- [111] Lundteigen M. A., Rausan M., (2018), *"Introduction to Fault Tree Analysis. In Chapter 5 of the NTNU Safety"*, Reliability and Risk Engineering Book Series (Version 0.1), Trondheim: Norwegian University of Science and Technology (NTNU), <https://www.ntnu.no>
- [112] Ma X., Lan H., Han B., He H., (2022), *"On the causation correlation of maritime accidents based on data mining techniques"*, International Journal of Maritime Engineering, 238(5);
- [113] Maidana R. G., Kristensen S. D., Utne I. B., Sørensen A. J., (2023), *"Risk-based path planning for preventing collisions and groundings of maritime autonomous surface ships"*, Ocean Engineering, 290, 116417. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116417>
- [114] Makarova I., Serikkaliyeva A., Gubacheva L., Mukhametdinov E., Buyvol P., Barinov A., Shepelev V., Mavlyautdinova G., (2023), *"The role of multimodal transportation in ensuring sustainable territorial development: Review of risks and prospects"*, Sustainability, 15(7), 6309, <https://doi.org/10.3390/su15076309>
- [115] Mangan J., Butcher T., (2016), *"Global Logistics and Supply Chain Management"*, Wiley, [https://www.wiley.com/en-us/Global logistics and supply chain management](https://www.wiley.com/en-us/Global+logistics+and+supply+chain+management);
- [116] Maslarić M., Brnjac N., Bago D., (2016), *"Intermodal Supply Chain Risk Management"*, Pomorski zbornik, 52, 11-31;
- [117] MercuryGate International, (2020), MercuryGate Transportation Management System (TMS), <https://www.mercurysgate.com/>
- [118] Merle G., Bobbio A., Griffon S., (2011), *"Modeling dynamic fault trees using PAND gates"*, IEEE Transactions on Reliability, 554–565, <https://doi.org/10.1109/TR.2011.2165197>
- [119] Ministerul Transporturilor România, (2020), *"Raport privind starea infrastructurii de transport rutier din România 2020"*, București: Ministerul Transporturilor România, <https://mt.gov.ro>
- [120] Ministerul Transporturilor din România, (2024), *"Proiecte de infrastructură"*, https://www.mt.ro/web14/documente/privatizare-si-management/guvernanta_corporativa/componenta_iniciala/2024/PROIECT_CNAIR.pdf
- [121] Ministerul Transporturilor din România, (2020), *"Strategia de transport intermodal în România"*, (2020), https://www.mt.ro/web14/documente/strategie/strategii_sectoriale.pdf
- [122] Ministerul Transporturilor și Infrastructurii, (2011), *"Strategia de transport intermodal în România"*, https://www.mt.ro/documente/strategie/strategii_sectoriale/strategie_de_transport_intermodal_text.pdf
- [123] Ministerul Transporturilor și Infrastructurii, (2023), *"Ordinul nr. 1.849 din 10 octombrie 2023 pentru aprobarea Strategiei de dezvoltare a transportului intermodal în România"*, Monitorul Oficial al României, Partea I, nr. 956, 23 octombrie 2023.
- [124] Mitsubishi Heavy Industries Ltd., (2023), *"Grid-Powered Electric Transfer Crane"*, <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e472/e472015.pdf>
- [125] Müller G., (2020), *"Multimodal transport: Challenges and opportunities"*, Journal of Transport and Logistics, Vol. 12(2), pp. 45-58;
- [126] Neter J., Kutner M., Nachtsheim C., (2005), *"Applied linear statistical models – 5th Edition"*, (2005), McGraw-Hill/Irwin, https://archive.org/details/appliedlinearsta0000kutn_5edi
- [127] Nitsenko V., Kotenko S., Hanzhurenko I., Mardani A., Karakai M., (2020), *"Mathematical modeling of multimodal transportation risks. Recent advances on soft computing and data meaning"*, https://doi.org/10.1007/978-3-030-36056-6_41
- [128] Notteboom T., Pallis A., Rodrigue J.-P., (2022), *"Port Economics, Management and Policy"*, Routledge, <https://doi.org/10.4324/9780429318184>

- [129] Oficiul pentru Publicații al Uniunii Europene, (2023), "*Raport special: Transportul intermodal de marfă - UE.*", <https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/intermodal-freight-transport-08-2023/ro/>
- [130] OMVPETROM, <https://www.omvpetrom.com/ro/produse/carburanti-si-aditivi/combustibil-nava>
- [131] Ouedraogo C., Montarnal A., Gourc D., (2022), "*Multimodal container transportation, traceability and supply chain risk management: A systematic literature review*", IFAC-PapersOnLine, 55(10), 2145–2152. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.07.172>
