



Fattori di emissione nei porti: incertezze ed effetti potenziali sulla progettazione e sull'esercizio sostenibili

Emission factors in ports: uncertainties and potential effects on sustainable design and operation

(<https://www.medra.org/servlet/view?lang=it&doi=10.57597/IF.09.2025.ART.2>)

Cristiano MARINACCI^(*)
Stefano RICCI^(*)

Sommario - I processi di progettazione e le procedure operative nei terminali marittimi racchiudono una serie di decisioni strategiche, che coinvolgono le risorse di maggiore rilievo. In effetti condizioni operative prossime alla capacità possono generare congestione ed effetti negativi sulla regolarità dei traffici. Gli autori hanno sviluppato metodi e modelli di supporto alle decisioni chiave [1], selezionando i parametri più appropriati per descrivere i terminali, determinando le loro caratteristiche dimensionali e di attrezzaggio e verificando la loro produttività sulla base di indagini su terminali portuali in esercizio, estese a un campione di oltre 700 terminali. I risultati di tale studio rappresentano le basi per la ricerca qui descritta che si focalizza su: 1) correlazione fra criteri di progettazione ed esercizio e requisiti di sostenibilità ambientale relative all'intero ciclo di vita dei porti; 2) applicabilità a terminali portuali di varie dimensioni, al servizio di diverse tipologie di traffico: Container, RoRo e Crociere, gestiti secondo varie regolamentazioni, comportamenti umani basati su culture diverse e diversi livelli di automazione.

1. Introduzione

I dati pubblicamente disponibili sulle emissioni generate dalle aree portuali sono rari e normalmente si riferiscono ai potenziali di generazione dalle navi o di altre sorgenti o alle concentrazioni di sostanze localmente inquinanti in specifiche aree. In questo contesto, la combinazione dell'approccio di alto livello della ricerca in essere e la complessità delle modalità di dispersione dei gas inquinanti, dipendenti dalla variabilità delle condizioni meteorologiche, che condizionano le concentrazioni locali, porta naturalmente il presente lo studio a focalizzarsi sulla generazione delle emissioni gassose, che giocano un ruolo a livello globale e

Summary - The maritime terminals design and operation processes includes a series of strategic decisions involving the engagement of relevant resources. In fact, conditions near the capacity generate congestion and negative effects on traffic regularity. The authors developed methods and models to support key decisions [1], selecting the most suitable parameters to describe the terminals, determining their dimensional and equipment characteristics and verifying their productivity based on surveys on terminals in operation, covering a sample of over 700 terminals. The achievements of this study represent the basis for the present research, focused on: 1) correlation between key design and operation criteria and lifecycle environmental sustainability requirements for ports; 2) applicability to terminals of various dimensions, handling various typologies of traffic: container, RoRo and cruise, operated according to various rules, cultural-depending human behaviours and levels of automation.

1. Introduction

The available public data on gaseous emissions generated from port areas are rare and normally concern either the generation potential from ships and other sources or the concentrations of local pollutants in specific areas. Moreover, the global high-level approach of our research purposes, combined with the complexity of the gaseous dispersions depending on the variability of meteorological conditions affecting the local concentration, brings naturally the focus of the study on the generation of gaseous emissions playing a key role both at global and local levels. It strongly depends on a large set of operational parameters, as clearly emerge both from scientific literature and from the studies carried out by port authorities, shipping companies and terminal operators

^(*) Sapienza Università di Roma, DICEA.

^(*) Sapienza University of Rome, DICEA.

locale. Il processo di generazione dipende sensibilmente da un'ampia gamma di parametri operativi, come emerge dalla letteratura scientifica e dagli studi sviluppati su iniziativa di autorità portuali, compagnie di navigazione e operatori di terminali portuali, frequentemente a seguito delle pressioni esercitate dalle amministrazioni e dalle comunità locali. Parametri tipici sono le tipologie di navi, motorizzazioni e loro sistemi di propulsione da esse adottate, combustibili impiegati, tempi trascorsi nelle aree portuali all'attracco o in manovra, equipaggiamenti e misure adottati per la riduzione delle emissioni.

La ricerca e la raccolta dei dati ha coinvolto una selezione di parametri ambientali disponibili da fonti pubbliche e affidabili e le analisi di consistenza e affidabilità su tali dati. Le attività in corso si focalizzano sulla ricerca di correlazioni affidabili e consolidate fra i parametri ambientali e quelli inerenti alle dimensioni, alle attrezzature e al traffico. I dati raccolti evidenziano variabilità importanti, che si traducono in incertezze per un'appropriata modellazione dei più affidabili fattori di emissione capaci di rappresentare i meccanismi di generazione e di prevederli in funzione delle composizioni delle flotte afferenti i porti e i singoli terminali al loro interno, così come in funzione della morfologia dei porti stessi. Queste incertezze nei fattori di emissione sono rappresentate, interpretate e correlate con i vari parametri che possono avere un effetto, in vista del loro sistematico uso nella definizione di una progettazione e una gestione sostenibili dei porti, che sono fra gli specifici obiettivi del progetto di ricerca *Design of Maritime Sustainable Terminals* (DEMASTER), che coinvolge Sapienza Università di Roma, in collaborazione con le Università di Catania e Ljubljana.

I successivi passi della ricerca si focalizzeranno sulla derivazione di criteri di progettazione (ad esempio dimensioni e attrezzature compatibili con livelli di emissioni gassose prefissati) o di gestione operativa (ad esempio traffico gestibile compatibilmente con livelli di emissioni gassose prefissati o misure più appropriate da adottare per favorire la decarbonizzazione).

2. Stato dell'arte

2.1. Caratterizzazione dimensionale, operativa e di traffico dei terminali marittimi

I terminali marittimi sono ambienti operativi complessi, dove attrezzature caratterizzate da livelli crescenti di automazione interagiscono con azioni umane basate su consolidate procedure finalizzate a massimizzare l'efficacia operativa assicurando comunque elevati livelli di sicurezza [2]. Nonostante la varietà delle operazioni fra le diverse tipologie di terminali (Container, Rinfuse solide e liquide, RoRo, RoPax, Cruise, etc.), si riscontrano similarità nei vincoli operativi e nelle soluzioni adottate per la logistica lato mare e lato terra. Pertanto, la progettazione dei terminali portuali è complessa e largamente basata su metodologie che apprendono dai terminali in esercizio, particolarmente per il dimensionamento geometrico preliminare, per le attrezzature da impiegare e per la quantificazione del personale.

under the pressure of administrations and independent local communities. Typical parameters are the typologies of ships, their motorization and propulsion systems, the various fuels employed, the time spent docking and maneuvering, the on-board equipment for the reduction of emissions.

