
**UNIVERSITÀ DI GENOVA
SCUOLA DI SCIENZE SOCIALI
DIPARTIMENTO DI ECONOMIA**



Tesi di laurea magistrale in
Economia e Management Marittimo e Portuale

**ANALISI DI METODI QUANTITATIVI A SUPPORTO DEI
PROCESSI OPERATIVI E DI GESTIONE DEL TERMINAL
RO-RO.**

Relatrice: Daniela Ambrosino

Candidato: Giovanni Saglietto

**Anno accademico
2023-2024**

Indice

| | |
|--|----|
| <i>Indice</i> | 2 |
| <i>Introduzione</i> | 3 |
| <i>Abstract</i> | 4 |
| <i>Capitolo I</i> | 5 |
| 1.1 - Short Sea Shipping | 5 |
| 1.2 - Motorways of the sea | 6 |
| 1.3 – Stato Attuale delle Motorways of the Sea | 8 |
| 1.4 – Mos e SSS: Il caso italiano | 12 |
| <i>Capitolo II</i> | 20 |
| 2.1 – Il problema della Capacità: Revisione della letteratura | 21 |
| 2.2 – Key Performance Indicators di un terminal Ro-ro | 24 |
| 2.3 – Il problema della capacità: Metodi di Simulazione | 35 |
| <i>Capitolo III</i> | 42 |
| 3.1 – Il Decision Support System (DSS) | 43 |
| 3.2 – Modelli di Ottimizzazione: Yard and Manpower Allocation (YMA) | 51 |
| 3.3 – Modelli di Ottimizzazione: Storage Location Assignment Problem (SLAP) | 58 |
| 3.3.1 - Assignment Rule based on Car Type (AR-CT) | 61 |
| 3.3.2 - Assignment Rule based on Car Group (AR-CG) | 64 |
| <i>Conclusioni</i> | 76 |
| <i>Ringraziamenti</i> | 78 |
| <i>Bibliografia</i> | 79 |
| <i>Sitografia</i> | 81 |

Introduzione

Il presente elaborato ha lo scopo di individuare le principali criticità del trasporto Ro-Ro e soprattutto della gestione operativa dei Terminal adibiti al carico rotabile (autonomo o semovente), individuando nella bibliografia di settore casi studio e strumenti di analisi pensati ai fini di razionalizzare il problema relativo alla lavorazione della nave Ro-Ro alla banchina, alla ottimizzazione della capacità del piazzale, della capacità di lavorazione dei cancelli di piazzale e quelli doganali, della gestione della forza lavoro al fine della movimentazione mezzi. Nel primo capitolo verrà introdotto l'argomento partendo dal concetto di MoS (Motorways of the Sea) e ancor prima SSS (Short Sea Shipping), analizzando i dati di mercato che daranno una panoramica sullo stato generale del trasporto Ro-ro in Europa e in Italia. Durante l'analisi del primo capitolo avremo già modo di porre gli interrogativi riguardo le criticità del settore. Il secondo capitolo si soffermerà sull'analisi quantitativa del sistema Terminal Ro-ro, individuando i principali KPI's (Key performance Indicator) e gli indicatori di capacità che permettono di fare un'analisi dimensionale in fase di *planning* dell'area terminalista, direzionando gli investimenti pubblici e privati nella realizzazione di nuove opere. Infine, il terzo capitolo, cuore della trattazione tutta, ha lo scopo di introdurre al problema di ottimizzazione del sistema Terminal Ro-ro, individuando ed esponendo nel dettaglio i principali modelli di ottimizzazione ed i metodi simulativi elaborati dalla letteratura esistente, evidenziandone pregi e criticità e commentandone approcci e risultati ottenuti.

Abstract

The purpose of this work is to identify the main criticalities of Ro-Ro transport and above all of the operational management of the Terminals used for Roll on – Roll off cargo (unaccompanied or accompanied), identifying case studies and analysis tools in the sector bibliography, designed to rationalize the handling problem of the Ro-Ro ship at the quay, the handling capacity's optimization of the yard and custom gates, the management of the workforce and vehicle handling. The first chapter will introduce the topic starting with the concept of MoS (Motorways of the Sea) and even earlier SSS (Short Sea Shipping), analyzing market data that will give an overview of the general state of Ro-Ro transport. During the analysis of the first chapter, we will already have the opportunity to understand the critical issues in the sector. The second chapter will focus on the quantitative analysis of the Terminal Ro-ro system, identifying the main KPI's (Key Performance Indicators) and capacity indicators that allow a dimensional analysis in the Terminal's planning phase, directing public and private investments in the realization of new projects. Finally, the third chapter, the heart of the entire treatment, aims to introduce the problem of optimizing the Terminal Ro-ro system, identifying the main optimization models and simulation methods proposed in the existing literature, highlighting their merits and criticalities.

Capitolo I

1.1 - Short Sea Shipping

La prima definizione fornita in letteratura è da parte della Commissione Europea (COM(95) 317): “ The movement of cargo and passengers by sea between ports situated in geographical Europe or between those ports situated in non-European countries having a coastline on the enclosed seas bordering Europe.” Quindi si possono definire le SSS come tratte marittime di corto-medio raggio adibite al trasporto di merci e persone, differenziandole dal concetto di “Deep sea Shipping” che avrà necessariamente come oggetto tratte marittime di più lungo raggio. Nonostante il concetto di SSS sia internazionale, e sarà adottato anche da altri sistemi economici diversi dall’Unione Europea, si noti ad esempio le SSS esistenti tra USA e Canada (L. Trujillo, A. Martínez-López), questo assumerà un tratto specificatamente Europeo a partire al 1992, dopo che nel White Paper of Transport¹ pubblicato dalla Commissione Europea si fa espresso utilizzo di questo acronimo. La ragione per cui si arriva ad ideare delle tratte marittime a corto raggio e a darne una posizione di rilievo è stata la allarmante consapevolezza da parte dei leader europei della sempre crescente congestione e affanno delle reti autostradali e delle principali arterie dell’Eurozona. Le SSS nascono quindi con il preciso di scopo di indirizzare parte del traffico su ruota, attraverso l’utilizzo di traghetti su tratte marittime a corto raggio. Il vantaggio derivante dalle SSS è un minor costo sociale dovuto alla congestione prodotta dalle reti autostradali e un costo considerevolmente minore per quel che riguarda le infrastrutture portuali, più semplici e con minor manutenzione necessaria. Data l’implementazione di SSS a partire dagli anni 90, è stato possibile reperire diversa bibliografia che evidenzia più di ogni cosa il limite delle SSS rispetto al trasporto all- road. Primo tra tutti la durata del trasporto, oltre che ad una generale

¹ I libri bianchi della Commissione europea sono documenti contenenti proposte per l’azione dell’Unione europea (Unione) in un settore specifico. In alcuni casi, fanno seguito a libri verdi pubblicati allo scopo di avviare un processo di consultazione a livello europeo.

Lo scopo di un libro bianco è l’avvio di una discussione con il pubblico, le parti interessate, il Parlamento europeo e il Consiglio al fine di approdare a un consenso politico.

convinzione (o falso mito) da parte degli spedizionieri, che vede il trasporto via mare come lento, rigido, poco affidabile, e dalla ingombrante burocrazia. Analizzeremo questi punti in un paragrafo a parte rifacendoci anche su casi studio specifici forniti dalla bibliografia. L'Unione Europea, compiendo varie ricerche, rilevò che la distanza ottimale di *break even point (BEP)* dopo la quale era vantaggioso compiere uno scambio modale in ottica MoS, era dai 834 ai 1400 km. Il Parlamento europeo arrivò ad una distanza minima di BEP di 1385 Km; molto prossima a quella riportata dallo studio precedente². La maggior parte di questi studi fu fatto proprio considerando le tratte Ro-ro e Ro-pax per la componente passeggeri, ritenendole le più adatte ad uno scambio modale. Il trasporto Ro-Ro è quindi un ottimo stimatore delle performance delle SSS, nonostante questo non impedi di comprendere anche le tratte feeder del trasporto container.

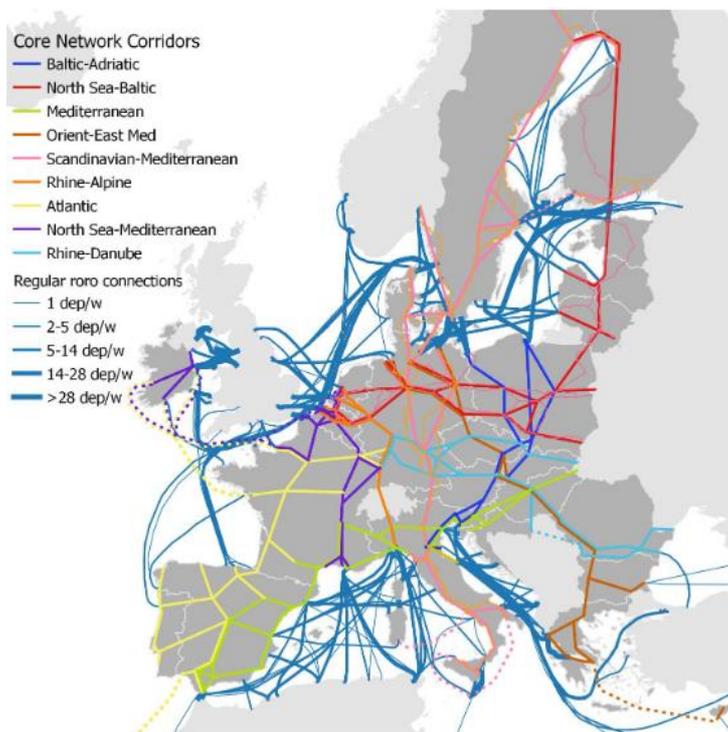
1.2 - Motorways of the sea

Il progetto SSS era tuttavia ancora poco sviluppato, di conseguenza un ulteriore aggiornamento normativo in tal senso non poteva che essere prossimo, ecco quindi che nel 2001 dopo la pubblicazione del *White Paper: "European Transport Policy for 2010: Time to Decide"* fa la sua comparsa l'acronimo di MoS – Motorways of the Sea, successivamente con il Regolamento 884/2004 della Commissione Europea, vi fu l'inclusione delle MoS alla rete Ten-t (Trans-European Transport Network). Quest'ultime sono un insieme di infrastrutture lineari (autostrade, ferrovie e tratte fluviali) e puntuali (città, porti, interporti, aeroporti) che sono rilevanti per il collegamento fisico ed economico europeo (*Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2024*). Successivamente con l'aggiornamento della legge 1315/2013, promulgata da Parlamento e Consiglio Europeo, vi è l'identificazione del CEF (*Connecting Europe Facility*) come principale ente finanziatore del progetto Ten-t. Sarà Proprio il CEF ad identificare i nove CNC's (*Core network Corridors*), specificando che ciascuno di essi avrebbe dovuto iniziare e finire in un porto (CE 1316/2013). Da questo documento, di cui noi leggiamo

² Lupi, Farina, Orsi, Pratelli«The capability of Motorways of the Sea of being competitive against road transport. The case of the Italian mainland and Sicily, 2016».

la versione aggiornata del 2024, agli articoli 20-21-22 della sezione 4, si possono leggere le caratteristiche principali delle MoS: questa è definita come un'estensione delle Reti Trans-europee (9 in totale di cui 4 investono l'Italia: Corridoio Mediterraneo, Corridoio Reno-Alpi, Corridoio Adriatico, Corridoio Scandinavo Mediterraneo) e dovrebbe facilitare lo scambio equo di merci e lo spostamento di persone all'interno degli spazi Comunitari³. Furono individuati quattro corridoi marittimi come estensione delle Ten-t: *Motorway of Baltic Sea*, *Motorway of Western Europe*, *Motorway of South-East Europe* e *Motorway of South-West Europe*. Esse devono consistere in tratte di corto-medio raggio, confermando quindi la loro natura estensiva rispetto alle SSS. La caratteristica più importante ad ogni modo è la loro interconnessione con le reti trans-europee, nel modo in cui i nodi portuali scelti per la rotta di corto raggio siano a loro volta inseriti (o nelle immediate prossimità) nel primo nodo della rete Ten-T disponibile. La *Figura 1* permette di osservare le nove direttive Ten-T nella loro totalità.

Figura 1- Reti Trans- Europee (Ten-T)



Fonte – Kurt Bodewig, “Shaping the future policies of European Maritime Space - MoS 2022”

³ «White paper EU - MoS, <https://eur-lex.europa.eu/IT/legal-content/glossary/white-paper.html> ».

1.3 – Stato Attuale delle Motorways of the Sea

Secondo il DIP 2022⁴ (*Detailed Implementation Plan*), implementato dalla Commissione Europea, le SSS sono responsabili del 60% del trasporto merci all'interno dello spazio Comunitario, pari a 1.6 miliardi di tonnellate. Il trasporto marittimo non contribuisce solamente all'integrazione economica intra-Europea, ma è visto dalla Commissione come lo strumento attraverso cui ridurre l'impatto ambientale del trasporto (soprattutto quello su strada), raggiungendo gli obiettivi posti dal *European Green Deal*⁵; l'idea è quindi di ampliare la rete SSS del 25% entro il 2030 e del 50% entro il 2050. In questo senso le MoS, con la loro rete di porti ed infrastrutture marittime ed investimenti annessi, è la chiave per il raggiungimento di un compiuto e maturo Spazio Marittimo Europeo (*EMS – European Maritime Space*). Nel 2019 i 292 porti inseriti nei CNC's della rete Ten-t hanno movimentato più di 3.3 miliardi di tonnellate di carico e 302 milioni di passeggeri; questi dati sono nettamente calati nel 2020 a causa della pandemia da COVID-19, per poi tornare nel 2021 ai livelli pre-pandemici. Dei 3.3 miliardi di tonnellate di merce spostata nello spazio Europeo, i due terzi della totalità sono stati assorbiti dalle tratte SSS ed in particolare dal bacino del Baltico, del mar Nero e del Mediterraneo Orientale. In termini assoluti invece il bacino del mare del Nord prende da solo 1/3 del volume di carico (1,2 miliardi di tonnellate). Segue il bacino del Mediterraneo Occidentale, il mar Baltico, il Mediterraneo Orientale ed il Mar Nero (*Tabella 1*). Quest'ultime dimostrano però la maggiore crescita in percentuale annua con rispettivamente il 2,6% ed il 3,5% durante il periodo pre-pandemia. La costa Atlantica del continente europeo conta 13 porti CNC, principalmente coinvolti nelle rotte deep-sea.

Le principali tipologie di carico sono *liquid bulk* (44,4%) e *dry bulk* (20,8%), mentre il 14,4% è trasporto contenitori, il 6,5% trasporto generalizzato, ed il 13,7% trasporto Ro-Ro (di questo il 7,8% è *accompanied*, mentre il 5,9% è *unaccompanied*). Inoltre, si è osservato che il 90% del carico Ro-Ro interessa le isole oppure passa attraverso uno Stretto, mentre solo 4,9% è interessato in una rotta di breve-corto raggio ed il 4,8% in un

⁴ Kurt Bodewig, «Shaping the future policies of European Maritime Space - MoS 2022.».

⁵ L'*European Green Deal* propone tra i molteplici obiettivi l'azzeramento delle emissioni nette di CO₂ entro il 2050.

traffico puramente europeo, su rotte parallele a quelle stradali⁶. Ad ogni modo il settore contenitori e Ro-ro mostrano i fattori maggiori di crescita annui rispettivamente del 4,4% e del 1,9%. Esistono dozzine di rotte marittime a corto raggio che interessano e connettono diversi bacini del continente europeo; queste possono distinguersi in due tipi: (a) che interessano Stretti ed Isole e (b) che interessano CNC's e percorrono parallelamente alcune direttive stradali oppure che connettono diverse MoS e Bacini marittimi. Le MoS hanno subito nel tempo molteplici studi ad avvalere la teoria secondo cui questo tipo di intermodalità offra una scelta più sostenibile: è stato calcolato che lo *shifting* modale produce l'equivalente monetario di 0.026 €/ton-km per ogni ton-km di merce spostata dalla rete autostrada al mare, ottenendo un benefit ambientale totale di 113 milioni di Euro su uno *shifting* obiettivo di 4.4 miliardi di ton-km di carico⁷

Tabella 1 – Traffico marittimo di merci dei porti EU TEN-T per maggiore bacino di marittimo, 2021.

| Sea basin | Total cargo volume handled (mln tonnes) | | | | of which short sea | |
|--------------------------------|---|------------------|-----------------------|--------------|--------------------|----------------|
| | CNC ports | Other core ports | Comprehen -sive ports | Total | Million tonnes | Share of total |
| Baltic Sea | 335 | 9 | 179 | 523 | 441 | (84%) |
| North Sea | 1,126 | 1 | 52 | 1,179 | 588 | (50%) |
| Atlantic | 219 | 9 | 63 | 292 | 184 | (63%) |
| Western Mediterranean | 502 | 39 | 132 | 673 | 459 | (68%) |
| Eastern Mediterranean | 236 | - | 43 | 279 | 207 | (74%) |
| Black Sea | 57 | - | 11 | 67 | 52 | (78%) |
| Outermost regions | - | 26 | 13 | 39 | 23 | (58%) |
| Total EU maritime ports | 2,474 | 84 | 493 | 3,052 | 1,954 | (62%) |
| <i>of which short sea</i> | 1,441 | 62 | 387 | 1,889 | | |
| | (58%) | (73%) | (79%) | (62%) | | |

Fonte - Kurt Bodewig, "Shaping the future policies of European Maritime Space - MoS 2022"

⁶ Lupi, Farina, Orsi, Pratelli «The capability of Motorways of the Sea of being competitive against road transport. The case of the Italian mainland and Sicily»,2016.

⁷ Marzano V, Tocchi D, Fiori C, Tinessa F, Simonelli F, Cascetta E, «Ro-ro_Ro-pax Maritime transport in Italy- A policy - oriented market analysis, 2020».

Un'ulteriore conferma sul volume di tonnellate merci trasportate dal settore Ro-ro e la tendenziale crescita sostenuta dal settore, la si può avere osservando le statistiche forniteci dall'Eurostat⁸, tramite le tabelle sottostanti.

