



Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București

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

REZUMAT

TEZĂ DE DOCTORAT

**CONTRIBUTIONS TO THE MERCHANT VESSELS'
PERFORMANCE TO REDUCE THE
ENVIRONMENTAL IMPACT IN PORTS**

**CONTRIBUȚII ASUPRA PERFORMANȚEI NAVELOR
COMERCIALE ȘI IMPACTUL ASUPRA MEDIULUI ÎN
PORTURI**

Conducător de doctorat:

Prof. univ. mat. ec. Doina - Eufrosina CARP

Doctorand:

Ing. Livia IONICHI (RAUCA)

BUCUREȘTI 2026

CUPRINS

	Pagină teză	Pagină rezumat
ABREVIERI	3	4
LISTĂ TABELE	5	
LISTĂ FIGURI ȘI ANEXE	8	
 CAPITOL 1 INTRODUCERE	 10	 6
1.1 Literatura de specialitate	10	
1.2 Necesitatea și oportunitatea tezei	15	6
1.3 Definiții	18	
1.4 Obiectivele și structura tezei	19	7
 CAPITOL 2 REGLEMENTĂRI PRIVIND REDUCEREA IMPACTULUI NAVELOR ASUPRA MEDIULUI	 21	 8
2.1 Impactul transportului maritim asupra mediului	21	8
2.2 Caracteristicile emisiilor din transportul maritim și reglementările aplicabile	23	9
2.2.1 Zone de control ale emisiilor	23	
2.2.2 Tipuri și caracteristici ale emisiilor din transportul maritim	25	9
2.3 Cerințe internaționale și europene în ceea ce privește reducerea emisiilor provenite din transportul maritim	27	10
2.3.1 Abordarea IMO pentru reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră	27	10
2.3.2 Reglementări europene de mediu	29	10
2.3.3 Indicatori de eficiență energetică elaborați de IMO și inițiative europene	32	
2.3.4 Impactul CII asupra operării navelor	36	
2.4 Impactul reglementărilor asupra transportului maritim	37	
2.4.1 Sisteme IMO & EU de colectare a datelor de la nave	37	
2.4.2 Principalii factori care influențează decarbonizarea navelor	39	
2.4.3 Provocările principalelor opțiuni de decarbonizare	41	
 CAPITOL 3 METODE ȘI TEHNOLOGII PENTRU ÎMBUNĂTĂȚIREA EFICIENȚEI NAVELOR	 43	 11
3.1 Componente de performanță	43	
3.2 Măsurile de eficiență energetică	46	11
3.2.1 Măsurile de gestionare a energiei și implementare la bordul navelor	46	11
3.2.2 Sisteme de monitorizare și management ale eficienței energetice la bordul navelor	50	
3.3 Tehnologii viitoare	50	12
3.3.1 Tehnologii pentru nave cu emisii zero	51	12

3.3.2 Analiza combustibililor alternativi aplicabili sectorului maritim	55	12
3.3.3 Impactul tehnologiilor de combustibil asupra proiectării navelor	61	
3.3.4 Analiza tehnologiilor de la bordul navei și investițiile aferente	62	
3.4 Analiza cost-eficiență a opțiunilor actuale de decarbonizare	64	14
CAPITOL 4 SISTEMUL COLD IRONING, O MASURĂ PENTRU SUSTENABILITATEA PORTURILOR ȘI A NAVELOR	74	17
4.1 Prezentare generală a sistemului Cold Ironing	74	17
4.1.1 Particularitățile sistemului Cold Ironing. Descrierea caracteristicilor tehnice, funcționale și tehnologice	75	
4.1.2 Opțiuni de electricitate de la țărm (SSE)	79	
4.2 Starea actuală a sistemului Cold Ironing în porturile europene	81	
4.3 Portul Constanța	82	
4.3.1 Locația și caracteristicile portului	82	
4.3.2 Stadiul actual al proiectelor de sustenabilitate din Portul Constanța	83	
4.3.3 Sistemul Cold Ironing în Portul Constanța	85	
4.4 Evaluarea sistemului Cold Ironing în Portul Constanța	87	17
4.4.1 Evaluarea emisiilor și a costurilor combustibilului și a energiei electrice	87	18
4.4.1.1 Evaluarea poluării aerului de la nave	87	18
4.4.1.2 Evaluarea costurilor navelor atunci când folosesc combustibili fosili vs. Cold Ironing	93	
4.4.1.3 Performanța navelor și beneficiile în reducerea impactului asupra mediului	96	
4.4.2 Costuri de implementare a sistemului Cold Ironing	98	20
4.4.2.1 Costuri de implementare Cold Ironing în port	99	
4.4.2.2 Costuri de implementare Cold Ironing la nava	100	
4.4.2.3 Analiza costurilor aferente navelor în diferite profiluri operaționale	104	20
4.4.3 Potențialul Portului Constanța de a produce energie verde	110	
4.4.3.1 Tehnologii verzi	110	
4.4.3.2 Evaluarea opțiunilor de energie verde pentru Portul Constanța utilizând tehnici decizionale	114	
CAPITOL 5 EFICIENȚA PORTUARĂ ȘI IMPACTUL ASUPRA PERFORMANȚEI NAVELOR ȘI A MEDIULUI	121	22
5.1 Introducere	121	22
5.2 Modelul de alocarea a danelor care include sistemul Cold Ironing	122	23
5.2.1 Descrierea și obiectivele modelului	122	23
5.2.2 Metodologie	127	25
5.2.3 Ordonanțarea activităților modelului propus	141	
5.2.4 Aplicarea modelului în Portul Constanța	145	29
5.3 Rezultate și concluzii	147	29

CAPITOL 6 CONCLUZII	158	33
6.1 Considerații finale	158	33
6.2 Contribuții originale	160	35
6.3 Direcții viitoare de cercetare	161	36
BIBLIOGRAFIE	162	38
LISTA LUCRĂRILOR PUBLICATE ȘI PARTICIPĂRI LA CONFERINȚE	171	
ANEXE	172	

ABREVIERI

AFC	<i>Alkaline Fuel Cell</i>
AIS	<i>Automatic Identification System</i>
ALB	<i>Allocated Berth</i>
AMP	<i>Alternative Maritime Power</i>
CAPEX	<i>CAPital EXPeditures</i>
CCS	<i>Carbon Capture and Storage</i>
CI	<i>Cold Ironing</i>
CIB	<i>Cold Ironing Berth</i>
CII	<i>Carbon Intensity Indicator</i>
DMFC	<i>Direct Methanol Fuel Cell</i>
DNV	<i>Det Norske Veritas</i>
ECA	<i>Emission Control Area</i>
EIAPP	<i>Engine International Air Pollution Prevention</i>
EU ETS	<i>European Union Emission Trading System</i>
EUA	<i>European Allowances</i>
FOC	<i>Fuel Oil Consumption</i>
GHG	<i>Greenhouse Gases</i>
GloMEEP	<i>Global Maritime Energy Efficiency Partnerships Project</i>
HFO	<i>Heavy Fuel Oil</i>
HVO	<i>Hydrotreated Vegetable Oil</i>
HVSC	<i>High Voltage Shore Connection</i>
IAPP	<i>International Air Pollution Certificate</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ICE	<i>Internal Combustion Engine</i>
IMO	<i>International Maritime Organization</i>
LBG	<i>Liquefied BioGas</i>
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i>
LNG	<i>Liquefied Natural Gas</i>
LOA	<i>Length OverAll</i>
LPG	<i>Liquefied Petroleum Gas</i>
LSFO	<i>Low Sulphur Fuel Oil</i>
LVSC	<i>Low Voltage Shore Connection</i>
MBM	<i>Market-Based Measures</i>
MCFC	<i>Molten Carbonate Fuel Cell</i>
MDO	<i>Marine Diesel Oil</i>
MGO	<i>Marine Gas Oil</i>
MSC	<i>Maritime Safety Committee</i>
MRV	<i>Monitoring, Reporting, and Verification</i>
NECA	<i>Nitrogen Emission Control Area</i>
OPEX	<i>OPerating EXPenses</i>
OPS	<i>Onshore Power Supply</i>
PAFC	<i>Phosphoric Acid Fuel Cell</i>

PEMFC	<i>Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell</i>
SBC	<i>Shore-side Battery Charging</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SCP	<i>Shore/berth Connection Point</i>
SCR	<i>Selective Catalytic Reduction</i>
SCS	<i>Shore Connection Substation</i>
SECA	<i>Sulphur Emission Control Area</i>
SEEMP	<i>Ship Energy Efficiency Management Plan</i>
SOFC	<i>Solid Oxide Fuel Cell</i>
SPB	<i>Shoreside Power Bank</i>
SSE	<i>Shore Side Electricity</i>
TEN-T	<i>Trans-European Transport Network</i>
UGC	<i>Underground Cable</i>
VLSFO	<i>Very Low Sulphur Fuel Oil</i>

CAPITOL 1

INTRODUCERE

Activitatea maritimă este lider în sectorul transporturilor, cu peste 12 miliarde de tone de marfă transportată în 2023, comparativ cu 4.3 miliarde de tone în 1990 ([United Nations, 2024](#)), fiind în același timp una dintre cele mai accesibile și rentabile mijloace de transfer de mărfuri la nivel mondial. În ultimii 20 de ani, statisticile Organizației Maritime Internaționale (IMO) au confirmat faptul că transportul maritim are o contribuție importantă asupra poluării, în special asupra poluării cu GHG (gaze cu efect de seră). Transportul maritim reprezintă aproximativ 3% din emisiile globale de CO₂.

La nivel mondial, peste 98% din combustibilii utilizați la nave au fost reprezentați de combustibili fosili convenționali, cum ar fi combustibil greu (HFO), combustibil cu conținut scăzut de sulf (LSFO) sau motorină maritimă (MGO) ([DNV, 2024](#)).

1.2 Necesitatea și oportunitatea tezei

Sectorul maritim trebuie să exploreze utilizarea combustibililor alternativi, să adapteze infrastructura existentă, să realizeze investiții și să promoveze formarea profesională în domeniul noilor tehnologii. În același timp, este necesară pregătirea și adaptarea personalului de la țărm și de la bord, precum și a șantierelor navale, specialiștilor și profesioniștilor din industrie. Promovarea navelor eficiente energetic poate contribui semnificativ la reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră, în contextul actual al schimbărilor climatice și al conștientizării tot mai accentuate a necesității unor acțiuni urgente.

Navele sunt componenta principală a sectorului maritim, iar performanța lor este direct legată de protecția mediului. Parametrii care definesc performanța navelor includ:

- consumul de combustibil;
- eficiența voiajului, reflectată prin timpii de navigație și de staționare;
- managementul vitezei navei;
- eficiența voiajului în ceea ce privește optimizarea rutei și parametrii de stabilitate;
- gradul de utilizare a capacității de încărcare;
- integrarea tehnologică, integritatea tehnică și fiabilitatea;
- performanța economică, incluzând costurile operaționale și rentabilitatea investiției;
- conformitatea cu standardele internaționale;
- nivelul emisiilor poluante și măsurile de control pentru reducerea acestora etc.

Opțiunile sunt limitate pentru navele existente și se concentrează în principal pe măsuri operaționale și soluții de modernizare. În plus, combustibilii cu emisii reduse de carbon, cum ar fi gaz natural lichefiat (LNG) și metanol, pot fi opțiuni pe termen scurt și mediu. Diverse tehnologii sunt în curs de dezvoltare pentru navele noi, iar cercetarea se îndreaptă în direcția tehnologiilor bazate pe hidrogen, amoniac, baterii și energie nucleară, în funcție de tipul și dimensiunea navei.

Datele disponibile indică faptul că, în 2024, aproximativ 27% dintre navele în construcție vor utiliza combustibili alternativi, marcând un progres semnificativ către tranziția spre surse de energie mai curate și către un transport maritim mai eficient ([DNV, 2024](#)).

Porturile din întreaga lume au oportunitatea de a reduce emisiile navelor aflate la acostare. Operarea și implementarea sistemului Cold Ironing la scară globală se află în fazele inițiale și

reprezintă un pas important pentru dezvoltarea portuară și pentru eficiența navelor. Pe lângă facilitatea oferită de porturi prin instalarea unui sistem de tip „Cold Ironing”, porturile pot contribui la creșterea performanței navelor prin reducerea costurilor și emisiilor în timp ce navele staționează la ancoră, așteptând eliberarea danei (Park & Suh, 2019). Porturile pot utiliza oportunitatea unui sistem de alimentare cu energie electrică de la țărm pentru a utiliza un model de alocare a danelor adaptat sistemului Cold Ironing, astfel încât navele să utilizeze o dană liberă dotată cu sistem de tip Cold Ironing pentru a aștepta până când dana desemnată devine disponibilă.

1.4 Obiectivele și structura tezei

Obiectivele tezei sunt:

1. Să evalueze impactul operării navelor asupra mediului în contextul reglementărilor internaționale și europene actuale.
2. Să evalueze măsurile operaționale și tehnice aplicabile pentru reducerea consumului de combustibil și minimizarea emisiilor generate de nave.
3. Să examineze disponibilitatea și provocările tehnologiilor viitoare și ale combustibililor alternativi, precum și capacitatea acestora de a reduce emisiile, și rentabilitatea opțiunilor de decarbonizare.
4. Să evalueze sistemul de alimentare cu energie electrică de la țărm (Cold Ironing) atât la bordul navelor, cât și în instalațiile portuare, cu accent deosebit pe Portul Constanța, pentru a determina eficacitatea acestuia în reducerea poluării provenite de la navele acostate, asigurând în același timp respectarea reglementărilor de mediu.
5. Să analizeze impactul modelelor de așteptare asupra eficienței danelor și a timpilor de așteptare în Portul Constanța, cu scopul de a identifica soluții pentru reducerea congestiei.
6. Să dezvolte și să valideze un model de alocare a danelor care să integreze cerințele sistemului Cold Ironing, cu scopul de a diminua costurile și emisiile în timp ce navele așteaptă eliberarea danei desemnate.

Prezenta teză este organizată în șase capitole. În afară de „Introducere”, celelalte capitole sunt următoarele:

Capitolul 2. Autoarea examinează reglementările internaționale și europene referitoare la reducerea impactului asupra mediului al navelor. Sunt prezentați indicatorii de eficiență energetică ai IMO și inițiativele EU, împreună cu un studiu privind reglementarea CII. Sunt analizați principalii factori și provocări ale soluțiilor de decarbonizare, precum și influența acestora asupra activităților maritime.

Capitolul 3. Autoarea investighează acțiuni pentru creșterea eficienței navelor în vederea respectării standardelor de mediu. Sunt luate în considerare noi tehnologii și combustibili pentru viitorul sistemelor de propulsie, împreună cu evaluarea strategiilor tehnico-economice și politice. Există diverse măsuri de eficiență energetică, iar potențialul lor depinde de planul de management al fiecărei companii. Unele dintre măsuri pot fi utilizate împreună, iar reducerea potențială a emisiilor de gaze cu efect de seră poate fi semnificativă. Este prezentat un studiu privind rentabilitatea opțiunilor actuale de decarbonizare.

Capitolul 4 se concentrează pe sistemul de electricitate la cheu. Sistemul Cold Ironing din Portul Constanța este analizat din punctul de vedere al costurilor și al fezabilității reducerii emisiilor. Prin instalarea electricității la cheu, emisiile ar scădea substanțial și ar sprijini navele

în îmbunătățirea eficienței energetice. Chiar dacă emisiile la dană sunt zero, prin producerea energiei sunt eliberați diferiți poluanți. Dintre alternativele verzi studiate pentru Portul Constanța, potențialul viabil este reprezentat de ferme eoliene offshore și panouri solare, iar evaluarea și selectarea opțiunii de energie verde arată că panourile solare sunt opțiunea preferată pentru port.

Capitolul 5. Autoarea propune un model de alocare a danelor care încorporează sistemul Cold Ironing ca soluție pentru navele care așteaptă eliberarea danei desemnate. Acest capitol își propune să dezvolte un algoritm care să reducă timpul petrecut la ancoră de către nave, permițându-le să acosteze la o dană liberă care dispune de o conexiune compatibilă la electricitatea de la cheu. Atât emisiile, cât și costurile vor scădea dacă navele așteaptă eliberarea danei alocate la o dană echipată cu Cold Ironing, dană disponibilă și compatibilă. Această secțiune evaluează eficiența danelor și reducerea timpilor de așteptare prin aplicarea diferitelor modele de așteptare.

Capitolul 6. Autoarea trage concluziile finale și prezintă rezultatele tezei, pe baza studiilor de caz prezentate. Contribuțiile personale și direcțiile pentru cercetări viitoare sunt, de asemenea, prezentate în această parte.

CAPITOL 2

REGLEMENTĂRI PRIVIND REDUCEREA IMPACTULUI NAVELOR ASUPRA MEDIULUI

2.1 Impactul transportului maritim asupra mediului

IMO își propune să atingă obiectivul de emisii nete zero până în jurul anului 2050, având ca referință anul 2008 (IMO, 2023). Figura 2.2 prezintă obiectivele IMO pentru reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră provenite din transportul maritim.

În iulie 2021, Comisia Europeană a stabilit obiectivul reducerii emisiilor de gaze cu efect de seră cu 55% până în 2030, precum și atingerea neutralității climatice până în 2050 (European Commission, 2023).

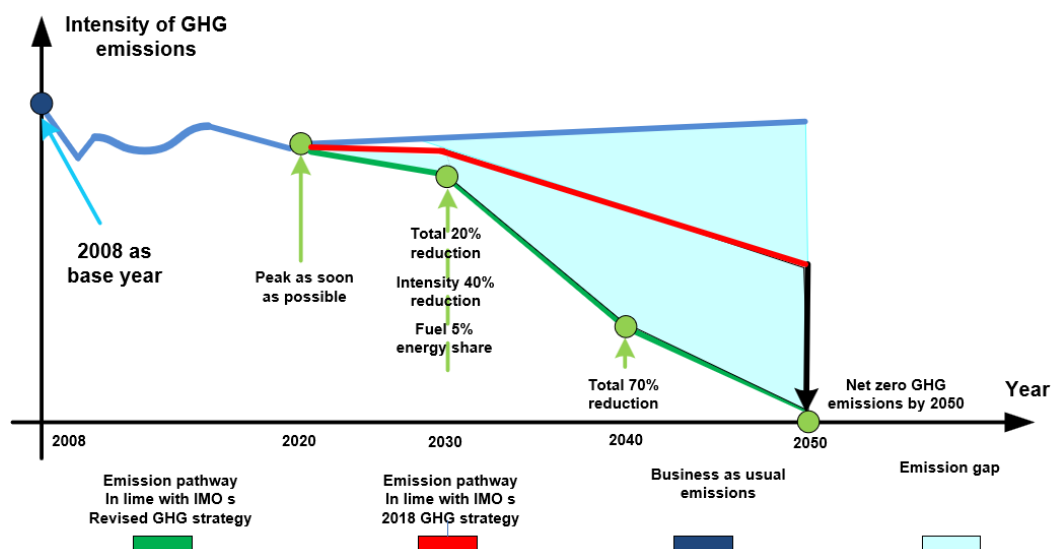


Figura 2.2 Obiectivele IMO pentru reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră provenite din transportul maritim

Sursa: (DNV, 2023)

2.2 Caracteristicile emisiilor din transportul maritim și reglementările aplicabile

2.2.2 Tipuri și caracteristici ale emisiilor din transportul maritim

Principalele emisii generate de activitățile de transport maritim includ atât gaze cu efect de seră, cât și poluanți atmosferici. Principalele tipuri de poluanți, caracteristicile acestora și impactul asupra sănătății umane și a mediului sunt prezentate în Tabelul 2.7.