The data collection involved a selection of environmental parameters available from public and reliable sources and the consistency and reliability analysis on this data. The ongoing activities are focused on the search of consolidated reliable correlation among selected environmental parameters and parameters related to dimensions, equipment and traffic. The data collected shows important variability and uncertainties for appropriate modeling the most reliable emission factors capable of reproducing the emission generation mechanisms and forecasting them depending on the composition of the fleets calling the ports and the single terminals, as well as the morphology of the ports themselves. These uncertainties in emission factors are presented, interpreted and correlated with various potentially affecting parameters in view of their systematic use in the definition of sustainable design and operation, which is among the specific aims of the Design of Maritime Sustainable Terminals (DEMASTER) Project, involving Sapienza University of Rome, in cooperation with the Universities of Catania and Ljubljana.

The next research steps will focus on deriving design criteria (e.g. dimensions and equipment compatible with a certain level of gaseous or noise emissions, selection) or operational performance (e.g. traffic manageable with a certain level of gaseous or noise emissions, most appropriate decarbonization measures to implement).

2. State of the art

2.1. Dimensional, operational and traffic characterization of maritime terminals

Maritime terminals are complex operational environments, where equipment characterized by increasing level of automation interacts with human actions based on consolidated procedures finalized to maximize the effectiveness of the operation ensuring high safety levels [2]. Though the variety of the operations across terminals' typologies (Container, Solid and Fluid Bulk, RoRo, RoPax, Cruise, etc.), similarity exists in constraints and solutions related to seaside and landside logistics. Therefore, the design of the terminals is complex and largely based on methodologies learning from the terminals in operation, particularly from preliminary geometrical dimensioning, equipment and personnel sizing.

The most consolidated approaches based on learning processes arose from the study of the Container terminals, where the traffic volumes are bigger, the intermodal logistic is more stringent and the modeling is simplified by the modularity of the units. Stochastic methods, trained by the background data from operated terminals, largely demonstrated their ability to manage the preliminary dimensioning of terminals in ports. They can integrate dimensions

Gli approcci più consolidati basati su processi di apprendimento emergono dallo studio dei terminali Container, nei quali i volumi di traffico sono più consistenti, la logistica intermodale presenta vincoli più stringenti e la modellazione è semplificata dalla modularità delle unità di carico. I metodi stocastici, istruiti dai dati di *background* dei terminali in esercizio, hanno dimostrato la loro abilità a gestire il dimensionamento preliminare dei terminali portuali. Essi possono integrare dimensioni e manovrabilità delle navi [3], morfologia dei terminali stessi, attrezzature di movimentazione, aree di stoccaggio, ecc., con l'obiettivo di supportare il processo di pianificazione e la progettazione, così come la stessa gestione operativa. Questi metodi consentono la selezione dei parametri più appropriati a descrivere i terminali, a determinare le loro caratteristiche dimensionali e le attrezzature e a verificare la loro produttività. Esempi consolidati relativi a terminal Container portuali possono essere trovati in [1][4][5][6]. Nello stesso tempo, approcci simili sono utilizzati per ambienti operativi molto diversi, quali quelli dei terminali per le Rinfuse solide, come in [7].

2.2. Caratterizzazione ambientale dei terminali marittimi

Nel campo degli effetti sull'ambiente provocati dall'esercizio dei terminali marittimi, lo stato dell'arte riguarda prevalentemente la generazione di emissioni gassose, che giocano un ruolo chiave a livello globale e locale. Uno screening iniziale sugli articoli che forniscono i fattori di emissione che mettono in relazione le quantità emesse con i dati del traffico marittimo ha evidenziato 31 documenti, selezionati sulla base dei filtri coerenti con gli scopi del progetto DEMASTER: i) terminali Container, RoRo e Crociere; ii) emissioni delle navi durante le soste in banchina.

14/31 articoli forniscono direttamente i valori delle emissioni (Tab. 1), mentre 5/31 articoli forniscono formulazioni per il calcolo dei fattori di emissione per le rispettive categorie di navi. I fattori di emissione forniti all'interno dei suddetti documenti possono essere sinteticamente ricondotti ai seguenti parametri (la presente ricerca si focalizza sui parametri sottolineati):

- Attività delle navi: navigazione, manovra, sosta in banchina (oggetto dello studio).
- Tipologia dei motori: principali, ausiliari (prevalenti durante le soste in banchina).
- Velocità dei motori: bassa, media, alta.
- Generazione dei motori: *Tier 0* (prima del 2000), *Tier 1* (2000-2010), *Tier 2* (2011-2015), *Tier 3* (dal 2016).
- Fattore di carico dei motori: 12-

and handiness of ships [3], terminal morphology, handling equipment, storage areas, etc., with the aim to support planning and design process as well as the operational management themselves. These methods allow selecting the most suitable parameters to describe the terminals, to determine their dimensional and equipment characteristics and to verify their production. Consolidated examples for Container terminals can be found in [1][4][5][6]. Meanwhile, similar approaches are also used in the very different operational environment of Solid Bulk terminals, such as in [7].

2.2. Environmental characterization of maritime terminals

In the field of environmental effects of maritime terminals operation, the state-of-the-art review has been focused on the generation of gaseous emissions playing a key role both at global and local levels. The initial screening on papers providing emission factors connecting the values of the emissions depending on shipping traffic data allows a selection of 31 relevant documents, using the filters coherent with the scopes of DEMASTER project: i) Container, RoRo and Cruise terminals; ii) emissions of ships at docking phases. 14/31 of these papers provide direct values of emissions (Tab. 1), meanwhile 5/31 papers provide formulations to calculate the emission factors for the corresponding categories of ships. The emission factors provided within these studies can be synthetically reported to the following parameters. The present study is focused on the underlined parameter:

- Activity of the ships: navigation, maneuver, docking (focus of the study).
- Typology of the engines: principal, auxiliary (prevalent in the docking phase).