Tabella 2 – Migliaia di tonnellate di merce totale spostate da/a i maggiori porti europei raggruppati per bacino marittimo di appartenenza, dati riferiti.

| | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|---|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Dataset: | Short sea shipping - EU level - gross weight of goods transported to/from main ports, by type of cargo for each sea region of partner ports | | | | | | | | | | |
| Last updated: | 23/04/2024 23:00 | | | | | | | | | | |
| Time frequency | Annual | | | | | | | | | | |
| Unit of measure | Thousand tonnes | | | | | | | | | | |
| Type of cargo | Total | | | | | | | | | | |
| | TIME | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
| SEABASIN (Labels) | | | | | | | | | | | |
| Baltic Sea | | 392.652 | 402.803 | 412.310 | 423.706 | 412.336 | 414.147 | 418.951 | 390.082 | 421.096 | 382.363 |
| Black Sea | | 126.145 | 127.028 | 121.774 | 129.588 | 134.381 | 138.132 | 147.615 | 136.169 | 132.491 | 118.286 |
| Mediterranean Sea | | 543.863 | 552.575 | 575.749 | 587.578 | 590.652 | 608.809 | 631.086 | 588.189 | 630.921 | 594.977 |
| North East Atlantic Ocean | | 200.920 | 203.966 | 210.282 | 214.811 | 219.825 | 224.998 | 222.196 | 207.855 | 221.676 | 217.342 |
| North Sea | | 413.936 | 441.908 | 440.188 | 440.734 | 439.175 | 452.134 | 453.163 | 429.635 | 442.842 | 463.073 |
| Other sea basins | | 101.654 | 82.297 | 71.095 | 75.161 | 90.125 | 109.003 | 105.987 | 98.309 | 97.317 | 85.584 |
| Total | | 1.610.880 | 1.638.403 | 1.660.535 | 1.702.834 | 1.711.477 | 1.771.398 | 1.800.469 | 1.682.005 | 1.771.942 | 1.690.967 |

Fonte – Eurostat, dati riferiti al 08 luglio 2024.

Tabella 3 – Migliaia di tonnellate di prodotto Liquid Bulk da/a i maggiori porti europei raggruppati per bacino marittimo di appartenenza.

| | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Dataset: | Short sea shipping - EU level - gross weight of goods transported to/from main ports, by type of cargo for each sea region of partner ports | | | | | | | | | | |
| Last updated: | 23/04/2024 23:00 | | | | | | | | | | |
| Time frequency | Annual | | | | | | | | | | |
| Unit of measure | Thousand tonnes | | | | | | | | | | |
| Type of cargo | Liquid bulk goods | | | | | | | | | | |
| | TIME | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
| SEABASIN (Labels) | | | | | | | | | | | |
| Baltic Sea | | 156.676 | 166.488 | 175.766 | 185.849 | 157.674 | 141.123 | 143.890 | 133.148 | 140.057 | 120.419 |
| Black Sea | | 81.274 | 79.794 | 78.365 | 84.193 | 83.478 | 77.641 | 80.608 | 80.224 | 75.142 | 68.935 |
| Mediterranean Sea | | 241.756 | 232.165 | 251.117 | 247.399 | 264.971 | 255.043 | 268.604 | 237.871 | 265.002 | 247.312 |
| North East Atlantic Ocean | | 64.850 | 60.907 | 64.917 | 65.956 | 66.173 | 64.391 | 67.093 | 62.046 | 61.603 | 65.460 |
| North Sea | | 169.792 | 187.168 | 190.294 | 188.917 | 179.076 | 177.122 | 182.570 | 174.807 | 170.686 | 183.646 |
| Other sea basins | | 63.870 | 46.483 | 42.539 | 49.900 | 54.961 | 66.503 | 67.253 | 57.317 | 51.980 | 44.218 |
| Total | | 719.752 | 716.073 | 744.624 | 766.389 | 751.366 | 733.742 | 757.056 | 695.867 | 708.140 | 678.799 |

Fonte - Eurostat, dati riferiti al 08 luglio 2024.

Tabella 4 – Migliaia di tonnellate di autoveicoli self-propelled trasportati su Ro-ro da/a i maggiori porti europei raggruppati per bacino marittimo di appartenenza.

| | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Dataset: | Short sea shipping - EU level - gross weight of goods transported to/from main ports, by type of cargo for each sea region of partner ports | | | | | | | | | | |
| Last updated: | 23/04/2024 23:00 | | | | | | | | | | |
| Time frequency | Annual | | | | | | | | | | |
| Unit of measure | Thousand tonnes | | | | | | | | | | |
| Type of cargo | Ro-Ro - mobile self-propelled units | | | | | | | | | | |
| | TIME | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
| SEABASIN (Labels) | | | | | | | | | | | |
| Baltic Sea | | 43.185 | 42.318 | 43.855 | 44.906 | 48.362 | 48.547 | 48.927 | 47.489 | 58.891 | 65.076 |
| Black Sea | | 206 | 137 | 153 | 183 | 251 | 830 | 372 | 254 | 288 | 227 |
| Mediterranean Sea | | 46.879 | 45.169 | 45.332 | 41.717 | 41.061 | 48.363 | 47.033 | 50.870 | 53.413 | 54.277 |
| North East Atlantic Ocean | | 34.110 | 32.053 | 36.754 | 37.467 | 37.540 | 36.710 | 34.858 | 31.277 | 33.091 | 27.957 |
| North Sea | | 16.399 | 17.365 | 17.942 | 19.083 | 21.510 | 21.137 | 18.933 | 17.951 | 19.767 | 19.230 |
| Other sea basins | | 1.315 | 1.055 | 290 | 276 | 330 | 411 | 165 | 189 | 309 | 495 |
| Total | | 137.170 | 133.185 | 139.537 | 138.969 | 143.910 | 150.626 | 144.841 | 143.006 | 160.498 | 162.190 |

Fonte - Eurostat, dati riferiti al 08 luglio 2024.

⁸ «Eurostat 2024, Short Sea Shipping status, dati raccolti l'8 Luglio 2024».

Su di un totale di 1.690.957 migliaia di tonnellate di merce trasportate dal sistema di SSS europeo, 162.190 migliaia di tonnellate appartengono al comparto Ro-ro (9,6% contro al 7,8 % del report del 2016) e 678.799 migliaia di tonnellate di Liquid Bulk (40,1% contro il 44,4% del 2016). Come è stato possibile osservare il comparto Ro-ro è in netta crescita mentre ad esempio il settore liquid bulk ha sempre la maggioranza del mercato ma è leggermente diminuito. Il susseguirsi di studi di settore da parte di enti privati e dalla Commissione Europea, hanno fatto notare come nell'ultimo ventennio l'implementazione delle MoS abbia prodotto dei risultati contrastanti e non allineati con le previsioni sperate. Non vi è stato infatti il trasferimento modale desiderato, il traffico Ro-ro è rimasto contenuto e non ha subito una crescita sostenuta durante gli anni, e la congestione stradale non si è ridotta al punto da raggiungere livelli di considerevole miglioramento. La varia letteratura, tra cui il *DIP 2018*, ha evidenziato alcune criticità delle MoS e dei progetti ad essa annessa, tra cui:

- Poca attenzione rispetto agli obiettivi di interscambio modale da parte dei progetti relativi alle MoS. Questi infatti si concentravano principalmente su progetti locali, che miglioravano situazioni di mercato oppure facilitavano processi amministrativi;
- Le MoS non hanno ricevuto il giusto flusso di fondi necessario per raggiungere gli obiettivi posti, con l'effetto di scoraggiare l'opinione pubblica e quella degli spedizionieri a ritenere le SSS un'alternativa valida di trasporto;
- La maggioranza delle imprese che sono coinvolte nell'intercambio modale sono piccole medie imprese. Queste spesso non hanno i mezzi per compiere una decisione ponderata sulla scelta effettivamente più ottimale per il loro tipo di trasporto. Il più (soprattutto se riferito al caso italiano, di cui parleremo nel prossimo paragrafo) sono padroncini che svolgono il ruolo di vettore in modo diretto e con un solo mezzo di proprietà.
- Il trasporto su strada è ancora visto come più veloce e flessibile, contrapponendosi al trasporto marittimo che, seppur percepito come meno costoso e più ecosostenibile, è anche considerato come lento, rigido e poco affidabile.

Il risultato finale di quanto detto finora è uno: la crescita e lo sviluppo delle SSS e MoS dipende unicamente dalla qualità e della soddisfazione offerta al cliente, gli spedizionieri. Di conseguenza i manager di sistema e le imprese terminaliste, insieme alle

amministrazioni locali, devono adoperarsi al fine di fornire un servizio affidabile, flessibile e sicuro⁹. A tal proposito si è voluto accennare al caso italiano nel successivo paragrafo.

1.4 – Mos e SSS: Il caso italiano

L'Italia è il paese che più di tutti nell'Eurozona traina il settore Ro-ro e traghetti, con uno share del 21,6 % del traffico dell'Unione Europea EU28; secondi solo alla Gran Bretagna, ma seguiti da Grecia e Danimarca. L'Italia è interessata da quattro corridoi Ten-t, conta 330 banchine adibite al trasporto merce rotabile e scalo passeggeri, approssimativamente 19.2 milioni di metri quadri di piazzale e area di stoccaggio e 1378 piloti per la movimentazione di semi-trailer (*Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2018*). Da quanto si evince dal Rapporto Annuale prodotto dall'agenzia *Rete Autostrade Mediterranee (RAM)*, che copre il periodo dal 2014 al 2017¹⁰, il trasporto Ro-ro di merci e di passeggeri dimostra percentuali di crescita considerevoli rispetto agli altri settori, rispettivamente del 24,2% e del 21,3%, contro una crescita del settore contenitore del 6.3%; si consideri una crescita di PIL nazionale per lo stesso periodo del 3,7%. Se si osserva nello specifico la movimentazione merci nazionale all'interno dei porti, il settore Ro-ro impiega 106,4 milioni di tonnellate di carico e su 502,1 milioni di tonnellate totali; mentre movimentata 42,21 milioni di passeggeri annui contro i soli 9,85 milioni di crocieristi. Se si osservano i traffici a livello dei cluster portuali, si assiste alla crescita impetuosa del Nord Tirreno con il 10,6% nel solo biennio 2016-2017, mentre il cluster del Centro-Sud Italia manifesta la crescita più sostenuta all'interno del triennio 2014-2017 (*Tabella 5*). Se si osservano invece i dati dei primi 5 porti italiani, si osserva un forte incremento in tutte le aree considerate dalla Tabella 5, con picchi nel porto di Livorno con il 33,6% e Catania con il 27,8%.

⁹ Balaban e Mastaglio, «RoPaxRoRo Exploring the Use of Simulation as Decision Support System,2013».

¹⁰ «Rapporto RAM - Le autostrade del mare in Italia».

Tabella 5 – Andamento traffici Ro-ro per cluster portuale Italia, periodo 2014-2017.

| Macroarea | RORO [Mln t] | | | | Variazione % | |
|----------------------------|--------------|-------------|-------------|---------------|--------------|--------------|
| | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2017-2016 | 2017-2014 |
| Nord Tirreno (1) | 24,8 | 27,0 | 30,7 | 34,0 | 10,6% | 37,1% |
| Nord Adriatico (2) | 11,5 | 11,0 | 11,7 | 12,4 | 6,2% | 7,8% |
| Centro Tirreno (3) | 16,4 | 17,2 | 17,6 | 18,7 | 6,3% | 14,0% |
| Centro - Sud Adriatico (4) | 6,6 | 7,1 | 10,0 | 10,7 | 6,7% | 62,0% |
| Sud + Isole (5) | 26,4 | 27,8 | 29,2 | 30,6 | 4,9% | 16,1% |
| Totale Italia | 85,7 | 90,0 | 99,2 | 106,41 | 7,2% | 24,2% |

Elaborazione RAM S.p.A. su dati AdSP - (1) AdSP del Mar Ligure Occidentale, AdSP del Mar Ligure Orientale, AdSP del Mar Tirreno Settentrionale. (2) AdSP del Mar Adriatico Centro Settentrionale, AdSP del Mar Adriatico Settentrionale, AdSP del Mar Adriatico Orientale. (3) AdSP del Mar Tirreno Centro Settentrionale, AdSP del Mar Tirreno Centrale. (4) AdSP del Mar Adriatico Meridionale, AdSP del Mar Adriatico Centrale. (5) AdSP del Mar di Sicilia Occidentale, AdSP del Mar di Sicilia Orientale, AdSP del Mar Tirreno Meridionale, AdSP del Mare di Sardegna, AdSP del Mar Ionio.

Fonte - «Rapporto RAM - Le autostrade del mare in Italia».

Anche leggendo il comunicato stampa redatto da *Assoporti* in collaborazione con *Intesa Sanpaolo* sul rapporto annuale della associazione SRM “*Italian Maritime Economy*” 2023¹¹, sono evidenziati gli stessi trend già presenti nel 2017, a prova del fatto che il settore Ro-ro è in crescita e merita investimenti da parte dell’amministrazione pubblica. In netta crescita la cantieristica per le navi Car Carrier con un numero di ordini nel 2022 di 90 navi contro le 38 dell’anno precedente; I porti italiani registrano il 40% di tutto il flusso import/export da e verso il paese (dato importante, che testimonia che la restante parte di traffico avviene tramite altra modalità di trasporto), di cui il 69% è concentrato nel Sud Italia. Il settore Ro-ro rimane un’eccellenza italiana con più di 29 compagnie di navigazione operanti 229 navi impegnate sul territorio, con uno storico di partenze settimanali nell’anno 2018¹² come mostrato in *Tabella 6*.

Tabella 6 – Servizi Ro-ro e Ro-pax da/a porti italiani: partenze e capacità settimanali, 2018 - totali in grassetto.

| Nationality of shipping companies | Weekly departures [#] | | | Weekly capacity [linear meters] | | |
|-----------------------------------|-----------------------|------------|------------|---------------------------------|----------------|------------------|
| | Ro-Ro | Ro-Pax | Total | Ro-Ro | Ro-Pax | Total |
| Italian | 205 | 253 | 458 | 591,290 | 484,854 | 1,076,144 |
| non-Italian | 28 | 81 | 109 | 93,076 | 171,836 | 264,912 |
| Total | 233 | 334 | 567 | 684,366 | 656,690 | 1,341,056 |

Fonte – Marzano et al, «Ro-ro_Ro-pax Maritime transport in Italy- A policy -oriented market analysis,2020»

Risulta opportuno trattare anche del livello dell’intermodalità presente sul territorio italiano. Mentre nell’Eurozona il comparto Ro-ro pesa il 13,7% sul totale del commercio

¹¹ «Comunicato stampa SRM “Italian Maritime Economy”, 2023».

¹² Marzano, Tocchi, Fiori, Tinessa, Simonelli «Ro-ro_Ro-pax Maritime transport in Italy- A policy -oriented market analysis,2020».

marittimo (in milioni di tonnellate di merce) in Italia il peso del comparto Ro-ro ammonta al 19,3%. Per quel che riguarda le distanze di *BEP di scambio modale*, individuate in un intervallo compreso in media tra i 834 Km ed i 1400 km a livello europeo, l'Italia dimostra una maggiore resilienza della modalità di trasporto all-road, nonostante il paese si dimostri ben disposto all'interscambio modale, essendo la distanza approssimativa dalla Sicilia al Nord Italia corrispondente a 1400 Km circa. Il trasporto su strada è ancora prediletto a livello italiano; nel 2015 il 74,5% delle tonnellate di merce trasportate su gomma aventi origine e destinazione in Italia, non superavano una lunghezza di 150 Km. Per iniziare ad approcciare l'analisi quantitativa relativa all'effettiva competitività delle Autostrade del Mare rispetto al trasporto su gomma, si è studiata attentamente la relazione "*The Capability of MoS of being competitive against road transport*", che costruisce un modello di analisi del Costo totale dei "*maritime links*" osservando le connessioni marittime esistenti tra i maggiori porti italiani della penisola, con i maggiori porti della Sicilia. Per il modello sono stati considerate solo le tratte di partenza essendo identiche a quelle di ritorno. Dovendo distinguere il costo totale di trasporto di un veicolo con guidatore o senza, si è optato nel primo caso di considerare un camion da 16 metri con guidatore singolo, ed un semi rimorchio da 12 metri non accompagnato. Lo scopo del modello era risolvere un problema di Cammino Minimo (*SPP*)¹³ avente come nodi di origine i porti della penisola, come nodi di destinazione i porti siciliani (Palermo, Trapani, Catania, Messina, ecc...) e come archi le tratte marittime aventi un peso specifico di costo calcolato secondo la notazione più classica ovvero tenendo conto dei costi monetari e del valore del tempo:

$$C_{tot} = \sum_i M_i + \sum_j T_j \quad (1)$$

Dove M è il costo monetario del trasporto e T è il costo del tempo trascorso nel trasporto. Per quel che riguarda i costi del trasporto (inteso quindi come trasporto via traghetto) bisogna calcolare il costo del biglietto, ed il costo dell'autista (nel caso di un camion accompagnato). Il primo di questi dipenderà dalle tariffe della Compagnia di navigazione,

¹³ Shortest Path Problem (SPP): I modelli di ottimizzazione fanno spesso utilizzo della teoria dei grafi, per quest'ultima il termine shortest-path significa il problema del cammino minimo tra due nodi, ossia quel percorso che collega due vertici dati appartenenti ad un grafo G, e che minimizza la somma dei costi associati all'attraversamento di ciascun arco.

mentre il secondo dipenderà dalle ore perse per la caricaione/scaricaione del mezzo e, nel caso di camion con autista, del tempo perso in mare a causa della tratta. Per la legge europea 561/2006 il camionista deve alternare tot ore di riposo alle ore di guida. Nel caso del modello considerato si calcola il salario orario di un camionista secondo i dati forniti nel 2011 dal Sole 24 Ore, all'ammontare di 26 €/h, e di 17,6 €/h una volta a bordo col veicolo (dal momento che il camionista non sta lavorando). Risulta che il costo generalizzato per un trasporto marittimo accompagnato è espresso con la seguente equazione:

$$C_{acc} = C_t + 26 \times 1.5 + 17.6 (h_b + 0.5) + VOT \times t_t \quad (2)$$

Dove C_t è il costo del biglietto di trasporto, 26 €/h è il costo orario dell'autista moltiplicato per le ore complessive perse nella movimentazione di carico (1 ora) e scarico (0.5 ore), 17,6 €/h è il salario orario durante la traversata, moltiplicato per le ore del tragitto (h_b) sommato ad una mezz'ora (0.5) che si intende come il tempo entro il quale il camionista deve essere già a bordo prima della partenza nave. Infine, VOT indica il Valore del Tempo, mentre t_t il numero di ore impiegate dal tragitto via mare. Nel caso di un trasporto di semi rimorchio senza autista, l'equazione perderà tutta la parte relativa ai costi orari durante il tragitto:

$$C_{non\ acc} = C_t + 26 \times 1 + VOT \times t_t \quad (3)$$

Si considera un tempo minore (di 1 ora totale) per la caricaione e scaricaione del semirimorchio essendo di 12m e non 16m. Lo studio considera inoltre nel tempo del trasporto oltre che il tempo di transito anche quello di attesa (t_w), un tempo "non - fisico" ma che tiene conto della disponibilità limitata della linea traghetto, questa infatti sarà disponibile 2-3 volte a settimana, producendo un tempo di attesa.