Tabel 2.7 Tipurile, caracteristicile și principalele efecte ale emisiilor din transportului maritim

Emisii	Caracteristici	Efecte principale
Azot (N_2)	Rămâne în mare parte nereacționat în procesul de ardere. O cantitate mică va participa la reacția chimică, rezultând oxizi de azot. Formează 78% din aerul de admisie	Protoxidul de azot (N_2O) este un gaz cu efect de seră care poate fi transformat în NO_2 și NO , care au un efect important asupra stratului de ozon
Oxigen (O_2)	Formează 21% din aerul de admisie și este parțial transformat în procesul de ardere	
Dioxid de carbon (CO_2)	Este componenta principală a oricărui proces de ardere a combustibililor fosili, iar cantitatea este determinată de conținutul de carbon al combustibilului	CO_2 este în prezent principala preocupare dintre toți poluanții, ducând la încălzirea globală și având un impact major asupra vieții marine
Oxizi de azot (NO_x)	NO_x depinde de tipul motorului (motoarele cu turație mică au emisii de NO_x mai mari decât motoarele cu turație medie) și de tipul de combustibil	NO_x este responsabil pentru probleme respiratorii, provocând ploii acide cu efecte dăunătoare asupra vegetației
Oxizi de sulf (SO_x)	Generarea SO_x depinde de conținutul de sulf al combustibilului utilizat. În timpul arderii, sulful reacționează cu oxigenul, formând dioxid de sulf (SO_2). Reducerea emisiilor de SO_x poate fi realizată fie prin utilizarea combustibililor cu conținut scăzut de sulf, fie prin implementarea sistemelor de scrubbere	SO_x este responsabil pentru afecțiuni respiratorii la oameni și afectarea vegetației, prin formarea ploilor acide. Concentrațiile scăzute pot provoca iritații oculare, dureri în piept și boli pulmonare. Concentrațiile mari pot provoca chiar moartea
Hidrocarburi (HC)	Acesta se formează din combustibil parțial ars, iar principalele emisii vor rezulta din arderea incompletă	HC poate cauza probleme de sănătate, de la efecte ușoare, cum ar fi iritația ochilor, până la efecte severe, cum ar fi toxicitate ridicată
Monoxid de carbon (CO)	Emisiile depind de sarcina și performanța motorului și sunt direct dependente de procesul de ardere care are loc și de cantitatea de aer furnizată pentru ardere	CO este incolor, inodor și fără gust și poate provoca chiar moartea la concentrații mari
Particule în suspensie (PM)	Reprezintă o combinație de componente organice și anorganice din elementele de carbon nearse sau parțial arse ale combustibilului	Emisiile de PM sunt responsabile pentru o cantitate considerabilă de cancer pulmonar. Dimensiunea PM determină efectul asupra sănătății umane
Ozon (O_3)	Stratul de ozon este afectat de substanțe precum agenții frigorigeni halogenați și gazele propulsoare	Când stratul de ozon este afectat, radiațiile ultraviolete B provoacă leziuni ale pielii și ochilor

Sursa: (Kristensen, 2012)

Impactul nociv al emisiilor a determinat instituțiile internaționale și europene să impună limite emisiilor de gaze cu efect de seră provenite din transportul maritim. Prin urmare, organizațiile maritime și-au stabilit obiective ambițioase pentru reducerea emisiilor provenite din operarea navelor (Figura 2.2).

2.3 Cerințe internaționale și europene în ceea ce privește reducerea emisiilor provenite din transportul maritim

2.3.1 Abordarea IMO pentru reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră

Măsurile IMO pe termen scurt, mediu și lung sunt prezentate în tabelul 2.8.

Tabel 2.8 Măsuri IMO pe termen scurt, mediu și lung

Plan	Măsuri
Termen scurt	<p>Îmbunătățirea eficienței energetice (EEDI și SEEMP)</p> <p>Dezvoltarea de soluții tehnice și operaționale de eficiență energetică</p> <p>Utilizarea instrumentelor de optimizare și reducere a vitezei</p> <p>Dezvoltări ale activităților portuare și logistice pentru a încuraja reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră provenite din transportul maritim</p> <p>Inițierea cercetării asupra tehnologiilor și combustibililor alternativi</p>
Termen mediu	<p>Inovarea și dezvoltarea soluțiilor tehnologice pentru combustibili cu emisii scăzute de carbon, precum și fără conținut de carbon</p> <p>Consolidarea măsurilor de creștere a eficienței energetice la nivel operațional și tehnic</p>
Termen lung	<p>Progresul cercetărilor și utilizarea combustibililor fără conținut de carbon în vederea atingerii obiectivelor de decarbonizare completă a transportului maritim până în anul 2050</p> <p>Promovarea și accelerarea adoptării tehnologiilor inovatoare pentru reducerea emisiilor</p>

Sursa: (IMO, 2020)

Pentru a atinge obiectivele ambițioase, IMO subliniază importanța inovării tehnice în vederea realizării Țintelor pe termen mediu și lung, precum și necesitatea dezvoltării și adoptării de combustibili și resurse alternative pentru alimentarea și operarea navelor.

2.3.2 Reglementări europene de mediu

Reglementările europene privind mediul care au impact asupra transportului maritim sunt:

a) Sistemul european de comercializare a certificatelor de emisii (EU ETS). Regulamentul funcționează într-o abordare de tip „cap and trade”, un „cap”, reprezentând o limită a emisiilor de gaze cu efect de seră care pot fi eliberate de un echipament.

b) FuelEU Maritime face parte din pachetul „Fit for 55” și își propune să reducă emisiile din transportul maritim prin utilizarea de combustibili regenerabili, precum și cei cu conținut scăzut de carbon.

c) Combustibil cu conținut scăzut de sulf. Conform (European Union, 2005), începând cu 1 ianuarie 2010, navele trebuie să folosească combustibili cu un conținut de sulf mai mic de 0,1%, atât pe căile navigabile interioare cât și în perioada în care sunt acostate în porturile europene.

d) Electricitate de la țărm. Printre soluțiile pentru reducerea poluării și limitarea încălzirii globale, (European Union, 2016) accentuează utilizarea energiei electrice de la țărm, în timp ce navele sunt acostate.

CAPITOL 3

METODE ȘI TEHNOLOGII PENTRU ÎMBUNĂTĂȚIREA EFICIENȚEI NAVELOR

3.2 Măsurile de eficiență energetică

3.2.1 Măsurile de gestionare a energiei și implementarea la bordul navelor

Tabelul 3.2 prezintă potențialele soluții operaționale și tehnice care pot fi aplicate la bordul navei.

Tabel 3.2 Măsurile de eficiență energetică și economiile potențiale asociate

Domeniu	Categorie	Măsurile	Potențial de creștere a eficienței energetice	Potențială reducere a GHG
Măsurile operaționale	Managemen- tul voiajului	Planificarea voiajului		1-10%
		Optimizarea rutei în funcție de condițiile meteorologice		1-10%
		Optimizarea asietei și a pescajului		1-10%
		Optimizarea pilotului automat	1-10%	1-10%
		Curățarea corpului navei		5-25%
		Vopsirea corpului navei		2-20%
		Gestionarea energiei la bord		1-10%
		Eficiența sistemului de guvernare		5-15%
	Strategii de flotă	Respectarea orarului navelor		2-50%
		Optimizarea voiajelor flotei	1-15%	5-50%
		Gestionarea flotei, logistică		5-50%
Măsurile tehnice	Corpul navei și eficiența elicei	Optimizarea formei corpului navei		Până la 75%
		Proiectarea elicei		2-20%
		Sisteme antivegetative		5-15%
		Dispozitive de îmbunătățire a propulsiei	1-8%	5-25%
		Sistem de lubrifiere cu aer		5-15%
	Managemen- tul sistemelor de propulsie	Sistem de răcire optimizat		1-10%
		Scrubber de evacuare		5-15%
		Recircularea gazelor de eșapament	1-5%	SOx-98%
		Reducere catalitică selectivă		NOx-35%
		Recuperarea căldurii reziduale		NOx-35%
		Tehnologii inovative		1-10%
	Combustibili alternativi	LNG, LPG		1-10%
		Hidrogen, Amoniac, Metanol		35%
		Biocombustibil	1-15%	80-100%
		E-combustibili		90%
	Tehnologii alternative	Complet electric		100%
		Sistem cu vele sau sisteme solare	1-8%	50-90%
		Propulsie asistată de vânt		50-90%
		Propulsie nucleară		50-90%

Sursa: (IMO, 2022b)

3.3 Tehnologii viitoare

În prezent, majoritatea combustibililor utilizați în transportul maritim sunt combustibili fosili, care sunt responsabili pentru formarea a 1036 tone de CO₂ pe an (Law et al., 2022). Una dintre cele mai viabile soluții este utilizarea combustibililor alternativi, fie cu conținut scăzut de carbon, fie neutri din punct de vedere al conținutului de carbon. Figura 3.3 prezintă numărul de nave aflate în operare, precum și în construcție, în funcție de tipul de combustibil utilizat.

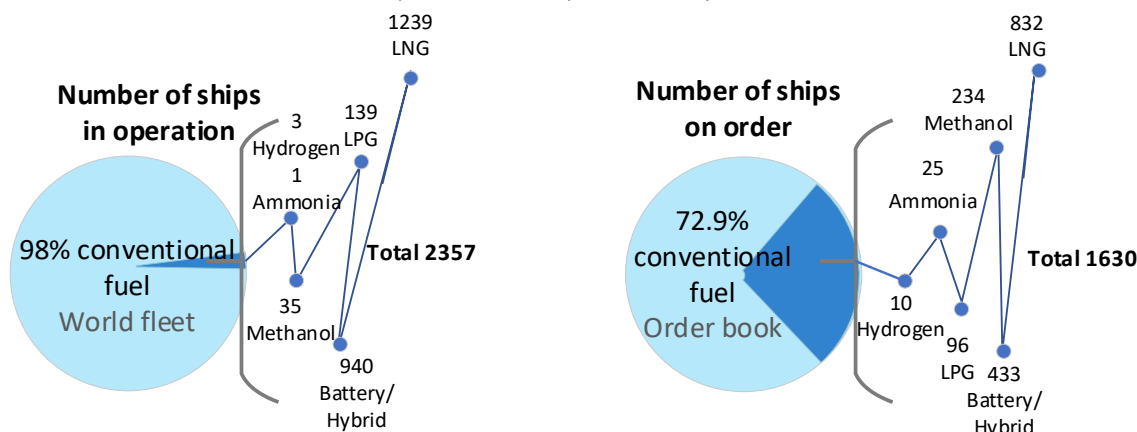


Figura 3.3 Adoptarea combustibililor alternativi în funcție de numărul de nave, atât aflate în operare cât și în construcție, conform raportului din luna iunie 2024

Sursa: (DNV, 2024)

3.3.1 Tehnologii pentru nave cu emisii zero

Energia regenerabilă poate fi utilizată direct pentru propulsia navei sau poate fi utilizată pentru a produce combustibili verzi (Mallouppas & Yfantis, 2021). Tehnologiile regenerabile sunt (Issa et al., 2022; Mallouppas & Yfantis, 2021):

1. Vânt – vele, rotoare, zmee, turbine eoliene.
2. Energie solară – fotovoltaice solare.
3. Energie nucleară.
4. Tehnologie de captare și stocare a carbonului.
5. Pile de combustie.
6. Baterii și supercondensatoare.

3.3.2 Analiza combustibililor alternativi aplicabili sectorului maritim

În prezent, 98% dintre combustibilii utilizați pentru propulsia navelor aflate în serviciu sunt combustibili convenționali, în timp ce doar 2% reprezintă combustibili alternativi. Transportul maritim a început deja să adopte aceste soluții alternative, considerate în prezent cele mai viabile pentru atingerea obiectivelor de decarbonizare.

Combustibilii alternativi pot fi clasificați în următoarele categorii, în funcție de sursa de producție (DNV, 2023), Figura 3.5:

- Combustibili gri, combustibili alternativi produși din surse convenționale, cum ar fi cărbunele, care nu reduc considerabil emisiile de CO₂;
- Combustibili albaștri, derivați din gaze naturale cu CCS (Captarea și Stocarea Carbonului) - reduc în mod semnificativ emisiile de CO₂;

- Biocombustibili, derivați din surse de bioenergie, cum ar fi biogazul, biodiesel-ul - au emisii scăzute de CO₂ și un conținut scăzut de sulf;
- Combustibili verzi sau electroliti, derivați din energie electrică regenerabilă - tehnologie considerată cu emisii zero de CO₂.

Grey	Blue	Green
Conventional / Fossil fuels (HFO, LNG, LPG, Methanol)		
Hydrogen	Hydrogen Produced from conventional sources gas/coal with CCS	Hydrogen Produced from renewable electricity
Ammonia	Ammonia Produced from conventional sources gas/coal with CCS	Ammonia Produced from renewable electricity
	e-fuels Produced with CO ₂ from CCS from different combustion process	e-fuels Produced with CO ₂ directly from the atmosphere
		Biofuels

Figura 3.5 Tipuri de combustibili alternativi și surse de producție

Sursa: Autorul

Cerințele specifice privind energia și stocarea combustibililor alternativi sunt prezentate în Tabelul 3.4.

Tabel 3.4 Caracteristicile generale ale combustibililor alternativi disponibili

Combustibili alternativi	Putere calorifică (MJ/kg)	Cerințe de stocare la bord	Capacitate de stocare necesară (m ³)
MGO	42.7	Lichid la temperatura mediului ambiant	1000
LNG	50.0	-163°C	1602
LPG	46.4	-43°C	1527
Metanol	22	Lichid la temperatura mediului ambiant	2272
Etanol	26.0	Lichid la temperatura mediului ambiant	1693
Biodiesel	38-46	Lichid la temperatura mediului ambiant	
Electricitate	-	Densitate mare de energie	-
Hidrogen	120-140	350-700 bar (gaz); -253°C (lichid)	4223
Amoniac	18.6	21°C sub 8.8 bar; -33°C atm presiune	3121

Sursa: (Reusser & Osses, 2021)

Se observă că, dintre combustibilii alternativi, doar metanolul și biocombustibilii sunt stocați la temperatura mediului și la presiune standard. Depozitarea celorlalți combustibili alternativi la temperaturi foarte scăzute implică echipamente speciale pentru stocare, precum și aranjamente diferite ale motoarelor la bord. Navele alimentate cu combustibili alternativi care necesită stocare la temperaturi scăzute au nevoie și de un spațiu de pregătire a combustibilului, pentru a-l aduce la parametrii necesari înainte de utilizarea în motor. Răcirea tancurilor, precum și pregătirea combustibilului pentru motorul principal necesită energie suplimentară care

trebuie generată la bord. O considerație importantă o reprezintă energia specifică a combustibililor alternativi, ceea ce înseamnă că motoarele au un alt consum de combustibil față de combustibilii convenționali. Aceasta duce la o creștere a volumului tancurilor de stocare a combustibilului la bord, ceea ce are un impact direct asupra spațiului de marfă disponibil.

3.4 Analiza cost-eficiență a opțiunilor actuale de decarbonizare

Impactul economic al combustibililor alternativi este ilustrat în două studii, după cum urmează:

A. Cheltuieli de capital (CAPEX), cheltuieli operaționale (OPEX) și emisii în condițiile actuale - când nava utilizează combustibili fosili și patru alternative de decarbonizare

B. Costul spațiului de marfă pierdut atunci când nava consumă metanol și amoniac

A. Studiul calculează și analizează costurile și emisiile în diferite configurații (Tabel 3.13).

Detaliile navei sunt:

LUNGIME	302 m
DEADWEIGHT	95906 t
GROSS TONNAGE	85745
TEU	8150
PUTEREA TOTALA A MOTORULUI	64640 kW
PUTEREA MOTORULUI AUXILIAR	1416 kW
CONSUM ZILNIC MEDIU DE ENERGIE (STAȚIONARE)	1400 kWh
CONSUM ZILNIC MEDIU DE ENERGIE (MARȘ)	14000 kWh

Rezumatul profilului operațional este prezentat în Tabelul 3.11.

Tabel 3.11 Sinteza rezultatelor navei luate în calcul pentru un an pe ruta analizată

Viteza medie (knots)	Ore în marș	Ore în staționare	Distanța (NM)	VLSFO consum (t)	MDO consum (t)
15.7	6839.5	1992.6	107463	21775.7	2910.3

Sursa: Autorul

Consumul detaliat de combustibil bazat pe timpii de staționare și de marș, precum și pe tipul de combustibil, se regăsesc în Tabelul 3.12.

Tabel 3.12 Distribuția consumului de combustibil în funcție de timpul de marș și timpul de staționare, precum și de tipul de combustibil (t)

Condiția	VLSFO	MDO
Marș	21023.4	2412.3
Staționare	752.3	498

Sursa: Autorul

Profilul operațional al navei este:

- Staționare (Acostare/Ancoră/Derivă) 83 Zile/an (23%);
- Acostare 67 Zile/an (18%);
- Timp de marș 282 Zile/an (77%).

Calculul va returna:

- Detalierea CAPEX/OPEX;
- Cantitatea de emisii.

pentru condiția actuală și în cele patru alternative de decarbonizare, conform tabelului 3.13:

Tabel 3.13 Alternative de decarbonizare

Alternative	Tipul metodei de decarbonizare la cheu	Măsura de prevenire la bord	Trecerea la combustibil alternativ
1	Electricitate la cheu	Vopsea de protecție	Metanol
2	Electricitate la cheu	Vopsea de protecție	Biocombustibil
3	Electricitate la cheu	Vopsea de protecție	Hidrogen
4		Vopsea de protecție	Electric

Sursa: Autorul

CAPEX, OPEX și rezultatele emisiilor sunt ilustrate grafic în figurile 3.8, 3.9 și 3.10.



Figura 3.8 CAPEX și OPEX pentru condiția actuală și alternative de decarbonizare (Milioane EUR)

Sursa: Autorul

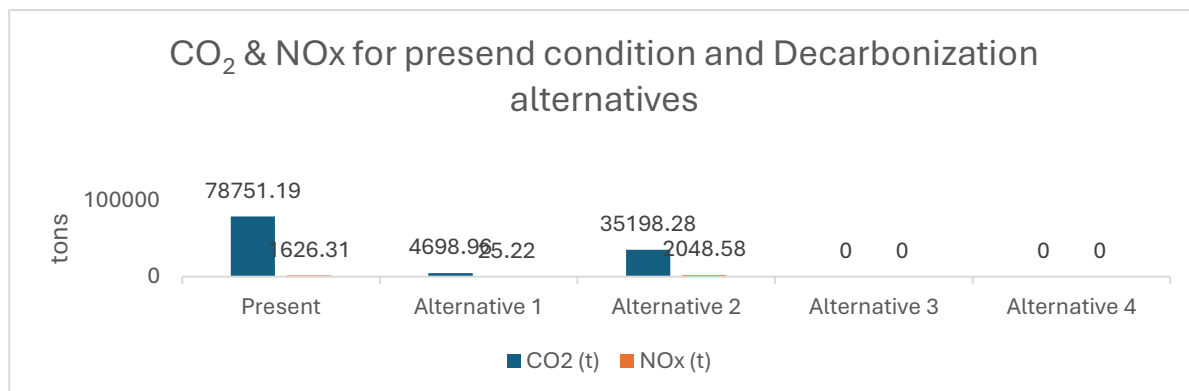


Figura 3.9 CO₂ și NO_x pentru condiția actuală și alternative de decarbonizare (t)

Sursa: Autorul

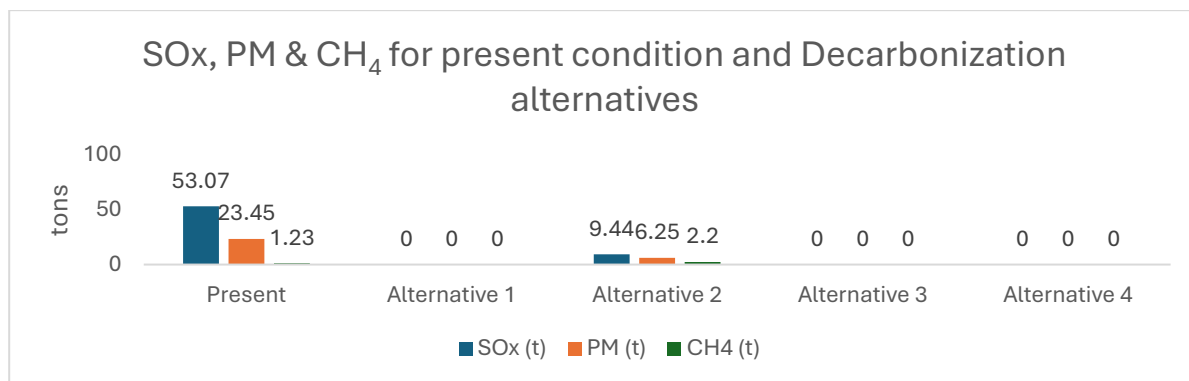


Figura 3.10 SO_x, PM și CH₄ pentru condiția actuală și alternative de decarbonizare (t)

Sursa: Autorul

Concluzii

Utilizarea combustibililor alternativi reprezintă o abordare viabilă și aplicabilă în decarbonizarea transportului maritim. Cu toate acestea, tranziția la combustibili alternativi vine cu un cost semnificativ pentru armator. Concluziile care reies din această cercetare sunt:

1. Opțiunea considerată pentru aplicare la bord (vopseaua de protecție) poate reduce consumul de combustibil și emisiile cu până la 20% (a se vedea tabelul 3.2). Cold Ironing este o soluție matură și gata de implementare pentru navele acostate, iar cheltuielile operaționale (OPEX) aduc economii importante.
2. CAPEX - Dacă pentru metanol este necesară modernizarea motorului, pentru biocombustibili nu sunt necesare modificări ale motorului, deoarece biocombustibilii pot fi amestecați cu combustibili fosili. Pentru hidrogen și electric, pe lângă noul design al motorului, capacitățile tancurilor de combustibil necesită modificări majore de proiectare în designul navei.
3. Analiza arată că, deși cheltuielile de capital pentru soluțiile pe bază de hidrogen și electricitate sunt ridicate, costurile operaționale rămân similare celor asociate combustibililor fosili, cu potențial de diminuare în deceniile următoare.
4. Deși unii combustibili alternativi au atins deja un anumit nivel de maturitate, utilizarea lor la scară globală rămâne în fază inițială, din cauza incompatibilităților tehnice, a reglementărilor de mediu, a costurilor ridicate, a problemelor de infrastructură și a necesității de competențe și formare specifice pentru navigatori.