- [132] Pan S., Yan H., He J., (2021), "*Vulnerability and resilience of transportation systems: A recent literature review*", Physics A: Statistical mechanics and its applications, DOI: 10.1016/j.physa.2021.126235
- [133] Popa C., Ștefanov O., Goia I., (2025), "*Multimodal livestock operations analysis using the business process modelling. Case study of Romanian Black Sea Ports*", Economies, MDPI, ISSN 2227-7099, <https://www.mdpi.com/2227-7099/13/3/69/pdf>
- [134] Popa C., Ștefanov O., Michnecka R., Rima B., (2025), "*Modelling solutions for cost optimization in multimodal transports considering the operational risk variables*", Transport, 40(3), 249–259, Vilnius Gediminas Technical University Press, ISSN: 1648-4142, DOI:10.3846/transport.2025.25716, <https://doi.org/10.3846/transport.2025.25716>
- [135] Popa C., Ștefanov O., Goia I., Nistor F., (2025), "*A hybrid fault tree–fuzzy logic model for risk analysis in multimodal freight transport*", Systems, 13(6), 429, <https://doi.org/10.3390/systems13060429>
- [136] Popa C., Ștefanov O., Goia I., (2025), "*Risk-based optimization of multimodal oil products operation through simulation and workflow modeling*", Systems, 13(6), <https://doi.org/10.3390/systems13060524>
- [137] Popa M., Roșca E., Rusca F., Costescu D., Dragu, V., (2016), "*Transit time through the border-crossing points: the case study of the EU's road BCP with Moldavia*", Transport Problems, 11(2), <https://doi.org/10.20858/tp.2016.11.2.8>
- [138] Popescu I., (2016), "*Analiza preliminară a riscurilor în transportul intermodal*", Academia.edu., <https://www.academia.edu/35840763>
- [139] Raicu Ș., (2007), "*Sisteme de transport*", București: Editura AGIR, <http://www.agir.ro/buletine/527.pdf>
- [140] Raicu Ș., Popa M., Costescu D., (2022), "*Uncertainties influencing transportation system performances*", Sustainability, 14(13), 7660. <https://doi.org/10.3390/su14137660>
- [141] Railport Arad, (2024), "*Transport intermodal internațional*", <https://www.railportarad.ro/en>
- [142] RailwayPro, (2023), "*Viteza redusă pe segmente critice: 10-20 km/h pe traseul București – Brașov din cauza degradării infrastructurii*", <https://www.railwaypro.com>
- [143] Rocket Consulting, (2024), "*Transportation Management: How to Optimise Multimodal Freight Transport*", <https://blog.rocket-consulting.com/rocket-sap-supply-chain-news-and-blog/transportation-management-how-to-optimise-multimodal-freight-transport>
- [144] Rodrigue J. P., (2020), "*The geography of transport systems*", (5th ed.), Routledge, ISBN-13: 978-0367364632;
- [145] romania-insider.com, (2016), "*Transport sector generates over 13% of Romania's greenhouse gas emissions*", <https://www.romania-insider.com/transport-sector-generates-over-13-of-romanias-greenhouse-gas-emissions>

- [146] Roșca E., Raicu Ș., Roșca M.A., Ruscă F.V., (2014), “*Risks and Reliability Assessment in Maritime Port Logistics*”, Advanced Materials Research, Vol. 1036 (2014), pp. 963 – 968, disponibil la: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1036.963>
- [147] Roșca E., Rusca F., Carlan V., Ștefanov O., Dinu O., Rusca A., (2025), “*Assessing the influence of equipment reliability over the activity inside maritime container terminals through discrete-event simulation*”, Systems, vol. 12, <https://doi.org/10.3390/systems13030213>
- [148] Rouhieh B., (2016), “*Modeling and optimizing route choice for multimodal transportation networks*”, Concordia University, Montreal, Canada, <https://spectrum.library.concordia.ca>;
- [149] Ruijters E., Stoelinga M., (2015), “*Fault tree analysis: A survey of the state-of-the-art in modeling, analysis and tools*”, Computer Science Review, 15, 29–62. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2015.03.001>
- [150] Ruscă F.V., Roșca E., Azmat M., Perez-Acebo H., Ruscă A., Olteanu S., (2020), “*Modeling the transit of containers through quay buffer storage zone in maritime terminals*”, ZIRP 2020, International Scientific Conference, pp. 213 – 227;
- [151] Russo F., Vitetta A., (2006), “*Risk evaluation in a transportation system*”, International Journal of Sustainable Development and Planning, 1(2) 170–191;
- [152] Sahner R. A., Trivedi K. S., Puliafito A., (1996), “*Performance and Reliability Analysis of Computer Systems: An Example-Based Approach Using the SHARPE Software Package*”, Kluwer Academic Publishers;