Una volta calcolati tutti i costi generalizzati del trasporto marittimo, è opportuno quantificare quelli del trasporto all-road:

$$C_i = C_{i,f} + C_{i,v} + C_{i,t} + C_{i,d} + VOT \times t_t \quad (4)$$

- $C_{i,f}$ sono i costi del carburante, a sua volta calcolato secondo l'equazione:

$$C_{i,f} = L_i \times C_{gas} \times C_g \quad (5)$$

Dove L_i è la lunghezza del tragitto autostradale i-esimo; C_g è il prezzo del carburante al litro (€/litro) secondo le stime più recenti; e C_{gas} è il consumo di carburante alla velocità media di corsa (esempio alla velocità di 70 Km/h per un mezzo specifico).

- $C_{i,v}$ sono i costi variabili oltre il carburante, calcolati secondo l'equazione:

$$C_{i,v} = L_i \times C_{i,v/km} \quad (6)$$

Dove L_i è la lunghezza del tragitto autostradale i -esimo; $C_{i,v/km}$ è il costo variabile al kilometro, per un determinato mezzo, contando ad esempio ammortamenti mezzo, oli lubrificanti, usura gomme, manutenzione.

- $C_{i,t}$ e $C_{i,d}$ sono rispettivamente il costo del biglietto per il tratto autostradale ed il costo dell'autista (sempre considerato di 26 €/h).
- Per il tempo di transito, è stata considerata una velocità media tenendo conto del tipo di mezzo e della geometria e capacità del tratto autostradale (se a due o più corsie e se il tratto è lineare), sommandoci le ore di riposo dell'autista che per le legge europea 561/2006 ammontano a 9 ore massime al giorno, composte da due periodi di 4 ore e 30 minuti che devono essere intervallati da un periodo di pausa di minimo 45 minuti.
- il VOT rappresenta uno degli elementi più difficili da stimare correttamente nella materia economica. Secondo la letteratura questo può essere definito come “il valore monetario che gli utenti sono disposti a pagare o accettare per una riduzione o aumento del tempo di trasporto per una determinata coppia origine-destinazione” (Feo et al, 2021)¹⁴, o ancora come “...il tasso marginale di sostituzione tra il tempo necessario al trasporto ed il denaro, mentre il VTTS (Value of Transport Time Saving) è il valore monetario cui un'azienda è disposta a pagare per risparmiare un valore unitario di tempo di trasporto” (De Jong et al, 2021)¹⁵. Il Valore del Tempo non è solo determinato dalla velocità con cui la merce arriva a destinazione, ma anche dalla frequenza con cui quel determinato tragitto è compiuto dalla azienda di trasporto e dalla affidabilità di esso. Pertanto, possiamo sintetizzare il Valore del tempo come:

$$VOT \text{ (Value of time)} = VOT_s + VOR + VOF \quad (7)$$

Dove VOT_s è il valore del tempo in termini di pura e semplice velocità del trasporto (s – speed), VOR è il valore della affidabilità (Value of Reliability) ed il VOF è il valore della frequenza (Value of Frequency). Stimare il VOT non è

¹⁴ «Feo-Valero et al. - 2021 - The Value of Time in Freight Transport».

¹⁵ «De Jong - 2021 - Value of Time in Freight Transport».

semplice in primis perché dipende dai soggetti economici e in seguito dal tipo di merce considerata. Nel primo caso il VOT ha un'accezione differente a seconda che sia lo spedizioniere (*shipper*) a calcolarlo rispetto che sia il trasportatore (*carrier*) o il passeggero. Il primo valuterà il VOT basandosi sulla merce, il suo valore sul mercato e la sua deperibilità (quindi in ottica produttiva), mentre per il *carrier* il VOT è derivato dai costi operativi quali i salari, il carburante e la manutenzione che risparmierà nel caso di un minor tempo di trasporto. La difficoltà ulteriore di calcolo del VOT è rappresentata dalle diverse partite di carico: mentre il passeggero è univoco, la merce può essere contata in molti modi tra cui tonnellate, CTU's, o nel caso del trasporto containerizzato in FCL (*Full Container Load*)¹⁶ o LCL (*Less Container Load*)¹⁷. Ciascuna di esse avrà un VOT diverso. Viste le evidenti difficoltà nel determinare un valore univoco del tempo, la letteratura ha optato per due diversi metodi: il *factor-cost method* che cerca di stimare il costo dei fattori di input ed il loro risparmio in caso di minor tempo di trasporto (ottimo per il VOT del *carrier*) ed il *modeling studies*, che si divide a sua volta in *RP (Reveiled Preference) studies* e *SP (Simulated Preference) studies*. Il primo utilizza dati ricavati da comportami reali dei trasportatori e spedizionieri ed intermediari; il secondo studia e simula delle scelte alternative che verranno proposte agli spedizionieri, trasportatori, ed intermediari sotto forma di questionario o intervista.

Lo scopo degli autori della ricerca è di confrontare i valori di Costo totale per ogni coppia origine/destinazione, determinando per ciascuna di esse anche i tempi di percorrenza e la convenienza o meno dell'interscambio modale in ottica MoS rispetto ad un trasporto "all-road". Si è ottenuta una matrice che presenta dei risultati incoraggianti per la nostra tesi. I ricercatori hanno rilevato che il costo generalizzato di un trasporto intermodale con ottica MoS è nella quasi totalità dei casi sempre più conveniente rispetto al trasporto all-road, con una sostanziale differenza riscontrata tra i costi di trasporto per veicolo con

¹⁶ Il Full Container Load (FCL) è una sigla per indicare un container caricato con un'unica partita di carico appartenente ad un solo *shipper* (o chi ne fa le veci).

¹⁷ Il Less Container Load (LCL) indica un contenitore condiviso da più partite di carico appartenenti a diversi *shipper*, che da soli non avrebbero avuto la possibilità di riempire un intero container.

guidatore e veicoli non accompagnati; quest'ultima opzione si è rivelata, con poca sorpresa, quella più conveniente. Si mostrano i risultati ottenuti nella *Tabella 7*:

Tabella 7 – Comparazione tra diversi modi di trasporto tra cui: intermodale con autista, senza autista, e trasporto su gomma. Si considera ogni porto della penisola ed ogni porto della Sicilia. I valori espressi in grassetto sono quelli che permettono un maggior risparmio in termini di tempo di percorrenza, costo monetario e generalizzato.

| Origin | Destination | Intermodal | | | | | | All-road | | | | | |
|---------|-------------|-------------|-------------------|----------------------|---------------|-------------------|----------------------|-------------|-------------------|----------------------|-----------|------|------|
| | | Accompanied | | | Unaccompanied | | | Travel time | Monetary cost (€) | Generalized cost (€) | | | |
| | | Travel time | Monetary cost (€) | Generalized cost (€) | Travel time | Monetary cost (€) | Generalized cost (€) | | | | | | |
| | | h m | | | h m | | | h m | | | | | |
| Trieste | Palermo | 31 | 41 | 2573 | 2789 | 42 | 36 | 2065 | 2356 | 45 | 14 | 3400 | 3708 |
| | Trapani | 33 | 8 | 2779 | 3005 | 44 | 3 | 2272 | 2572 | 46 | 29 | 3593 | 3910 |
| | Gela | 50 | 39 | 2546 | 2892 | 51 | 39 | 1997 | 2349 | 46 | 8 | 3451 | 3766 |
| | Catania | 48 | 10 | 2248 | 2577 | 49 | 10 | 1698 | 2034 | 43 | 39 | 3153 | 3451 |
| Venezia | Messina | 49 | 32 | 2455 | 2793 | 50 | 32 | 1905 | 2250 | 33 | 17 | 2946 | 3173 |
| | Palermo | 29 | 58 | 2290 | 2494 | 40 | 53 | 1783 | 2061 | 43 | 31 | 3117 | 3414 |
| | Trapani | 31 | 25 | 2497 | 2711 | 42 | 20 | 1989 | 2278 | 44 | 46 | 3310 | 3615 |
| | Gela | 48 | 56 | 2264 | 2597 | 49 | 56 | 1714 | 2054 | 44 | 25 | 3168 | 3471 |
| Milano | Catania | 46 | 27 | 1965 | 2282 | 47 | 27 | 1416 | 1739 | 32 | 56 | 2870 | 3095 |
| | Messina | 47 | 49 | 2172 | 2498 | 48 | 49 | 1622 | 1955 | 30 | 34 | 2664 | 2872 |
| | Palermo | 29 | 44 | 2223 | 2425 | 30 | 44 | 1697 | 1907 | 44 | 8 | 3206 | 3507 |
| | Trapani | 31 | 11 | 2429 | 2642 | 32 | 11 | 1904 | 2124 | 45 | 23 | 3399 | 3708 |
| Torino | Gela | 47 | 5 | 2355 | 2676 | 48 | 5 | 1757 | 2085 | 45 | 2 | 3257 | 3564 |
| | Catania | 44 | 37 | 2057 | 2361 | 45 | 37 | 1459 | 1770 | 33 | 34 | 2959 | 3188 |
| | Messina | 45 | 59 | 2264 | 2577 | 46 | 59 | 1666 | 1986 | 32 | 11 | 2752 | 2972 |
| | Palermo | 30 | 9 | 2287 | 2493 | 31 | 9 | 1762 | 1974 | 45 | 30 | 3395 | 3706 |
| Bologna | Trapani | 31 | 36 | 2494 | 2709 | 32 | 36 | 1969 | 2191 | 46 | 45 | 3589 | 3907 |
| | Gela | 47 | 31 | 2420 | 2744 | 48 | 31 | 1822 | 2153 | 46 | 24 | 3447 | 3763 |
| | Catania | 45 | 2 | 2122 | 2429 | 46 | 2 | 1524 | 1838 | 43 | 55 | 3149 | 3448 |
| | Messina | 46 | 24 | 2328 | 2645 | 47 | 24 | 1730 | 2054 | 33 | 33 | 2942 | 3171 |
| Genova | Palermo | 28 | 3 | 1973 | 2165 | 38 | 58 | 1466 | 1732 | 32 | 35 | 2801 | 3023 |
| | Trapani | 29 | 30 | 2180 | 2381 | 40 | 25 | 1673 | 1948 | 33 | 50 | 2994 | 3224 |
| | Gela | 47 | 8 | 1966 | 2287 | 48 | 8 | 1416 | 1744 | 33 | 29 | 2852 | 3080 |
| | Catania | 44 | 40 | 1668 | 1972 | 45 | 40 | 1118 | 1429 | 30 | 1 | 2554 | 2758 |
| Cosenza | Messina | 46 | 2 | 1874 | 2188 | 47 | 2 | 1325 | 1645 | 28 | 38 | 2347 | 2542 |
| | Palermo | 27 | 43 | 1918 | 2107 | 28 | 43 | 1393 | 1589 | 43 | 23 | 3039 | 3335 |
| | Trapani | 29 | 10 | 2125 | 2324 | 30 | 10 | 1600 | 1806 | 44 | 38 | 3232 | 3537 |
| | Gela | 45 | 4 | 2051 | 2358 | 46 | 4 | 1453 | 1767 | 44 | 17 | 3091 | 3393 |
| Cosenza | Catania | 42 | 35 | 1753 | 2043 | 43 | 35 | 1155 | 1452 | 32 | 49 | 2792 | 3016 |
| | Messina | 43 | 58 | 1960 | 2259 | 44 | 58 | 1362 | 1668 | 30 | 26 | 2586 | 2793 |

Le eccezioni sono poche e vengono mostrate nel continuo della tabella sottostante:

Tabella 7 (continuo)

| Origin | Destination | Intermodal | | | | | | All-road | | | | | |
|----------|-------------|-------------|-------------------|----------------------|---------------|-------------------|----------------------|-------------|-------------------|----------------------|-----------|-------------|-------------|
| | | Accompanied | | | Unaccompanied | | | Travel time | Monetary cost (€) | Generalized cost (€) | | | |
| | | Travel time | Monetary cost (€) | Generalized cost (€) | Travel time | Monetary cost (€) | Generalized cost (€) | | | | | | |
| | | h m | | | h m | | | h m | | | | | |
| Brindisi | Gela | 29 | 43 | 1644 | 1726 | 30 | 43 | 1370 | 1579 | 24 | 2 | 1644 | 1808 |
| | Catania | 27 | 14 | 1346 | 1411 | 28 | 14 | 1072 | 1264 | 11 | 33 | 1346 | 1425 |
| | Messina | 31 | 10 | 1169 | 1384 | 32 | 10 | 1282 | 1504 | 10 | 11 | 1139 | 1209 |
| | Palermo | 10 | 55 | 1556 | 1630 | 29 | 31 | 1258 | 1460 | 22 | 55 | 1556 | 1712 |
| | Trapani | 12 | 10 | 1749 | 1832 | 30 | 46 | 1451 | 1661 | 24 | 10 | 1749 | 1914 |
| | Gela | 28 | 7 | 1496 | 1688 | 29 | 7 | 1141 | 1340 | 23 | 49 | 1607 | 1770 |
| Potenza | Catania | 25 | 38 | 1198 | 1373 | 26 | 38 | 843 | 1025 | 11 | 20 | 1309 | 1387 |
| | Messina | 29 | 58 | 1409 | 1613 | 30 | 58 | 1054 | 1265 | 8 | 58 | 1103 | 1164 |
| | Palermo | 16 | 13 | 1230 | 1341 | 17 | 13 | 902 | 1019 | 22 | 35 | 1518 | 1672 |
| | Trapani | 17 | 40 | 1437 | 1557 | 18 | 40 | 1108 | 1235 | 23 | 50 | 1712 | 1874 |
| Cosenza | Gela | 22 | 47 | 1406 | 1562 | 23 | 47 | 1113 | 1275 | 23 | 29 | 1570 | 1730 |
| | Catania | 20 | 18 | 1108 | 1247 | 21 | 18 | 814 | 960 | 11 | 0 | 1272 | 1347 |
| | Messina | 26 | 37 | 1319 | 1500 | 27 | 37 | 1025 | 1213 | 8 | 38 | 1065 | 1124 |
| | Palermo | 22 | 10 | 1913 | 2066 | 23 | 10 | 1585 | 1744 | 8 | 4 | 1041 | 1096 |
| | Trapani | 23 | 35 | 2140 | 2299 | 24 | 35 | 1811 | 1978 | 10 | 19 | 1234 | 1304 |
| | Gela | 25 | 20 | 2620 | 2793 | 26 | 20 | 2276 | 2457 | 8 | 58 | 1092 | 1153 |
| Cosenza | Catania | 27 | 41 | 2530 | 2717 | 28 | 41 | 2187 | 2380 | 6 | 29 | 794 | 838 |
| | Messina | 29 | 2 | 2660 | 2856 | 30 | 2 | 2393 | 2596 | 5 | 7 | 587 | 622 |

Fonte - Lupi, et al «The capability of Motorways of the Sea of being competitive against road transport. The case of the Italian mainland and Sicily»,2016

Come si può notare il vantaggio proposto dal trasporto intermodale va a dissiparsi quanto più il porto di origine è geograficamente vicino al luogo di destinazione. Di conseguenza uno scambio modale che sfrutti le MoS sarà statisticamente più conveniente e

maggiormente utilizzato al Nord e Centro Italia. Quanto detto è ulteriormente verificato dalle interviste svolte dai ricercatori con imprese di trasporto locali. Quello che si evince dalla ricerca e dalle interviste è anzitutto:

- La scarsa conoscenza da parte degli spedizionieri dei costi monetari effettivi delle MoS, spesso ritenuti troppo onerosi e sovrastimati, senza una base reale di dati per avere questo tipo di convinzione;
- La generale insoddisfazione dovuta alla bassa frequenza delle partenze settimanali dei traghetti per le destinazioni desiderate, che va ad incidere negativamente sui tempi di attesa (t_w) delle MoS a favore del trasporto su gomma;
- La troppa variabilità delle schedule delle rotte marittime, che va a favore del trasporto su gomma soprattutto su brevi distanze, e nel caso di trasporto “*just in time*¹⁸”.
- A causa della geografia italiana, le imprese di trasporto su gomma sono più avvantaggiate nella parte Nord- Ovest del paese potendo contare su molti porti Tirrenici (come Genova e Savona) per utilizzare le MoS con destinazione Sicilia, mentre le imprese del Nord-Est del paese che si affacciano sull’Adriatico, hanno dei tempi di percorrenza nettamente maggiori, soprattutto se si considerano porti come Palermo, inoltre l’offerta di MoS nell’Adriatico verso la Sicilia è minore rispetto al Nord-ovest.
- Il modello può essere, con le giuste premesse del caso, ampliato a tutto il territorio Europeo.

¹⁸ Per *just in time* - JIT, si intende una tecnica di produzione legata alla gestione delle scorte e dell’inventario ideata per minimizzare gli sprechi di risorse e per rinnovare gli articoli in funzione della domanda. Una produzione *just in time*, richiede un trasporto just in time.

Capitolo II

Nel primo capitolo ho voluto analizzare l'impianto normativo delle MoS e delle SSS, focalizzandomi sul caso italiano e partendo col definire quelli che sono allo stato attuale le inefficienze e mancanze del sistema di Motorways of the Sea; che può con buona approssimazione essere ricondotto interamente al trasporto di tipo Ro-ro, essendo quest'ultimo il secondo settore (dopo quello liquid bulk) a sfruttare le SSS ed essendo quello che più costituisce un'alternativa valida (come osservato nel caso italiano tra i porti della penisola e la Sicilia) al trasporto interamente su gomma, muovendosi parallelo alle principali direttive europee Ten-t. Il presente capitolo si pone l'obiettivo di indagare maggiormente sull'oggetto della mia ricerca: il terminal Ro-ro. La prima cosa che si nota leggendo la varia letteratura in merito è spesso la relativamente scarsa attenzione al trasporto Ro-ro ed al sistema terminal Ro-ro, a favore del trasporto e terminal contenitori; che è invece oggetto di studio della maggior parte della letteratura di settore, ne è un esempio il *Decision Support System (DSS)* ideato da *Mar-Ortiz et al, (2019)*¹⁹ per l'ottimizzazione delle operazioni di stoccaggio dei contenitori nello yard dato un numero noto di gru di banchina e gru di piazzale, tramite l'utilizzo di un modello di ottimizzazione discreta che minimizza la differenza di *workload* tra le *gantry crane* e le *quay crane*, permettendo di arrivare al numero ottimale di quote di autoveicoli per il trasporto in import ed in export dei contenitori. Quest'ultima parte è risolta dagli autori tramite un algoritmo meta-euristico di tipo *tabu-search*. Altri lavori guardano più al lato nave, ottimizzando il processo di caricazione e stivaggio dei containers partendo dalla predisposizione di quest'ultimi in pile dedicate dello yard e divise per tipologia, peso, destinazione. Ne è un esempio il lavoro svolto da *Monaco et al, (2014)*²⁰ che risolve il problema tramite un modello di ottimizzazione intera binaria e un algoritmo euristico a due passaggi entrambi con metodo Tabu Search.

¹⁹ Mar-Ortiz, Castillo-García, e Gracia, «A Decision Support System for a Capacity Management Problem at a Container Terminal,2019».

²⁰ Monaco, Sammarra, e Sorrentino, «The Terminal-Oriented Ship Stowage Planning Problem,2014».