B. Acest studiu utilizează aceleași caracteristici ale navei ca în studiul A. Acest studiu estimează costul spațiului de marfă pierdut atunci când o navă container utilizează metanol sau amoniac drept combustibil. Pierderea de spațiu de marfă afectează în mod semnificativ potențialul de câștig al navei pe întreaga sa durată de viață.

Rezultatele sunt prezentate în Tabelul 3.29.

Tabel 3.29 Costul spațiului de marfă pierdut pentru o navă container de 8150 TEU (EUR)

Combustibil	Costul spațiului de marfă pierdut (EUR)
Metanol	55655
Amoniac	75703

Sursa: (Rauca & Batrinca, 2024)

Concluzii

În ceea ce privește combustibilii alternativi, pierderea spațiului destinat transportului mărfii este o problemă care trebuie luată în considerare de către armator. Combustibilii alternativi au densități energetice diferite în comparație cu combustibilii fosili; prin urmare, necesită mai mult spațiu pentru tancurile de combustibil. Rezultatele sunt:

1. Costul pierderii spațiului de încărcare poate crește substanțial odată cu creșterea dimensiunii navei, suma este semnificativ mai mare pentru combustibilii alternativi cu densitate energetică mai mică.
2. Indiferent dacă armatorul alege o abordare cu o singură oprire sau cu două opriri pentru alimentare cu combustibil, armatorii trebuie să determine frecvența alimentării în funcție de ruta navei și să efectueze o analiză amănunțită a capacității tancurilor de combustibil.

3. Locația tancurilor de combustibili alternativi la bordul navelor este un alt factor care trebuie luat în considerare, deoarece poate reduce și mai mult spațiul destinat mărfii.
4. Pe parcursul existenței sale, pierderea capacității de încărcare are un efect major asupra potențialului de câștig al navei. Armatorii trebuie să evalueze toate opțiunile atunci când selectează un combustibil alternativ, în funcție de următoarele: frecvența alimentării cu combustibil; evaluare financiară, comparând reducerile potențiale de costuri cu pierderile financiare generate de scăderea capacității de încărcare; secvența portuară și facilitățile de alimentare pentru a permite posibilitatea efectuării alimentării de mai mult de două ori pe parcursul unui voiaj; accesibilitatea combustibilului pe termen lung; durata de viață proiectată a navei.

CAPITOL 4

SISTEMUL COLD IRONING, O MASURĂ PENTRU SUSTENABILITATEA PORTURILOR ȘI A NAVELOR

4.1 Prezentare generală a sistemului Cold Ironing

Electricitatea de la țărm (SSE), Cold Ironing (CI), alimentarea cu energie electrică onshore (OPS) sau energia maritimă alternativă (AMP) furnizează energie electrică navelor în timp ce sunt acostate la cheu, folosind instalații de la țărm.

În timp ce navele sunt acostate, energia necesară funcționării motoarelor auxiliare este furnizată de alimentarea cu energie electrică de la țărm. Motoarele, care în mod normal consumă combustibil pentru a furniza energia electrică necesară tuturor activităților operaționale, sunt acum conectate la rețeaua electrică de la țărm. Aceasta este o facilitate esențială oferită de porturi, deoarece elimină emisiile nocive de gaze cu efect de seră provenite de la nave în timp ce se află la dană. Pe lângă reducerea emisiilor, alte avantaje includ reducerea zgomotului și a vibrațiilor, îmbunătățirea vizibilității în port și, în final, creșterea siguranței personalului portuar.

4.4 Evaluarea sistemului Cold Ironing în Portul Constanța

Examinarea se va concentra asupra sistemului Cold Ironing din Portul Constanța și analizează implementarea acestui proiect din perspectiva emisiilor. Vor fi investigate următoarele dane (Figura 4.4):

- 114 – Terminal vrac;
- 121 și 123 – Terminal containere.



Figura 4.4 Danele 114, 121&123 din Portul Constanța

Sursa: Marine Traffic; Autorul

4.4.1 Evaluarea emisiilor și a costurilor combustibilului și energiei electrice

4.4.1.1 Evaluarea poluării aerului la nave

Acest studiu compară emisiile navelor care utilizează combustibili fosili cu emisiile generate de producția de energie pentru utilizarea în sistemul Cold Ironing. Vor fi analizate navele care au acostat la danele 114 - Terminalul Vrac și danele 121 și 123 de la Terminalul Container, în perioada 2021-2023. Figurile 4.5 și 4.6 prezintă cantitățile de emisii și consumul de combustibil de la navele acostate la danele 114, 121 și 123 în perioada 2021-2023.

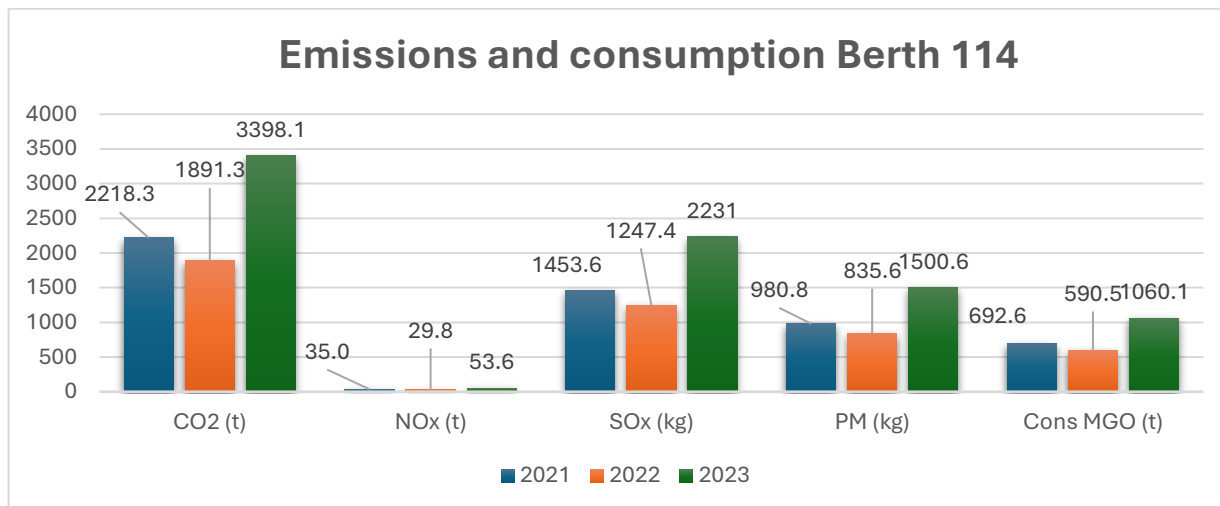


Figura 4.5 Emisii și consum de combustibil la dana 114, 2021-2023

Sursa: Autorul

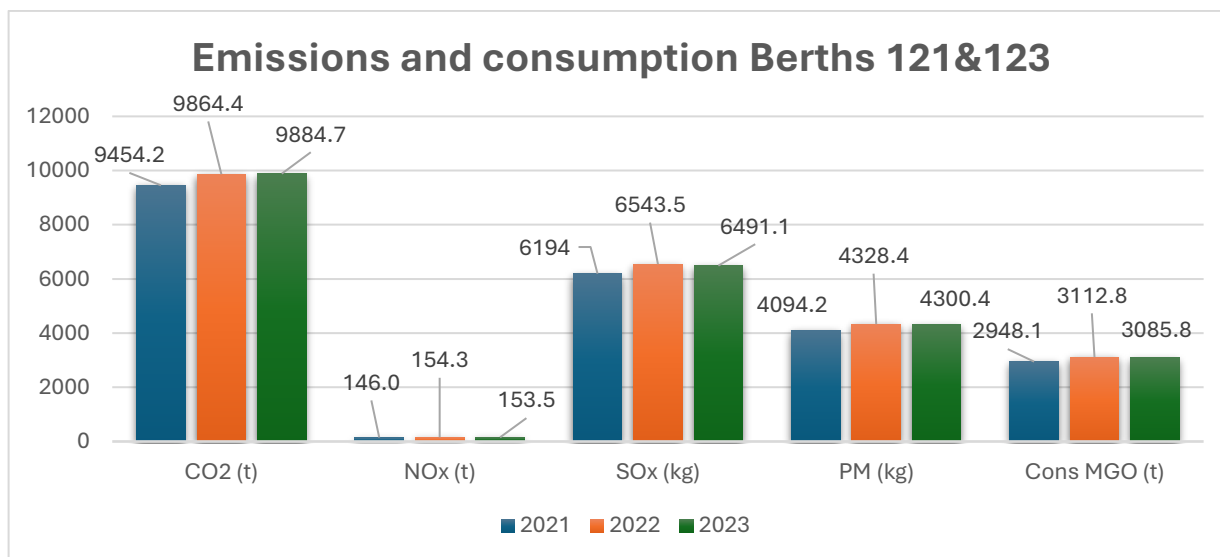


Figura 4.6 Emisii și consum de combustibil la danele 121&123, 2021-2023

Sursa: Autorul

În continuare, se vor calcula emisiile atunci când se utilizează energia electrică de la țărm. Chiar dacă energia electrică în sine nu generează poluare, vor exista emisii rezultate în urma producției de energie electrică. Reducerea emisiilor prin utilizarea energiei electrice de la țărm în Portul Constanța la danele 114, 121 și 123 pentru anii 2021-2023 este prezentată în Figurile 4.7 și 4.8.

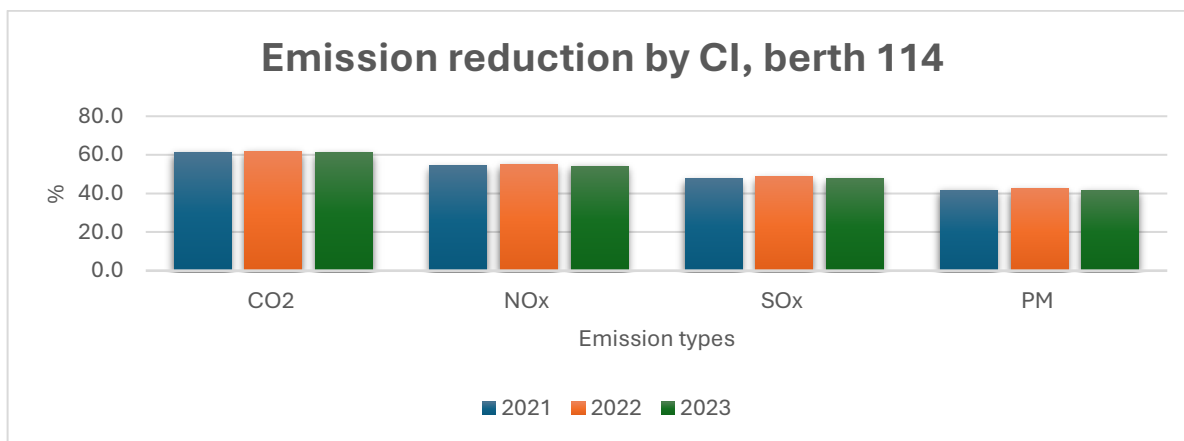


Figura 4.7 Reducerea emisiilor prin folosirea Cold Ironing, dana 114, 2021-2023 (%)
Sursa: Autorul

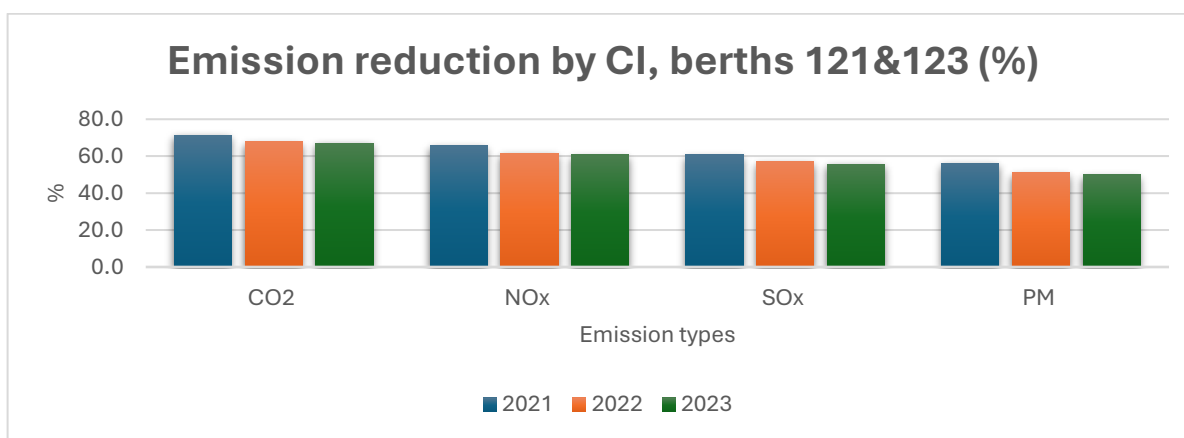


Figura 4.8 Reducerea emisiilor prin folosirea Cold Ironing, danele 121&123, 2021-2023 (%)
Sursa: Autorul

Concluzii

Traficul navelor a crescut semnificativ în ambele terminale în 2023, comparativ cu anii precedenți. Tendințele arată că numărul navelor va crește, ceea ce va duce la o creștere a consumului de combustibil în timpul staționării în port, prin urmare, emisiile vor crește cu efecte nocive asupra populației. Cantitatea medie de emisii de CO₂ este de 12000 de tone pe an, iar consumul de combustibil în timpul staționării în port este de peste 3700 de tone pe an.

Sistemul Cold Ironing oferă posibilitatea utilizării unei alternative de alimentare cu energie electrică de la țărm în Portul Constanța. Danele studiate vor permite navelor acostate să fie conectate la energia electrică de la țărm, iar consecința va fi utilizarea energiei electrice pentru alimentarea navelor, în locul combustibililor fosili. Beneficiile sistemului Cold Ironing sunt numeroase; cu toate acestea, cel mai important avantaj va fi absența poluării în terminalele și danele unde este instalat. Acest fapt va duce la o creștere a calității aerului în zona portuară și în vecinătatea portului și la o creștere a calității muncii atât pentru personalul portuar, cât și pentru cel al navei. Chiar dacă energia electrică are zero emisii atunci când este utilizată pentru alimentarea navelor, producția de energie electrică nu este lipsită de poluanți. Calculele arată o scădere substanțială a emisiilor totale, de la producție până la utilizarea la nave, cu o medie de 60%. Cantitatea de emisii poate fi redusă și mai mult dacă energia electrică este produsă din surse regenerabile.

4.4.2 Costuri de implementare a sistemului Cold Ironing

4.4.2.3 Evaluarea costurilor aferente navelor în diferite profiluri operaționale

Următorul studiu evaluează costurile asociate unei rute pentru Nava B (vrachier) și Nava D (portcontainer), având capacități de încărcare similare (Nava B – 114000 DWT și Nava D – 101000 DWT). Studiul se concentrează pe analiza costului combustibilului convențional, în situația în care navele folosesc doar combustibil pe întreaga durată a voiajului, comparativ cu situația când navele sunt conectate la rețeaua electrică de la țărm în porturile europene. Studiul calculează EU ETS și FuelEU Maritime pe durata unui an pentru ambele nave, apoi calculează costurile totale în diferite configurații, luând în considerare și costurile de instalare ale sistemului Cold Ironing la bordul navei. Compararea unei nave portcontainer cu o navă tip vrachier de dimensiuni similare sau cu o capacitate de încărcare comparabilă evidențiază modul în care tipul navei și profilul operațional (proiectarea motorului, viteza și cererea de energie, ruta) influențează emisiile, chiar și atunci când capacitatea de transport este similară.

Consumul navelor și profilurile operaționale ale navelor sunt prezentate în tabelele 4.25 și 4.26. Staționare reprezintă orice situație în care nava nu este în marș, ceea ce înseamnă ca nava este fie la ancoră, fie în derivă, fie acostată la cheu.

Tabel 4.25 Consumul de combustibil în funcție de timpii de staționare și marș și tipul de combustibil pentru Nava B (t)

Condiția	HFO	VLSFO	MGO
Marș	4255	1537	458
Staționare	0	388	422

Sursa: Autorul

Profilul operațional al navei B este:

- Staționare 148 zile/an (41%);
- Acostare 44 zile/an (12%);
- Marș 217 zile/an (59%).

Tabel 4.26 Consumul de combustibil în funcție de timpii de staționare și marș și tipul de combustibil pentru Nava D (t)

Condiția	VLSFO	MGO
Marș	21023.4	2412.3
Staționare	752.3	804

Sursa: Autorul

Profilul operațional al navei D este:

- Staționare 83 zile/an (23%);
- Acostare 67 zile/an (18%);
- Marș 282 zile/an (77%).

Presupunând că jumătate din timpul total de acostare este în porturile EU, consumul de combustibil în timp ce este acostată în porturile EU este redat în Tabelul 4.27.

Tabel 4.27 Durata staționării în port și consumul de combustibil pentru nava B și pentru nava D în timp ce sunt acostate în porturi EU

Nava	Staționare în port (zile)	MGO consum în port (t)
Nava B	22	110
Nava D	34	306

Sursa: Autorul

Rezultatele sunt ilustrate în Figura 4.11 și Figura 4.12.