Tabella 1 – Table 1

Tipologie di fattori di emissioni proposte nei rispettivi articoli di riferimento
Typologies of emissions factors proposed by the respective referenced papers

Riferimento bibliografico <i>References</i>	Porto di riferimento <i>Concerned port</i>	Emissioni calcolate <i>Calculated emissions</i>
ALBO LÓPEZ <i>et al.</i> (2023) [8]	Vigo (ES)	CO ₂ NO _x SO _x PM
CANEPÀ <i>et al.</i> (2023) [9]	Genova (IT)	CO ₂ NO _x SO _x PM
DÍAZ VÁZQUEZ <i>et al.</i> (2024) [10]	Veracruz (MX)	CO ₂
GRIGORIADIS <i>et al.</i> (2021) [11]	GENERALI <i>GENERAL</i>	CO ₂ NO _x SO _x PM
KNEŽEVIĆ <i>et al.</i> (2018) [12]	Zadar (HR)	CO ₂ NO _x SO _x PM
KNEŽEVIĆ <i>et al.</i> (2021) [13]	Zadar (HR)	CO ₂ NO _x SO _x PM
PASTORČIĆ <i>et al.</i> (2020) [14]	Šibenik (HR)	CO ₂ NO _x SO _x PM
RADONJA <i>et al.</i> (2020) [15]	Rijeka (HR)	CO ₂ NO _x SO _x PM
STAZIĆ <i>et al.</i> (2020) [16]	Split (HR)	CO ₂ NO _x SO _x PM
TZANNATOS (2010) [17]	Piraeus (GR)	NO _x SO _x PM
ZEKIĆ <i>et al.</i> (2022) [18]	Dubrovnik (HR)	CO ₂

17% per i motori ausiliari durante le soste in banchina delle navi Container, Roro e da Crociera.

- Unità dei fattori di emissione: energia [kWh], massa [t].
- *Heavy Fuel Oil (HFO), Residual Oil (RO), Marine Diesel Oil (MDO), Marine Gas Oil (MGO) e Low Sulphur Fuel Oil (LSFO).*
- Emissioni gassose globali e locali: CO₂, NO_x, SO_x, PM_{2.5} e PM₁₀.

La variabilità dei fattori di emissione corrispondenti è descritta e discussa nel capitolo 4.

3. Indagine sui terminali portuali in esercizio

L'indagine è stata condotta utilizzando esclusivamente fonti di dati pubbliche, raccogliendo, sistematizzando e analizzando i dati più aggiornati, su base annuale, relativi a porti principalmente ma non esclusivamente europei, nei quali si sia svolto traffico Container, RoRo o Crociere, che sono riportati in Tab. 2. Dati multipli, riferiti ad anni diversi sono stati comunque considerati per accrescere le dimensioni del campione e la qualità delle potenziali correlazioni.

4. Correlazione fra parametri ambientali e di traffico

4.1. Incertezze nelle emissioni unitarie risultanti dalla letteratura scientifica

La variabilità dei fattori di emissione tratti dalla letteratura scientifica relativi ai periodi di sosta in banchina delle navi è descritta nelle Tab. 3 e Tab. 4 con riferimento agli studi selezionati ed elencati in Tab. 1, mentre nelle Tab. 5 e Tab. 6 sono riportati valori medi, deviazioni standard assolute e percentuali dei fattori di emissione, considerando rispettivamente l'impiego come combustibili del MGO e del MDO.

L'accurata analisi della letteratura scientifica sui fattori di emissione relativi alle fasi di permanenza in banchina ha messo in evidenza un elevato livello di incertezze, dimostrato dai valori delle deviazioni standard prossimi al 50% dei valori medi e oltre tale valore per le emissioni di SO_x, particolarmente sensibili alle tipologie di combustibili, per le navi alimentate con MDO. Nello stesso tempo i valori più stabili, sebbene comunque caratterizzati da valori di deviazioni standard oltre il 40%, risultano quelli relativi alle emissioni di CO₂, rappresentati in Fig. 1.

4.2. Confronto con i dati utilizzati da alcuni modelli di calcolo e da riconosciuti database

In questo campo diversi riferimenti bibliografici possono essere utilizzati per analisi comparative fra i dati raccolti per questo studio e quelli impiegati di default da riconosciuti modelli di calcolo e raccomandati da riconosciuti database. I riferimenti che sono stati considerati, fra gli altri, sono (Tab. 7):

- *UK Ship Emissions Inventory* [19] per tutte le sostanze considerate.

- *Speed of the engines: low, medium, high.*
- *Generation of the engines: Tier 0 (before 2000), Tier 1 (2000-2010), Tier 2 (2011-2015), Tier 3 (from 2016).*
- *Load factors of the engines: 12-17% for auxiliary engines during the docking phases of Container, Roro and Cruise ships.*
- *Emission factors units: energy [kWh], mass [t].*
- *Heavy Fuel Oil (HFO), Residual Oil (RO), Marine Diesel Oil (MDO), Marine Gas Oil (MGO) and Low Sulphur Fuel Oil (LSFO).*
- *Global and local gaseous emissions: CO₂, NO_x, SO_x, PM_{2.5} and PM₁₀.*

The variability of the corresponding emission factors is described and discussed in section 4.

3. Investigation into the operated terminals

The investigation has been carried out by using public sources only and has systematically and extensively collected data characterizing European ports where Container, RoRo or Cruise traffic has been recorded in the last available years. The yearly data collected concerns the parameters described in Tab. 2. Multiple data have been recorded for terminals providing environmental parameters to increase the data available for potential correlations.

4. Correlation between environmental and traffic parameters

4.1. Uncertainties in unit emission factors resulting from literature

The variability of the emission factors resulting from the literature review for the docking phase of the ships is highlighted in Tab. 3 and Tab. 4 with reference to the selected studies listed in Tab. 1, meanwhile in Tab. 5 and Tab. 6 are reported average values, standard deviation and percentual standard deviation of emission factors, respectively considering Marine Gas Oil (MGO) and Marine Diesel Oil (MDO) as fuels.

The careful analysis of the literature on emission factors of ships during their docking phase at ports highlighted a high level of uncertainties demonstrated by values of the standard deviation close to 50% of the average values, and beyond these values for the SO_x emissions, particularly sensible to the fuel typologies, for MDO fueled ships. Meanwhile the most stable value, though always beyond 40% of standard deviation, is detected for CO₂ emissions, specifically represented in Fig. 1.