- [153] Sánchez-Beaskoetxea J., Basterretxea-Iribar I., Sotés I., Maruri M., (2021), “*Human error in marine accidents: Is the crew normally to blame?*”, Maritime Transport Research, 2, <https://doi.org/10.1016/j.martra.2021.100016>
- [154] Saporì E., Sciutto M., Sciutto G., (2014), “*A quantitative approach to risk management in critical infrastructures*”, Transportation Research Procedia, 3, 740–749, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.10.053>
- [155] Sauerberg M., Luy M., (2024), “*Standardized mean age at death (MADstd): Exploring its potential as a measure of human longevity*”, Volume 50, Art. 30, pp. 871-898, disponibil online la: <https://www.demographic-research.org/Volumes/Vol50/30/>
- [156] Schruben L.W., (1982), “*Detecting Initialization Bias in Simulation Experiments*”, Opns. Res. 30, pp. 56 - 590, <https://doi.org/10.1287/opre.30.3.569>
- [157] Schruben L.W., Singh H., Tierney L., (1983), “*Optimal Tests for Initialization Bias in Simulation Output*”, Vol. 31(6), pp. 1167-1178, <https://doi.org/10.1287/opre.31.6.11>
- [158] Sellner K., Vyslouzilova D., (2019), “*Identification and solution of safety and operational-economic risks in railway transport*”, Sciendo, CzOTO, Vol. 2, Issue 1, pp. 112-120;
- [159] Sigalingging E. D., Erlina Muda I., Herubawa D. A., (2024), “*Application of the Simple Additive Weighting Method in the Performance Assessment of Energy Companies Based on ROA and DAR*”, Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 102(22), 8066–8073;
- [160] Soekkha H. M., (1997), “*Aviation safety: human factors, system engineering, flight operations*”, Economics strategies management, VSP;
- [161] Soares C. G., Teixeira A. P., (2001), “*Risk assessment in maritime transportation. Reliability engineering & system safety*”, 74(3), 299-309, [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(01\)00082-3](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(01)00082-3)
- [162] Steenken D., Vob S., Stahlbock R., (2004), “*Container terminal operation and operations research – a classification and literature review*”, OR Spectrum, 26(1), 3–49;
- [163] Ștefan D. S., Popescu M., Lunțaru C. M., Suciu A., Belcu M., Ionescu L. E., Popescu M., Iancu P., Ștefan M., (2022), “*Comparative study of useful compounds extracted from Lophanthus anisatus by Green Extraction*”, Molecules, 27, 7737. <https://doi.org/10.3390/molecules27227737>

- [164] Ștefanov N. O., Popa C., Mickiene R., (2025), “*Case study of risk assessment in maritime operations applying the Fault Tree Analysis Method*”, Research journal TRANSPORT published by Vilnius Gediminas Technical University, 12 pagini, ID STRAB-2024-0043.R1
- [165] Ștefanov N.O., Rauca L., (2023), “*Environmental Risk Assessment in the Background of Armed Conflict in the Black Sea Area*”, Transnav, The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Volume XX, Number X, DOI: 10.12716/1001.16.XX.XX.;
- [166] Ștefanov N.O., Agape A.G., Stoenciu D., Berescu C., Bocanete P., (2022), “*Study of the risk analysis associated with multimodal maritime transport*”, Technium, Vol. 4, Issue 4, pp. 32-36, ISSN: 2668-778X;
- [167] Ștefanov N.O., Apetroaei G.M., (2021), “*Considerations for Risk Mitigation in the International Carriage of Goods by Sea*”, SEA-CONF 2021, Proceedings of the International Scientific Conference, pp. 384-391, ISSN: 2457-144X;
- [168] Ștefanov N.O., Agape A.G., Nita C.M., Bocanete P., (2021), “*Multimodal Transport - Risk and Environment*”, Technium, Vol. 3, Issue 11, pp. 40-45, ISSN: 2668-778X;
- [169] Stermann J., (2021), “*System dynamics modeling for freight transport*”, International Journal of Transport Economics, 48(1), 27-49, <https://doi.org/10.1007/s11495-021-09837-5>
- [170] Stornes P., (2015), “*Risk influencing factors in maritime accidents An exploratory statistical analysis of the Norwegian maritime Authority incident*”, Trondheim: Studio Apertuna, NTNU Social Research;
- [171] Szaciłło L., Krześniak M., Jasiński D., Valis D., (2022), “*The use of the risk matrix method for assessing the risk of implementing rail freight services*”, Archives of Transport, 64(4), 89-106., <https://doi.org/10.5604/01.3001.0016.1185>
- [172] Tabatabaei S. M., (2024), “*Sustainable supply chain design: integrating risk management, resilient multimodal transportation and production strategic*”, SSRN Preprint, https://ssrn.com/abstract_id=5003804