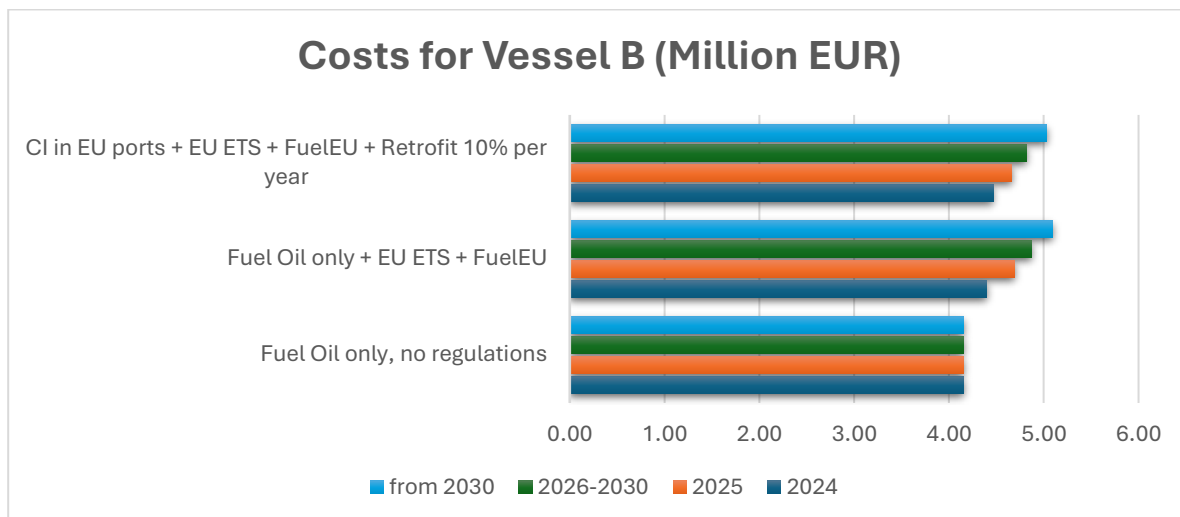


Figura 4.11 Costuri pentru nava B (Milioane EUR)

Sursa: Autorul

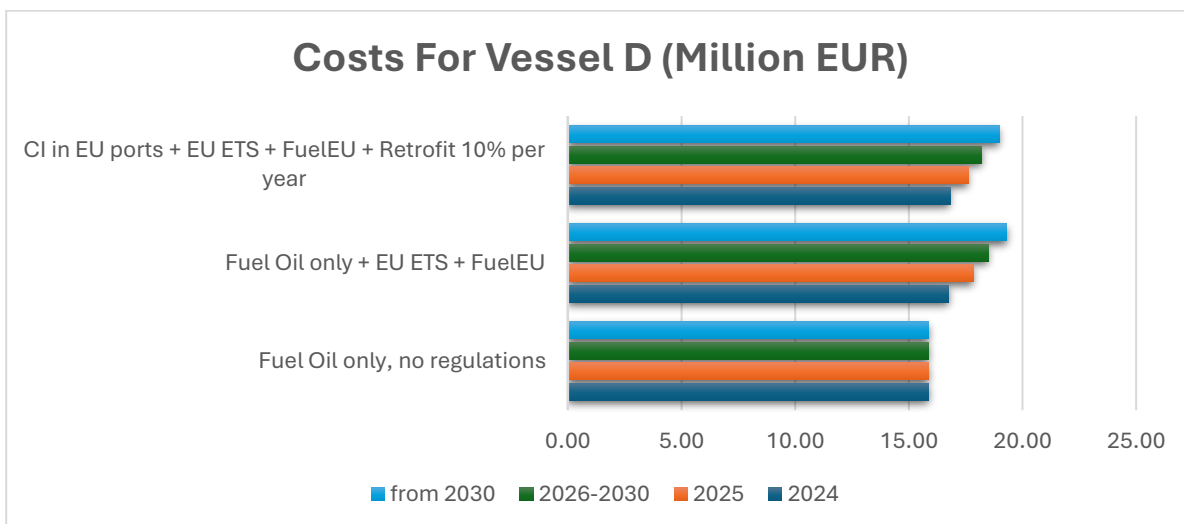


Figura 4.12 Costuri pentru nava D (Milioane EUR)

Sursa: Autorul

Concluzii

Studiul a analizat o rută pe o perioadă de un an din perspectiva a două nave, o navă portcontainer și cealaltă o navă vrachier, ambele având capacități de încărcare similare. Navele au profiluri operaționale diferite, vrachierele având timpi de staționare mai lungi, atât la ancoră, cât și la dană, în comparație cu navele container, datorită diferitelor tipuri de operațiuni de transport marfă și a echipamentelor necesare în port. Se presupune că navele sunt acostate în porturile EU jumătate din timpul total de acostare dintr-un an, iar combustibilul utilizat în porturile EU este MGO, cu un conținut de sulf de 0,1%. Pe lângă costurile EU ETS și FuelEU Maritime, armatorii vor acoperi costurile de modernizare ale navei pentru instalarea sistemului Cold Ironing. Studiul a considerat că amortizarea costurilor pentru sistemul Cold Ironing se va desfășura pe o perioadă de 10 ani. Concluziile sunt:

1. Din 2025, armatorii au costuri mai mari asociate cu noile reglementări maritime EU ETS și FuelEU Maritime. Cold Ironing ar putea fi o soluție, dar reducerea emisiilor se realizează doar în port, atunci când navele sunt acostate.
2. Pentru a utiliza sistemul CI în porturi, navele existente trebuie modernizate. În funcție de tipul și dimensiunea navei, costurile de modernizare sunt semnificative. Presupunând costurile de modernizare vor fi amortizate pe o perioadă de 10 ani, acest lucru va crește costurile operaționale totale cu peste 13%.
3. Emisiile de CO₂ vor scădea cu mai puțin de 3% pentru fiecare navă, atunci când se utilizează CI în porturile EU, în timp ce costurile totale vor crește cu 17% în medie, comparativ cu situația în care nu există reglementări.
4. Tehnologia CI poate reduce costurile și emisiile, însă navele portcontainer, prin natura operațiunilor lor de transport marfă și infrastructura portuară, au o staționare scurtă în port, în medie de o zi. Pentru celelalte tipuri de nave, cum ar fi vrachierele, unde staționare în port este mai lungă, tehnologia CI poate avea un impact mai mare asupra costurilor finale.
5. Noile reglementări ale EU și creșterea semnificativă a costurilor în apele EU ar putea impune armatorilor și navlositorilor să caute porturi mai convenabile în afara EU pentru a opera navele. Acest lucru poate avea un impact important asupra economiei europene, deoarece marfa ar putea fi transferată către alte mijloace de transport, crescând timpul de transfer, costurile și poluarea.
6. Calculele arată că emisiile din port sunt reduse la zero, deoarece energia electrică nu are emisii. Acest fapt va duce la o creștere a calității aerului în zona portuară.

CAPITOL 5

EFICIENȚA PORTUARĂ ȘI IMPACTUL ASUPRA PERFORMANȚEI NAVELOR ȘI A MEDIULUI

5.1 Introducere

Problema alocării danelor este de o importanță majoră în activitatea portuară. Aceasta se referă la alocarea corespunzătoare a danelor navelor sosite, pentru a reduce timpii de așteptare și întârzierile și, cel mai important, pentru a reduce costurile și emisiile. O problemă tipică de alocare a danelor poate fi adaptată și remodelată într-o problemă de alocare a danelor dotate cu sistemul Cold Ironing. Aceasta înseamnă că navele, în loc să staționeze la ancoră în așteptarea unei dane libere, pot acosta la o dană liberă care are implementat acest sistem, cu condiția ca atât nava, cât și dana echipată cu tehnologia Cold Ironing să fie compatibile. Algoritmul dezvoltat pe baza problemei alocării danelor evidențiază economii importante în ceea ce privește costurile și emisiile. În acest fel, navele utilizează corespunzător facilitățile portuare și respectă reglementările de mediu.

Avantajele utilizării unei dane echipate cu tehnologia Cold Ironing în locul așteptării la ancoră înainte de a acosta la dana programată sunt:

- Reducere importantă a emisiilor. În cazul în care nava așteaptă la o dană dotată, aceasta nu folosește motoarele auxiliare pentru a produce electricitate, fiind conectată la energia furnizată de la țărm.

- Economii de costuri. În funcție de prețul energiei electrice, conectarea la energia de la țărm poate fi mai puțin costisitoare decât utilizarea combustibilului.
- Conformitate cu reglementările EU. Atunci când nava utilizează energia electrică de la țărm în locul combustibilului, aceasta este conformă cu regulamentul FuelEU Maritime.
- Reducerea penalităților impuse de legislația EU. Reglementările stabilesc un cost pentru emisiile de gaze cu efect de seră, astfel că aceste costuri vor fi diminuate.
- Îmbunătățirea ratingului CII. Prin reducerea emisiilor de CO₂, calificativul navei se va îmbunătăți, iar nava va deveni mai atractivă pentru potențialii navlositori.
- Îmbunătățirea calității aerului în port și a condițiilor de lucru pentru toate părțile implicate în operațiunile navei, de la personalul de la bord până la lucrătorii portuari.

5.2 Modelul de alocarea a danelor care include sistemul Cold Ironing

5.2.1 Descrierea modelului

Un model de alocare a danelor pentru sistemul Cold Ironing ar putea reprezenta o soluție pentru valorificarea instalațiilor de alimentare de la țărm pe care porturile vor fi obligate să le furnizeze începând cu anul 2030, conform reglementărilor europene. Având în vedere numărul ridicat de zile de așteptare ale unei nave înainte de acostare, staționarea la o dană liberă echipată cu sistem Cold Ironing constituie o oportunitate importantă atât pentru navă, cât și pentru port. În primul rând, eficiența danei este evaluată pentru a identifica metode de reducere a congestiei. Ulterior, este aplicat un model de alocare a danelor care integrează cerințele Cold Ironing, cu scopul de a diminua costurile și emisiile. Astfel, navele vor utiliza motoarele doar pentru manevrele necesare între rada portului și dana dotată cu Cold Ironing, precum și la deplasarea de la aceasta către dana alocată.

Pe durata așteptării la dana echipată cu Cold Ironing, nava va fi conectată la energia electrică de la țărm, ceea ce permite oprirea motoarelor auxiliare și utilizarea exclusivă a electricității de la mal, în locul utilizării combustibilului.

Modelul urmărește determinarea eficienței operațiunilor de escala ale navelor, având două obiective principale:

1. Analiza eficienței utilizării danelor portuare cu scopul de a reduce timpii de așteptare ai navelor. În cadrul modelului, eficiența operațională a danelor este analizată din perspectiva timpilor de așteptare și a gradului de utilizare. Durata operațiunilor de încărcare/descărcare este inclusă, însă analiza se concentrează asupra modalităților de reducere timpilor de așteptare prin aplicarea diferitelor modele de așteptare.
2. Maximizarea utilizării danelor echipate cu Cold Ironing (CI) cu scopul de a reduce costurile și emisiile.

Caracteristicile modelului sunt următoarele:

a) Evaluarea parametrilor de performanță ai sistemului este necesară pentru a analiza resursele disponibile, limitele de capacitate și timpii de așteptare ai navelor, cu scopul de a optimiza operațiunile portuare și de a utiliza eficient resursele portului în condiții variate ([Raicu et al., 2023](#)).

b) Modelul se referă la o configurație discretă a danelor, ceea ce înseamnă că fiecare navă poate acosta la o singură dană la un moment dat și nu poate utiliza mai multe dane simultan.

Cât timp o navă se află la dană, doar ea poate fi conectată la energia electrică furnizată de la țărm. Din același motiv, acostarea în dana dublă este exclusă.

c) Pentru ca o navă să poată acosta la o dană electrică (Cold Ironing Berth – CIB), este obligatorie compatibilitatea dintre sistemul de tensiune de la țărm și cel de la bord. În plus față de aceste restricții de compatibilitate, lungimea danei și adâncimea apei la dana electrică trebuie să fie corespunzătoare lungimii și pescajului navei.

d) Modelul ia în considerare condițiile meteorologice. În cazul unor condiții nefavorabile și al închiderii portului, traficul naval din interiorul zonei portuare este suspendat. Această situație avantajează navele care așteaptă deja la CIB (Cold Ironing Berth), deoarece pot utiliza energie electrică în loc să rămână la ancoră și să consume combustibil în așteptarea îmbunătățirii condițiilor hidrometeorologice. CIB reprezintă dana dotată cu sistemul Cold Ironing.

e) În situația în care portul este congestionat, iar numărul navelor aflate la rada portului depășește limita impusă de autoritățile portuare, navele care sosesc sunt instruite să își ajusteze viteza pentru a ajunge mai târziu în zona portuară. Noua viteză va permite o sosire ulterioară, astfel încât timpul de așteptare să fie minimizat. Prin reducerea vitezei, navele consumă mai puțin combustibil, ceea ce are un impact direct asupra costurilor și emisiilor.

Viteza ajustată trebuie să fie mai mare decât viteza economică a navei (a se vedea subcapitolul 1.3 pentru definiția vitezei economice). În cazul în care viteza ajustată scade sub viteza economică, navelor li se poate solicita fie să ancoreze într-o zonă exterioară special desemnată pentru operațiuni de încărcare cu barje, fie să se îndrepte către o altă dană alternativă, dacă este permis, sau, în ultimă instanță, să se îndrepte către un alt port—cel mai des întâlnit în cazul navelor de linie.

f) Disciplina de deservire la ALB (Allocated Berth) poate fi fie FIFO, fie bazată pe prioritate—în funcție de tipul de mărfuri transportate (încărcăturile de cereale au prioritate față de alte tipuri de mărfuri, datorită caracterului lor perisabil). Această prioritate nu se aplică la CIB; navele intră la dana donată cu Cold Ironing în ordinea sosirii (first-come, first-served), deoarece la CIB nu se desfășoară operațiuni de încărcare/descărcare. ALB este dana specifică alocată/desemnată pentru operațiunile de încărcare/descărcare.

g) Modelul are ca obiectiv identificarea costului minim asociat celor mai fezabile aranjamente, pe baza disponibilității danei dotate cu Cold Ironing, cu respectarea constrângerilor definite. Odată ajunse în zona portuară, în loc să aștepte la ancoră, navele sunt instruite să se îndrepte către o dană liberă echipată cu tehnologie Cold Ironing. În acest fel, navele vor aștepta la o dană echipată cu sistem Cold Ironing până când dana alocată/desemnată devine disponibilă.

Modelul va calcula costurile și emisiile navei în funcție de soluția determinată, indicând durata timpului de așteptare la ancoră, timpul de manevră de la ancoră la dana cu alimentare electrică (Cold Ironing), durata staționării la dana Cold Ironing, timpul de manevră de la dana Cold Ironing la dana desemnată, precum și durata operațiunilor de manipulare – timpul operațional la dana alocată.

Modelul ia în considerare un timp de siguranță între două nave succesive, în scopul acostării, pentru a evita situația în care două nave se intersectează la aceeași dană.

Figura 5.3 ilustrează modelul de alocare a danelor pentru Cold Ironing.

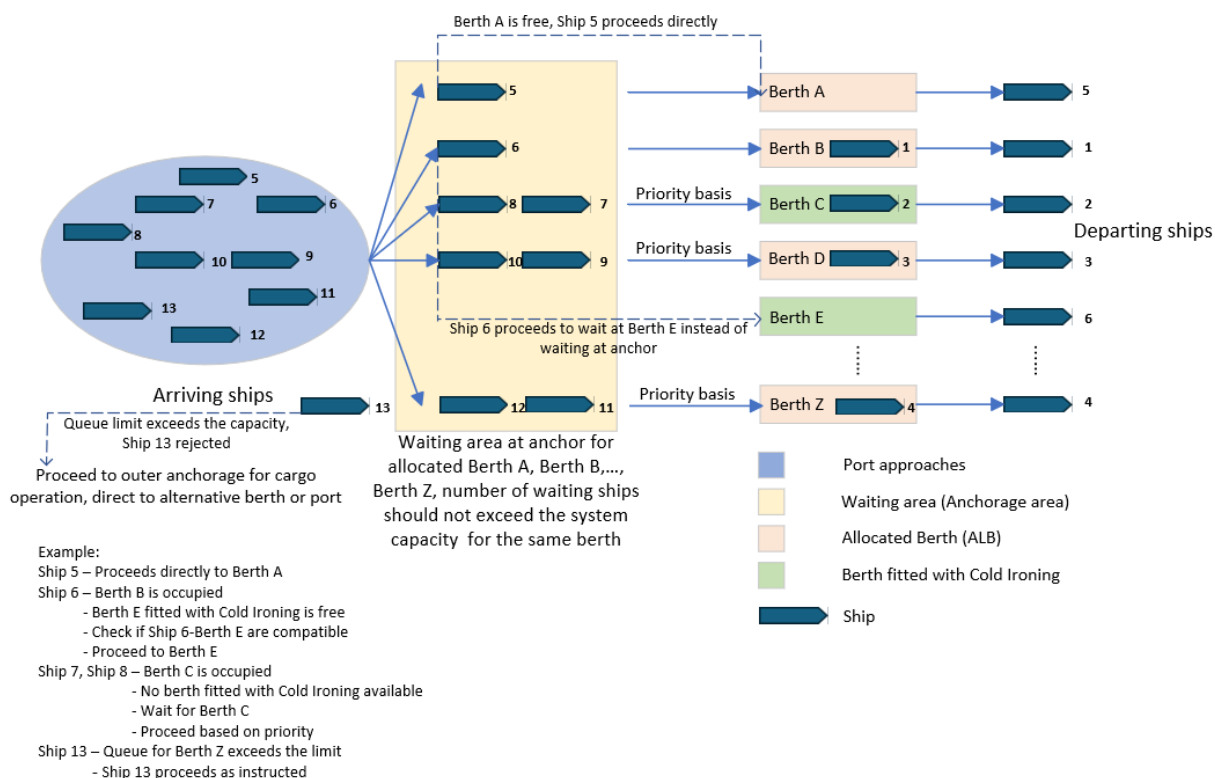


Figura 5.3 Modelul de alocare a danelor care include sistemul Cold Ironing

Sursa: Autorul

5.2.2 Metodologia

Modelul de alocare a danelor Cold Ironing este împărțit în trei secțiuni:

I) Modele de așteptare

II) Ajustarea vitezei între porturi

III) Costurile și emisiile modelului de alocare a danelor dotate cu sistemul Cold Ironing

I) Modele de așteptare

Modelele de așteptare sunt utilizate pentru o ilustrare cât mai precisă a activităților și operațiunilor portuare. Modelele aplicate sunt $M/G/1/b/\infty/FIFO$, $M/G/1/b/\infty/PQ(NP)$ și $M/G/1/b/\infty/PQ(P)$, pentru a determina gradul de încărcare și eficiența terminalelor și danelor. Modelele de așteptare permit o gestionare mai eficientă a traficului portuar; în lipsa acestora, porturile se confruntă cu congestie și timpi de așteptare prelungiți, care, în final, conduc la un consum mai ridicat de combustibil și la poluare.

Din cauza complexității sistemului cu capacitate finită, nu există o formulă simplă și specifică pentru calcularea probabilității de blocare și a timpului mediu de așteptare în coadă. Datorită neuniformității sosirilor, variației timpilor de servire și capacității finite a sistemului, probabilitatea de blocare și timpul de așteptare la ancoră au fost determinate prin simulare, urmărind evoluția sistemului în timp. Pe baza parametrilor de intrare — timpul de sosire în port, prioritatea, timpul de servire la dană și capacitatea sistemului — pot fi ulterior obținute informații relevante privind comportamentul general al sistemului.

Sumarul formulelor pentru modelele de așteptare $M/G/1/b/\infty/FIFO$, $M/G/1/b/\infty/PQ(NP)$ și $M/G/1/b/\infty/PQ(P)$, este prezentat în Tabelul 5.1.

Table 5.1 Sumarul formulelor pentru modelele de așteptare M/G/1/b/∞/FIFO, M/G/1/b/∞/PQ(NP), M/G/1/b/∞/PQ(P)

Parametru	M/G/1/b/∞/FIFO	M/G/1/b/∞/PQ(NP)	M/G/1/b/∞/PQ(P)
Utilizarea totală pentru clasa de prioritate j (ψ_j)	-	$\psi_j = \frac{\lambda_j}{\mu_j}$	$\psi_j = \frac{\lambda_j}{\mu_j}$
Utilizarea totală (ψ)	$\psi = \frac{\lambda}{\mu}$	$\psi = \sum_{i=1}^j \psi_i$	$\psi = \sum_{i=1}^j \psi_i$
Probabilitatea de blocare totală $P_{block,total}$	Prin simulare	Prin simulare	Prin simulare
Probabilitatea de blocare pe clasă ($P_{block,j}$)	-	Prin simulare	Prin simulare
Rata sosirilor efective (λ_{eff})	$\lambda_{eff} = \lambda \times (1 - P_{block})$	$\lambda_{eff,j} = \lambda_j \times (1 - P_{block,j})$	$\lambda_{eff,j} = \lambda_j \times (1 - P_{block,j})$
Timp mediu de așteptare (ω_Q)	Prin simulare	Prin simulare	Prin simulare
Timpul mediu în sistem (ω)	$\omega = \omega_Q + \frac{1}{\mu}$	$\omega_j = \omega_{Q,j} + \frac{1}{\mu_j}$	$\omega_j = \omega_{Q,j} + \frac{1}{\mu_j}$
Lungimea medie a cozii de așteptare (l_Q)	$l_Q = \lambda \times \omega_Q \times (1 - P_{block})$	$l_{Q,j} = \lambda_j \times \omega_{Q,j,PQ(NP)} \times (1 - P_{block,j})$	$l_{Q,j} = \lambda_j \times \omega_{Q,j,PQ(NP)} \times (1 - P_{block,j})$
Numărul mediu de nave în sistem (l)	$l = \lambda_{eff} \times \omega$	$l_j = l_{Q,j} + \lambda_{eff,j} \times E(S_j)$	$l_j = l_{Q,j} + \lambda_{eff,j} \times E(S_j)$
Rata de respingere (R)	$R = \lambda \times P_{block}$	$R_j = \lambda_j \times P_{block,j}$	$R_j = \lambda_j \times P_{block,j}$

Sursa: Autorul

unde:

λ – rata sosirilor pentru disciplina FIFO;

λ_j - rata sosirilor pentru clasa de prioritate j pentru disciplinele cu priorități;

λ_{eff} - rata sosirilor efective pentru disciplina FIFO;

$\lambda_{eff,j}$ - rata sosirilor efective pentru clasa de prioritate j pentru disciplinele cu priorități;

μ – numărul mediu de nave servite (rata de servire) pentru disciplina de servire FIFO;

μ_j - numărul mediu de nave servite (rata de servire) pentru clasa de prioritate j pentru disciplinele cu priorități;

ψ_j – utilizarea medie a danei pentru clasa de prioritate j pentru disciplinele cu priorități;

ψ – utilizarea totală a danei;

$E(S)$ – timpul mediu de servire pentru disciplina FIFO;

$E(S_j)$ – timpul mediu de servire pentru clasa de prioritate j pentru disciplinele cu priorități;

l_Q – lungimea medie a cozii de așteptare, numărul mediu de nave în așteptare pentru disciplina FIFO;

$l_{Q,j}$ - lungimea medie a cozii de așteptare, numărul mediu de nave în așteptare pentru clasa de prioritate j pentru disciplinele cu priorități;

l – numărul mediu de nave în așteptare și la dana ALB pentru disciplina FIFO;
 l_j – numărul mediu de nave în așteptare și la dana ALB pentru clasa de prioritate j pentru disciplinele cu priorități;
 ω_Q – timpul mediu de așteptare (hrs) pentru disciplina FIFO;
 $\omega_{Q,j}$ – timpul mediu de așteptare (hrs) pentru clasa de prioritate j pentru disciplinele cu priorități;
 ω – timpul mediu de așteptare și la dana ALB (hrs) pentru disciplina FIFO;
 ω_j – timpul mediu de așteptare și la dana ALB (hrs) pentru clasa de prioritate j pentru disciplinele cu priorități;
 $P_{block,total}$ – probabilitatea de blocare în cazul în care este depășită capacitatea sistemului pentru disciplina FIFO și probabilitatea de blocare totală în cazul disciplinelor cu priorități;
 $P_{block,j}$ – probabilitatea de blocare în cazul în care este depășită capacitatea sistemului pentru clasa de prioritate j pentru disciplinele cu priorități;
 R – rata de respingere pentru disciplina FIFO;
 R_j – rata de respingere pentru clasa de prioritate j pentru disciplinele cu priorități;
 j – clasa de prioritate $j \in \{1, 2\}$, clasa 1 sunt nave cu prioritate ridicată, clasa 2 sunt nave cu prioritate scăzută.