4.2. Comparison with data used by some calculation models and recognized inventories

Various references exist in this field that can be used for a cross-check analysis between the data emerging from our

Tabella 2 – Table 2

Valori dei parametri dimensionali, operativi e ambientali raccolti per i terminali marittimi oggetto dell'indagine
 Values of operational and environmental parameters collected for the maritime terminals investigated

Parametri Parameter	Dati raccolti Recorded data
Nazioni Country	America (US). Europa (AL, BE, BG, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GE, GR, HR, IE, IS, IT, LT, LV, MC, ME, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RU, SE, SI, UA, UK). Asia (JP). Oceania (AU). Totale: 33 – Total: 33.
Porti Port	America: US (2). Europa: AL (1), BE (3), BG (2), DE (3), DK (8), EE (1), ES (26), FI (8), FR (21), GE (2), GR (7), HR (6), IE (4), IS (8), IT (36), LT (1), LV (3), MC (1), ME (2), MT (2), NL (3), NO (18), PL (4), PT (10), RO (1), RU (2), SE (18), SI (1), UA (3), UK (31). Asia: JP (1). Oceania: AU (1). Totale: 241 – Total 241.
Terminali Terminal	Totale: 535 (624 record includendo i dati multipli) Total: 535 (624 records, including multiple data)
Tipologia Typology	Container (238), Crociere (181), RoRo (187), Aggregati (18) Container (238), Cruise (181), RoRo (187), Aggregated (18)
Anni Year	2010 - 2025
Lunghezza delle banchine [m] Quay length [m]	50 - 4986
Area totale [m ²] Total area [m ²]	5667 - 5000000
Area di stoccaggio scoperta [m ²] Uncovered stacking area [m ²]	1080 - 2200000
Area di stoccaggio coperta [m ²] Covered stacking area [m ²]	572 - 500000
Gru di banchina Gantry cranes	1 - 90
Altre gru Other cranes	1 - 80
Caricatori vari Various loaders	1 - 341
TEU movimentati (10000) Handled TEU (10000)	10516 - 1382000
Volumi movimentati (100000 t) Handled tonnage (100000 t)	101000 - 148900000
Toccate annuali delle navi Yearly ships calls	10 - 105596
Tempo in banchina [h] Ships docking time [h]	90 - 200000
Emissioni di CO ₂ [t] CO ₂ emissions [t]	402 - 320000
Emissioni di NO _x [t] NO _x emissions [t]	5 - 11000
Emissioni di SO _x [t] SO _x emissions [t]	0 - 5500
Emissioni di PM [t] PM Emissions [t]	0 - 560
Emissioni di CO ₂ [t/toccata] CO ₂ emissions [t/call]	0.109 - 2157.895
Emissioni di NO _x [t/toccata] NO _x emissions [t/call]	0.007 - 7.266
Emissioni di SO _x [t/toccata] SO _x emissions [t/call]	0.000 - 3.236
Emissioni di PM [t/toccata] PM Emissions [t/call]	0.000 - 0.337
Emissioni di CO ₂ [t/h] CO ₂ emissions [t/h]	0.100 - 10.593
Emissioni di NO _x [t/h] NO _x emissions [t/h]	0.002 - 0.223
Emissioni di SO _x [t/h] SO _x emissions [t/h]	0.000 - 0.037
Emissioni di PM [t/h] PM Emissions [t/h]	0.000 - 0.007

Tabella 3 – Table 3

Valori dei fattori di emissione forniti da studi selezionati dalla letteratura scientifica per le fasi di sosta in banchina di navi che utilizzano il MGO
Values of emission factors based on the selected literature for docking phase of ships using MGO

	Vigo (ES) (2023)	Genova (IT) (2023)	Veracruz (MX) (2024)	GENERAL (2021)	Zadar (HR) (2018)	Zadar (HR) (2021)	Sibenik (HR) (2020)	Rijeka (HR) (2020)	Split (HR) (2020)	Piraeus (GR) (2010)	Dubrovnik (HR) (2022)
CO ₂ [g/kWh]	696	690	690	615	88	588	588	588	652	-	690
NO _x [g/kWh]	10.5	11.8	-	12.4	14.1	14.1	14.1	14.1	-	-	-
SO _x [g/kWh]	0.420	0.460	-	0.355	0.700	0.700	0.700	0.700	0.410	-	-
PM [g/kWh]	0.170	0.300	-	0.221	0.300	0.300	0.300	0.300	0.400	-	-

Tabella 4 – Table 4

Valori dei fattori di emissione forniti da studi selezionati dalla letteratura scientifica per le fasi di sosta in banchina di navi che utilizzano il MDO
Values of emission factors based on the selected literature for docking phase of ships using MDO

	Vigo (ES) (2023)	Genova (IT) (2023)	Veracruz (MX) (2024)	GENERALE (2021) GENERAL (2021)	Zadar (HR) (2018)	Zadar (HR) (2021)	Sibenik (HR) (2020)	Rijeka (HR) (2020)	Split (HR) (2020)	Piraeus (GR) (2010)	Dubrovnik (HR) (2022)
CO ₂ [g/kWh]	-	690	690	615	588	588	588	588	652	-	-
NO _x [g/kWh]	-	11.8	-	12.4	14.1	14.1	14.1	14.1	-	13.9	-
SO _x [g/kWh]	-	0.460	-	0.355	5.600	5.600	5.600	5.600	0.410	4.300	-
PM [g/kWh]	-	0.300	-	0.221	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400	0.300	-

- EMEP/EEA *air pollutant emission inventory guidebook* 2023 [20] per NO_x e PM.

Le differenze che emergono confermano le incertezze che caratterizzano numerosi insiemi di dati riferiti a navi con diverse tipologie di motorizzazione e carburante. Esse cambiano tipicamente a seguito degli sviluppi tecnologici, sebbene le evoluzioni siano moderate dalla lunga vita tecnica delle navi.

In particolare:

- Le moderate differenze fra le emissioni di CO₂ (10-17% in meno), dipendono principalmente dalle differenze

Variabilità dei fattori di emissione forniti da studi selezionati dalla letteratura scientifica per le fasi di sosta in banchina di navi che utilizzano il MGO
Variability of emission factors based on the selected literature references for docking phase of ships using MGO

Tabella 5 – Table 5

Carburante: MGO <i>Fuel: Marine Gas Oil (MGO)</i>	Fattori di emissione [g/kWh] <i>Emission factors [g/kWh]</i>			
	CO ₂	NO _x	SO _x	PM
Valore medio <i>Average value</i>	588.500	13.014	0.556	0.286
Deviazione standard <i>Standard deviation</i>	233.979	6.353	0.277	0.138
Deviazione standard percentuale <i>Percentual Standard deviation</i>	40.1%	48.8%	49.9%	48.3%

temporali fra i diversi studi (2018-2024) e il database Defra (2010).