Prima risolvendo il problema di caricazione nave, tenendo conto in primis dei vincoli strutturali e di stabilità, e successivamente risolvendo il problema dal punto di vista del terminal planner, che dovrà preparare il piazzale anticipatamente una volta ottenuto il piano di carico della nave. La letteratura è molto ampia in merito. Per brevità della trattazione e non essendo questo l'oggetto della nostra ricerca si rimanda al lavoro di altri autori quali ad esempio *Ambrosino et al, (2022)*²¹ e *Carlo et al, (2014)*²². In particolar modo il lavoro svolto da *Stahlbock et al (2007)*²³ fornisce una visione generale ed ordinata sui problemi di ottimizzazione presenti nella gestione operativa di un terminal contenitori. Ad ogni modo è evidente che, nonostante la letteratura in merito al trasporto containerizzato sia ampia e varia, fornendo più di uno strumento teorico e pratico per lo studio dell'ottimizzazione delle operazioni portuali all'interno del terminal, quest'ultimi non sono e non possono essere tradotti al trasporto di merci rotabili, per diverse ragioni: in primis, il terminal contenitori e l'ottimizzazione dei suoi processi dipende da molti mezzi di movimentazione (come ad esempio le *gantry crane* e le *quay crane*) che sono totalmente assenti nel terminal Ro-ro; inoltre, il più grande "difetto", se così può essere definito, della merce rotabile è che non può essere disposta in pile di stoccaggio (moltiplicando la capacità del piazzale stesso), ne tantomeno essere movimentata molteplici volte, questo per evitare possibili danni al carico (nei terminal *automotive*, si considera accettabile un danno dal 0.5% al 1.0% sul totale del parco auto²⁴).

2.1 – Il problema della Capacità: Revisione della letteratura

La scarsità di Capacità di un terminal Ro-ro è il problema più evidenziato dalla letteratura odierna. Un problema originario dalla incapacità della merce di tipo rotabile di poter essere stoccata su sé stessa e movimentata, oltre al generale dilatarsi dei tempi di sosta all'interno dello yard stesso prima di essere prelevata, lato terra dal sistema stradale

²¹ Ambrosino e Xie, «Optimization Approaches for Defining Storage Strategies in Maritime Container Terminals,2022».

²² Carlo, Vis, e Roodbergen, «Storage Yard Operations in Container Terminals, 2014».

²³ Stahlbock e Voß, «Operations Research at Container Terminals» - 2007.

²⁴ Iannone et al. «Proposal for a flexible discrete event simulation, 2016».

(tramite camion, bisarche) o ferroviario, lato mare tramite altre navi dirette a mercati più lontani. Tutto questo in un ambiente internazionale che, come visto nel capitolo precedente, porta ad una crescita costante di questo comparto, esacerbandone i limiti strutturali. I metodi per l'analisi quantitativa utilizzati sono tra i più vari: *Iannone et al. (2016)*²³ forniscono una preziosa panoramica del sistema terminal Ro-ro, individuando variabili, vincoli spaziali, temporali e di costo, presenti giornalmente nel processo decisionale dei terminal planner di un sistema Ro-ro; *Özkan et al. (2016)*²⁵ compiono una attenta analisi dei principali step presenti all'interno di un terminal, ipotizzando il trasporto di una partita di carico tra due porti Ro-ro. Il modello considera un terminal Ro-ro puro, inteso come un sistema portuale che movimentata unicamente camion e semi-articolati (esclude di conseguenza car-carrier e Ro-pax). Le variabili del problema sono la capacità della nave, il numero di camion/semi-trailer movimentato in un anno, ed il numero medio di camion/semi-trailer in sosta nel terminal annualmente. I ricercatori utilizzano come strumenti risolutivi i modelli di simulazione, ottenendo tramite la teoria delle code e l'inferenza statistica le *probability distribution functions (pdf)* dei vari elementi di flusso all'interno del terminal. Ad esempio, all'arrivo e la partenza delle navi con operazioni di ormeggio, carico e scarico annesse, è data distribuzione normale, mentre il susseguirsi dell'arrivo dei camion ai gate del terminal è data distribuzione esponenziale. Il risultato della relazione mostra, come il numero di mezzi in arrivo annualmente è l'elemento da cui dipende maggiormente (con relazione esponenziale) la capacità necessaria del terminal. *Zhang et al. (2023)*²⁶ considera un problema di programmazione congiunta dell'allocazione delle sezioni di piazzale a livello macro e dell'assegnazione della manodopera di trasferimento nei terminali RO-RO per automobili. Il problema di pianificazione congiunta è formulato come un modello di programmazione intera mista con l'obiettivo di minimizzare la distanza di guida totale necessaria dei veicoli. Per valutare le prestazioni degli algoritmi generati sono stati condotti esperimenti numerici basati su dati casuali e un caso studio basato su dati operativi reali osservati dal *Shanghai Haitong International Automobile Terminal Co. I*

²⁵ Özkan, Nas, e Güler, «Capacity Analysis of Ro-Ro Terminals by Using Simulation Modeling Method, 2016».

²⁶ Zhang, Chen, Mei «Optimization of Joint Scheduling of yard allocation and transfer manpower assignment for automobile Ro-Ro terminal, 2023».

risultati dimostrano che gli algoritmi proposti sono in grado di generare soluzioni di alta qualità in modo efficiente e sono di grande utilità pratica nelle operazioni quotidiane. *Chen et al. (2020)*²⁷ investigano sul problema di assegnamento del posto di sosta nel caso di terminal Ro-ro car- cargo (*cc*), con l'obiettivo di massimizzare la capacità del terminal. Nella relazione vengono studiati due casi di ingombro (*deadlock situations*) e tramite la simulazione di un piano di carico nave, è sviluppato un modello di programmazione intera binaria per ottimizzare la sequenza di caricazione delle macchine sulla nave e minimizzare il livello di dispersione dei gruppi macchina (definiti all'interno del lavoro). Infine, *N. Abourrja et al. (2023)*²⁸ prende nota del fatto che la scarsa letteratura in merito al terminal Ro-ro risulti ulteriormente frammentata a causa dell'orientamento verso specifici obiettivi e casistiche, mentre è assente un modello di supporto decisionale (*DSS*) generalizzato. Questa relazione si pone proprio questo scopo, focalizzandosi sui principali indicatori di performance (*KPI's*) e sulle tre principali arterie del sistema portuale: i flussi, le decisioni e le operazioni. Relativamente ai *KPI's* è stata di grande ispirazione il lavoro svolto da *Fusco et al. (2010)*^{29,30} riguardo allo studio della capacità portuale di un terminal *pure* Ro-ro partendo proprio dall'individuazione degli indicatori di performance, e tramite la teoria delle code, lo studio della capacità inespressa del terminal traghetti di Barcellona. Sarà mio scopo durante la trattazione analizzare dettagliatamente i lavori citati poc'anzi ed evidenziarne pregi e difetti, nonché spunti di riflessione per un'analisi omnicomprensiva del sistema terminal Ro-Ro.

²⁷ Chen, Li, Wu, Gao, Liu «Optimizing storage location assignment in an automotive Ro-Ro terminal, 2020».

²⁸ N. Abourrja, Rouky, Kornevs, Meijer «A simulation-based decision support framework devoted to Ro-Ro terminals: Design, implementation and evaluation, 2023».

²⁹ Fusco, Sauri «Performance indicator for Roll-on-Roll-off Terminals. A Planning Assesment tool, 2009».

³⁰ Morales-Fusco et al.«Quality indicators and capacity calculation for Ro-ro terminal, 2010».

2.2 – Key Performance Indicators di un terminal Ro-ro

Ho voluto iniziare ad esaminare il terminal Ro-ro partendo da quegli elementi che in letteratura sono definiti come KPI's (*Key performance indicator's*), ovvero degli indicatori qualitativi, di flusso o quantitativi, e finanziario/economico che permettono di osservare le qualità tecniche di un terminal e determinarne allo stato attuale le performance operative. Al contempo, ritengo che lo studio attento e con metodo di questi indicatori risulti essere il primo elemento che ogni terminalista dovrebbe studiare per determinare i punti deboli del proprio sistema terminal e migliorarli. Seguendo la classificazione proposta da *Kubilay Gurbuz, Deputy General Manager* del porto di Limak, Turchia³¹ avremo:

- 1) indicatori di performance di banchina (*berth performance indicator*);
- 2) indicatori di performance di maneggio del carico (*handling performance indicator*);
- 3) indicatori di performance di stoccaggio (*storage performance indicator*);
- 4) indicatori di qualità del servizio (*quality of service indicator*).

Ancora una volta lo studio dei *KPI's* in chiave terminalista ha sempre guardato con favore al terminal contenitori, mentre quello Ro-ro non ha avuto altrettanto fortuna. In questo merito è illuminante la ricerca svolta da *Fusco et al. (2010)* che permette di avere un chiaro quadro degli indicatori di un terminal Ro-ro. La ricerca viene svolta su di un terminal *pure Ro-ro*, escludendo quindi i carichi rotabili appartenenti al segmento automotive, e quello passeggeri proprio di una nave Ro-Pax, quest'ultima citata in altri testi come *Xu et al. (2023)*³² e *Karapetyan e Punnen, (2012)*³³. Lo studio parte con l'identificazione delle operazioni madre del terminal Ro-ro. Se ci basassimo sul terminal contenitori, queste sarebbero identificabili con cinque processi decisionali: 1) arrivo della

³¹ Özkan, Nas, e Güler, «Capacity Analysis of Ro-Ro Terminals by Using Simulation Modeling Method,2016».

³² Xu et al., «Ferry Scheduling Optimization Considering Arrival Time Uncertainty and In-Place Time Differences, 2023».

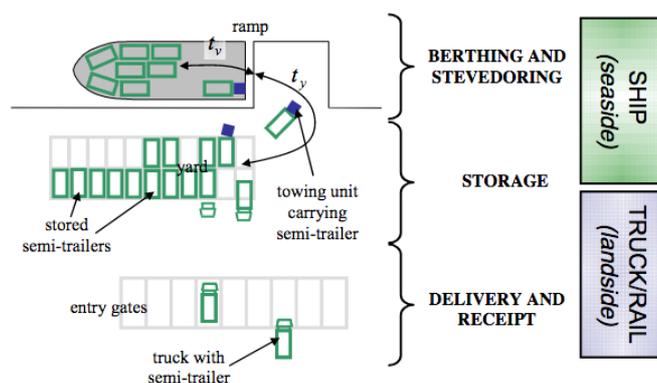
³³ Karapetyan e Punnen, «A Reduced Integer Programming Model for the Ferry Scheduling Problem, 2012».

nave, 2) operazioni di Scarico/Carico, 3) Trasferimento al piazzale, 4) Stoccaggio, 5) scambio modale e flusso import/export. Queste vengono sintetizzate ulteriormente in letteratura, non considerando l'arrivo della nave, ma focalizzandosi solo sul sistema terminal. In questo caso le operazioni sarebbero essenzialmente quattro: 1) Carico/Scarico, 2) Trasferimento, 3) Stoccaggio, 4) Consegna/Ricezione. Col terminal Ro-ro non si può seguire lo stesso schema, infatti i ricercatori semplificano le operazioni a 3 processi operativi, dal momento che la fase di *trasferimento* è difficile da considerare separatamente rispetto al processo di *carico/scarico* e *stoccaggio*. Di conseguenza le operazioni sono tre (*Figura 2*):

- 1) Carico/Scarico e Rimessaggio (*Berthing and Stevedoring*);
- 2) Stoccaggio;
- 3) Consegna e Ricezione (*Delivery and Receipt*).

La prima operazione comprende oltre che le movimentazioni di carico e scarico, anche l'ormeggio e la partenza della nave, congiuntamente al processo di trasferimento dei mezzi da/verso la nave. La seconda operazione riflette unicamente la necessità di spazio del terminal per ospitare i mezzi in attesa di essere caricati sulla nave o presi in consegna dal lato terra.

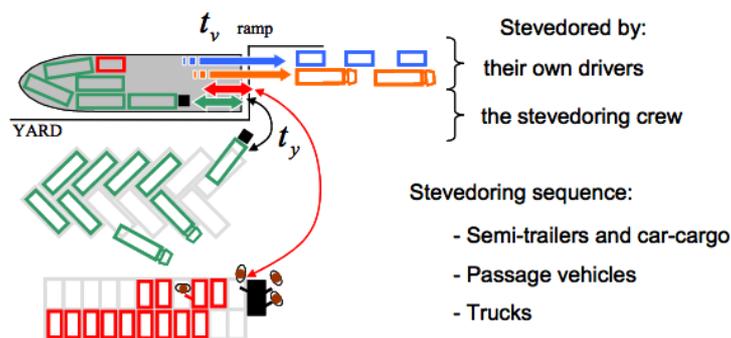
Figura 2 – Processi operativi di un terminal pure Ro-ro



Fonte - Morales-Fusco et al. «Quality indicators and capacity calculation for Ro-ro terminal, 2010»

Qualora considerassimo un terminal Ro-ro generalizzato, quindi con un flusso automotive ed uno con camion “*accompanied*”, il numero di variabili aumenterebbe ma le fasi operative rimarrebbero sostanzialmente inalterate (*Figura 3*).

Figura 3 – Processi operativi (con focus sul “Stevedoring”) di un terminal Ro-ro generalizzato.



Fonte - Morales-Fusco et al. «Quality indicators and capacity calculation for Ro-ro terminal, 2010»

Il focus della nostra ricerca verterà proprio sulla fase di stoccaggio, essendo questo l'elemento che di più determina la capacità massima di un terminal, intesa come il massimo di numero di mezzi gestibili, avendo ottimizzato ogni singolo suo processo e considerando livelli di domanda considerevoli. Questa definizione di Capacità prende il nome di *Level of Usage (LoU)*. Il *LoU* è stato calcolato in molti modi, prendendo sempre come spunto la letteratura sul trasporto container, questo è stato calcolato come il rapporto tra il tempo di attesa della nave per iniziare le sue operazioni (*waiting time* - t_w) ed il tempo necessario a completarle (*service time* - t_s). Altre volte è utilizzato il *berth occupancy ratio* che mi determina il livello di congestione delle banchine, un indicatore qualitativo che può essere approssimato dalla *Waiting Probability*, e quindi dal *waiting time*. Ognuno di questi indicatori si adatta meglio ad un diverso tipo di terminal. Nel terminal Ro-ro invece, si è rivelato un ottimo stimatore del *LoU* il *turn-around time*, anche detto *dwelling time*, definito come il tempo totale per permettere alla nave di compiere totalmente le sue operazioni, comprese quelle di manovra, accosto e ormeggio, posa della rampa, ed il conseguente disormeggio, partenza, ed uscita dal porto. Conseguentemente massimizzare la capacità di un terminal esistente, si limiterebbe a trovare il valore minimo del *turnaround time*. Potremmo dire che il decorrere del *turn-around time* (t_t) inizi all'imbarco pilota (durante la manovra di arrivo) e si concluda allo sbarco pilota una volta completata la manovra di partenza.

Matematicamente il *turn-around time* è ottenuto con la seguente equazione:

$$t_t = t_s + t_w \quad (8)$$

Il *service time* (t_s) è il tempo in cui una banchina è dedicata interamente alle operazioni di una singola nave, rispettivamente le operazioni di ormeggio/disormeggio, posizionamento/rientro rampa (t_o) e carico/scarico e trasporto della merce (t_{sv}).

$$t_s = t_o + t_{sv} \quad (9)$$

Notare che l'*operation time* (t_o) dipende molto dal tipo di nave, dai limiti portuali, dalle velocità ottenibili in manovra e dalla distanza tra la *pilot station*³⁴ e la banchina di ormeggio. Ecco un esempio calcolato da *Fusco et al. (2010)* relativo al *operation time* dei principali porti Ro-ro spagnoli (*Tabella 8*), sintetizzato dalla seguente equazione empirica:

$$t_o = 20 \times d + 6 \times R + 20 \quad (10)$$

Dove R è il numero di rampe con cui la nave è equipaggiata, mentre d è la distanza in miglia nautiche dalla pilota station alla banchina (*Nm – nautical miles, pari a 1852 m*).