II) Ajustarea vitezei între porturi

O modalitate eficientă de reducere a congestiei portuare și de prevenire a blocării navelor constă în ajustarea vitezei de deplasare între porturi. La plecarea din portul anterior, nava transmite autorităților portului de destinație timpul estimat de sosire. În cazul în care se constată că portul este aglomerat și capacitatea pentru dana este depășită, nava este instruită să își reducă viteza de marș, fără a scădea sub viteza sa economică. Formulele folosite sunt prezentate de la (5.15) la (5.19).

$$\tau_s = ETA_s - ETD_s \quad [hr] \quad (5.15)$$

$$v_s = \frac{D_s}{\tau_s} \quad [knots] \quad (5.16)$$

$$v_{adj_s} = \begin{cases} \frac{D_s}{\tau_s + [(t_k + t_{1k} + t_{2k} + t_{3k} + t_{4k} + t_{5k}) - t_s]} & \text{dacă } N > (b - 1) \text{ și ALB ocupat} \\ v_s & \text{altfel} \end{cases} \quad [knots] \quad (5.17)$$

$$n\tau_s = \begin{cases} \frac{D_s}{v_{adj_s}} & \text{dacă } v_{eco_s} \leq v_{adj_s} < v_s \\ 0 & \text{altfel} \end{cases} \quad [hr] \quad (5.18)$$

$$nETA_s = ETD_s + n\tau_s \quad (5.19)$$

unde:

s – nava verificată;

ETA_s – timpul estimat de sosire al navei s ;

$nETA_s$ – noul timp estimat de sosire al navei s ;

ETD_s – timpul estimat de plecare al navei s din portul anterior;

τ_s – durata voiajului între porturi (hrs) a navei s ;
 $n\tau_s$ – noua durată a voiajului între porturi (hrs) a navei s ;
 v_s – viteza necesară între porturi (knots) a navei s ;
 v_{eco_s} – viteza economică între porturi (knots) a navei s ;
 v_{adj_s} – viteza ajustată între porturi (knots) a navei s ;
 D_s – distanța dintre porturi (nautical miles) a navei s ;
 N – numărul de nave aflate în port simultan pentru același ALB;
 b – capacitatea sistemului;
 $t_{1_k}, t_{2_k}, t_{3_k}, t_{4_k}, t_{5_k}$ - componentele de timp – la ancoră, manevră ancoră-CIB, staționare CIB, manevră CIB-ALB, operare ALB, pentru nava k ;
 t_s, t_k – timpul de sosire al navelor s și k relativ la prima nava sosită, dintr-un set de nave S ;
 k – nava care este în prezent la ALB.

III) Costurile și emisiile modelului de alocare a danelor dotate cu sistemul Cold Ironing

Pornind de la modelul clasic de alocare a danelor – bazat pe dană independentă – se integrează elementele specifice sistemului Cold Ironing cu scopul de a dezvolta un model orientat spre atingerea obiectivelor de reducerea a costurilor operaționale și diminuarea emisiilor generate de nave pe întreaga durată a escalei, de la sosire până la plecare. Modelul matematic este prezentat mai jos. Modelul calculează timpul de așteptare la ancora, timpii de manevra, de staționare în dana electrică și în dana alocată, costurile și emisiile, alegând opțiunea cu cost minim.

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{\substack{t \in T \\ q_{CIB} \in Q}} \sum_{s \in S} Cost(s, q_{CIB}, q_{ALB}, t) \quad , \forall s \in S, \forall q \in Q, \forall t \in T, T \subset \mathbb{N}^5 \\ \\ t_{3_s} \geq 36 \text{ ore} \\ compat(s, q_{CIB}) = \begin{cases} 1 & \text{dacă } compat(s_{SC}, q_{CIB_{SC}}) = 1, L_s \leq L_{q_{CIB}}, d_s \leq d_{q_{CIB}} \\ 0 & \text{altfel} \end{cases} \\ compat(s_{SC}, q_{CIB_{SC}}) = \begin{cases} 1 & \text{dacă } s_{SC} LVSC = q_{CIB_{SC}} LVSC \text{ or } s_{SC} HVSC = q_{CIB_{SC}} HVSC \\ 0 & \text{altfel} \end{cases} \\ \left(\sum_{\substack{k \in S \\ k \neq s}} \sum_{t=\alpha_s}^{\alpha_s+t_{3_s}+ST} x_{kq_{CIB_s}t} \right) = 0 \quad , compat(s, q_{CIB}) = 1, \forall s \in S \text{ fix} \\ \left(\sum_{t=\alpha_s}^{\alpha_s+t_{3_s}+ST} w_t \right) = 0 \quad , \forall s \in S \text{ fix} \\ \left(\sum_{\substack{k \in S \\ k \neq s}} \sum_{t=\alpha_s+t_{3_s}+t_{4_s}}^{\alpha_s+t_{3_s}+t_{4_s}+t_{5_s}+ST} x_{kq_{ALB_s}t} \right) = 0 \quad , \forall s \in S \text{ fix} \\ \left(\sum_{t=\alpha_s+t_{3_s}+t_{4_s}}^{\alpha_s+t_{3_s}+t_{4_s}+t_{5_s}+ST} w_t \right) = 0 \quad , \forall s \in S \text{ fix} \\ j_s \in \{1,2\}, \quad \text{ordinea priorităților 1, 2} \\ x_{sqt} \in \{0,1\}, w_t \in \{0,1\}, q \in Q, t \in T, T \subset \mathbb{N}^5 \end{array} \right.$$

unde:

$s \in S$ - nava s dintr-un set de sosiri de nave S ;

$q \in Q$ - cheu q dintr-un set de cheiuri Q ;

$t \in T$ - interval de timp t dintr-un set de intervale T ; $T = (t_1, t_2, t_3, t_4, t_5)$, $T \in \mathbb{N}^5$;

q_{ALB_s} - cheu de acostare al navei s la ALB;

q_{CIB_s} - cheu de acostare al navei s la CIB;

s_{SC} - tipul de conectare CI al navei s , LVSC sau HVSC;

d_q - adâncimea apei la cheul q (m);

d_s - pescajul navei s (m);

L_q - lungimea cheului q (m);

L_s - lungimea navei s (m);

ST - timp de siguranță între două nave la acostare (hrs), CIB sau ALB;

w - condiții meteorologice, valoarea este 1 dacă portul este închis datorită condițiilor hidro-meteorologice, altfel 0;

x_{sqst} - variabilă de decizie, ia valoarea 0 dacă nava s poate acosta la cheul q , altfel 1;

α_s - durata de timp din momentul sosirii navei s până la plecarea de la CIB (hrs); $\alpha_s = t_s + t_{1s} + t_{2s}$ și este folosită pentru simplificarea formulelor;

j_s - prioritatea navei s , bazată pe tipul mărfii transportate; $j \in \{1, 2\}$, clasa 1 sunt nave cu prioritate ridicată, clasa 2 sunt nave cu prioritate scăzută.

5.2.4 Aplicarea modelului în Portul Constanța

Modelul de alocare a danelor echipate cu sistemul Cold Ironing a fost aplicat pe un număr limitat de dane din Portul Constanța. Danele considerate pentru acest studiu sunt dedicate operării mărfurilor solide în vrac.

Prima parte a modelului calculează eficiența danelor. Pentru aceasta, au fost aplicate modelele de așteptare M/G/1/b/∞/FIFO, M/G/1/b/∞/PQ(NP) și M/G/1/b/∞/PQ(P). Aceste modele au analizat un număr de 2487 de nave care au sosit în perioada 2021–2024 în Portul Constanța. Studiul a analizat 20 de dane din Portul Constanța (Berth A – Berth T). Dintre acestea, 4 dane (Berths I, J, N și S) sunt programate să facă parte din proiectul de implementare a sistemului Cold Ironing.

În continuare, costurile și emisiile pentru modelul de alocare a danei echipate cu Cold Ironing au fost evaluate pentru 100 de nave (Ship 1 –Ship 100) care au sosit în port în primele două luni ale anului 2024 și care erau programate să acosteze la dane incluse în studiu. În cazul în care navele erau nevoite să aștepte la ancoră până când dana alocată devenea disponibilă, modelul a verificat dacă exista o dană echipată cu sistem Cold Ironing, liberă și compatibilă, care ar fi putut fi utilizată în locul așteptării la ancoră.

5.3 Rezultate și concluzii

Modelele de așteptare M/G/1/b/∞/FIFO, M/G/1/b/∞/PQ(NP) și M/G/1/b/∞/PQ(P) au determinat gradul de încărcare al danelor și nivelul de utilizare a capacității acestora. Rezultatele arată că, în prezent, danele pot satisface în mod acceptabil cerințele operaționale ale navelor acostate, astfel încât nu este necesară utilizarea unor dane suplimentare pentru a acoperi numărul de nave care sosesc. Rezultatele sunt următoarele:

- programul navelor arată că nu există uniformitate în sosiri; prin urmare, există perioade cu trafic intens și perioade fără sosiri;
- ocazional, sistemul depășește limita de capacitate impusă, iar navele care sosesc sunt respinse;
- cea mai mare probabilitate de blocare este observată în cazul modelului cu priorități, relative, în timp ce cea mai mică probabilitate de blocare este observată pentru disciplina FIFO;
- timpul mediu de așteptare pe toate danele pentru perioada studiată (2021-2024) este de 65 de ore pe navă pentru FIFO, 58 de ore pe navă pentru disciplina cu prioritate relativă și 53 de ore pe navă pentru disciplina cu prioritate absolută.

Analiza eficienței danelor în cadrul modelelor de așteptare s-a bazat pe o valoare comparativă atribuită fiecărei dane, evaluată pentru fiecare an și pentru fiecare model studiat. Studiul a evaluat eficiența danelor utilizând metoda analizei multicriteriale, pentru a obține un scor unic și comparabil, care combină diferiți parametri și le atribuie ponderi variabile în funcție de importanța lor.

Parametrii luați în considerare pentru scorul de eficiență al danei sunt:

- Utilizarea totală a sistemului (ψ);
- Rata efectivă de sosire (λ_{eff});
- Timpul mediu de așteptare la ancoră (ω_Q).

Ponderile și obiectivele parametrilor pentru scorul de eficiență al danelor sunt prezentate în Tabelul 5.4.

Tabel 5.4 Parametrii scorului de eficiență a danei, ponderi și obiective

Parametru	Pondere (u)	Obiectiv
ψ_{std}	0.4	Bazat pe o valoare ideală de utilizare de 0.7
$\lambda_{eff\ std}$	0.3	Maxim
$\omega_{Q\ std}$	0.3	Minim

Sursa: Autorul

Pe baza rezultatelor obținute pentru scorurile de eficiență, se observă următoarele:

- Cel mai eficient model de așteptare este M/G/1/b/∞/PQ(P), cu un scor mediu de 0.691, urmat de M/G/1/b/∞/PQ(NP) cu 0.682, și de M/G/1/b/∞/FIFO cu 0.671.
- Cele mai eficiente dane sunt caracterizate printr-o rată efectivă de sosire ridicată și timpi de așteptare reduși, în timp ce danele cele mai puțin eficiente prezintă o probabilitate mare de blocare. Figura 5.9 ilustrează scorurile de eficiență pentru cele mai eficiente și cele mai puțin eficiente dane, defalcate pe componente.
- Dintre danele echipate cu sistem Cold Ironing, Berth I este cea mai performantă, în timp ce Berth J este cea mai puțin eficientă. Figura 5.10 prezintă utilizarea medie a danelor echipate cu Cold Ironing comparativ cu utilizarea medie a tuturor celorlalte dane, pentru anii 2021–2024. Se observă că danele Berth I și Berth N sunt subutilizate; prin urmare, acest timp de inactivitate poate fi valorificat de navele aflate la ancoră, pentru a folosi instalația Cold Ironing. Utilizarea strategică a acestor dane reprezintă o oportunitate importantă pentru reducerea timpilor totali de așteptare ai navelor din sistem. Figura 5.11 arată legătura dintre capacitate disponibilă în ore a danelor echipate cu Cold Ironing și timpul total de așteptare la celelalte dane. Graficul evidențiază faptul că, chiar și în perioadele cu timpi mari de așteptare, danele Cold Ironing rămân subutilizate.

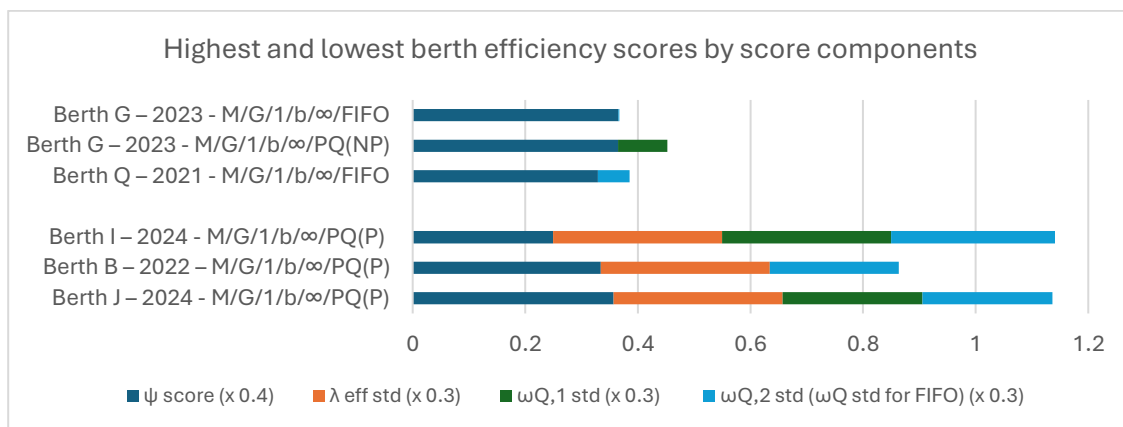


Figura 5.9 Scorurile de eficiență ale danelor, cele mai eficiente și cele mai puțin eficiente, defalcate pe componente de scor, 2021–2024

Sursa: Autorul

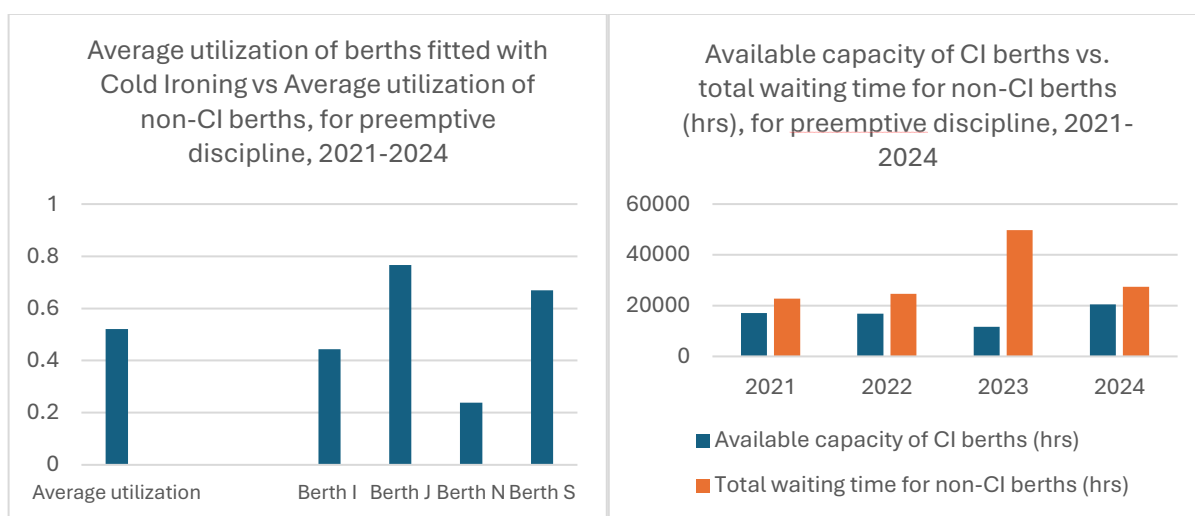


Figura 5.10 Utilizarea medie a danelor dotate cu sistemul Cold Ironing vs utilizarea medie a danelor fără CI, pentru PQ(P), 2021-2024

Figura 5.11 Capacitatea disponibilă a danelor dotate cu sistemul Cold Ironing și durata totală de așteptare la danele fără CI, pentru PQ(P), 2021-2024 (hrs)

Sursa: Autorul

În continuare, modelul calculează costurile și emisiile minime pe baza componentelor de timp identificate pentru fiecare navă. Sunt analizate trei configurații distincte, prezentate în Tabelul 5.7. Odată ce timpii sunt identificați, modelul calculează costurile și emisiile.

Table 5.7 Configurații analizate

Configurația	Descriere
1	Verificare pentru ALB alocat – nu există Cold Ironing operațional în port – stare actuală
2	Verificare pentru ALB alocat – Cold Ironing operațional la ALB, dacă este instalat și operațional, conform proiectului; navele așteaptă la ancoră doar până când ALB alocat devine disponibil
3	Aplicarea modelului/verificarea algoritmului – așteptare la CIB în loc de așteptare la ancoră și apoi continuare către ALB alocat. Portul are Cold Ironing instalat, conform proiectului.

Sursa: Autorul

Pentru cele 100 de nave analizate, rezultatele au arătat că timpul mediu de așteptare la ancoră a fost redus cu 38% (de la o medie de 45 de ore la o medie de 28 de ore) atunci când s-a utilizat modelul de alocare a danelor echipate cu Cold Ironing. Costurile și emisiile pentru cele trei configurații, pentru navele și danele studiate, sunt prezentate în Figurile 5.13, 5.14, 5.15, 5.16.