- [173] Taherdoost H., Madanchian M., (2023), “*Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts*”, Encyclopedia, 3(1), 77–87. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia3010006>
- [174] Târcolea C., Filipoiu A., Bontaș S., (1989), “*Tehnici actuale în teoria fiabilității-Aplicații actuale în teoria fiabilității*”, Editura Științifică și Enciclopedică, Bucharest, pp. 87-137;
- [175] Timofeeva O., Sannikov A., Stepanenko M., Balashova T., (2023), “*Modification of the Bellman–Ford Algorithm for Finding the Optimal Route in Multilayer Network Structures*”, Computation, 11(4), 74. <https://doi.org/10.3390/computation11040074>
- [176] Triantaphyllou E., (2000), “*Multi-criteria decision making methods: A comparative study*”, Springer, <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3157-6>
- [177] Tummala R., Schoenherr T., (2011), “*Assessing and managing risks using the Supply Chain Risk Management Process (SCRMP). Supply Chain Management: An International Journal*”, 16(6), 474–483. <https://doi.org/10.1108/13598541111171165>
- [178] Uddin M., Huynh N., (2016), “*Routing model for multicommodity freight in an intermodal network under disruptions*”, Transportation Research Record, 2548(1), 71-80;
- [179] United Nations Conference on Trade and Development, (2023), “*Maritime Security Report*”, UNCTAD Publishing;
- [180] United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD), (2023), “*Trade and Development Report 2023: Growth, debt, and climate – Realigning the global financial architecture*”, <https://unctad.org/publication/trade-and-development-report-2023>

- [181] United States Department of Transportation, (2024), *"Black Sea and Sea of Azov – Military Combat Operations"*, Maritime Advisory 2024-012. <https://www.maritime.dot.gov/msci/2024-012-black-sea-and-sea-azov-military-combat-operations>
- [182] Uniunea Națională a Transportatorilor Rutieri din România (UNTRR), (2016), *"Transportul multimodal - secțiunea transport intermodal"*, București, https://www.untrr.ro/media/wysiwyg/legis_3/Anexa_3_MPT_octombrie_2016.pdf
- [183] Uniunea Națională a Transportatorilor Rutieri din România (UNTRR), [https://www.untrr.ro/Raportul UNTRR 2022](https://www.untrr.ro/Raportul_UNTRR_2022)
- [184] U.S. Nuclear Regulatory Commission, (1981), *"Fault Tree Handbook: A Basic Reference Guide for Fault Tree Analysis (NUREG-0492)"*, Washington, DC: U.S. Government Printing Office;
- [185] Vafaei N., Ribeiro R. A., Camarinha-Matos L. M., (2022), *"Normalization techniques in multi-criteria decision making: A comparative analysis"*, Expert Systems with Applications, 193, 116479. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116479>
- [186] Water Journal, (2024), Volume X, Elvetia, Basel, <https://www.mdpi.com/journal/water>
- [187] Wallace R. B., Murthy D. N. P., (2000), *"Reliability: Modeling, prediction, and optimization"*, pg. 96, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118150481>
- [188] Worldbank, (2023), <https://blogs.worldbank.org/en/transport/why-ports-matter-global-economy>
- [189] World Bank, (2023), *"Connecting to Compete 2023: The Logistics Performance Index and Its Indicators"*, Washington D.C.: The World Bank Group, <https://lpi.worldbank.org>
- [190] World Maritime University, (2023), *"Raport anual 2023"*, <https://www.wmu.se/docs/annual-report-2023>
- [191] World Highways, (2022), *"Romania's DEx12 Craiova–Pitești expressway: construction progress and traffic impact"*, <https://www.globalhighways.com/wh12/news/romania-dex12-craiova-pitesti-target>
- [192] Yadav R., Kanchan R., Shah H., (2023), *"Fault Tree Analysis for Robust Design. Inventions"*, 9(1), Article 19, <https://doi.org/10.3390/inventions9010019>
- [193] Yilma H., (2014), *"Challenges and prospects of traffic management practices of Addis Ababa City Administration"*, Addis Ababa University Repository, <http://etd.aau.edu.et/handle/123456789/10166>
- [194] Zajac M., Świeboda J., Manea S.-A., (2017), *"Preliminary Risk Analysis in Intermodal Transport"*, Academia.edu, https://www.academia.edu/35840763/Preliminary_Risk_Analysis_in_Intermodal_Transport
- [195] Zhao D., Ou Y., Shafiei S., Grzybowska, H., Qin, A. K., Tan, G., Li, M., (2022), *"Traffic disruption modelling with mode shift in multi-modal networks"*, <https://arxiv.org/abs>