- Le differenze fra le emissioni di NO_x sono trascurabili rispetto al database Defra ma più importanti (25-58% in più) in confronto con il EMEP/EEA guidebook e richiedono ulteriori approfondimenti al di là degli obiettivi di questo studio.
- Le rilevanti differenze fra le emissioni di SO_x (62-86% in meno), dipendono chiaramente dalle differenze temporali fra i diversi studi (2018-2024) e il database Defra (2010) e l'importante evoluzione delle normative e della qualità dei carburanti nel periodo considerato.
- Le moderate differenze fra le emissioni di PM rispetto al database Defra (2010) (5-13% less) dipendono anch'esse dalle differenze temporali fra gli studi, mentre le differenze più importanti (29-54% in più) in confronto con il EMEP/EEA guidebook e richiedono anch'esse ulteriori approfondimenti.

4.3. Incertezze nelle previsioni di emissioni aggregate risultanti dalle indagini sui terminali portuali in esercizio

La variabilità dei valori delle emissioni emerge dalle indagini svolte sui terminali portuali descritti in Tab. 2, nelle quali è stato ricostruito il traffico

Tabella 6 – Table 6
Variabilità dei fattori di emissione forniti da studi selezionati dalla letteratura scientifica per le fasi di sosta in banchina di navi che utilizzano il MDO
Variability of emission factors based on the selected literature references for docking phase of ships using MDO

Carburante: MDO Fuel: Marine Diesel Oil (MDO)	Fattori di emissione [g/kWh] Emission factors [g/kWh]			
	CO ₂	NO _x	SO _x	PM
Valore medio Average value	624.875	13.500	3.491	0.353
Deviazione standard Standard deviation	280.695	6.534	2.586	0.167
Deviazione standard percentuale Percentual Standard deviation	44.9%	48.4%	74.1%	47.3%

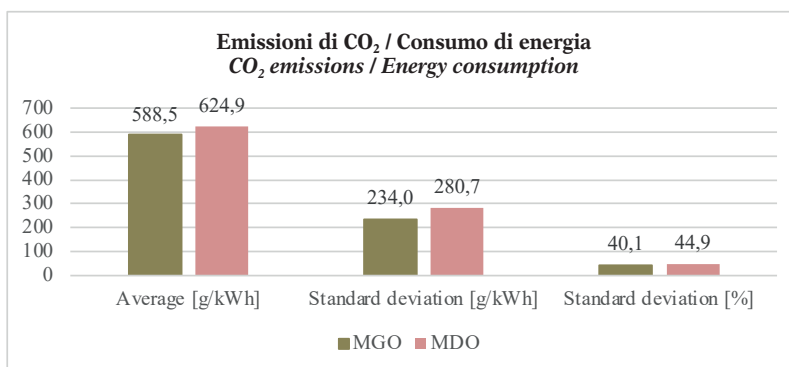


Figura 1 - Fattori di emissione di CO₂ forniti da studi selezionati dalla letteratura scientifica per le fasi di sosta in banchina di navi che utilizzano MGO e MDO.

Figure 1 - CO₂ emission factors based on the selected literature references for docking phase of ships using MGO and MDO.

Tabella 7 – Table 7

Variabilità dei fattori di emissione forniti da studi selezionati dalla letteratura scientifica per le fasi di sosta in banchina di navi che utilizzano MDO e MGO

Variability of emission factors based on the selected literature references for docking phase of ships using MDO

Valori medi per le soste in banchina Average values for docking phase	Fattori di emissione [g/kWh] Emission factors [g/kWh]			
	CO ₂	NO _x	SO _x	PM
Da studi di letteratura (navi che utilizzano MGO) From selected references (ships using MGO)	588.500	13.014	0.556	0.286
Defra. 2010 (navi che utilizzano MGO) Defra. 2010 (ships using MGO)	690.000	13.000	0.900	0.300
Da studi di letteratura (navi che utilizzano MDO) From selected references (ships using MDO)	624.875	13.500	3.491	0.353
Defra. 2010 (navi che utilizzano MDO) Defra. 2010 (ships using MDO)	690.000	13.000	6.500	0.400
European Environment Agency. 2023 (velocità alta) European Environment Agency. 2023 (high speed)	-	8.530	-	0.221
European Environment Agency. 2023 (velocità media) European Environment Agency. 2023 (medium speed)	-	10.800	-	0.215

Container, Crociere e RoRo nei più recenti anni disponibili, per quanto relativo al numero di toccate delle navi nei vari porti e del tempo trascorso in banchina. I risultati sono riassunti nelle Tab. 8 e Tab. 9 per quanto riguarda i valori medi delle emissioni per toccata e per ora di presenza in banchina, separatamente per le navi Container, Crociere e RoRo. I valori medi, le deviazioni standard assolute e percentuali qualificano statisticamente questi risultati.

L'attenta analisi degli indicatori delle emissioni durante il tempo di presenza in banchina evidenzia in genere un livello di incertezza molto alto, dimostrato da valori della deviazione standard frequentemente prossimi o al di là del 100% del valore medio per le navi Container e RoRo. Un panorama diverso è offerto dalle navi da Crociera, le emissioni delle quali sono caratterizzate da valori

investigation and the recommended data from calculation models and largely recognized inventories.

The references that have been considered, among many, are (Tab. 7):

- UK Ship Emissions Inventory [19] for all considered pollutants.
- EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 [20] for NO_x and PM.

The emerging differences confirm the uncertainties affecting large sets of data referring to ships with different typologies of motorization and fuels. They typically change according to technological developments, though the evolutions are moderated by the long technical life of the vessels.

In particular:

- The moderate differences in CO₂ emissions (10-17% less), mainly depend on the temporal differences between the selected references (2018-2024) and the UK inventory (2010).
- The differences in NO_x emissions are negligible in comparison with UK inventory but more important (25-58% more) in comparison with EMEP/EEA guidebook and would need further investigations beyond the objective of the present study.
- The relevant differences in SO_x emissions (62-86% less), clearly depend on the temporal differences between the selected references (2018-2024) and the UK inventory (2010) and the important evolution of normative and fuel quality in the concerned period.
- The moderate differences in PM emissions respect to UK inventory (5-13% less) also depend on the temporal differences between the selected references and the UK inventory, meanwhile the more important differences (29-54% more) respect to EMEP/EEA guidebook would also need further investigations.