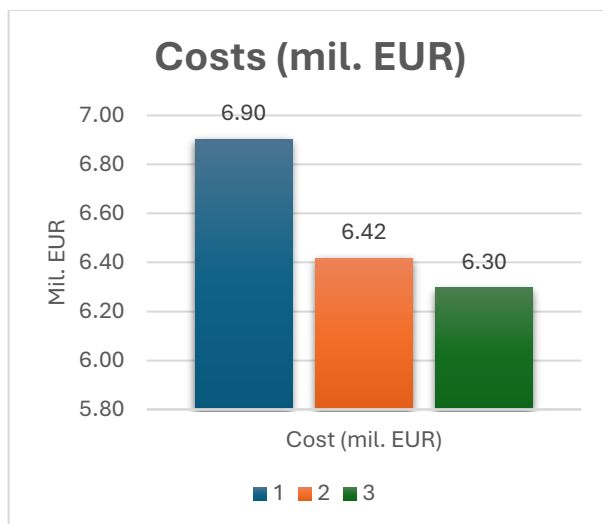


Figura 5.13 Costurile pentru cele trei configurații (Milioane EUR)

Sursa: Autorul

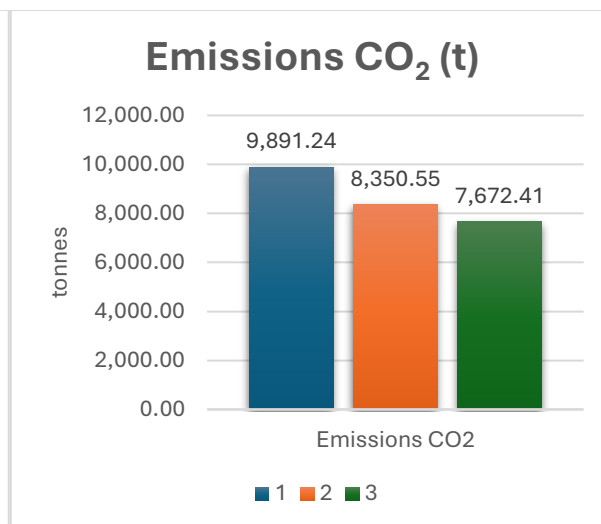


Figura 5.14 Emisiile CO₂ pentru cele trei configurații (t)

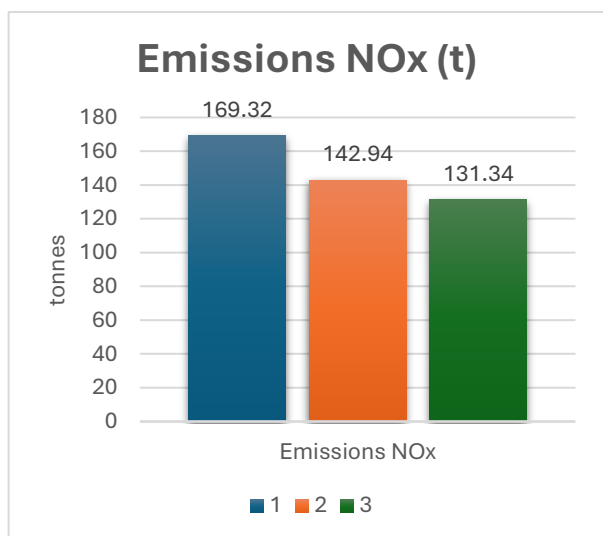


Figura 5.15 Emisiile NO_x pentru cele trei configurații (t)

Sursa: Autorul

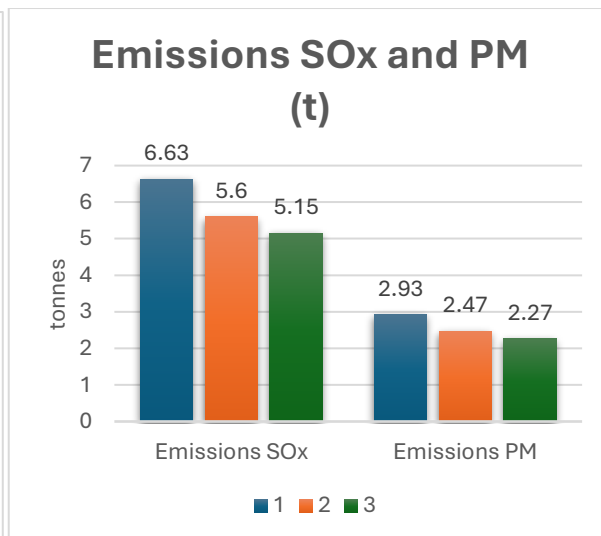


Figura 5.16 Emisiile SO_x and PM pentru cele trei configurații (t)

Concluzii

Concluziile aplicării modelului de alocare a danelor echipate cu Cold Ironing.

1. Prima parte a analizei a determinat eficiența danelor pentru un număr de 20 de dane din Portul Constanța, pe o perioadă de patru ani (2021–2024). Dintre acestea, patru dane sunt programate să facă parte din proiectul Cold Ironing. Calculele arată că modelul de așteptare M/G/1/b/∞/PQ(P) obține cel mai mare scor de eficiență. Rezultatele arată că

portul este ocazional congestionat și că timpii de așteptare la ancoră sunt uneori ridicați. Acești timpi sunt direct corelați cu nivelul de poluare; prin urmare, reducerea timpilor de așteptare ar trebui să fie un obiectiv al porturilor în contextul reglementărilor de mediu. De asemenea, rezultatele arată că danele echipate cu sistem Cold Ironing sunt subutilizate și, prin urmare, pot prelua navele care altfel ar fi obligate să aștepte la ancoră până la eliberarea danelor alocate.

2. Dintr-un total de 100 de nave, modelul a identificat o soluție favorabilă pentru 20 de nave, care au putut aștepta la dana echipată cu Cold Ironing (CIB), în loc să staționeze la ancoră. Pentru restul navelor, modelul nu a putut identifica soluții avantajoase, astfel că acestea au continuat să aștepte doar la ancoră până când dana desemnată (ALB) a devenit disponibilă. O parte dintre nave au intrat direct la dana desemnată, imediat după sosire. Modelul a luat în considerare doar acele soluții care indicau un timp de așteptare la dana Cold Ironing (t_3) mai mare de 36 de ore, deoarece calculele au arătat că un interval de peste 36 de ore este avantajos din punct de vedere al costurilor pentru armator.

Soluția rezultată din aplicarea modelului este preferabilă, deoarece atât costurile totale, cât și emisiile vor scădea, costurile vor fi reduse cu 9%, iar emisiile cu 23% în medie, comparativ cu situația actuală, când sistemul Cold Ironing nu este funcțional. În plus, nava respectă FuelEU Maritime, deci nu va fi supusă unor penalități. Mai mult, nava va avea un surplus care poate fi utilizat fie pentru banking, fie pentru pooling, în conformitate cu reglementările FuelEU. De asemenea, EU ETS va scădea datorită reducerii emisiilor.

În prezent, numărul porturilor care oferă facilitatea Cold Ironing este limitat, astfel încât majoritatea navelor vor întâlni configurația 1 (așteptând la ancoră și consumând doar combustibil) atunci când vizitează un port pentru operațiuni de marfă. Studiul de caz arată că alternativele 2 sau 3 sunt mai avantajoase din punct de vedere al costurilor și al cantităților de emisii. Cold Ironing este o măsură tehnică eficientă, care va crește performanța navelor și va minimiza efectul asupra mediului.

CAPITOL 6

CONCLUZII

6.1 Considerații finale

Performanța este o măsură a îndeplinirii de către navă a tuturor criteriilor care definesc eficiența energetică, parametrii de siguranță, integritatea, rentabilitatea, profitabilitatea, conformitatea cu reglementările și impactul asupra mediului. Performanța de mediu a navelor este guvernată de strategiile IMO și de reglementările EU, care provoacă industria să găsească soluții eficiente pentru progresul și integrarea dezvoltărilor inovatoare în materie de eficiență energetică.

Decarbonizarea transportului maritim este o preocupare reală pentru toate părțile implicate. Este de notorietate faptul că transportul maritim contribuie semnificativ la emisiile globale de gaze cu efect de seră și acum se confruntă cu o presiune importantă pentru a căuta soluții pentru a funcționa mai eficient, mai sustenabil și pentru a reduce efectul negativ pe care îl are asupra mediului și sănătății umane.

Opțiunile includ atât soluții operaționale, cât și tehnice. Deși soluțiile operaționale pot reduce emisiile pe termen scurt și mediu, realizările realiste ale obiectivelor IMO pentru 2050 rămân la combustibili alternativi.

Există mai multe opțiuni disponibile, însă pentru unii combustibili alternativi tehnologia nu a atins încă maturitatea. Există proiecte pilot în desfășurare, dar poate dura mulți ani până când tehnologia va fi suficient de matură pentru a fi utilizată pe scară largă.

Porturile pot promova și stimula reducerea emisiilor și creșterea performanței navelor prin instalarea de electricitate la țărm sau Cold Ironing pentru navele care vizitează porturile.

O combinație de politici, stimulente și măsuri poate motiva substanțial companiile și participanții implicați în transportul maritim să adopte noi tehnologii care pot crește performanța navelor și pot reduce impactul asupra mediului. Implementarea acestor măsuri poate fi dificilă în cadrul flotelor și ar putea muta transportul de mărfuri de la transportul maritim la cel terestru. În acest caz, se va utiliza un număr mai mare de mijloace de transport și, în final, cantitatea totală de emisii poate crește substanțial.

Rezultatele tezei

1. Anumite măsuri operaționale pot fi implementate și aplicate cu bugete și costuri minime și pot avea rezultate bune asupra performanței navelor. Măsurile operaționale, cum ar fi reducerea vitezei și diminuarea timpilor de inactivitate (ancorare, derivă, acostare) ar putea îmbunătăți scorul CII.
2. Noile tehnologii, cum ar fi sistemele de propulsie asistată de vânt, panourile solare, energia nucleară, tehnologiile de captare și stocare a carbonului, pilele de combustie, bateriile și supercondensatoarele, pot fi implementate cu succes pe nave fie prin modificarea navei, fie prin reproiectarea navei. Unele tehnologii inovatoare sunt imature, iar utilizarea lor la scară largă este limitată.
3. Transportul maritim a început deja să utilizeze combustibili alternativi, care în prezent sunt considerați cea mai viabilă soluție pe termen lung pentru strategia de decarbonizare. Analizând navele comandate, conform datelor din iunie 2024, 73% dintre nave vor utiliza combustibili convenționali, în timp ce 27% vor utiliza combustibili alternativi.
4. CAPEX și OPEX sunt ambele aspecte importante. Dacă pentru metanol este necesară modificarea motorului, pentru biocombustibili nu sunt necesare modificări ale motorului, deoarece biocombustibilii pot fi amestecați cu combustibili fosili; pentru hidrogen și complet electric, pe lângă noul design al motorului, capacitățile tancurilor de combustibil necesită modificări majore de proiectare a navei.
5. Costul pierderii spațiului de încărcare poate crește substanțial odată cu dimensiunea navei; suma este semnificativ mai mare pentru combustibilii alternativi cu densitate energetică mai mică. Indiferent dacă aleg o abordare cu o singură oprire sau cu două opriri, proprietarii navelor trebuie să determine frecvența bunkeraj-ului în funcție de ruta navei și să efectueze o analiză amănunțită a capacității tancurilor de combustibil. Pe parcursul duratei sale de exploatare, capacitatea pierdută de transport marfă are un impact major asupra potențialului de câștig al navei.
6. Electricitatea de la țărm este o alternativă pentru reducerea emisiilor în timp ce navele sunt acostate în port. Utilizarea acestei instalații portuare va permite navelor să reducă la zero toți poluanții. Pe lângă emisiile nocive, zgomotul și vibrațiile sunt eliminate, crescând calitatea condițiilor de muncă pentru personalul navei și lucrătorii portuari. De

asemenea, populația care locuiește în apropierea portului va beneficia de avantajele Cold Ironing.

7. Chiar dacă energia electrică utilizată în port este lipsită de poluare, producția energiei electrice în România se bazează atât pe surse fosile, cât și pe surse regenerabile. Calculele arată că emisiile de gaze cu efect de seră vor fi reduse în medie cu 60% (de la producere energiei până când este utilizată de către nave) atunci când se utilizează energia electrică de la țărm față de arderea combustibilului convențional.
8. Aplicarea și evaluarea modelelor de așteptare pentru eficiența danelor și a timpilor de așteptare reprezintă un instrument important pentru identificarea măsurilor suplimentare care să prevină congestia portuară și a regulilor de prioritarizare în vederea reducerii întârzierilor. Porturile pot aplica strategii precum slow steaming sau sosiri la timp (Just-in-time arrival) pentru a evita creșterea timpilor de așteptare înainte de acostare.
9. Un model de alocare a danelor de tip „Cold Ironing” ar putea fi o soluție pentru a profita de instalațiile electrice de la țărm pe care porturile trebuie să le ofere începând cu 2030, așa cum este cerut de reglementările EU. Având în vedere numărul mare de zile de așteptare pentru o navă înainte de acostare, așteptarea la o dană liberă echipată cu Cold Ironing este o oportunitate importantă pentru nave și pentru port. Performanța navelor poate fi crescută prin reducerea poluării și, prin urmare, prin respectarea reglementărilor IMO și EU. Pe lângă respectarea regulilor privind emisiile, navele reduc penalitățile impuse de EU ETS și FuelEU Maritime și își îmbunătățesc scorul CII.

6.2 Contribuții originale

Teza „CONTRIBUTIONS TO THE MERCHANT VESSELS' PERFORMANCE TO REDUCE THE ENVIRONMENTAL IMPACT IN PORTS” se concentrează pe interconectarea dintre performanța navelor și protecția mediului și pe modul în care un transport maritim performant, eficient și sustenabil poate controla și preveni emisiile de gaze cu efect de seră. Aceasta analizează impactul activităților de transport maritim asupra mediului și a calității vieții și investighează soluții viabile pentru decarbonizarea transportului maritim.

Cercetarea contribuie la îmbunătățirea performanței navelor prin analiza măsurilor aplicate atât la nivelul navei, cât și la nivelul portului, care influențează în mod complementar eficiența acestora. La nivelul navei, se examinează tehnologii și combustibili alternativi, punând accent pe sistemul Cold Ironing pentru reducerea consumului de combustibil și a emisiilor în timpul staționării în port. Din perspectiva portului, se analizează măsuri pentru reducerea timpilor de așteptare și a congestiei, facilitarea sosirilor Just-in-time și furnizarea de energie de la uscat. Prin abordarea acestor dimensiuni, studiul demonstrează modul în care acțiunile coordonate între navă și port pot crește eficiența, reduce costurile operaționale și contribui la o reducere semnificativă a emisiilor în zonele portuare.

Contribuțiile personale sunt:

1. Abordarea practică și evaluarea impactului funcționării navelor asupra mediului, evaluarea factorilor care influențează decarbonizarea navelor, împreună cu provocările privind opțiunile de decarbonizare.
2. Studii de caz privind aplicabilitatea reglementărilor, atât operaționale, cât și tehnice. Identificarea măsurilor operaționale și tehnice relevante pentru cercetare pe baza constatărilor studiilor de caz.

3. Investigarea tehnologiilor viitoare și analiza combustibililor alternativi, în conjuncție cu evaluarea tehnico-economică și politică a strategiei privind combustibilii.
4. Analiza implicațiilor de proiectare și a rentabilității opțiunilor de decarbonizare – CAPEX și OPEX pentru diferite metode operaționale, măsuri de prevenire și combustibili alternativi. Examinarea spațiului de marfă pierdut la trecerea la combustibili alternativi. Evaluarea indicatorului CII pentru diferite nave, sub diferite profiluri operaționale.
5. Studiu privind sistemul de implementare a sistemului Cold Ironing în Portul Constanța, evaluarea emisiilor, a costurilor cu energia electrică și combustibilul pentru navele care fac escală în Portul Constanța. Danele 114, 121 și 123 au fost analizate între anii 2021-2023.
6. Evaluarea costului atât pentru instalarea sistemului Cold Ironing în port, cât și pentru modernizarea navei; evaluarea costurilor navelor asociate utilizării combustibililor fosili comparativ cu utilizarea energiei electrice de la țărm în timpul staționării la dană.
7. Evaluarea și selectarea celei mai bune opțiuni de energie verde în Portul Constanța, pentru creșterea sustenabilității și pentru a sprijini reducerea emisiilor pentru navele care fac escală în port. Cercetarea a utilizat tehnici decizionale, atât pentru luarea deciziilor individuale, cât și pentru luarea deciziilor de grup.
8. Determinarea capacității de utilizare a unei dane specifice prin aplicarea modelelor de așteptare M/G/1/b/∞/FIFO, M/G/1/b/∞/PQ(NP) și M/G/1/b/∞/PQ(P). În același timp, aceste modele permit stabilirea gradului de încărcare al danei pentru planificarea acostării navelor, estimarea timpului de așteptare al navei înainte de acostare, evaluarea modului în care navele cu prioritate ridicată influențează navele cu prioritate scăzută și luarea deciziilor privind măsurile suplimentare în situații de congestie portuară.
9. Realizarea planificării activităților pentru modelul propus de alocare a danelor cu sistemul Cold Ironing, având ca scop optimizarea planificării, determinarea duratei minime a proiectului și identificarea activităților care pot fi amânate fără a afecta calendarul general.
10. Dezvoltarea unui model de alocare a danelor Cold Ironing, ca soluție pentru reducerea timpilor de așteptare ai navelor, permițându-le să acosteze într-o dană liberă care are o conexiune electrică compatibilă la țărm.

6.3 Direcții viitoare de cercetare

Decarbonizarea transportului maritim este în interesul multor țări, guverne, organisme instituționale, societăți de clasificare, mediul academic, armatori și multe sectoare implicate în activități de transport maritim.

Cercetări viitoare:

- a) Investigații suplimentare privind măsurile operaționale și tehnice pentru a spori eficiența și performanța navelor, cu impact direct asupra mediului.
- b) Analiză mai aprofundată a viitorilor combustibili alternativi neutri în carbon, cum ar fi amoniacul și hidrogenul, și a combustibililor care pot fi obținuți din energia electrică regenerabilă - dezvoltarea reglementărilor, logistică (producție, disponibilitate, bunkerare, întreținere etc.), avansarea studiului procedurilor de siguranță, a practicilor sigure și a cerințelor de competență.

- c) Extinderea modelului de așteptare $M/G/1$ (cu o singură dană) într-un cadru cu mai multe dane ($M/G/c$) pentru a depăși o limitare a acestei lucrări și pentru a-i crește relevanța în scenarii portuare mai complexe. O configurație $M/G/c$ ar reflecta interacțiunile dintre diferite dane, oferind o imagine completă asupra problemelor de congestie, în special în contextul unui trafic imprevizibil al navelor.
- d) O îmbunătățire suplimentară presupune integrarea datelor din Sistemul de Identificare Automată (AIS), permițând suport pentru predicții în timp real ale cozii de așteptare, evaluarea congestiei și programarea dinamică a danelor în conformitate cu principiile sosirilor Just-in-time (JIT).

BIBLIOGRAFIE

1. Aakko-Saksa, P. T., Lehtoranta, K., Kuitinen, N., Järvinen, A., Jalkanen, J., Johnson, K., Jung, H., Ntziachristos, L., Gagné, S., Takahashi, C., Karjalainen, P., Rönkkö, T., & Timonen, H. (2022). Reduction in greenhouse gas and other emissions from ship engines: Current trends and future options. *Progress in Energy and Combustion Science*, 94, 101055. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2022.101055>
2. ABS. (2020). ABS Hydrogen as marine fuel. In ABS. ABS, SUSTAINABILITY WHITEPAPER.
3. Al-Aboosi, F. Y., El-Halwagi, M. M., Moore, M., & Nielsen, R. B. (2021). Renewable ammonia as an alternative fuel for the shipping industry. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 31, 100670. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2021.100670>
4. Al-Enazi, A., Okonkwo, E. C., Bicer, Y., & Al-Ansari, T. (2021). A review of cleaner alternative fuels for maritime transportation. *Energy Reports*, 7, 1962–1985. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.03.036>
5. Albayrak, M. T., Sogut, M., & Toma, A. (2021). Energy efficiency in ports: Comparative performance and cost analysis of heat demand in port facilities using solar energy. *Scientific Bulletin*, XXIV(2), 34–48. <https://doi.org/10.21279/1454-864x-21-i1-003>
6. AllTrack. (n.d). *Live Vessel and marine traffic*. <https://alltrack.org/>
7. Ash, N., & Scarbrough, T. (2019). Sailing on Solar: Could green ammonia decarbonise international shipping. *Environmental Defense Fund: London, UK*.
8. Aslam, S., Michaelides, M. P., & Herodotou, H. (2023). Berth allocation Considering Multiple Quays: A Practical approach using Cuckoo search Optimization. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(7), 1280. <https://doi.org/10.3390/jmse11071280>
9. Bahrami, N., & Siadatmousavi, S. M. (2023). Ship voyage optimisation considering environmental forces using the iterative Dijkstra's algorithm. *Ships and Offshore Structures*, 1–8. <https://doi.org/10.1080/17445302.2023.2231200>
10. Bakar, N. N. A., Bazmohammadi, N., Vasquez, J. C., & Guerrero, J. M. (2023). Electrification of onshore power systems in maritime transport towards decarbonization of ports: A review of the Cold Ironing technology. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 178, 113243. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113243>
11. Baltic Shipping. (n.d.). *Vessel database*. <https://www.balticshipping.com>
12. Barregard, L., Molnár, P., Jonson, J. E., & Stockfelt, L. (2019). Impact on population health of Baltic shipping emissions. *International Journal of Environmental Research and Public Health/International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(11), 1954. <https://doi.org/10.3390/ijerph16111954>
13. Berthelsen, F. H., & Nielsen, U. D. (2021). Prediction of ships' speed-power relationship at speed intervals below the design speed. *Transportation Research. Part D, Transport and Environment*, 99, 102996. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102996>
14. Bordogna, G. (2020). Aerodynamics of wind-assisted ships : Interaction effects on the aerodynamic performance of multiple wind-propulsion systems. *Doctoral Thesis*. <https://doi.org/10.4233/uuid:96eda9cd-3163-4c6b-9b9f-e9fa329df071>
15. Bouman, E. A., Lindstad, E., Rialland, A. I., & Strømman, A. H. (2017). State-of-the-Art Technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping—A review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 52, 408–421. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.022>
16. Boviatsis, M., & Tselentis, B. (2022). A comparative analysis between EU MRV and IMO DCS – the need to adopt a harmonised regulatory system. *Global NEST International Conference on Environmental Science & Technology*. <https://doi.org/10.30955/gnc2019.00925>
17. Bullock, S., Mason, J., Broderick, J., & Larkin, A. (2020). Shipping and the Paris climate agreement: a focus on committed emissions. *BMC Energy*, 2(1). <https://doi.org/10.1186/s42500-020-00015-2>
18. Buonomano, A., Del Papa, G., Giuzio, G. F., Palombo, A., & Russo, G. (2023). Future pathways for decarbonization and energy efficiency of ports: Modelling and optimization as sustainable energy hubs. *Journal of Cleaner Production*, 420, 138389. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138389>
19. Bureau Veritas. (2022). Bureau Veritas, an inside look at methanol as fuel. In www.bureauveritas.com. Bureau Veritas. Retrieved April 16, 2023, from <https://marine-offshore.bureauveritas.com/inside-look-methanol-fuel>
20. Burlacu, G., Danet, N., Bandrabur, C., & Duminica, T. (2005). Fiabilitatea, Mentenabilitatea si Disponibilitatea Sistemelor Tehnice. MatixRom, Bucuresti.
21. Canepa, M., Ballini, F., Dalaklis, D., Frugone, G., & Sciutto, D. (2023). Cold ironing: Socio-Economic analysis in the Port of Genoa. *Logistics*, 7(2), 28. <https://doi.org/10.3390/logistics7020028>