Tabella 8 – Operation Time (t_o) dei maggiori porti Ro-ro spagnoli.

| | Barcelona - Port Nou | Valencia - Car and Rolled Cargo terminal | Cádiz - Marqués de Comillas berth | Vigo - Bouzas berth |
|--|---------------------------------|---|--|--------------------------------|
| d (nautical miles) | 3 | 1,2 | 0,75 | 0,15 |
| t_o (min) | 80 + 3R | 43 + 3R | 36 + 3R | 24 + 3R |

Fonte - Morales-Fusco et al. «Quality indicators and capacity calculation for Ro-ro terminal, 2010»

Lo *stevedoring time* (t_{sv}) è l'indicatore più difficile da calcolare perché dipende profondamente dalla tipologia di nave, la sua compartimentazione interna ed il piano di carico/scarico, la dimensione del terminal e la distanza tra le zone di yard e quella tra la rampa e la prima area di stoccaggio (D), il tipo di merce, a seconda che si tratti di macchine intese come carico (*car-cargo*, t^{cc}), camion (t^t), semi-trailer (t^{st}), macchine passeggeri (t^p). Per quel che riguarda il car-carco ed i semi-trailer, questi non si muoveranno direttamente dalla nave al di fuori del terminal, ma andranno posizionati nello yard, per cui dovranno prima essere spostati fuori dalla nave (t_v) e poi posizionati

³⁴ La *pilot station* è un punto geograficamente localizzato sulla cartografia tradizionale o elettronica (ENC – Electronic Navigation Chart) che mostra, per ogni porto o luogo di traffico ed interesse commerciale, la zona in cui la nave dovrà aspettare ed imbarcare il pilota, in modo da essere assistita durante la manovra di atterraggio. In partenza, il pilota raggiunge la nave via banchina.

nella zona del piazzale corretta (t_y). Il tutto viene sintetizzato dalla seguente equazione (vedi Figura 3):

$$t_{sv} = t^p + t^t + \max(t_v^{cc} + t_y^{cc}, t_v^{st} + t_y^{st}) \quad (11)$$

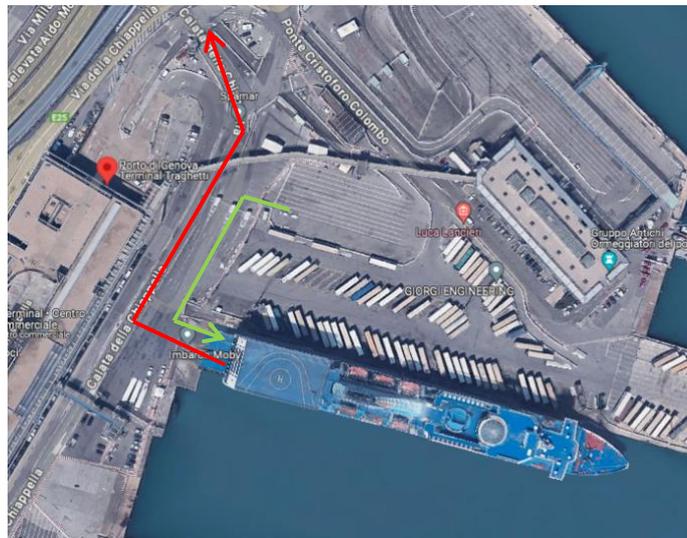
Se considerassimo t^p e t^t come valori deterministici, potremmo allora definire come μ_l^t e μ_l^p la quantità rispettivamente di camion (*truck*) e auto-passeggero (*passenger car*) caricabili in un'unità di tempo (al minuto in questo caso). Al contempo definiremo come μ_u^t e μ_u^p la quantità dei mezzi sopracitati scaricabile per unità di tempo. Infine, avremo che n_u^p ; n_l^p ; n_u^t ; n_l^t rappresenteranno le quantità di camion e macchine effettivamente da scaricare e caricare dalla/verso la nave (in breve, la domanda di movimentazione). Il che ci porta a definire i tempi con la seguente equazione:

$$t^t(\text{in minuti}) = \frac{1}{\mu_l^t} n_l^t + \frac{1}{\mu_u^t} n_u^t + t_{af}^t \quad (12)$$

$$t^p(\text{in minuti}) = \frac{1}{\mu_l^p} n_l^p + \frac{1}{\mu_u^p} n_u^p + t_{af}^p \quad (13)$$

Dove i valori μ sono fortemente dipendenti dal numero di rampe R disponibili. Maggiori saranno quest'ultime maggiore sarà la capacità di movimentazione della nave, sempre considerato che questo tipo di mezzo non necessita di *stevedoring*. Mentre i termini t_{af}^t ; t_{af}^p (*af* – *affectation*) possono essere considerati come il ritardo dovuto all'inefficienza di capacità dei gate di entrata ed uscita del terminale, insieme ai limiti fisici delle vie di traffico del terminal. Per quest'ultimo elemento un esempio chiarirà ogni dubbio:

Figura 4 – Terminal Traghetto di Genova. Ipotesi di flusso di scaricazione (rosso) e caricazione (verde)



Fonte - immagine satellitare catturata da Google Maps in data 10 Luglio 2024

Prendendo come spunto un'immagine satellitare che restituisce il terminal traghetti di Genova, il percorso di uscita ed i rispettivi gate hanno capacità di mezzi limitata (*linea gialla della figura 4*), pertanto non potranno fisicamente ospitare più di un tot di mezzi contemporaneamente tra le proprie corsie. Di conseguenza, se i mezzi escono dalla nave con tasso di arrivo λ e la portata dei gate e delle corsie è data dal tasso di servizio μ , dove $\mu < \lambda$, allora si creeranno delle code³⁵, con successivo aumento di attesa ed inefficienze alla caricaione, scaricaione, simboleggiato dai termini $t_{af}^t; t_{af}^p$.

Questi sono calcolati tramite la seguente formula:

$$t_{af}^t = \frac{1}{\mu_g} (n_u^t - L) - \frac{1}{\mu_u^t} n_u^t \quad (14)$$

Dove μ_g è la capacità di servizio dei cancelli del terminal (*g- gate*) espressa in numero di camion serviti nell'unità di tempo e L è la capacità delle corsie di uscita del terminal.

I tempi di *stevedoring* dei semi-trailer e del car-cargo differisce da quanto detto finora per il singolo fatto di non potersi muovere da solo, pertanto saranno dipendenti dal numero di stivatori e dalle distanze di percorso del piazzale. Nella ricerca visionata ad ogni modo è posta un'ipotesi importante: è disposto che il flusso dei semi-trailer non interferisca con quello delle macchine, né tanto meno il flusso di carico avvenga in contemporanea col flusso di scarico. In questo modo è possibile calcolare i singoli valori dei tempi indipendentemente per poi sommarli ed ottenere il valore totale del *stevedoring time*.

Per entrambi i fenomeni è come sempre possibile rifarsi ad una analisi deterministica, imponendo come costante il valore di tempo necessario per compiere questo tipo di operazioni, a seguito di molte osservazioni sul campo; oppure può essere mantenuta la natura stocastica dell'evento. In tal caso, entrambi i tempi, hanno dimostrato di avere una *pdf* (*Probability Density Function*) di tipo Normale con media e varianza come parametri. Nel caso dei semi-trailer, la distribuzione è approssimata partendo da quella dei mafi (t_v^m), che studiando il caso studio del porto di Barcellona, si è rivelata uno stimatore

³⁵ Si ricorda dalla Teoria delle Code, che entrambi i tassi di arrivo e servizio sono eventi stocastici, aventi quindi una loro componente aleatoria e non determinista. Pertanto, per molti eventi di questo tipo (come l'intervallo di inter-arrivo di due veicoli, camion o contenitori) essendo indipendenti, si suppone una distribuzione esponenziale con parametro λ avente come media $1/\lambda$ e varianza $1/\lambda^2$. Il rapporto tra il tasso di arrivo ed il tasso di servizio ci fornisce il tasso di utilizzo del servizio: $\lambda/\mu = \rho$

corretto della distribuzione dei semi-trailer. Pertanto, quest'ultimi avranno come parametri:

$$t_v^{st} \approx N \left(\frac{t_v^m (n_u^{st} + n_l^{st})}{n^m}; \frac{\sigma_v^{m^2} (n_u^{st} + n_l^{st})}{(n^m)^2} \right) \quad (15)$$

$$t_y^{st} \approx N \left(\frac{t_y^m (n_u^{st} + n_l^{st})}{n^m}; \frac{\sigma_y^{m^2} (n_u^{st} + n_l^{st})}{(n^m)^2} \right) \quad (16)$$

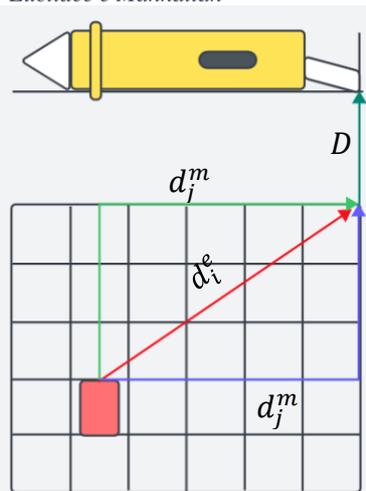
Per il car-cargo è più facile impostare una formula empirica che permetta di determinare con un buon grado di approssimazione il t_v^{cc} ed il t_y^{cc} oppure affidarsi al metodo deterministico.

Un fattore importantissimo che è opportuno considerare è il piazzale stesso, evidenziando i possibili indicatori di performance, che rientrano nella categoria degli indicatori fisici. Come poc'anzi detto i tempi di *stevedoring* dei semi-trailer e del car-cargo, dipendono anche dalle distanze percorse nel piazzale, e dalla distanza tra ciascun piazzale, e tra i piazzali e le rampe. Ho voluto evidenziare due distanze in particolare:

- Distanza Rampa – piazzale (D): è la minor distanza che intercorre tra l'inizio della rampa nave e la prima area di sosta disponibile in piazzale;
- Distanza locale della i -esima unità di carico (d): questa è rappresentata dalla somma di tutte le distanze i -esime percorse dal semi-trailer/mafi/car-cargo, prima di raggiungere la sua posizione di sosta definitiva o viceversa, dalla posizione di yard all'ingresso della rampa, come mostrato in *Figura 5*:

Figura 5 – Differenza tra distanze

Euclidea e Manhattan



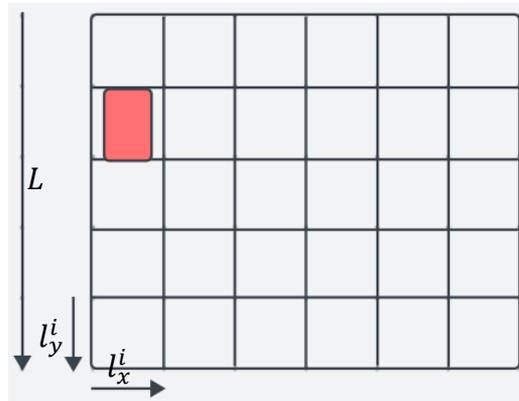
Fonte – Elaborazione Propria

In questo caso le distanze possono variare di molto a seconda della presenza o meno di *deadlock situation* nelle celle prossime a quelle del veicolo da spostare. Se fosse presente un veicolo nella cella superiore a quella considerata, il percorso verde verrebbe scartato, mentre se ad essere occupata fosse quella a destra o sottostante (la presenza di un veicolo impedirebbe la manovra) ad essere scartato sarebbe il percorso blu. La tragitto che ne risulterebbe sarebbe un cammino minimo di tipo Manhattan, caratterizzato da distanze non euclidee, lungo linee verticali ed orizzontali rispetto al punto di origine. Il percorso rosso

rappresenta una distanza Euclidea ed è ovviamente il più breve, ma non è nella maggior parte dei casi, praticabile. Il percorso scelto in questo caso sarebbe quello di cammino minimo che rispetti tutti i vincoli di ingombro dei mezzi circostanti.

Seguono ulteriori indicatori di Area del piazzale, importantissimi per determinarne la capacità effettiva o potenziale, come mostrato nello studio di *Özkan et al. (2016)*³⁶. Identificheremo come A_r l'area residua del piazzale, e come A_{or} l'area ottimale richiesta per ospitare il carico desiderato. Per calcolare A_r ho voluto considerare un piazzale di forma quadrata avente lato L e dimensione della i -esima area di sosta avente dimensione $l_x^i ; l_y^i$ come mostrato in *Figura 6*:

Figura 6 - Esempio di posto di sosta e yard quadrato di area L^2



Fonte – Elaborazione propria

In questo modo il calcolo dell'area potenziale può facilmente essere calcolato con la seguente equazione:

$$A_r = \sum_{i \in N} (l_y^i \times l_x^i) \quad (17)$$

Dove $N = \{n_1; n_{i+1}; \dots; n_n\}$ è l'insieme discreto di tutte le aree che compongono l'area di piazzale totale.

L'area ottimale richiesta che serve per ospitare il carico desiderato invece è data dalla somma di tutte le "impronte" generate dai carichi rotabili posizionati nell'area di sosta, che siano essi macchine, semi-trailer, camion, mafi, articolati o macchine fuori misura. Ovviamente, volendo fare un calcolo che tenga conto della "worst-case scenario", si

³⁶ Özkan, Nas, e Güler, «Capacity Analysis of Ro-Ro Terminals by Using Simulation Modeling Method, 2016».

potrebbe semplicemente considerare l'area occupata dal mezzo con maggior ingombro. Ad ogni modo ho voluto optare per una formula generale:

$$A_{or} = \sum_{v \in V} (l_y^v \times l_x^v) v^v \quad (18)$$

Dove $l_y^v; l_x^v$ sono le dimensioni di lunghezza e larghezza del veicolo v-esimo appartenente all'insieme discreto dei veicoli $V = \{v_1; v_{i+1}; \dots; v_n\}$.

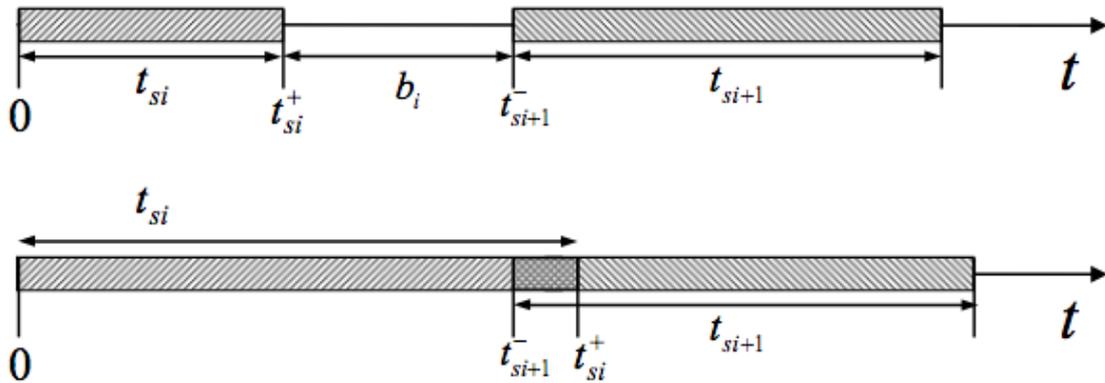
Ne consegue che un importante *KPI* di tipo fisico è rappresentato dal rapporto tra queste due grandezze, il che mi dimostra il livello di utilizzo dello yard:

$$Area\ indicator = \frac{A_{or}}{A_r} \quad (19)$$

Il coefficiente adimensionale varia nell'intervallo $[0; 1]$, dove 1 sancisce l'utilizzo dell'intera capacità dello yard.

L'ultimo elemento che rimane da trovare è il *waiting time* (t_w). Questo rappresenta il tempo che una nave deve aspettare affinché venga assegnata ad una banchina e possa iniziare le sue operazioni. Questo tempo di attesa dipende dal tempo di servizio della nave i-esima con cancello di arrivo precedente al suo. Volendo rappresentare graficamente il *waiting time* si osservi la *Figura 7*.

Figura 7 – Tempi di servizio e tempi di attesa di due navi assegnate alla stessa banchina con cancello di arrivo diversi



Fonte - Fusco, Sauri «Performance indicator for Roll-on-Roll-off Terminals. A Planning Assesment tool, 2009»

Considerando la prima linea temporale, t_{si} è il tempo di servizio della nave i-esima, ottenuto dalla differenza tra il suo tempo di partenza (t_{si}^+) e quello di arrivo (t_{si}^-); mentre t_{si+1} è il tempo di servizio della nave $i+1$ -esima arrivata successivamente, anch'esso ottenuto dal suo tempo di partenza (t_{si+1}^+) meno il suo tempo di arrivo (t_{si+1}^-).

Nel primo caso, non esiste un tempo di attesa (né code), perché tra l'arrivo della nave $i+1$ -esima e la partenza della nave i -esima, intercorre un periodo di inter-arrivo (b_i), ottenuto dall'equazione:

$$b_i = t_{si+1}^- - t_{si}^+ \quad (20)$$

Osservando la seconda linea temporale, si nota immediatamente che l'arrivo schedulato della nave $i+1$ -esima (t_{si+1}^-) è precedente sull'asse t , rispetto alla partenza della nave i -esima (t_{si}^+).

Pertanto, la nave successiva dovrà attendere, per un valore corrispondente all'equazione:

$$t_{wi+1} = t_{si}^+ - t_{si+1}^- \quad (21)$$

Questa condizione si verifica solo quando $t_{si}^+ \geq t_{si+1}^-$ e quindi il tempo di inter-arrivo $b_i \leq 0$. Il tutto può essere riassunto col seguente sistema:

$$t_{wi+1} = \begin{cases} t_{si}^+ - t_{si+1}^- , & b_i \leq 0 \\ 0 , & b_i > 0 \end{cases} \quad (22)$$

Il fatto che il tempo di attesa si verifichi anche con condizione di $b_i = 0$, è dovuto ad una considerazione pratica. È improbabile che la rapida successione tra la partenza di una nave e l'arrivo della successiva sulla stessa banchina avvenga senza produrre alcun ritardo o coda nel sistema terminal.

Ovviamente, il problema può essere approcciato deterministicamente, come detto nel caso di t_y^{cc} ; t_v^{cc} . In questo caso, si può simulare un modello oppure compiere uno studio statistico sulla frequenza dei tempi di attesa in un determinato terminal, e dare a questa variabile un termine noto, e costante. Se si considera il problema in modo stocastico invece, anche il *waiting time*, dovrà essere considerato come una variabile aleatoria che avrà la sua funzione di densità di probabilità. Come evidenziato nel calcolo del t^{st} , la distribuzione è approssimabile alla Normale, nel caso di arrivi schedulati e non randomici (se randomici, gli arrivi seguono una distribuzione di Poisson o Erlang- K). Questo può essere trasposto a tutti gli eventi stocastici trattati finora, come è anche evidenziato dallo studio di Özkan et al, (2016), che rifacendosi sul caso di trasporto di merci Ro-ro tra due diversi terminal ad una distanza data, riassume efficacemente le distribuzioni degli eventi sopracitati, fornendone uno schema riassuntivo molto utile che riporto di seguito (Figura 8). Pertanto, anche il *waiting time* ha, secondo queste ipotesi una distribuzione Normale, a sottolineare il fatto di star parlando comunque di tratte facenti parte delle MoS e SSS, pertanto caratterizzate da una ricorrenza degli approdi

regolare e ciclica. Ad ogni modo, se il *waiting time* si verifica solo a condizione che $b_i \leq 0$, possiamo supporre che anche l'intervallo di inter-arrivo abbia distribuzione Normale, e sia uno stimatore corretto di t_w (per arrivi schedulati). Siccome i parametri della Normale sono la media e la varianza, nel caso di b_i si avrà che:

$$\bar{b}_i = \bar{t}_{si+1}^- - \bar{t}_{si}^+ = \frac{\sum_{i=1}^n t_{si+1}^-}{n} - \frac{\sum_{i=1}^n t_{si}^+}{n} \quad (23)$$

Dove n è il numero di navi approdate in porto nel caso di t_{si+1}^- ; mentre è il numero di navi partite dal porto nel caso di t_{si}^+ .

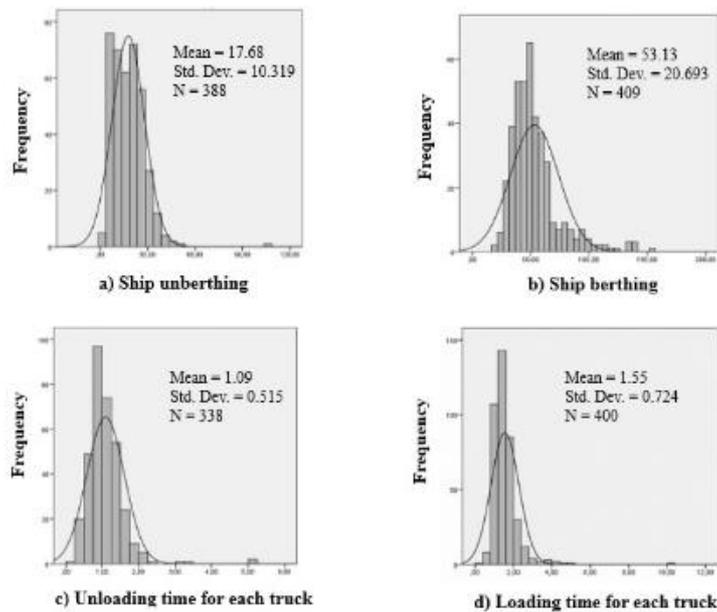
In definitiva i parametri della *pdf* Normale di b_i sono:

$$b_i = N(\bar{b}_i; \sigma_{b_i}^2) = N(\bar{t}_{si+1}^- - \bar{t}_{si}^+; \sigma_{t_{si}^+}^2 + \sigma_{t_{si+1}^-}^2) \quad (24)$$

Di conseguenza la probabilità di attesa per una data nave può essere espressa con la variabile δ :

$$\delta = \Pr(b_i \leq 0) \quad (25)$$

Figura 8 – pdf delle principali operazioni lato banchina.