4.3. Uncertainties in aggregated emissions forecast resulting from the investigation into operated terminals

The variability of the emissions resulting from the investigation carried out on the extended database of ports described in Tab. 2, where Container, RoRo or Cruise traffic has been recorded in the last available years with reference

Tabella 8 – Table 8

Variabilità delle emissioni/toccata sulla base dei risultati dell'indagine sui terminali operativi per la fase di permanenza in banchina di navi Container, da Crociere e RoRo

Variability of emissions/call based on the results of the investigation into operating terminals for docking phase of Container, Cruise and RoRo ships

Navi Container Record di dati disponibili: 18 <u>Container ships</u> Available data records: 18	Emissioni [t/toccata] Emissions [t/call]			
	CO ₂	NO _x	SO _x	PM
Valore medio Average value	57.859	0.634	0.106	0.038
Deviazione standard Standard deviation	69.761	0.787	0.204	0.047
Deviazione standard percentuale Percentual Standard deviation	120.6%	124.2%	191.5%	122.9%
Navi da Crociera Record di dati disponibili: 33 <u>Cruise ships</u> Available data records: 33	Emissioni [t/toccata] Emissions [t/call]			
	CO ₂	NO _x	SO _x	PM
Valore medio Average value	71.094	1.528	0.121	0.054
Deviazione standard Standard deviation	51.200	1.338	0.118	0.048
Deviazione standard percentuale Percentual Standard deviation	72.0%	87.6%	98.3%	88.9%
Navi RoRo Record di dati disponibili: 24 <u>RoRo ships</u> Available data records: 24	Emissioni [t/toccata] Emissions [t/call]			
	CO ₂	NO _x	SO _x	PM
Valore medio Average value	16.762	0.516	0.074	0.019
Deviazione standard Standard deviation	11.775	0.569	0.089	0.014
Deviazione standard percentuale Percentual Standard deviation	70.2%	110.4%	120.9%	75.5%

molto più stabili, particolarmente per i dati delle emissioni riferiti al tempo di permanenza in banchina, per i quali i valori di deviazione standard rientrano nel range 18-32%.

In termini comparativi, si può notare che:

- I valori delle emissioni riferite al tempo passato in banchina sono generalmente molto più stabili di quelle riferite al numero di toccate, che include durate variabili delle permanenze in porto.
- I valori delle emissioni delle navi da Crociera sono generalmente molto più stabili di quelle delle navi Container e RoRo, probabilmente per la maggiore omogeneità delle flotte in termini di età e tipologie di motorizzazione, ma anche dei tempi di permanenza in porto.
- I valori delle emissioni di PM e CO₂ sono generalmente più stabili di quelli delle emissioni di NO_x e SO_x, più sensibili ai carburanti utilizzati e alle varie regolamentazioni adottate nei porti.
- Infine, in termini assoluti, i valori delle emissioni delle navi da Crociera, riferite al numero di toccate e al tempo trascorso in banchina, sono generalmente più elevati di quelli delle navi Container e RoRo per ogni tipologia di sostanze, a seguito dei maggiori fabbisogni di potenza, con l'unica eccezione delle emissioni di SO_x, che sono positivamente influenzate dalla maggiore evoluzione tecnologica conseguente alla vita tecnica normalmente più breve di queste tipologie di navi.

I risultati esemplificativi per le emissioni di CO₂ sono anche rappresentati nelle Fig. 2 e Fig. 3.

5. Considerazioni conclusive

5.1. Elementi di rilievo emergenti

L'estesa indagine sulla letteratura scientifica e l'originale raccolta di dati, che ricopre un elevato numero di terminali Container, Crociere e RoRo (624 record, con dati ambientali disponibili per 96 di questi) ha confermato la rilevanza delle variabilità e delle incertezze che caratterizzano i valori delle emissioni gassose delle navi durante la loro permanenza in banchina.

Tabella 9 - Table 9

Variabilità delle emissioni/ora sulla base dei risultati dell'indagine sui terminali operativi per la fase di permanenza in banchina di navi Container, da Crociere e RoRo

Variability of emissions/hour based on the results of the investigation into operating terminals for docking phase of Container, Cruise and RoRo ships

Navi Container Record di dati disponibili: 4	Emissioni [t/h] Emissions [t/hour]			
	CO₂	NO_x	SO_x	PM
Valore medio <i>Average value</i>	1.663	0.030	0.002	0.001
Deviazione standard <i>Standard deviation</i>	1,331	0.032	0.002	0,001
Deviazione standard percentuale <i>Percentual Standard deviation</i>	80.0%	107.6%	91.9%	63.1%
Navi da Crociera Record di dati disponibili: 9 <i>Cruise ships</i> <i>Available data records: 9</i>	Emissioni [t/h] Emissions [t/hour]			
	CO₂	NO_x	SO_x	PM
Valore medio <i>Average value</i>	3.676	0.069	0.003	0.003
Deviazione standard <i>Standard deviation</i>	0.646	0.020	0.000	0.001
Deviazione standard percentuale <i>Percentual Standard deviation</i>	17.6%	29.7%	16.8%	32.0%
Navi RoRo Record di dati disponibili: 8 <i>RoRo ships</i> <i>Available data records: 8</i>	Emissioni [t/h] Emissions [t/hour]			
	CO₂	NO_x	SO_x	PM
Valore medio <i>Average value</i>	2.016	0.089	0.008	0.003
Deviazione standard <i>Standard deviation</i>	1.862	0.083	0.012	0.002
Deviazione standard percentuale <i>Percentual Standard deviation</i>	92.4%	93.5%	143.9%	63.5%

to the number of calls and the docking time spent in ports by ships. The results are summarized in Tab. 8 and Tab. 9 for the average values of emissions/call and emissions/hour, separately for Container, Cruise and RoRo ships. Average values, standard deviation and percentual standard deviation are provided to qualify statistically these results.

The careful analysis of the emissions indicators of ships during their docking phase at ports generally highlighted a very high level of uncertainties demonstrated by values of the standard deviation frequently close or beyond 100% of the average values for both Container and RoRo ships. A different panorama is offered by the Cruise ships, whose emissions are characterized by much more stable values, partic-

Gli articoli selezionati dalla letteratura scientifica di settore hanno evidenziato:

- Incertezze di rilievo, con valori di deviazione standard prossimi al 50% e oltre del valore medio assoluto per le emissioni di SO_x.
- Valori più stabili (attorno al 40% di deviazione standard) per le emissioni di CO₂.
- I dati raccolti nel corso dell'indagine sui terminali portuali in esercizio hanno messo in luce:
- Maggiore affidabilità dei dati di emissione riferiti al tempo trascorso in banchina piuttosto che al numero di tocche.
- Affidabilità molto maggiore dei dati delle missioni prodotte dalle navi da Crociera che di quelle relative alle navi Container e RoRo.

ularly for time dependent values, whose standard deviations are in the range 18-32%.