22. Carlson, O., & Nilsson, P. A. (2014). Development and demonstration of new technology for the use of wind turbines on ships. *The Swedish Energy Agency*. https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/208887/local_208887.pdf
23. Carp, D., Barsan, E., Vancia, D., Aivaz, K. A. (2007). *Impactul Economic al Porturilor Maritime din judetul Constanța în anul 2004 și tendințe în perioada 2005- perioada 2005-2009*
24. Carp, D., & Rapeanu, E. (2009). *Noduri și rețele de transport*, 249 pg., Ed. Didactică și Pedagogică R.A. București, ISBN 978-973-30-2539-9
25. Chang, S., Lin, M., & Tsai, J. (2024). An optimization approach to berth allocation problems. *Mathematics*, 12(5), 753. <https://doi.org/10.3390/math12050753>
26. Chen, S., Meng, Q., Jia, P., & Kuang, H. (2021). An operational-mode-based method for estimating ship emissions in port waters. *Transportation Research Part D Transport and Environment*, 101, 103080. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103080>
27. Choi, G., Lee, W., & Kim, T. (2023). Voyage optimization using dynamic programming with initial quadtree based route. *Journal of Computational Design and Engineering*, 10(3), 1185–1203. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwad055>
28. Christodoulou, A., Dalaklis, D., Ölcner, A., & Ballini, F. (2021). Can Market-Based Measures Stimulate Investments in Green Technologies for the Abatement of GHG Emissions from Shipping? A Review of Proposed Market-Based Measures. *Transactions on Maritime Science*, 10(01), 208–215.
29. Ciorbea, V. (1995). *Portul Constanța de la antichitate la mileniul III*. Europolis.
30. Clarke, D., Chan, P., Dequeljoe, M., Kim, Y., & Barahona, S. (2023). CO2 emissions from global shipping. In *OECD Statistics Working Papers*. <https://doi.org/10.1787/bc2f7599-en>
31. Contini, D., & Merico, E. (2021). Recent advances in studying air quality and health effects of shipping emissions. *Atmosphere*, 12(1), 92.
32. Cullinane, K., & Yang, J. (2022). Evaluating the Costs of decarbonizing the shipping industry: A Review of the literature. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(7), 946. <https://doi.org/10.3390/jmse10070946>
33. Curto, D., Franzitta, V., & Guercio, A. (2021). Sea Wave Energy. A review of the current technologies and perspectives. *Energies*, 14(20), 6604. <https://doi.org/10.3390/en14206604>
34. Dalsøren, S. B., Eide, M. S., Endresen, Ø., Mjelde, A., Gravir, G., & Isaksen, I. S. A. (2009). Update on emissions and environmental impacts from the international fleet of ships: the contribution from major ship types and ports. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(6), 2171–2194. <https://doi.org/10.5194/acp-9-2171-2009>
35. De Marsillac Garcia, R., De Marsillac, C. E., Pereda, P. C., Lucchesi, A., & Caprace, J. (2024). GHG Policies in Maritime Transport: A Comparative Analysis using Cost-Effectiveness and Multi-Criteria Analysis. *Research Square (Research Square)*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4855186/v1>
36. Deling, W., Yuli, C., Changhai, H., Liang, C., & Changyue, W. (2020). Study on IMO New requirement: Ship fuel oil consumption data collection and Reporting. *American Journal of Water Science and Engineering*, 6(1), 50. <https://doi.org/10.11648/j.ajwse.20200601.16>
37. Dewan, M. H., & Godina, R. (2023). Effective training of seafarers on energy efficient operations of ships in the maritime industry. *Procedia Computer Science*, 217, 1688–1698. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.369>
38. Dewan, M. H., Yaakob, O., & Suzana, A. (2018). Barriers for adoption of energy efficiency operational measures in shipping industry. *WMU Journal of Maritime Affairs*, 17(2), 169–193. <https://doi.org/10.1007/s13437-018-0138-3>
39. Diniz, N. V., Cunha, D. R., De Santana Porte, M., Oliveira, C. B. M., & De Freitas Fernandes, F. (2023). A bibliometric analysis of sustainable development goals in the maritime industry and port sector. *Regional Studies in Marine Science*, 69, 103319. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.103319>
40. DNV. (2021). *DNV SEEMP Part III*. www.dnv.com. Retrieved October 14, 2022, from <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/seemp-part-iii/>
41. DNV. (2023). DNV Maritime Forecast to 2050 Energy Transition outlook 2023. In *A Deep Dive Into Shipping Decarbonization Journey*.
42. DNV. (2024). DNV Maritime Forecast to 2050 Energy Transition outlook 2024. In *A Deep Dive Into Shipping Decarbonization Journey*.
43. E-COLD. (2021). *Application Form Technical Description CEF-T-2021-CORECOEN — CEF 2 Transport - Projects on the Core Network – Cohesion Envelope EU Grants: Application Form (CEF-T)*.
44. Ealing. (2024). In www.ealingproject.eu. Retrieved February 22, 2024, from <https://ealingproject.eu/>
45. EMSA. (2022). *Shore-Side electricity guidance to port authorities and administrations*. European Maritime Safety Agency.

46. ENTSOE. (2024). *Current emissions in Romania*. <https://www.nowtricity.com/>. Retrieved March 30, 2024, from <https://www.nowtricity.com/country/romania/#:~:text=Quick%20stats%20about%20Romania,Coal%20usage%20was%2014.4%25>
47. European Commission. (2023). *2030 Climate Target Plan*. www.commission.europa.eu. Retrieved November 6, 2023, from https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_en
48. European Commission. (2018). EUROPEAN COMMISSION A clean planet for all. (2018). In *A European Strategic Long-term Vision for a Prosperous, Modern, Competitive and Climate Neutral Economy*. Brussels, 28.11.2018 COM(2018) 773 final.
49. European Union. (2003). DIRECTIVE 2003/87/EC. (2003). In *DIRECTIVE 2003/87/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 13 October 2003 Establishing a System for Greenhouse Gas Emission Allowance Trading Within the Union and Amending Council Directive 96/61/EC*.
50. European Union. (2005). DIRECTIVE 2005/33/EC. (2005). In *DIRECTIVE 2005/33/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 6 July 2005 Amending Directive 1999/32/EC*.
51. European Union. (2015). REGULATION (EU) 2015/757. (2015). In *REGULATION (EU) 2015/757 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 29 April 2015 on the Monitoring, Reporting and Verification of Carbon Dioxide Emissions From Maritime Transport, and Amending Directive 2009/16/EC (L 123/55)*. Official Journal of the European Union.
52. European Union. (2016). DIRECTIVE (EU) 2016/802. In *DIRECTIVE 2005/33/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 6 July 2005 Amending Directive 1999/32/EC*.
53. European Union. (2023). REGULATION (EU) 2023/1805. (2023). In *REGULATION (EU) 2023/1805 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 13 September 2023 on the Use of Renewable and Low-carbon Fuels in Maritime Transport, and Amending Directive 2009/16/EC (L 234/48)*. Official Journal of the European Union.
54. EUROSTAT. (2023). Energy statistics. Energy datasheets: EU countries. In <https://data.europa.eu>. Retrieved March 3, 2024, from <https://data.europa.eu/euodp/en/data/dataset/information-on-energy-markets-in-eu-countries-with-national-energy-profiles/resource/24184068-8ec3-470a-ba28-5ca2317c6f6f>
55. Eyring, V., Isaksen, I. S., Bernsten, T., Collins, W. J., Corbett, J. J., Endresen, O., Grainger, R. G., Moldanova, J., Schlager, H., & Stevenson, D. S. (2010). Transport impacts on atmosphere and climate: Shipping. *Atmospheric Environment*, 44(37), 4735–4771. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.04.059>
56. Fasihi, M., Weiss, R., Savolainen, J., & Breyer, C. (2021). Global potential of green ammonia based on hybrid PV-wind power plants. *Applied Energy*, 294, 116170. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116170>
57. Fatnes, J. N. (2010). *Flow-times in an M/G/1 Queue under a Combined Preemptive/Non-preemptive Priority Discipline.: Scheduled Waiting Time on Single Track Railway Lines* (Master's thesis, Institutt for matematiske fag).
58. Fink, L., Karl, M., Matthias, V., Oppo, S., Kranenburg, R., Kuenen, J., Moldanova, J., Jutterström, S., Jalkanen, J.-P., & Majamäki, E. (2022). The contribution of shipping to air pollution in the Mediterranean region—A Multimodel evaluation: Comparison of photooxidants NO₂ and O₃. *EGU sphere*, 1–65.
59. Giallombardo, G., Moccia, L., Salani, M., & Vacca, I. (2009). Modeling and solving the Tactical Berth Allocation Problem. *Transportation Research Part B Methodological*, 44(2), 232–245. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2009.07.003>
60. Glavinović, R., Krčum, M., Vukić, L., & Karin, I. (2023). Cold Ironing Implementation Overview in European Ports—Case Study—Croatian Ports. *Sustainability*, 15(11), 8472. <https://doi.org/10.3390/su15118472>
61. Global Maritime Forum. (2020). *Getting to zero coalition. New fuels: total cost of operation*. www.globalmaritimeforum.org. Retrieved May 20, 2023, from <https://globalmaritimeforum.org/insight/new-fuels-total-cost-of-operation/>
62. GloMEEP. (2020). *Global Maritime Energy Efficiency Partnership – Fixed Sails or Wings, 2020*. www.glomeep.imo.org. Retrieved March 6, 2023, from <https://glomeep.imo.org/technology/fixed-sails-or-wings>
63. Grigoriadis, A., Mamarikas, S., Ioannidis, I., Majamäki, E., Jalkanen, J., & Ntziachristos, L. (2021). Development of exhaust emission factors for vessels: A review and meta-analysis of available data. *Atmospheric Environment X*, 12, 100142. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2021.100142>
64. Grzelakowski, A. S., Herdzik, J., & Skiba, S. (2022). Maritime Shipping Decarbonization: Roadmap to meet Zero-Emission Target in shipping as a link in the global supply chains. *Energies*, 15(17), 6150. <https://doi.org/10.3390/en15176150>
65. Guo, B., Gupta, P., Steen, S., & Tvete, H. A. (2023). Evaluating vessel technical performance index using physics-based and data-driven approach. *Ocean Engineering*, 286, 115402. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115402>

66. Halim, R., Kirstein, L., Merk, O., & Martinez, L. (2018). Decarbonization Pathways for International Maritime Transport: A Model-Based Policy Impact Assessment. *Sustainability*, 10(7), 2243. <https://doi.org/10.3390/su10072243>
67. Hansen, E. K., Rasmussen, H. B., & Lützen, M. (2020). Making shipping more carbon-friendly? Exploring ship energy efficiency management plans in legislation and practice. *Energy Research & Social Science*, 65, 101459. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101459>
68. Hansson, J., Brynolf, S., Fridell, E., & Lehtveer, M. (2020). The Potential Role of Ammonia as Marine Fuel—Based on Energy Systems Modeling and Multi-Criteria Decision Analysis. *Sustainability*, 12(8), 3265. <https://doi.org/10.3390/su12083265>
69. Hansson, J., Månsson, S., Brynolf, S., & Grahn, M. (2019). Alternative marine fuels: Prospects based on multi-criteria decision analysis involving Swedish stakeholders. *Biomass & Bioenergy*, 126, 159–173. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.05.008>
70. Harchol-Balter, M. (2013). *Performance modeling and design of computer systems: queueing theory in action*. Cambridge University Press.
71. Hasanov, J., Ricci, S., & Rizzetto, L. (2022). Greenhouse gas emissions of ships at Ports: Quantitative estimations and forecasts. *2022 World of Shipping Portugal. An International Research Conference on Maritime Affairs, Online Conference, from Portugal to the World*, 27–28.
72. Haxhiu, A., Abdelhakim, A., Kanerva, S., & Bogen, J. (2021). Electric power integration schemes of the hybrid fuel cells and Batteries-Fed Marine Vessels—An Overview. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 8(2), 1885–1905. <https://doi.org/10.1109/tte.2021.3126100>
73. Houtkoop, K., Visser K., Sietsma J., & De Vries, N. (2022). New potential for integration of nuclear power in marine propulsion systems. *Conference Proceedings of INEC*. <https://doi.org/10.24868/10647>
74. IMO. (1972). COLREG. Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea (COLREGs), 1972. London: IMO
75. IMO. (2005). *MARPOL 73/78, Annex VI, Regulations 13&14, with ammendaments*. International Maritime Organization.
76. IMO. (2009). MEPC.1/CIRC.684. (2009). In *Guidelines for Voluntary Use of the Ship Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI)* (MEPC.1/Circ.684). International Maritime Organization.
77. IMO. (2012). MEPC.213(63). (2012). In *2012 GUIDELINES FOR THE DEVELOPMENT OF a SHIP ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT PLAN (SEEMP)* (MEPC 63/23). International Maritime Organization.
78. IMO. (2014). MEPC.245(66). (2014). In *2014 GUIDELINES ON THE METHOD OF CALCULATION OF THE ATTAINED ENERGY EFFICIENCY DESIGN INDEX (EEDI) FOR NEW SHIPS* (MEPC 66/21). International Maritime Organization.
79. IMO. (2016). MEPC.278(70). (2016). In *AMENDMENTS TO THE ANNEX OF THE PROTOCOL OF 1997 TO AMEND THE INTERNATIONAL CONVENTION FOR THE PREVENTION OF POLLUTION FROM SHIPS, 1973, AS MODIFIED BY THE PROTOCOL OF 1978 RELATING THERETO Amendments to MARPOL Annex VI (Data Collection System for Fuel Oil Consumption of Ships)* (MEPC.278(70)). International Maritime Organization.
80. IMO. (2016b). MEPC.282(70). (2016). In *2016 GUIDELINES FOR THE DEVELOPMENT OF a SHIP ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT PLAN (SEEMP)* (MEPC 70/18/Add.1). International Maritime Organization.
81. IMO. (2020). *Fourth IMO GHG Study, full report*. International Maritime Organization
82. IMO. (2021). MEPC.328(76). (2021). In *AMENDMENTS TO THE ANNEX OF THE PROTOCOL OF 1997 TO AMEND THE INTERNATIONAL CONVENTION FOR THE PREVENTION OF POLLUTION FROM SHIPS, 1973, AS MODIFIED BY THE PROTOCOL OF 1978 RELATING THERETO 2021 Revised MARPOL Annex VI* (MEPC.328(76)). International Maritime Organization.
83. IMO. (2021b). MEPC.338(76). (2021). In *2021 Guidelines on the Operational Carbon Intensity Reduction Factors Relative to Reference Lines (CII Reduction Factors Guidelines, G3)* (MEPC 76/15/Add.2). International Maritime Organization.
84. IMO. (2022). *IMO addressing climate change. IMO A decade of action to cut GHG emissions from shipping*. www.imo.org. Retrieved October 10, 2022, from https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/Documents/Addressing%20climate%20change%20-%20a%20decade%20of%20action%20to%20cut%20GHG%20emissions%20from%20shipping_FINAL_%2014-07-21%29_Large.pdf
85. IMO. (2022b). IMO ENERGY EFFICIENCY OF SHIPS. (2022). In *Report of Fuel Oil Consumption Data Submitted to the IMO Ship Fuel Oil Consumption Database in GISIS (Reporting Year: 2021)* (MEPC 79/6/1). International Maritime Organization.

86. IMO. (2022c). MEPC.346(78). (2022). In *2022 GUIDELINES FOR THE DEVELOPMENT OF a SHIP ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT PLAN (SEEMP)* (MEPC 78/17/Add.1). International Maritime Organization.
87. IMO. (2022d). MEPC.352(78). (2022). In *2022 Guidelines on Operational Carbon Intensity Indicators and the Calculation Methods (CII Guidelines, G1)* (MEPC 78/17/Add.1). International Maritime Organization.
88. IMO. (2022e). MEPC.353(78). (2022). In *2022 Guidelines on the Reference Lines for Use With Operational Carbon Intensity Indicators (CII Reference Lines Guidelines, G2)* (MEPC 78/17/Add.1). International Maritime Organization.
89. IMO. (2022f). MEPC.354(78). (2022). In *2022 Guidelines on the Operational Carbon Intensity Rating of Ships (CII Rating Guidelines, G4)* (MEPC 78/17/Add.1). International Maritime Organization.
90. IMO. (2023). MEPC.377(80). In *2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions From Ships* (MEPC 80/WP.12). International Maritime Organization.
91. IMO. (2023a). MEPC.1/CIRC.778/Rev.4. (2023). In *List of Special Areas, Emission Control Areas and Particularly Sensitive Sea Areas* (MEPC.1/Circ.778/Rev.4). International Maritime Organization.
92. Innes, A., & Monios, J. (2018). Identifying the unique challenges of installing Cold Ironing at small and medium ports – The case of aberdeen. *Transportation Research. Part D, Transport and Environment*, 62, 298–313. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.02.004>
93. International Energy Agency. (2022). International Energy Agency Fuel cost. *Indicative shipping fuel cost*. www.iea.org. Retrieved May 5, 2023, from <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/indicative-shipping-fuel-cost-ranges>
94. Irena, A. (2021). A pathway to decarbonize the shipping sector by 2050. *International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi*.
95. Irena, K., Ernst, W., & Alexandros, C. G. (2021). The cost-effectiveness of CO2 mitigation measures for the decarbonisation of shipping. The case study of a globally operating ship-management company. *Journal of Cleaner Production*, 316, 128094. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128094>
96. Issa, M., Ilinca, A., & Martini, F. (2022). Ship energy efficiency and maritime sector initiatives to reduce carbon emissions. *Energies*, 15(21), 7910. <https://doi.org/10.3390/en15217910>
97. Issam, E. H., Azza, L., Mohamed, E. M., kaoutar, A., & Yassine, T. (2017). A multi-objective model for discrete and dynamic berth allocation problem. In *Proceedings of the 2nd international Conference on Big Data, Cloud and Applications* (pp. 1-5).
98. Johansson, L., Jalkanen, J., & Kukkonen, J. (2017). Global assessment of shipping emissions in 2015 on a high spatial and temporal resolution. *Atmospheric Environment*, 167, 403–415. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.042>
99. Joung, T., Kang, S., Lee, J., & Ahn, J. (2020). The IMO initial strategy for reducing Greenhouse Gas(GHG) emissions, and its follow-up actions towards 2050. *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, 4(1), 1–7. <https://doi.org/10.1080/25725084.2019.1707938>
100. Kachi, A., Mooldijk, S., Warnecke, C., & BMU, N. S. (2019). Carbon pricing options for international maritime emissions. *New Climate-Institute for Climate Policy and Global Sustainability gGmbH: Berlin, Germany*.
101. Kamaljit, M. (2016). Alternative fuels for marine and inland waterways: an exploratory study. *JRC Technical Reports, Report EUR 27770 EN*. <https://doi.org/10.2790/227559>
102. Kareem, B., & Gbolagade, A. O. (2018). DEVELOPMENT OF a QUEUEING MODEL FOR COMMUNICATION CONGESTION CONTROL IN THE PRODUCTION INDUSTRY. *Journal of Production Engineering*, 21(1), 25–32. <https://doi.org/10.24867/jpe-2018-01-025>
103. Kendall, D. G. (1953). Stochastic Processes Occurring in the Theory of Queues and their Analysis by the Method of the Imbedded Markov Chain. *The Annals of Mathematical Statistics*, 24(3), 338–354. <https://doi.org/10.1214/aoms/117728975>
104. Khan, S., Grudniewski, P., Muhammad, Y. S., & Sobey, A. J. (2022). The benefits of co-evolutionary Genetic Algorithms in voyage optimisation. *Ocean Engineering*, 245, 110261. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110261>
105. Kim, K. (2020). Delay cycle analysis of finite-buffer M/G/1 queues and its application to the analysis of M/G/1 priority queues with finite and infinite buffers. *Performance Evaluation*, 143, 102133.
106. Kim, A., & Seo, Y. (2019). The reduction of SOx emissions in the shipping industry: The case of Korean companies. *Marine Policy*, 100, 98–106. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2018.11.024>
107. Klebanoff, L. E., Caughlan, S. A., Madsen, R. T., Conard, C. J., Leach, T. S., & Appelgate, T. B. (2021). Comparative study of a hybrid research vessel utilizing batteries or hydrogen fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(76), 38051–38072. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.047>