Fonte - Özkan, Nas, e Güler, «Capacity Analysis of Ro-Ro Terminals by Using Simulation Modeling Method, 2016

2.3 – Il problema della capacità: Metodi di Simulazione

Mentre *Fusco et al. (2010)*, come analizzato nella sezione 3, ha affrontato il problema della capacità del terminal Ro-ro basandosi sullo studio dei *KPI's* e utilizzando come stimatore corretto della capacità il *turn-around time*; *Özkan et al. (2016)*, studiano il problema della capacità tramite i modelli di simulazione. Il loro studio si basa sull'osservazione e la collezione di dati iniziali relativi ai traffici annuali presenti tra i terminal traghetti della Turchia. Ho voluto approfondire la loro relazione avendo potuto notare i risultati ottenuti tramite l'applicazione del loro algoritmo risolutivo e tramite le potenzialità di software di simulazione come Witness ® e Promodel ®, quest'ultimo utilizzato dai ricercatori per lo studio dei flussi. Il loro modello sfrutta i metodi simulativi per compiere un'analisi di sensibilità sulle seguenti tre variabili: Il numero di camion in arrivo ad un terminal *pure Ro-ro* (dedita al trasporto di soli camion e semi-trailer) nell'arco di un anno, la capacità in termini di unità di trasporto della nave Ro-ro, la distanza (in miglia nautiche) che intercorre tra due porti consecutivi tra loro nel tragitto della nave (si suppone in ottica *MoS*). Per la prima variabile si è scelto un intervallo tra 10.000 e 28.000 unità; per la seconda l'intervallo scelto è tra 80 e 240 camion; per la terza variabile l'intervallo è da 80 a 120 miglia nautiche.

Il metodo di simulazione compie un'analisi di scenario optando per modificare una sola variabile alla volta, mantenendo le altre costanti. La scelta delle costanti è stata per la prima variabile di 20.000 unità l'anno, per la seconda variabile 200 camion e per la terza si è optato per 160 miglia nautiche. Il modello fa diversi assunti che in alcuni casi riprendono quanto detto nel paragrafo precedente o lo modificano:

- Viene considerata una nave ed un terminal *pure Ro-ro* dove non sono comunque contati i semi-trailer ma unicamente i camion;
- I camion hanno un'impronta di 60 m² e lunghezza di 15 m;
- La capacità è intesa come il numero totale di camion ospitabili all'interno del terminal;
- Esistono due terminal e due navi Ro-ro, si studia la capacità in relazione alla distanza tra questi due in miglia nautiche;

- Le navi mantengono una velocità media di 17 nodi con deviazione standard di 2 nodi;
- La caricazione dei camion avviene solo dopo che siano state ultimate le operazioni di scarica;
- Le banchine sono considerate sempre disponibili, pertanto non sono contemplate code e *waiting time* per l'approdo delle navi;
- Anche eventuali ritardi dovuti al dispaccio doganale o ad inefficienze del terminal non sono considerati;
- Condizioni meteo avverse non sono contemplate;
- Tutti gli eventi indipendenti e casuali all'interno del modello hanno *pdf* di tipo Normale, fatta eccezione per l'arrivo dei camion al terminal che ha distribuzione Esponenziale.

Il flusso generalizzato analizzato dal modello è sintetizzato nella *Figura 9* e spiegato di seguito. I camion in arrivo con *pdf* di tipo esponenziale al terminal A, attendono l'arrivo della nave avente *pdf* normale, oppure vengono immediatamente imbarcati sul traghetto fintanto che quest'ultimo non sia totalmente carico; qualora vi siano operazioni di sbarco da compiere prima dell'imbarco dei camion, quest'ultimi sosterranno nell'area di attesa del terminal A. Una volta compiute le operazioni portuali di carico e scarico, la nave disormeggia e parte, compiendo il suo tragitto fino all'approccio al porto di destinazione ed al terminal B, dove sarà nuovamente ormeggiata ed inizieranno le regolari operazioni di sbarco dei mezzi provenienti dal terminal A, e dove verranno imbarcati quelli arrivati precedentemente (sempre con *pdf* esponenziale) al terminal B. Anche in questo caso, l'eventuale necessità di realizzare lo sbarco prima dell'imbarco dei mezzi, verrà sopperita con lo stazionamento dei mezzi nelle aree di sosta. Come si osserva dalla *figura 9*, tutte le operazioni concernenti la nave, sono state approssimate dai ricercatori nell'aver una distribuzione di probabilità di tipo Normale.

ed è stato così ottenuto l'intervallo di confidenza $(1 - \alpha)^{37}$ del numero medio di camion in sosta nel piazzale al variare degli arrivi di camion su base annua:

Tabella 9 – Valori di intervallo di confidenza con livello di confidenza al 95% del numero massimo di camion accumulati nel terminal dipendentemente dal numero di arrivi di camion su base annua.

| Arriving trucks/year | Maximum number of trucks accumulated in the terminal | |
|----------------------|--|------------------------------------|
| | Lower value of confidence interval | Upper value of confidence interval |
| 10000 | 116.23 | 178.76 |
| 12000 | 144.98 | 226.21 |
| 14000 | 160.70 | 246.74 |
| 16000 | 147.76 | 242.33 |
| 18000 | 173.21 | 248.33 |
| 20000 | 160.35 | 256.39 |
| 22000 | 178.94 | 288.15 |
| 24000 | 198.09 | 315.15 |
| 26000 | 208.49 | 329.00 |
| 28000 | 217.00 | 313.54 |

Fonte - Özkan, Nas, e Güler, «Capacity Analysis of Ro-Ro Terminals by Using Simulation Modeling Method, 2016

Costruendo poi due diverse rette di regressione che uniscano i singoli valori rispettivamente inferiore e superiore dell'intervallo, si è ottenuto un grafico che denota la

³⁷ (Bassi e Ingrassia, "Statistica per le analisi di mercato - metodi e strumenti", I ed.) l'intervallo di confidenza della media μ di un campione di dimensione n (con varianza δ^2 nota) avente variabili casuali con distribuzione Normale standardizzata si calcola con la seguente equazione, ipotizzando un $\alpha = 0,05$:

$$\text{posto che } Z \text{ (valore standardizzato)} = \frac{\bar{x} - \mu}{\delta / \sqrt{n}}$$

Indicando $Z_{\alpha/2}$ come il numero reale tale che $P(Z > Z_{\alpha/2}) = \alpha / 2$,

assunto che per proprietà di simmetria della funzione di distribuzione (Φ) della Normale Standardizzata,

$$\Phi(-Z) = 1 - \Phi(Z)$$

E che quindi,

$$P(-Z_{\alpha/2}) = 1 - P(Z_{\alpha/2}) = \alpha / 2$$

Avremo che la probabilità del valore Z sarà

$$P(-Z_{\alpha/2} \leq Z \leq Z_{\alpha/2}) = 1 - \alpha$$

E quindi l'intervallo di confidenza di Z è,

$$[-Z_{\alpha/2} \leq Z \leq Z_{\alpha/2}] = \left[-Z_{\alpha/2} \leq \frac{\bar{X} - \mu}{\delta / \sqrt{n}} \leq Z_{\alpha/2} \right]$$

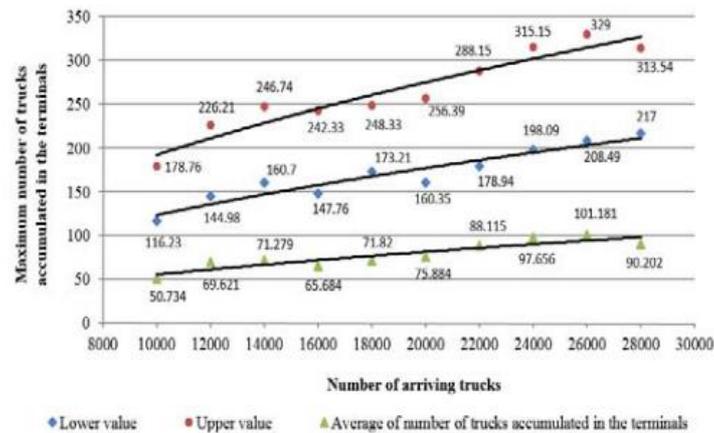
Pertanto, l'intervallo di confidenza della media μ è,

$$\left[\bar{X} - Z_{\alpha/2} / \delta / \sqrt{n} \leq \mu \leq \bar{X} + Z_{\alpha/2} / \delta / \sqrt{n} \right]$$

correlazione esponenziale tra la variabile indipendente “arrivi” e quella dipendente “camion accumulati nel terminal”. Di seguito il grafico delle rette di regressione:

- limite superiore: $y = 1.6675 x^{0.05153}$; con indice di determinazione $R^2 = 0.9073$;
- limite inferiore: $y = 0.9934 x^{0.5234}$; con indice di determinazione $R^2 = 0.8936$;

Grafico 1 - Il grafico a dispersione dei valori degli intervalli di confidenza del numero massimo di camion accumulati nei terminal in funzione dei camion in arrivo



Fonte - Özkan, Nas, e Güler, «Capacity Analysis of Ro-Ro Terminals by Using Simulation Modeling Method, 2016

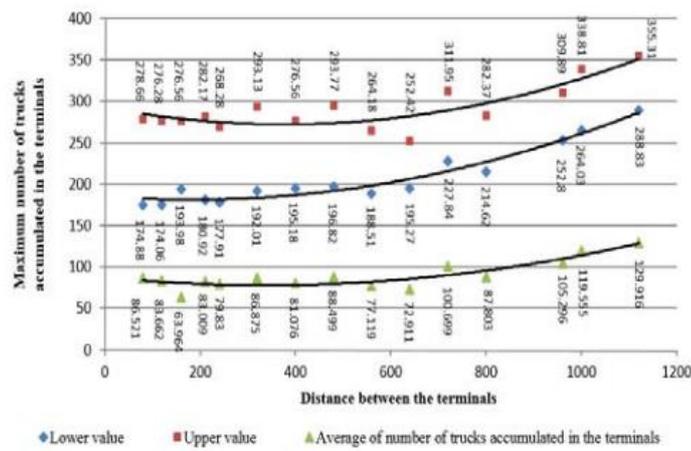
Come si evince leggendo il grafico, con 18.000 camion in arrivo l’anno, dato per costante la capacità nave e la distanza tra i due terminal, la capacità ottimale richiesta (A_{or}) del terminal deve essere di $(60m^2 \times 248.33) \approx 14.900m^2$. Si è tenuto conto del limite superiore in modo da fare una sovrastima della capacità necessaria.

Lo studio prosegue formulando gli stessi grafici e calcolando gli stessi intervalli di confidenza per un campione di 40 osservazioni, alternando le variabili: nel secondo caso la variabile indipendente è la “Distanza tra Terminal” mentre le altre variabili rimangono costanti secondo i valori prestabiliti. Il terzo test considera la variazione della Capacità nave, mantenendo gli altri elementi costanti. Ricavando gli intervalli di confidenza e costruendo le curve di regressione per ciascun limite d’intervallo, si riscontra che:

- Distanza Terminal – massimo numero di camion accumulati (*Grafico 2*): relazione di tipo **polinomiale** con funzione upper level e lower level rispettivamente di $y_{ul} = 0.0001x^2 - 0.1073x + 292.5$ e $y_{ll} = 0.0001x^2 - 0.0436x + 185.14$ e valori di coefficiente di determinazione $R_{ul}^2 = 0.7192$; $R_{ll}^2 = 0.9431$.

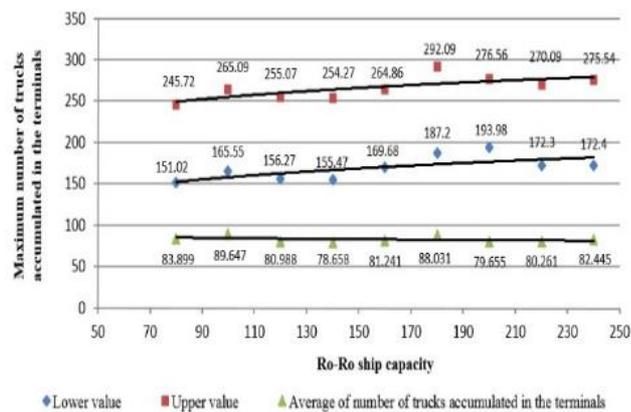
- Capacità Nave - massimo numero di camion accumulati (*Grafico 3*): relazione di tipo **esponenziale** con funzione upper level e lower level rispettivamente di $y_{ul} = 158.38x^{0.1035}$ e $y_{ll} = 75.118x^{0.1613}$ e valori di coefficiente di determinazione $R_{ul}^2 = 0.5404$; $R_{ll}^2 = 0.5083$.

Grafico 2 - Il grafico a dispersione dei valori degli intervalli di confidenza del numero massimo di autocarri accumulati nei terminali in funzione della distanza tra i terminali stessi



Fonte - Özkan, Nas, e Güler, «Capacity Analysis of Ro-Ro Terminals by Using Simulation Modeling Method, 2016

Grafico 3 - Il grafico a dispersione dei valori dell'intervallo di confidenza del numero massimo di camion accumulati nei terminali in funzione della capacità delle navi Ro-Ro



Fonte - Özkan, Nas, e Güler, «Capacity Analysis of Ro-Ro Terminals by Using Simulation Modeling Method, 2016

I test statistico di correlazione di Pearson³⁸, messo a confronto tra i tre scenari, dimostra che la variabile ad avere più peso nel determinare la capacità di un terminal Ro-ro è il “numero di arrivi di autocarri in un terminal” (*Tabella 10*).

Tabella 10 – Indice di Correlazione lineare di Pearson calcolato tra la variabile “numero massimo di autocarri accumulati in un terminal” e le tre variabili evidenziate nel testo del problema di simulazione.

| Coefficiente di Correlazione di Pearson | Variabile 1: “numero di arrivi di autocarri in un terminal” | Variabile 2: “Distanza in miglia nautiche tra due terminal Ro-ro” | Variabile 3: “Capacità di Carico della nave Ro-ro” |
|---|---|---|--|
| Numero massimo di autocarri accumulati in un terminal | 0.959 | 0.841 | 0.706 |

Fonte – Rielaborazione propria

Le conclusioni riscontrate da questo modello sono le seguenti: un terminal operator di sistema Ro-ro dovrebbe focalizzare la sua attenzione sulla domanda di mercato e da questa cercare di anticipare le fluttuazioni di domanda future, disponendo una capacità di terminal intesa in termini di Area Ottimale Richiesta (A_{or}) adeguata.

³⁸ Il coefficiente di correlazione lineare di Pearson (Borra e Di Ciaccio, "Statistica - metodologie per le scienze economiche e sociali", III ed.) è un valore adimensionale che varia nell'intervallo $[-1; 1]$, ed è dato dal rapporto tra la covarianza delle variabili X e Y ed il prodotto delle loro rispettive deviazioni standard.

$$\varphi_{x,y} = \frac{\sigma_{x,y}}{\sigma_x \sigma_y}$$

Capitolo III

Nello scorso capitolo ho identificato il problema della capacità del sistema terminal Ro-Ro, evidenziando la bibliografia esistente in merito e compiendone un'analisi approfondita, soffermandomi su due strumenti di analisi e calcolo della capacità differenti, quali i *Key performance Indicator's (KPI's)* ed i Metodi di Simulazione. Quest'ultimi, tramite la statistica inferenziale, permettono di ottenere un'analisi di scenario dettagliata del sistema terminal esistente, mentre gli indicatori di performance permettono di quantificarne e monitorare i risultati, evidenziandone le criticità con l'ottica di ottimizzarne i processi o indirizzare nuovi investimenti su progetti futuri. In questo capitolo è mia intenzione continuare la ricerca bibliografica riguardante i processi di efficientamento e analisi quantitativa del sistema terminal, focalizzandomi maggiormente sui modelli di ottimizzazione, che sfruttano la formulazione matematica per descrivere sistemi chiusi complessi con vincoli, parametri fissi e dinamici, come può essere un terminal Ro-ro. Inoltre, ho voluto dedicare un paragrafo allo studio e formulazione di un *Decision Support System (DSS)*, che potrebbe essere definito come il prodotto finale delle considerazioni di scenario, dei modelli di ottimizzazione, dei metodi simulativi scelti, e degli indicatori di performance individuati, per restituire all'utente finale (il *terminal planner* o *port authority*) uno strumento, spesso concretizzato in un *software* o foglio di calcolo, che permetta un' immediata analisi di scenario e di sensitività, dando l'opportunità al suo utilizzatore di compiere scelte giustificate e ponderate con ottica d'efficienza, minimizzazione dei costi operativi e ambientali, massimizzazione del profitto, del livello di utilizzazione delle risorse disponibili e delle capacità di piazzale, nonché indirizzare investimenti futuri e valutarne l'efficacia a secondo del progetto infrastrutturale pianificato. Il primo paragrafo analizzerà la bibliografia prodotta in merito all'implementazione di un *DSS* mentre i successivi due paragrafi analizzeranno rispettivamente due differenti modelli di ottimizzazione che investigano e risolvono il problema di "*space allocation*" e "*man-power allocation*" all'interno di un terminal Ro-ro di tipo *car carrier*. Nonostante i due modelli rappresentino una soluzione al problema di un particolare tipo di terminal, ritengo che entrambi possano essere modificati in modo da essere adattati al caso più generale del *pure* Ro-ro: che tratta unicamente semi trailer e autocarri.

3.1 – Il Decision Support System (DSS)

Alla base della definizione e costruzione di un *DSS*, deve esserci la ragione e lo scopo della sua creazione. Come evidenziato nei capitoli precedenti, i modelli per l'ottimizzazione dei processi marittimo - portuali di un terminal Ro-ro sono sempre stati scarsi rispetto al ben più trattato settore contenitori. Nonostante vi siano diversi esempi di sistemi di supporto alle decisioni, nonché metodi simulativi e di modelli di ottimizzazione per specifiche fasi operative del sistema Ro-ro, è scarsa la possibilità di trovare in letteratura un modello che affronti la complessità del sistema Ro-ro nella sua interezza ed in termini generali (Abourraja et al. 2023)³⁹. Gli stessi ricercatori hanno evidenziato come la maggior parte dei modelli analizza e risolve singoli problemi di un sistema terminal; ne sono alcune esempi i modelli per l'ottimizzazione dello *scheduling di banchina*, oppure modelli di *space allocation* per i mezzi Ro-ro, o ancora modelli che analizzano il problema delle code e dei tempi di attesa partendo dai *custom gates* di un terminal. Nessuno considera l'interdipendenza presente tra ciascuno di questi problemi. Inoltre, i singoli modelli citati si focalizzano sulla massimizzazione/minimizzazione di funzioni obiettivo proprie di un solo soggetto operante nel sistema terminal. Nel corso di questo paragrafo si vuole precisare che il termine “modello di ottimizzazione”, se non espressamente specificato, intenderà qualsiasi metodo utilizzato per ottenere obiettivi di ottimizzazione ed efficienza di un determinato processo operativo o gruppo di processi all'interno del terminal Ro-ro. Si ritiene infatti che, sino a che l'elemento di analisi è il *DSS* il modello di ottimizzazione o il metodo simulativo utilizzato non sia altro che lo strumento attraverso il quale si sia perseguito l'obiettivo finale; pertanto la differenziazione di quest'ultimi per il momento è ritenuta superflua. Detto ciò, si vuole ora predisporre le fondamenta per la costruzione di un *DSS*, secondo l'analisi compiuta dai ricercatori Abourraja et al. (2023), Iannone et al. (2015)⁴⁰, Abourraja et al. (2022)⁴¹

³⁹ Abourraja et al. «A simulation-based decision support framework devoted to Ro–Ro terminals: Design, implementation and evaluation», 2023.