In comparative terms, it can be noted that:

- Emissions referring to the time spent at the berth are generally much more stable than those referring to the number of calls, which include variable durations of the calls themselves.
- Emissions referring to the Cruise ships are generally much more stable than those concerning Container and RoRo ships, possibly due to the more homogeneous fleet in terms of age and motorization, as well as in terms of duration of stay in ports.
- Emissions of PM and CO₂ are normally more stable than those referred to NO_x and SO_x, more sensible to used fuels and local regulations.

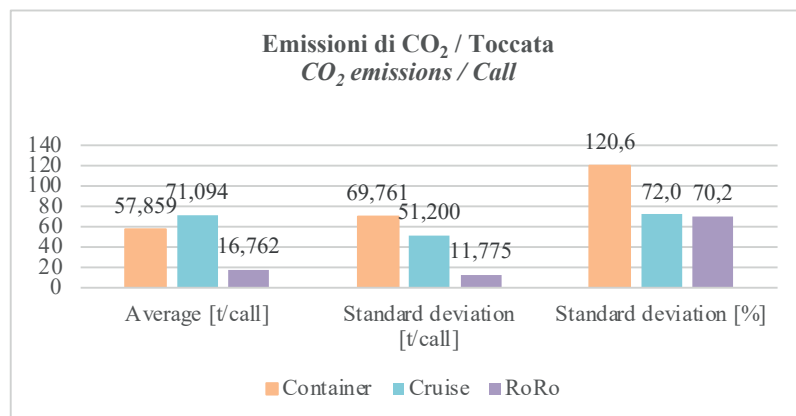


Figura 2 - Valori delle emissioni di CO₂ per toccata durante la permanenza in banchina risultanti dall'indagine descritta nel capitolo 3.

Figure 2 - Values of CO₂ emissions per call during the docking phase resulting from the investigation described in section 3.

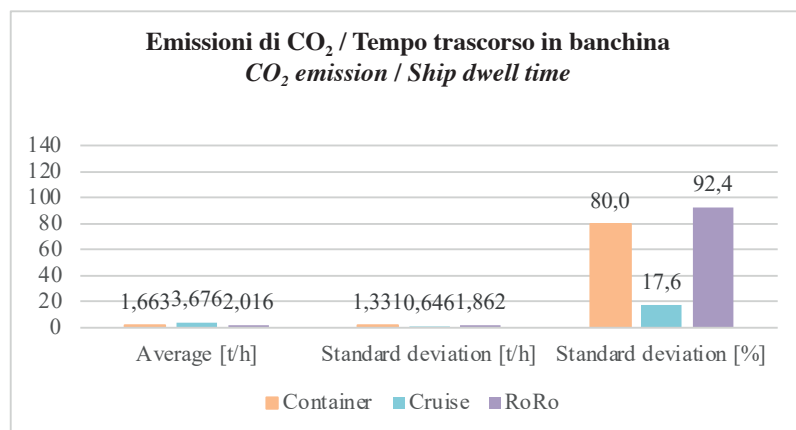


Figura 3 - Valori delle emissioni di CO₂ per ora di permanenza in banchina risultanti dall'indagine descritta nel capitolo 3.

Figure 3 - Values of CO₂ emissions per hour during the docking phase resulting from the investigation described in section 3.

- Finally, in absolute terms, the emissions from Cruise ships, both per call and per hour, are generally higher than those from Container and RoRo ships for all pollutants, due to the higher power needs, except for SO_x, positively affected by the technological update consequent to the generally shorter technical life of this typology of vessels.

The exemplificative results for the CO₂ emissions are also represented in Fig. 2 and Fig. 3.

5. Closing remarks

5.1. Emerging highlights

The extensive literature review and the original data collection covering many Container, Cruise and RoRo terminals (624 records, with environmental data available for 96 of them) confirmed the relevance of the variability and uncertainties affecting the emissions value of the corresponding ships during the time spent in ports.

Papers from the literature on emission factors highlighted:

- Relevant uncertainties, with values standard deviation generally near 50% of the average values and beyond for SO_x emissions.
- More stable values (about 40% of standard deviation) for CO₂ emissions.
- Data from the investigation carried out on the port terminals in operation highlighted:

- Maggiore affidabilità dei relativi alle emissioni di PM and CO₂ in confronto a quelli relativi alle emissioni di NO_x e SO_x.
- Valori delle emissioni generalmente maggiori per le navi da Crociera rispetto a quelle Container e RoRo per la maggioranza delle sostanze inquinanti.
- Su questa base, l'uso dei dati delle emissioni attese, affetti da tali livelli di incertezza, dovrebbero essere attentamente considerato, fra l'altro:
- per prevenire possibili sotto- o sopravvalutazioni dell'inquinamento gassoso a seguito di un incremento di traffico, dimensioni o attrezzature nei terminali.
- Per prevenire inadeguate misure per mitigare gli impatti ambientali delle navi durante la loro sosta in porto, quali, fra gli altri, le restrizioni nell'uso di specifici carburanti, l'elettificazione delle banchine [21] e limitazioni del traffico.
- *Higher reliability of emissions data referring to the time spent in ports than to the number of calls.*
- *Much higher reliability of emissions produced by Cruise ships than those concerning Container and RoRo ships.*
- *Higher reliability of emissions concerning PM and CO₂ than those concerning NO_x and SO_x.*
- *Generally higher emissions from Cruise ships than those from Container and RoRo ships for most of the pollutants.*
- *On this basis, the use of expected emissions data affected by such levels of uncertainties should be carefully considered, among other aspects:*
- *to prevent possible under- or over-estimation of pollution following an increase in traffic, dimensions and equipment facilities at terminals.*
- *To prevent inadequate measures to mitigate the environmental impacts of ships during their stay in ports, such as, among others, restrictions in the use of fuels, electrification of quays [21] and traffic limitation.*

5.2. Pro mi sviluppi della ricerca

Le attività nell'ambito del citato progetto DEMASTER si focalizzano ora sullo sviluppo di specifiche problematiche emerse, tra le quali, in particolare:

- Raffinamento dei parametri che influenzano i fattori di emissione e dei modelli di previsione con essi connessi.
- Ulteriore classificazione, validazione ed estensione al di fuori del continente europeo del database di parametri significativi emergenti dal cluster di porti significativi selezionati.
- Sviluppo di scenari di test, a fini di validazione, basati sulla simulazione di requisiti di progetto e condizioni operative per gruppi di porti selezionati, a partire da quelli dell'area Adriatica-Ionica oggetto del progetto DEMASTER.
- Più estesa applicazione ed estensione delle metodologie di progetto e operatività sostenibili al di là dell'area Adriatica-Ionica.