108. Kleinrock, L. (1975). *Queuing Systems, Volume I: Theory* Wiley.
109. Kristensen, H. O. (2012). Energy demand and exhaust gas emissions of marine engines. *Clean Shipping Currents*, 1(6), 18–26.
110. Kuitinen, N., Jalkanen, J., Alanen, J., Ntziachristos, L., Hannuniemi, H., Johansson, L., Karjalainen, P., Saukko, E., Isotalo, M., Aakko-Saksa, P., Lehtoranta, K., Keskinen, J., Simonen, P., Saarikoski, S., Asmi, E., Laurila, T., Hillamo, R., Mylläri, F., Lihavainen, H., . . . Rönkkö, T. (2020). Shipping Remains a Globally Significant Source of Anthropogenic PN Emissions Even after 2020 Sulfur Regulation. *Environmental Science & Technology*, 55(1), 129–138. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03627>
111. Lagouvardou, S., Psaraftis, H. N., & Zis, T. (2020). A Literature Survey on Market-Based Measures for the Decarbonization of Shipping. *Sustainability*, 12(10), 3953. <https://doi.org/10.3390/su12103953>
112. Law, L., Foscoli, B., Mastorakos, E., & Evans, S. (2021). A comparison of alternative fuels for shipping in terms of lifecycle energy and cost. *Energies*, 14(24), 8502. <https://doi.org/10.3390/en14248502>
113. Law, L. C., Mastorakos, E., & Evans, S. (2022). Estimates of the decarbonization potential of alternative fuels for shipping as a function of vessel type, cargo, and voyage. *Energies*, 15(20), 7468. <https://doi.org/10.3390/en15207468>
114. Lee, H., Park, D., Choo, S., & Pham, H. T. (2020). Estimation of the Non-Greenhouse Gas Emissions Inventory from Ships in the Port of Incheon. *Sustainability*, 12(19), 8231. <https://doi.org/10.3390/su12198231>
115. Li, L., Gao, S., Yang, W., & Xiong, X. (2020). Ship's response strategy to emission control areas: From the perspective of sailing pattern optimization and evasion strategy selection. *Transportation Research. Part E, Logistics and Transportation Review*, 133, 101835. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.101835>
116. Lindstad, H., Eskeland, G. S., Psaraftis, H., Sandaas, I., & Strømman, A. H. (2015). Maritime shipping and emissions: A three-layered, damage-based approach. *Ocean Engineering*, 110, 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.09.029>
117. Lloyd's Register. (2019). Fuel production cost estimates and assumptions. This is part of Zero-Emission Vessels: Transition Pathways. In www.lr.org.
118. Magirou, E. F., Psaraftis, H. N., & Bouritas, T. (2015). The economic speed of an oceangoing vessel in a dynamic setting. *Transportation Research Part B Methodological*, 76, 48–67. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.03.001>
119. Mallouppas, G., & Yfantis, E. A. (2021). Decarbonization in Shipping Industry: A review of research, technology development, and innovation proposals. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(4), 415. <https://doi.org/10.3390/jmse9040415>
120. MarineTraffic. (n.d.). *Vessel database*. <https://www.marinetraffic.com>
121. Martínez-López, A., Romero-Filgueira, A., & Chica, M. (2021). Specific environmental charges to boost Cold Ironing use in the European Short Sea Shipping. *Transportation Research. Part D, Transport and Environment*, 94, 102775. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102775>
122. Medhi, J. (2002). *Stochastic models in queueing theory*. Elsevier.
123. Meyer, J., Stahlbock, R., & Voß, S. (2012). Slow Steaming in Container Shipping. 45th Hawaii International Conference on System Sciences, 1306–1314. <https://doi.org/10.1109/hicss.2012.529>
124. MMMCZCS Maersk McKinney Moller Center for Zero Carbon Shipping (2024). *Assessing impacts of EU and US policies on accelerated deployment of alternative maritime fuels*. www.zerocarbonshipping.com. Retrieved October 14, 2024, from <https://www.zerocarbonshipping.com>
125. Mnasri, S., & Alrashidi, M. (2021). A comprehensive modeling of the discrete and dynamic problem of berth allocation in maritime terminals. *Electronics*, 10(21), 2684. <https://doi.org/10.3390/electronics10212684>
126. Moreno-Gutiérrez, J., & Durán-Grados, V. (2020). Calculating ships' real emissions of pollutants and greenhouse gases: Towards zero uncertainties. *The Science of the Total Environment*, 750, 141471. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141471>
127. Nassersharif, B., & Thomas, D. (2023). Nuclear propulsion. In *IntechOpen eBooks*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.110616>
128. Nedelcu, L., Tanase, V., & Rusu, E. (2023). An Evaluation of the Wind Energy along the Romanian Black Sea Coast. *Inventions*, 8(1), 48. <https://doi.org/10.3390/inventions8010048>
129. Notteboom, T., & Haralambides, H. (2023). Seaports as green hydrogen hubs: advances, opportunities and challenges in Europe. *Maritime Economics & Logistics*, 25(1), 1–27. <https://doi.org/10.1057/s41278-023-00253-1>
130. Nuchturee, C., Li, T., & Xia, H. (2020). Energy efficiency of integrated electric propulsion for ships – A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 134, 110145. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110145>

131. Nunes, R. A. O., Alvim-Ferraz, M. C. M., Martins, F. G., Jalkanen, J., Majamäki, E., & Sousa, S. I. V. (2021). HEALTH IMPACTS OF PM_{2.5} AND NO₂ SHIP-RELATED AIR POLLUTION IN MATOSINHOS MUNICIPALITY, PORTUGAL. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. <https://doi.org/10.2495/air210201>
132. Olmer, N., Comer, B., Roy, B., Mao, X., & Rutherford, D. (2017). Greenhouse gas emissions from Global Shipping, 2013–2015 Detailed methodology. *International Council on Clean Transportation: Washington, DC, USA*, 1–38.
133. Onea, F., & Rusu, L. (2019). A study on the wind energy potential in the Romanian coastal environment. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(5), 142. <https://doi.org/10.3390/jmse7050142>
134. Onishchenko, O., Golikov, V., Melnyk, O., Onyshchenko, S., & Obertiur, K. (2022). TECHNICAL AND OPERATIONAL MEASURES TO REDUCE GREENHOUSE GAS EMISSIONS AND IMPROVE THE ENVIRONMENTAL AND ENERGY EFFICIENCY OF SHIPS. *Scientific Journal of Silesian University of Technology Series Transport*, 116, 223–235. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.116.14>
135. Parhamfar, M., Sadeghkhani, I., & Adeli, A. M. (2023). Towards the application of renewable energy technologies in green ports: Technical and economic perspectives. *IET Renewable Power Generation*, 17(12), 3120–3132. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12811>
136. Park, N. K., & Suh, S. C. (2019). Tendency toward Mega Containerships and the Constraints of Container Terminals. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(5), 131. <https://doi.org/10.3390/jmse7050131>
137. Peng, X., Wen, Y., Wu, L., Xiao, C., Zhou, C., & Han, D. (2020). A sampling method for calculating regional ship emission inventories. *Transportation Research. Part D, Transport and Environment*, 89, 102617. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102617>
138. Perčić, M., Vladimir, N., Jovanović, I., & Koričan, M. (2022). Application of fuel cells with zero-carbon fuels in short-sea shipping. *Applied Energy*, 309, 118463. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118463>
139. Pioneers. (2024). *Pioneers Ports*. www.pioneers-port.eu. Retrieved March 2, 2024, from <https://pioneers-ports.eu/>
140. Popp, L., & Müller, K. (2021). Technical reliability of shipboard technologies for the application of alternative fuels. *Energy Sustainability and Society*, 11(1). <https://doi.org/10.1186/s13705-021-00301-9>
141. Popa, M., Rosca, 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), 79–89. <https://doi.org/10.20858/tp.2016.11.2.8>
142. Port of Constanța Administration. (2022). *Annual Report/Port of Constanța*.
143. Port of Constanța Administration. (2023). *Port of Constanța Presentation*. www.portofconstantza.com. Retrieved February 2, 2024, from https://www.portofconstantza.com/pn/page/np_prezentare_port
144. Poulsen, R. T., Ponte, S., & Sornn-Friese, H. (2018). Environmental upgrading in global value chains: The potential and limitations of ports in the greening of maritime transport. *Geoforum*, 89, 83–95. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2018.01.011>
145. Pruyn, J., & Willeijns, J. (2022). Cold ironing: modelling the interdependence of terminals and vessels in their choice of suitable systems. *Journal of Shipping and Trade*, 7(1). <https://doi.org/10.1186/s41072-022-00119-4>
146. Prussi, M., Scarlat, N., Acciaro, M., & Kosmas, V. (2021). Potential and limiting factors in the use of alternative fuels in the European maritime sector. *Journal of Cleaner Production*, 291, 125849. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125849>
147. Psaraftis, H. N. (2019). Sustainable shipping. *Maritime and Port Logistics of the MHCL 2019, Bar, Montenegro*.
148. Raicu, S., Costescu, D., & Popa, M. (2023). Effects of the queue discipline on system performance. *AppliedMath*, 3(1), 37–48. <https://doi.org/10.3390/appliedmath3010003>
149. **Rauca, L., & Batrinca, G. (2022). Assessment of business process vs environmental impact of ship emissions: the case of a container terminal in Port of Constanța, Romania. 40th IBIMA International Conference, Seville, Spain, (ISBN: 979-8-9867719-0-8) and (ISSN: 2767-9640).**
150. **Rauca, L., & Batrinca, G. (2023). Impact of carbon intensity indicator on the vessels' operation and analysis of onboard operational measures. Sustainability, 15(14), 11387. https://doi.org/10.3390/su151411387**
151. **Rauca, L., & Batrinca, G. (2024). Assessment of the lost cargo capacities of a container vessel when transitioning to alternative fuels. AIN Journal, 49(1). https://doi.org/10.59660/49140**
152. **Rauca, L., & Nicolae, F. (2022). ASSESSMENT OF THE ENVIRONMENTAL IMPACT BY MERCHANT VESSELS' VOYAGE MONITORING. Scientific Bulletin of Naval Academy, XXV(2), 21–36. https://doi.org/10.21279/1454-864x-22-i2-002**

153. **Rauca, L., & Carp, D. (2024).** Overview of the vessel's costs under EU emission regulations. *Scientific Bulletin of Naval Academy*, XXVII(2), 225–233. ISSN: 2392-8956
154. **Rauca, L., Popa, C., Atodiresei, D., & Nedelcu, A. T. (2025).** Port Performance and Its Influence on Vessel Operating Costs and Emissions. *Logistics*, 9(3), 122. <https://doi.org/10.3390/logistics9030122>
155. **Raut, J., Law, K. S., Onishi, T., Daskalakis, N., & Marelle, L. (2022).** Impact of shipping emissions on air pollution and pollutant deposition over the Barents Sea. *Environmental Pollution*, 298, 118832. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.118832>
156. **Reusser, C. A., & Osses, J. R. P. (2021).** Challenges for Zero-Emissions ship. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(10), 1042. <https://doi.org/10.3390/jmse9101042>
157. **Rhodes, R., Leiphardt, C., Young, H. S., Morten, J., Hayes, B., Dillon, J., Louttit, W., Powell, M., & McCauley, D. J. (2025).** Investigation of a port queuing system on CO2 emissions from container shipping. *Marine Pollution Bulletin*, 218, 118151. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.118151>
158. **Rusu, E. (2009).** Wave energy assessments in the Black Sea. *Journal of Marine Science and Technology*, 14(3), 359–372. <https://doi.org/10.1007/s00773-009-0053-6>
159. **Salmon, N., & Bañares-Alcántara, R. (2021).** Green Ammonia as a Spatial Energy Vector: A review. *Sustainable Energy & Fuels*, 5(11), 2814–2839. <https://doi.org/10.1039/D1SE00345C>
160. **Schroer, M., Panagakos, G., & Barfod, M. B. (2022).** An evidence-based assessment of IMO's short-term measures for decarbonizing container shipping. *Journal of Cleaner Production*, 363, 132441. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132441>
161. **Schwarzkopf, D. A., Petrik, R., Matthias, V., Quante, M., Yu, G., & Zhang, Y. (2022).** Comparison of the impact of ship emissions in northern Europe and eastern China. *Atmosphere*, 13(6), 894. <https://doi.org/10.3390/atmos13060894>
162. **Seo, D. W. (2014).** Explicit Formulae for Characteristics of Finite-Capacity M/D/1 Queues. *ETRI Journal*, 36(4), 609–616.
163. **Serra, P., & Fancello, G. (2020).** Towards the IMO's GHG goals: A critical overview of the perspectives and challenges of the main options for decarbonizing international shipping. *Sustainability*, 12(8), 3220. <https://doi.org/10.3390/su12083220>
164. **Sinclair, B. (2002).** Priority M/G/1 Queue with and without Preemption. *pp. http://www.shihada.com/F10-337/papers/mg1p.pdf*.
165. **Solecka, K. (2014).** Electre III method in assessment of variants of integrated urban public transport system in Cracow. *Transport Problems*, 9(4), 83–96.
166. **Sorte, S., Rodrigues, V., Borrego, C., & Monteiro, A. (2020).** Impact of harbour activities on local air quality: A review. *Environmental Pollution*, 257, ISSN 0269-7491. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113542>
167. **Styhre, L., Winnes, H., Black, J., Lee, J., & Le-Griffin, H. (2017).** Greenhouse gas emissions from ships in ports – Case studies in four continents. *Transportation Research. Part D, Transport and Environment*, 54, 212–224. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.04.033>
168. **Sztrik, J. (2016).** *Basic queueing theory* (pp. 978-3639734713). OmniScriptum GmbH, KG, Saarbrücken, Germany: GlobeEdit.
169. **Taspinar, T., & Orman, Z. (2023).** VOYAGE SPEED OPTIMIZATION USING GENETIC ALGORITHM. *The International Journal of Maritime Engineering*, 165(A1), 89–102. <https://doi.org/10.5750/ijme.v165ia1.1200>
170. **Tran, N. K., Lam, J. S. L., Jia, H., & Adland, R. (2021).** Emissions from container vessels in the port of Singapore. *Maritime Policy & Management*, 49(3), 306–322. <https://doi.org/10.1080/03088839.2021.1980236>
171. **Tu, H., Liu, Z., & Zhang, Y. (2024).** Study on Cost-Effective Performance of Alternative Fuels and Energy Efficiency Measures for Shipping Decarbonization. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(5), 743. <https://doi.org/10.3390/jmse12050743>
172. **United Nations. (2020).** *United Nations Environment Programme (UNEP)*. www.unep.org. Retrieved November 4, 2022, from <https://www.unep.org/news-and-stories/story/how-climate-change-making-record-breaking-floods-new-normal>
173. **United Nations. (2024).** Review of Maritime Transport 2024. In *Review of maritime transport*. <https://doi.org/10.18356/9789211065923>
174. **Vahabzad, N., Mohammadi-Ivatloo, B., & Anvari-Moghaddam, A. (2021).** Optimal energy scheduling of a solar-based hybrid ship considering cold-ironing facilities. *IET Renewable Power Generation*, 15(3), 532–547. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12015>

175. VesselFinder. (n.d.). *AIS vessel information*. <https://www.vesselfinder.com>
176. Wackerly, D. D., Mendenhall, W., & Scheaffer, R. L. (2008). *Mathematical statistics with applications* (Vol. 7). Belmont, CA: Thomson Brooks/Cole.
177. Wang, H., Lang, X., & Mao, W. (2021). Voyage optimization combining genetic algorithm and dynamic programming for fuel/emissions reduction. *Transportation Research. Part D, Transport and Environment*, 90, 102670. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102670>
178. Wang, X., Shen, Y., Lin, Y., Pan, J., Zhang, Y., Louie, P. K. K., Li, M., & Fu, Q. (2019). Atmospheric pollution from ships and its impact on local air quality at a port site in Shanghai. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(9), 6315–6330. <https://doi.org/10.5194/acp-19-6315-2019>
179. Wang, Y., & Wright, L. (2021). A Comparative review of alternative fuels for the maritime sector: economic, technology, and policy challenges for clean energy implementation. *World*, 2(4), 456–481. <https://doi.org/10.3390/world2040029>
180. Walther, L. (2021). Development of a weather routing system for analysis and optimization of ship voyage. Fraunhofer Verlag.
181. Wartsila. (2021). *Onboard carbon capture and storage*. www.wartsila.com. Retrieved March 5, 2023, from <https://www.wartsila.com/marine/products/exhaust-treatment/carbon-capture-and-storage>
182. Wu, P., & Bucknall, R. (2019). Hybrid fuel cell and battery propulsion system modelling and multi-objective optimisation for a coastal ferry. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(4), 3193–3208. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.11.152>
183. Wu, Y., Huang, Y., Wang, H., & Zhen, L. (2022). Nonlinear programming for fleet deployment, voyage planning and speed optimization in sustainable liner shipping. *Electronic Research Archive*, 31(1), 147–168. <https://doi.org/10.3934/era.2023008>
184. Xiao, G., Wang, Y., Wu, R., Li, J., & Cai, Z. (2024). Sustainable Maritime Transport: A review of intelligent shipping technology and green port construction applications. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(10), 1728. <https://doi.org/10.3390/jmse12101728>
185. Xing, H., Stuart, C., Spence, S., & Chen, H. (2021). Fuel cell power Systems for Maritime Applications: Progress and Perspectives. *Sustainability*, 13(3), 1213. <https://doi.org/10.3390/su13031213>
186. Yan, R., Wang, S., & Du, Y. (2020). Development of a two-stage ship fuel consumption prediction and reduction model for a dry bulk ship. *Transportation Research. Part E, Logistics and Transportation Review*, 138, 101930. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.101930>
187. Ytreberg, E., Åström, S., & Fridell, E. (2021). Valuating environmental impacts from ship emissions – The marine perspective. *Journal of Environmental Management*, 282, 111958. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.111958>
188. Yu, H., Fang, Z., Fu, X., Liu, J., & Chen, J. (2021). Literature review on emission control-based ship voyage optimization. *Transportation Research. Part D, Transport and Environment*, 93, 102768. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102768>
189. Yuan, Q., Wang, S., Zhao, J., Hsieh, T., Sun, Z., & Liu, B. (2022). Uncertainty-informed ship voyage optimization approach for exploiting safety, energy saving and low carbon routes. *Ocean Engineering*, 266, 112887. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112887>
190. Zaccone, R., Ottaviani, E., Figari, M., & Altosole, M. (2018). Ship voyage optimization for safe and energy-efficient navigation: A dynamic programming approach. *Ocean Engineering*, 153, 215–224. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.01.100>
191. Zhang, Q., Guan, H., Chen, S., & Wan, Z. (2024). Towards decarbonization: How EEXI and CII regulations affect container Liner fleet deployment. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 133, 104277. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104277>
192. Zhang, Z., Song, C., Zhang, J., Chen, Z., Liu, M., Aziz, F., Kurniawan, T. A., & Yap, P. (2023). Digitalization and innovation in green ports: A review of current issues, contributions and the way forward in promoting sustainable ports and maritime logistics. *The Science of the Total Environment*, 912, 169075. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169075>
193. Zis, T. P. (2019). Prospects of Cold Ironing as an emissions reduction option. *Transportation Research. Part a, Policy and Practice*, 119, 82–95. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.11.003>
194. Zis, T., North, R. J., Angeloudis, P., Ochieng, W. Y., & Bell, M. G. H. (2014). Evaluation of Cold Ironing and speed reduction policies to reduce ship emissions near and at ports. *Maritime Economics & Logistics*, 16(4), 371–398. <https://doi.org/10.1057/mel.2014.6>