⁴⁰ Iannone et al., «Proposal for a Flexible Discrete Event Simulation Model for Assessing the Daily Operation Decisions in a Ro–Ro Terminal», 2015.

⁴¹ Abourraja, Kringos, e Meijer, «Exploiting Simulation Model Potential in Investigating Handling Capacity of Ro-Ro Terminals», 2022.

e Balaban et al. (2013)⁴². Come si è evidenziato, molti modelli prodotti analizzano solo un particolare processo operativo del sistema Ro-ro, senza però tenere conto dell'interdipendenza tra essi, ne tanto meno tenendo conto dei possibili conflitti di interesse tra gli *stakeholder* del sistema terminal. Quali sono questi soggetti. I ricercatori Iannone et al. (2015), compiono una differenziazione adattandovi un *Business Process Model and Notation (BPMN)*⁴³. In questo modo le operazioni sono attribuite ai singoli *stakeholder* (sotto elencati) e le relazioni tra loro sono rappresentate da frecce orientate (Figura 10).

- 1) Shipping Company / Vessel;
- 2) Terminal Management;
- 3) Drivers;
- 4) Transporter.

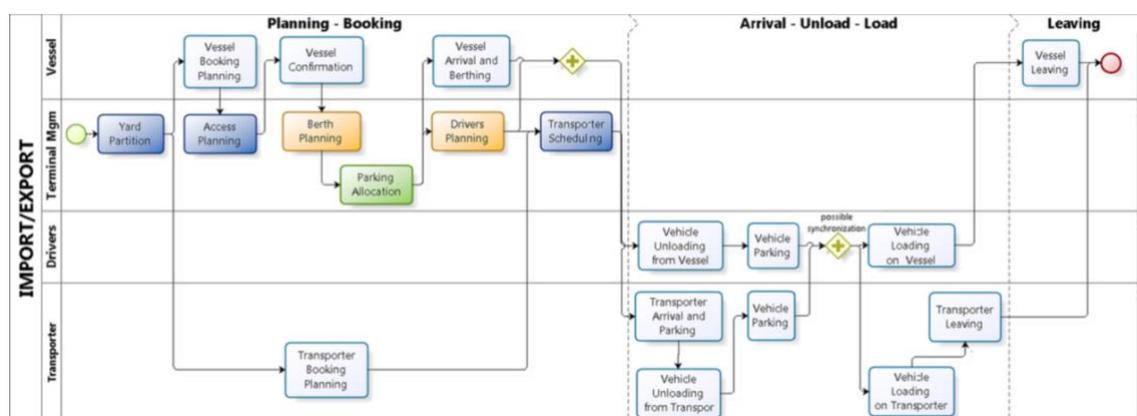
Costruire un *DSS* che sia efficace significa tenere conto delle aspettative di ciascuno di questi *stakeholder*. Dopotutto, è ovvio che una Shipping Company avrà molto più interesse nella gestione del terminal lato mare, pertanto i modelli a cui sarà interessata saranno quelli che ottimizzano il *berth scheduling* e minimizzano *KPI's* quali il *Turn-around time* o il *service time*. Questo perché gli permetterebbe di poter aumentare il numero di scali per singolo viaggio. Contrariamente a quanto detto ora, il Terminal Management si muoverà più con l'ottica d'efficienza del sistema Terminal, puntando verso modelli che massimizzino la resa a parità di input, sfruttando quanto possibile la capacità del terminal e puntando ad un utilizzo omogeneo dell'equipaggiamento di banchina. Il driver avrà interesse allo scheduling della nave ed alla partita di carico rotabile da sbarcare e imbarcare, in modo tale da gestire il suo orario di lavoro e massimizzare il suo salario orario. Infine, il transporter (colui che traina i semitrailer in export al terminal, e ritira quelli in import), avrà più a cuore la velocità dei processi doganali e di verifica del carico, che gli permettano di fare più viaggi per singola giornata di lavoro. È possibile osservare come questi obiettivi singolarmente siano perpetrabili, mentre risultino spesso contrastanti se messi a confronto. Invero, come evidenziato da

⁴² Balaban e Mastaglio, «RoPax/RoRo: Exploring the Use of Simulation as Decision Support System», 2013.

⁴³ Schema a flusso che è capace di rappresentare processi in un modo visivo intuitivo.

Abourraja et al. (2023), “gli stakeholder di un sistema terminal preferiscono non essere così categorici sul determinare quale soluzione sia la migliore e quale debba essere scartata; ragionano piuttosto con un sistema di pesi e contrappesi, pertanto il loro scopo è ottenere un buon equilibrio tra più soluzioni diverse”. La progettazione di un *Decision Support System* dipende molto dal livello dei problemi studiati in ambito portuale. Nel settore terminalista le decisioni sono prese su tre livelli: Strategiche, Tattiche ed Operative.⁴⁴

Figura 10 – BPMN dei diversi stakeholder del sistema terminal Ro-ro e le operazioni a loro annesse.



Fonte - Iannone et al., «Proposal for a Flexible Discrete Event Simulation Model for Assessing the Daily Operation Decisions in a Ro-Ro Terminal», 2015.

La decisione Strategica interesserà il dimensionamento del terminal Ro-ro, ovvero la capacità di piazzale in termini di metri quadri di copertura totale, la lunghezza e quantità di banchine ed il numero di accessi rampa disponibili, la presenza o meno di connessioni ferroviarie e la prossimità alla rete autostradale, il numero dei cancelli di ingressi e dei dispacci doganali all'interno del terminal. Le decisioni tattiche invece avranno a che fare con l'utilizzo delle risorse ottenute dalle decisioni strategiche; dato un determinato piazzale, la decisione sul come ottimizzarne il suo utilizzo tramite un problema di “*space allocation*” ricade nel gruppo delle decisioni strategiche, lo stesso vale per la decisione di “*berth allocation*”, data una determinata lunghezza di banchina e un numero finito di accessi rampa. Le decisioni operative interessano i processi a breve termine in corso all'interno del terminal, come ad esempio i problemi di “*driver scheduling*”, o “*mafì's scheduling*” per il trasporto dei semi-trailer, o ancora problemi di “*parking allocation*”

⁴⁴ Stahlbock e Voß, «Operations Research at Container Terminal: Literature Update», 2008.

nel caso di un terminal car-cargo, in cui dovrò scegliere il miglior modo per parcheggiare le macchine affinché possano essere caricate/scaricate dalla nave in modo da non creare “*deadlock situation*”. Come evidenziato dai ricercatori *Stahlbock e Voß, (2008)*⁴³, i processi decisionali sono interdipendenti tra loro, pertanto una decisione strategica, che risiede al più alto livello decisionale, ricadrà a cascata su tutte le altre decisioni. Un DSS deve tenere conto di questo, considerando che, più sarà alto il livello decisionale scelto per il nostro modello, meno complessa sarà la formulazione del modello stesso, essendovi meno vincoli. Si è voluto sintetizzare il tutto nella *Tabella 10*, utilizzando come modello per i processi operativi quelli elencati durante il capitolo II, alla figura 2.

Tabella 10 – Matrice Livelli Decisionali/ Processi operativi che evidenzia il livello decisionale a cui si trova il singolo problema operativo da risolvere.

| Decisioni/Processi Operativi | Berthing and Stevedoring | Storage | Delivery and Receipt |
|------------------------------|--|--|---|
| Decisioni Strategiche | <ul style="list-style-type: none"> • Dimensionamento banchine; • # banchine; • # accessi rampa; • Connessione alla rete Autostradale; • Numero di autisti | <ul style="list-style-type: none"> • Dimensionamento piazzale; • Numero di trattori da rimorchio e mafi; • Dimensionamento corsie di traffico | <ul style="list-style-type: none"> • Connessione alla rete Autostradale; • # di cancelli doganali; • # di cancelli di ingresso al terminal |
| Decisioni Tattiche | <ul style="list-style-type: none"> • Scheduling di banchina (<i>berth allocation</i>); | <ul style="list-style-type: none"> • Scheduling delle zone di piazzale (<i>storage planning</i>) | <ul style="list-style-type: none"> • Scheduling del cancello di arrivo dei mezzi per l'import e l'export |
| Decisioni Operative | <ul style="list-style-type: none"> • <i>Driver scheduling</i> | <ul style="list-style-type: none"> • <i>Tractor trailer scheduling</i>; • <i>import/export flow scheduling</i>; • <i>parking allocation</i> | <ul style="list-style-type: none"> • <i>import/export flow scheduling</i> |

Fonte – Elaborazione propria

Abourraja et al. (2023) utilizza una metodologia diversa per sviluppare il suo DSS. Egli parte con l'obiettivo di costruire un DSS che facesse da base generale per la costruzione di strumenti di decisioni più specifici. Il concetto fondamentale dietro alla ricerca degli autori, è la distinzione tra *flussi, decisioni, indicatori, operazioni e risorse*. Le operazioni che prendono atto all'interno del terminal Ro-ro, sono guidate da decisioni (strategiche, tattiche ed operative), prese dal susseguirsi dei flussi e monitorate degli indicatori (*KPI's*), mentre sono compiute dalle risorse (mezzi e capitale umano) a disposizione. Lo studio

prosegue identificando gli scenari di flusso (*Flow Scenario*) intesi come i dati che alimentano il sistema; lo scenario decisionale (*Planning Scenario*) raggruppa invece i processi decisionali, contenenti soluzioni ammissibili per la gestione dei flussi; infine, lo scenario operativo (*Operating Scenario*) contiene le operazioni con cui sono gestiti i flussi e gli indicatori (*KPI's*) per monitorare gli stessi. Le risorse sono rappresentate dall'insieme di dati di input (variabili e costanti) su cui posa l'architettura del *DSS*.

Flow Scenario: Sia $F = (f_1, f_2, \dots, f_a | a \in \mathbb{N})$ l'insieme di tutti i flussi generati all'interno di uno scenario. Si immagina che f_i sia il flusso in import o export di una partita di semi-trailer, aventi una determinata lunghezza (a giustificare la presenza di classi diverse a seconda del dimensionamento della merce); immaginiamo ora di ripetere queste affermazioni per altri tipi di merce. Il traghetto potrebbe essere di tipo feeder (dedicato quindi alle SSS) oppure impegnato nel trasporto deep sea, quindi anche lui appartiene a classi specifiche. Ciascuno di questi elementi avrà poi una sua origine e destinazione che cambiano a seconda della partita di carico osservata. Quindi, il flusso f_i è l'insieme di complessivo di questi elementi:

$$\forall i \ 1 < i < a, f_i \tag{26}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathcal{L}_{ferry} \{ferry_{f_e}^{(class,arrival,departure,loads)} | f_e \in N, 1 \leq f_e \leq E\} \\ \mathcal{L}_{camion} \{camion_t^{(class,arrival,departure,loads)} | f_e \in N, 1 \leq t \leq T\} \\ \mathcal{L}_{semitrailer} \{semitrailer_{st}^{(class,arrival,departure,loads)} | f_e \in N, 1 \leq st \leq W\} \\ \mathcal{L}_{car} \{veicoli_v^{(class,arrival,departure,loads)} | f_e \in N, 1 \leq v \leq V\} \end{array} \right.$$

Dove E, T, W, V sono il numero totale di ferry, camion, semitrailer e veicoli rispettivamente considerati; \mathcal{L} è la lista degli elementi di una determinata categoria. Complessivamente vanno a comporre il flusso totale f_i .

Planning scenario: Si è detto che il planning scenario è composto dalle decisioni prese, e quindi dai problemi risolti, per gestire i flussi. Sia $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n | n \in \mathbb{N}\}$ l'insieme dei problemi da risolvere (o decisioni da prendere), e sia che $\forall q, 1 \leq q \leq n, p_q = \{d_{q1}, d_{q2}, \dots, d_{qg} | g \in \mathbb{N}\}$, dove p_q contiene i tutti i set d_{qg} di soluzione del problema q . Infine, sia H_{f_i} il set di tutti i *planning scenario* per il *flow scenario* f_i . Per quante siano numerose le combinazioni di soluzioni possibili per singolo scenario di flusso, è possibile decidere di considerarne una parte, pertanto, si definisce $b_i \in \mathbb{N}, 1 \leq$

$b_i \leq H$, dove b_i rappresenta il numero del *planning scenario*, e H il numero totale di combinazioni risolutive possibili. Detto ciò, il *planning scenario* è così definito:

$$\forall f_i \in F, H_{f_i} = \{h_{f_{i1}}, h_{f_{i2}}, \dots, h_{f_{ib_i}} \mid b_i \in \mathbb{N}, 1 \leq b_i \leq H\} \quad (27)$$

così che,

$$\forall j \quad 1 \leq j \leq b_i, \quad h_{f_{ij}} = (d_{p_1}, d_{p_2}, \dots, d_{p_n} \mid d_{p_q} \in p_q)$$

Un esempio chiarirà quanto mostrato nella formulazione matematica. Immaginiamo un terminal che debba schedulare il cancello di arrivo di due navi Ro-ro, ciascuna di esse con un carico di rispettivamente 20 semi-trailer e 50 camion da scaricare. Nel terminal sono disposte due aree di piazzale per la merce in import rispettivamente per le due tipologie di mezzi, mentre in altre due aree avremo 30 semi-trailer e 70 camion pronti all'export, da dividere tra le due navi. Dal testo identifichiamo le liste degli elementi: arrivo delle navi \mathcal{L}_{ferry} , ($E = 2$); i semi-trailer in import e export $\mathcal{L}_{semitrailer}$ ($W = 50$), i camion in import ed export \mathcal{L}_{camion} ($T = 120$). L'insieme di questi elementi crea un possibile *flow scenario* rappresentato da $f_i \in F$. Al suo interno si generano una serie di problemi/decisioni da risolvere; un problema potrebbe essere il *driver scheduling* (quali e quanti driver sono necessari per sbarcare ed imbarcare tutta i camion), *berth allocation* (a quale banchina e in quale cancello di arrivo ormeggiare ciascuna nave) oppure lo *space allocation* (dove parcheggiare i camion, in quale area ed in quale fila della suddetta, così da non creare intralci), e via dicendo. Questi problemi $p_n \in P$, hanno ciascuno per conto suo, un insieme di soluzioni d_{p_q} che risolvono il problema p_q dove $\forall q, 1 \leq q \leq n$.

Il *planning scenario* H_{f_i} sarà per il nostro *flow scenario* $f_i \in F$, l'insieme di tutte le combinazioni possibili di decisione $h_{f_{ib_i}} \mid b_i \in \mathbb{N}, 1 \leq b_i \leq H$ ai problemi presenti nello scenario di flusso f_i , dove la singola combinazione $h_{f_{ij}}$ è composta dalle singole decisioni d_{p_q} prese per la risoluzione di ogni singolo problema p_q all'interno del flusso.

Operating Scenario: Per via della natura casuale e aleatoria di molte delle variabili utilizzate per spiegare i modelli di ottimizzazione di un terminal e la sua simulazione, si può affermare che ciascun *planning scenario*, iterato molteplici volte come è usuale fare in un metodo simulativo, avrà molteplici *operating scenario*, dal momento che ad ogni iterazione le variabili utilizzate assumeranno un valore diverso dal precedente. Un'idea sulla natura stocastica del sistema terminal era già stata data dai ricercatori Özkan et al.

(2016)⁴⁵, che avevano ipotizzato l'arrivo dei camion ai terminal con *pdf* esponenziale, mentre le operazioni portuali quali attracco/ disormeggio, carico/scarico, tempo di inter arrivo dei driver, avessero *pdf* normale. Se invece usassimo un approccio deterministico, e quindi eliminassimo la componente casuale alle variabili, l'*operating scenario* sarebbe sempre lo stesso, a prescindere dal numero di iterazioni svolte. Per quel che riguarda i *KPI's*, siccome anche loro sono compresi nell'*operating scenario*, i ricercatori hanno adottato una differenziazione per classe e per operazione portuale. Relativamente a quest'ultima, gli autori separano la fase di *berthing* da quella di *stevedoring*, che invece nella mia trattazione era stata considerata unita alla prima. Per quel che riguarda le classi dei *KPI's*, è utilizzata la teoria di Esmer (2008)⁴⁶, che studia i *Key Performance Indicator's* di un terminal contenitori, differenziandoli tra le categorie *Ship, Cargo, Berth* e *Labour*. Ad ogni modo Abourraja et al. (2023), aggiunge un ulteriore classe definita *Penalty*, che simboleggia le negatività (come il ritardo) provocate da una decisione non ottimale oppure da fenomeni non prevedibili che peggiorano il risultato del nostro modello. Pertanto, sia \mathbb{K} l'insieme di tutti i *KPI's*, sia Z l'insieme dei centri operativi del terminal, e sia C l'insieme delle classi dei *KPI's*, di conseguenza un gruppo specifico di *KPI's* sarà definito come:

$$\forall e \quad 1 \leq e \leq (|Z| \times |C|) \wedge c \in C \wedge z \in Z, \quad (28)$$

$$\bar{K}_e^{(z,c)} = \{k_{w_e} | w_e \in \mathbb{N}\}$$

dove:

$$\mathbb{K} = \cup \bar{K}_e^{(z,c)}, \quad \forall e, e' \quad 1 \leq e, e' \leq (|Z| \times |C|), \quad (30)$$

$$se \quad e \neq e' \Rightarrow \bar{K}_e^{(z,c)} \neq \bar{K}_{e'}^{(z,c)}$$

Il tutto è riassunto nella tabella fornita dai ricercatori, relativamente ad i *KPI's* utilizzati (Tabella 11).

⁴⁵ Özkan, Nas, e Güler, «Capacity Analysis of Ro-Ro Terminals by Using Simulation Modeling Method»,2016.

⁴⁶ Esmer, «Performance Measurements of Container Terminal Operations», 2008.