5.2. Next research developments

The ongoing research, within the framework of the cited DEMASTER Project, is now focused on the development of specific research developments, with priority on the following actions:

- *Refinement of the emission factors parameters and models.*
- *Further classification, validation and extension to other continents of the parameters based on the selected clusters of ports.*
- *Testing of scenarios by simulating new terminal design and operational conditions in selected port clusters, starting from the Adriatic-Ionian ports within the DEMASTER Project.*
- *Broader application and extension of the validated sustainable design methodology beyond the Adriatic-Ionian cluster.*

BIBLIOGRAFIA – REFERENCES

- [1] DAS CHAGAS V., LOPEZ LAMBAS M.E., MARINACCI C., RICCI S., RIZZETTO L. (2021), "Dimensioning of Container Terminals. Validation and Application Fields for a Stochastic Process", ICCSA 2021, LNCS 12958:188-197 (doi: 10.1007/978-3-030-87016-4_14).
- [2] STEENKEN D., VOSS S., STAHLBOCK R. (2004), "Container terminal operation and operations research - A classification and literature review", OR Spectrum, 26:3-49.
- [3] MARINACCI C., RICCI S., RIZZETTO L. (2022), "Effects of ships' dimension on emissions of container and cruise fleets", Ingegneria Ferroviaria, 77(1), 5-21 (ISSN: 0020-0956).
- [4] MARINACCI C., QUATTRINI A., RICCI S. (2008), "Integrated design process of maritime terminals assisted by simulation models", 10th International Workshop on Harbor Maritime & Multimodal Logistics Modeling & Simulation. 1:190-201. ISBN: 978-88-903724-2-1.
- [5] RICCI S., MARINACCI C. (2009), "Modelling support for maritime terminals planning and operation", Transnav. International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, ISSN: 2083-6473.

- [6] GHAREHGOZLI A., ZAERPOUR N., DE KOSTER R. (2019), "Container terminal layout design: transition and future", *Maritime Economic & Logistics*, 22:610-639 (doi: 10.1057/s41278-019-00131-9).
- [7] LODIEWIJKS G., SCHOTT D., OTTJES J.A. (2007), "Modern dry bulk terminal design", *Bulk Solids Handling*, 27(6):364-376.
- [8] ALBO LÓPEZ A.B., CARRILLO C., DÍAZ DORADO E. (2023), "An Approach for Shipping Emissions Estimation in Ports: The Case of Ro-Ro Vessels in Port of Vigo", *Journal of Marine Science and Engineering*. 11:884 (doi: 10.3390/jmse11040884).
- [9] CANEPA M., BALLINI F., DALAKLIS D., FRUGONE G., SCIUTTO D. (2023), "Cold Ironing: Socio-Economic Analysis in the Port of Genoa", *Logistics*, 7:28 (doi:10.3390/logistics7020028).
- [10] DÍAZ VÁZQUEZ A.M., FUENTES GARCÍA G., SOSA ECHEVERRÍA R. (2024), "Temporal variability of atmospheric carbon dioxide emissions in the port of Veracruz, Mexico", *Marine Systems & Ocean Technology*, 20:1 (doi: 10.1007/s40868-024-00147-8).
- [11] GRIGORIADIS A., MAMARIKAS S., IOANNIDIS I., MAJAMAKI E., JALKANEN J.P., NTZIACHRISTOS L. (2021), "Development of exhaust emission factors for vessels: A review and meta-analysis of available data", *Tallinn University of Technology Estonian Maritime Academy* (doi: 10.1016/j.aeaoa.2021.100142).
- [12] KNEŽEVIĆ V., RADONJA R., DUNDOVIĆ Č. (2018), "Emission Inventory of Marine Traffic for the Port of Zadar", *Pomorstvo*, 32(2):239-244 (doi: 10.31217/p.32.2.9).
- [13] KNEŽEVIĆ V., PAVIN Z., ČULIN J. (2021), "Estimating Shipping Emissions. A Case Study for Cargo Port of Zadar, Croatia", *Transnav. International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* (doi: 10.12716/1001.15.03.16).
- [14] PASTORČIĆ D., RADONJA R., KNEŽEVIĆ V., PELIĆ V. (2020), "Emission Inventory of Marine Traffic for the Port of Šibenik", *Pomorstvo*, 34(1):86-92 (doi: 10.31217/p.34.1.10).
- [15] RADONJA R., IVČE R., ZEKIĆ A., CATELA L. (2020), "Emission Inventory of Marine Traffic for the Port of Rijeka", *Pomorstvo*, 34(2):387-395. doi: 10.31217/p.34.2.19.
- [16] STAZIĆ L., RADONJA R., PELIĆ V., LALIĆ B. (2020), "The Port of Split international marine traffic emissions inventory", *Pomorstvo*, 34(1):32-39 (doi: 10.31217/p.34.1.4).
- [17] TZANNATOS E. (2010), "Ship emissions and their externalities for the port of Piraeus", *Atmospheric Environment*, 44:400-407 (doi: 10.1016/j.atmosenv.2009.10.024).
- [18] ZEKIĆ A., IVČE R., RADONJA R. (2022), "Emission Inventory of Ships Calling at the Port of Dubrovnik", *Transnav. International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* (doi: 10.12716/1001.16.02.03).
- [19] Defra (2010), "UK Ship Emissions Inventory", Final Report, November 2010, Doc Reg 21897-01 ENTEC UK Ltd
- [20] European Environment Agency (2023), "EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023" - Technical guidance to prepare national emission inventories. Part B: sectoral guidance chapters 1.A.3.d (doi: 10.2800/795737)
- [21] PEDDI K.P., RICCI S., RIZZETTO L. (2024), "Reduction Potential of Gaseous Emissions in European Ports Using Cold Ironing", *Applied Sciences*, 14, 6837 (doi: 10.3390/app14156837).