Tabella 11 – Matrice $|Z| \times |C|$ dei KPI's. Nelle colonne i centri operativi del terminal, nelle righe le classi di KPI's scelte per il modello.

| | Ship-to-shore | Transport | Storage | Delivery-receipt |
|--------------|--|---|--|--|
| Utilization | Berth utilization Berth workload balance | IT utilization IT unproductive activity IT workload balance Road network condition index | Filling ratio Parking lots loads balance Waiting lane utilization Waiting lane workload balance | Gate utilization Queue lane utilization Queue lane workload balance |
| Service/Time | Store-to-shore distance Ferry turnaround time Waiting time of ITs at berth | IT service times IT distance traveled | Pack time Unpark time Shore-to-store distance Waiting time of ITs for trailer | Truck/lorry turnaround time Scanning processing time Truck-to-store distance |
| Environment | Energy consumption CO2 Emission | Energy consumption CO2 Emission | Energy consumption CO2 Emission | Energy consumption CO2 Emission |
| Economic | Profit (gain) Handling cost | Profit (gain) Transportation cost | Profit (gain) Parking cost | Profit (gain) Handling cost |
| Penalty | Ferry handling delays | Congestion index | Reshuffling time | Truck/lorry waiting time at gate Truck handling delays |

Fonte - Abourraja et al. «A simulation-based decision support framework devoted to Ro-Ro terminals: Design, implementation and evaluation», 2023

Consideriamo i KPI's appartenenti al primo centro operativo (*ship-to-shore*, $|Z| = 1$) e alla prima classe (*Utilization*, $|C| = 1$). All'interno di questa cella, sono indicati due diversi KPI's (*berth utilization* e *berth workload balance*). Secondo la formulazione matematica sopraindicata: il numero totale di gruppi di KPI's ammonta a 20 unità ($|Z| \times |C| = 4 \times 5$). Il sottogruppo indicato avrà coordinate $\bar{K}_1^{(1,1)}$. I due KPI's appartenenti al gruppo saranno indicati rispettivamente con k_{1_1} e k_{2_1} , il primo ad indicare la *berth utilization* ed il secondo il *berth workload balance*. Infine, il set contenente tutti i KPI's sarà dato dall'unione di tutti e 20 i sottogruppi $\rightarrow \mathbb{K} = \bigcup \bar{K}_e^{(z,c)}$. Come sottolineato ad inizio paragrafo, è molto più ragionevole pensare che gli *stakeholder* presenti all'interno delle attività di un terminal Ro-ro, considerino alcuni problemi e loro rispettive decisioni e KPI's con maggior riguardo rispetto ad altri. Pertanto, i ricercatori hanno associato ad ogni gruppo di indicatori di performance, un coefficiente o peso. Di conseguenza, basandoci sulla classificazione proposta alla *tabella 11*:

- ogni centro operativo $z \in Z$ avrà un coefficiente $\alpha_z \setminus \sum_{z \in Z} \alpha_z = 1 \wedge \alpha_z \in [0 - 1]$;
- ogni classe di KPI's $c \in C$ avrà coefficiente $\beta_c \setminus \sum_{c \in C} \beta_c = 1 \wedge \beta_c \in [0 - 1]$;
- per esprimere preferenza tra i singoli KPI's all'interno del gruppo, si userà il coefficiente $\gamma_k \setminus \sum_{k \in \bar{K}_e^{(z,c)}} \gamma_k = 1 \wedge \gamma_k \in [0 - 1]$.

Il lavoro di Abourraja et al. (2023) ha introdotto una struttura di supporto alle decisioni basata su tre arterie principali che può essere applicata a molti terminali Ro-Ro. Questo

framework include un metodo scalabile per prendere decisioni ponderate in base a un insieme di coefficienti. L'applicazione del *framework* è stata testata sul caso reale del porto traghetti di Norvik (Svezia) mentre per stimare i valori dei coefficienti $\alpha_z, \beta_c, \gamma_k$ si è estratto una serie di profili dalla letteratura esistente. È stato poi condotto un esperimento di simulazione per valutare il caso di studio in base a diversi flussi e regole. I risultati mostrano la capacità del meccanismo di supporto alle decisioni proposto di evidenziare in modo efficiente gli scenari peggiori e migliori, nonché le relazioni e le compatibilità tra le regole coinvolte. Ciò che rende questo approccio molto competitivo è anche la sua capacità di catturare diversi punti di vista e di aggregarli in una misura significativa. Inoltre, la progettazione di questo approccio e del *framework*, in generale, non è legata a un caso di studio specifico, ma è adattabile ad altri terminali Ro-Ro puri.

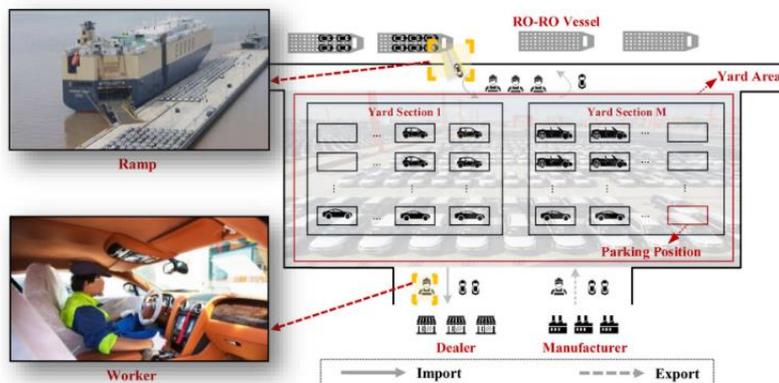
3.2 – Modelli di Ottimizzazione: Yard and Manpower Allocation (YMA)

Questo paragrafo ed il successivo saranno interamente dedicati all'analisi di due problemi di ottimizzazione. Il primo che analizzerò è stato proposto dai ricercatori *Zhang et al. (2023)*⁴⁷, che analizzano i due maggiori problemi decisionali di un sistema terminal RO-RO di tipologia car- cargo: l'assegnazione dei posti di piazzale (*yard allocation problem – YAP*) e l'assegnazione di forza lavoro (*Manpower assignment problem – MAP*) che organizza i driver e trasportatori per completare le operazioni di trasferimento veicoli. Il loro modello ha come oggetto un tipico terminal car-carrier, soggetto unicamente a merce rotabile di tipo car-cargo. Il loro è definito come **macro-modello**, dal momento che non considera le singole posizioni da allocare all'interno dell'area di piazzale, ma risolve il problema allocando l'area di piazzale stessa. Il lavoro dei ricercatori nasce dall'osservazione dei processi di scheduling e decisionali dei maggiori porti RO-Ro al mondo quali Shanghai, dove il processo è, nonostante la dimensione del terminal e il numero di attracchi annui, compiuto ancora manualmente, con ingenti perdite di tempo e

⁴⁷ Di Zhang, Feng Chen, Ziqiao Mei - «Optimization of Joint Scheduling of yard allocation and transfer manpower assignment for automobile Ro-Ro terminal», 2023.

produttività. Il terminal Ro-ro ed i processi in atto identificati dai ricercatori sono come mostrati in *Figura 11* ed elencati di seguito.

Figura 11 – Layout di un Terminal RO-Ro



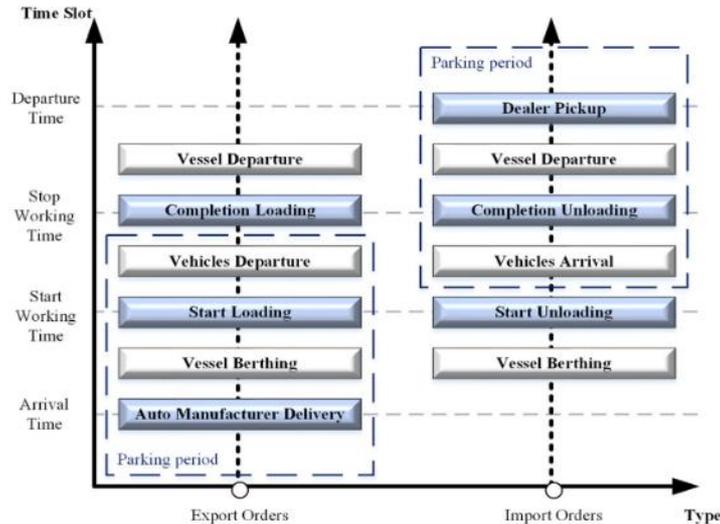
Fonte - Di Zhang, Feng Chen, Ziqiao Mei - «Optimization of Joint Scheduling of yard allocation and transfer manpower assignment for automobile Ro-Ro terminal», 2023

Un Terminal Ro-Ro serve un numero di veicoli, appartenenti ad ordini (partite di carico) diversi. Gli ordini di esportazione vengono consegnati dalla casa manifatturiera (o dai loro agenti), e trasferiti successivamente nell'area di piazzale in fasce orarie di arrivo prestabilite, dopo che tutti i loro veicoli sono arrivati al terminal. Dopodiché, durante i periodi di movimentazione (nelle fasce orarie di inizio e fine lavoro), i veicoli sono guidati da autisti (*drivers*) a partire dalle sezioni del piazzale assegnate fino alle sezioni di banchina, dove attraccano le relative navi RO-RO di esportazione. Gli ordini di importazione, invece, sono consegnati da navi ormeggiate al terminal in banchina, per poi essere condotti alla zona di yard assegnatagli da parcheggiatori dedicati, entro i periodi di lavorazione della nave. Vi sono poi fasce orarie di partenza prestabilite in cui i concessionari prelevano i veicoli corrispondenti, concludendo il ciclo in import.

Per l'operatore del terminal, è necessario effettuare due piani: (1) un piano di assegnazione delle sezioni di piazzale (*YAP*); (2) un piano di assegnazione dei lavoratori (*WAP*). Il problema di allocazione del piazzale consiste nel determinare i piani di parcheggio dei vari ordini in modo da allocare tutti i veicoli in import, mentre il problema di assegnamento degli autisti consiste nell'identificare il piano di maneggio del carico in modo da trasferire tutti i veicoli (e gli autisti stessi) dalla banchina (o meglio dalla nave) alla zona di yard dedicata, e viceversa. I processi operativi e l'arco temporale in cui

avvengono sono descritti esaurientemente sia per il ciclo in import sia per quello in export nella *Figura 12*.

Figura 12 – Processi operativi di parcheggio, consegna nave e consegna terra per ciclo import ed export



Fonte - Di Zhang, Feng Chen, Ziqiao Mei - «Optimization of Joint Scheduling of yard allocation and transfer manpower assignment for automobile Ro-Ro terminal», 2023

Il modello di ottimizzazione proposto dai ricercatori pone come funzione obiettivo la minimizzazione della distanza totale di guida percorsa dai veicoli. Ricordiamo infatti dal Capitolo 2, *Figura 5* che la distanza totale percorsa dal veicolo è data dalla sommatoria delle distanze non euclidee, più la costante della distanza tra la sezione di yard e la rampa di accesso alla nave.

$$d_i = \sum_{j \in I} d_j^m + D \tag{30}$$

Dove $i \in I$ è l'ordine di consegna i -esimo appartenente all'insieme degli ordini, $j \in J$ è la sezione di yard considerata appartenente all'insieme delle sezioni.

La minimizzazione della distanza totale di guida dei veicoli è una scelta appropriata: in primo luogo, una distanza minore equivale a un minor numero di operazioni, il che significa che i terminal planner hanno una maggiore flessibilità nell'assegnazione delle risorse umane. Questo tipo di flessibilità può essere utilizzata per far fronte a vari imprevisti che sono la principale fonte di riduzione dell'efficienza; inoltre, una distanza più breve può contribuire a ridurre il rischio di collisioni tra veicoli oltre che una maggiore soddisfazione da parte dei clienti, poiché i contachilometri delle nuove auto registreranno poche variazioni, almeno per quel che riguarda il tempo trascorso nel terminal. Di seguito,

si propone il modello elaborato dai ricercatori, con la spiegazione dettagliata dei vari vincoli.

Insiemi:

I^E : insieme degli ordini in Export

I^I : insieme degli ordini in Import

I : insieme totale degli ordini tale che $I = I^I \cup I^E = \{1, 2, \dots, I\}$

J : insieme delle sezioni di piazzale (o yard)

T : insieme degli intervalli di tempo

Parametri:

t_i^a : tempo di arrivo dell'ordine $i \in I^E$

t_i^d : tempo di partenza dell'ordine $i \in I^I$

t_i^L : inizio turno di lavoro dell'ordine $i \in I$

t_i^R : termine turno di lavoro dell'ordine $i \in I$

n_i : numero di veicoli presenti nell'ordine $i \in I$

b_i : sezione di banchina assegnata all'ordine $i \in I$

$\alpha_{i,j}$: la distanza tra la sezione di banchina b_i dell'ordine $i \in I$ e la sezione di yard $j \in J$

$\beta_{i,j}$: il numero medio di veicoli trasferibili da un autista per la distanza tra la sezione di banchina b_i dell'ordine $i \in I$ e la sezione di yard $j \in J$

$Y_{j,t}$: numero di parcheggi disponibili nella sezione di yard $j \in J$ nell'intervallo di tempo $t \in T$

W_t : numero di autisti disponibili nell'intervallo di tempo $t \in T$

M : valore della BigM, ovvero una costante positiva molto grande

Variabili decisionali:

$x_{i,j,t}$: numero di autisti impegnati nell'ordine $i \in I$, nella sezione di yard $j \in J$, nell'intervallo di tempo $t \in T$

$z_{i,j,t}$: numero di parcheggi della sezione di yard $j \in J$, allocati all'ordine $i \in I$ nell'intervallo di tempo $t \in T$

d_i : distanza di guida necessaria dell'ordine $i \in I$

Basandosi sulle definizioni specificate sopra, è stato prodotto il seguente modello di ottimizzazione intera mista (*MIP – Mixed Integer Programming Problem*):

$$(\mathbf{MIP}) \min \sum_{i \in I} d_i \quad (31)$$

Vincoli:

$$\sum_{i \in I} z_{i,j,t} \leq Y_{i,j} \quad \forall j \in J, t \in T, \quad (32)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{i,j,t} \leq W_t \quad \forall t \in T, \quad (33)$$

$$\sum_{j \in J} z_{i,j,t} \cdot \alpha_{i,j} = d_i \quad \forall i \in I^l, t = t_i^d, \quad (34)$$

$$\sum_{j \in J} z_{i,j,t} \cdot \alpha_{i,j} = d_i \quad \forall i \in I^E, t = t_i^a, \quad (35)$$

$$x_{i,j,t} = 0, \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in [0, t_i^l] \cup [t_i^R, T], \quad (36)$$

$$z_{i,j,t} = 0, \quad \forall i \in I^l, \forall j \in J, \forall t \in [0, t_i^l] \cup [t_i^d + 1, T], \quad (37)$$

$$z_{i,j,t} = 0, \quad \forall i \in I^E, \forall j \in J, \forall t \in [0, t_i^a - 1] \cup [t_i^R, T], \quad (38)$$

$$\sum_{j \in J} z_{i,j,t} = n_i, \quad \forall i \in I^l, t = t_i^d, \quad (39)$$

$$\sum_{j \in J} z_{i,j,t} = n_i, \quad \forall i \in I^E, t = t_i^a, \quad (40)$$

$$z_{i,j,t} + x_{i,j,t+1} \cdot \beta_{i,j} \geq z_{i,j,t+1}, \quad \forall i \in I^l, \forall j \in J, \forall t \in [t_i^l, t_i^d - 1], \quad (41)$$

$$z_{i,j,t+1} - z_{i,j,t} \geq (x_{i,j,t+1} - 1) \cdot \beta_{i,j}, \quad \forall i \in I^l, \forall j \in J, \forall t \in [t_i^l, t_i^d - 1], \quad (42)$$

$$z_{i,j,t} - x_{i,j,t+1} \cdot \beta_{i,j} \leq z_{i,j,t+1}, \quad \forall i \in I^E, \forall j \in J, \forall t \in [t_i^a, t_i^R - 1], \quad (43)$$

$$z_{i,j,t} - z_{i,j,t+1} \geq (x_{i,j,t} - 1) \cdot \beta_{i,j}, \quad \forall i \in I^E, \forall j \in J, \forall t \in [t_i^a, t_i^R - 1], \quad (44)$$

$$z_{i,j,t+1} - z_{i,j,t} \geq x_{i,j,t+1}, \quad \forall i \in I^l, \forall j \in J, \forall t \in [t_i^l, t_i^d - 1], \quad (45)$$

$$z_{i,j,t} - z_{i,j,t+1} \geq x_{i,j,t}, \quad \forall i \in I^E, \forall j \in J, \forall t \in [t_i^a, t_i^R - 1], \quad (46)$$

$$x_{i,j,t} \in \mathbb{N}, \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T, \quad (47)$$

$$z_{i,j,t} \in \mathbb{N}, \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T, \quad (48)$$

$$d_i \geq 0, \quad \forall i \in I. \quad (49)$$

Avendo già spiegato le ragioni dietro alla scelta della funzione obiettivo (31), e avendo ben note le variabili decisionali ed il loro dominio come espresso ai vincoli (47), (48), (49), si propone una spiegazione dei rimanenti vincoli.

Vincoli dal (32) al (35): I vincoli (32), (33) sono vincoli di capacità. Il primo sta ad indicare che il numero di posti utilizzati nella sezione di piazzale non ecceda quelli utilizzabili nella suddetta sezione di yard e nell'intervallo di tempo selezionato. Il vincolo (33) a sua volta afferma che il numero di autisti impegnati tra tutte le sezioni di yard e tra tutti gli ordini, non possa superare il numero di disponibilità di autisti complessiva per intervallo di tempo considerato. I vincoli (34) e (35) legano le variabili "distanza" e "spazio disponibile". I vincoli, rispettivamente per il trasferimento in import ed export, determinano che la distanza di guida percorsa per ogni ordine al tempo considerato pari alla partenza dell'ordine stesso, sia uguale alla somma di tutte le distanze tra la sezione di yard j-esima e la sezione di banchina b-esima.

Vincoli dal (36) al (38): Questi sono vincoli di tempo. Il vincolo (36) mi indica che nell'intervallo di tempo precedente all'inizio del turno di lavoro e successivo al termine del turno di lavoro, in ogni ordine ed in ogni sezione di piazzale il numero di autisti impegnati sarà pari a zero. Lo stesso vale per i posti allocati nel piazzale per l'ordine in import; durante l'intervallo di tempo precedente all'inizio del turno di lavoro e nell'intervallo successivo alla partenza dell'ultimo veicolo, il numero di posti allocati sarà nullo. Per il ciclo export (38), il numero di posti allocati a piazzale per i mezzi sarà zero durante l'intervallo di tempo precedente all'arrivo dei veicoli in export, e successivamente al termine del turno di lavoro degli autisti.

Vincoli (39) e (40): Questi vincoli impongono che tutti i veicoli siano lavorati; prevedono infatti che il numero di posti allocati nelle sezioni di yard, sia in export che in import, sia pari al numero di veicoli previsti per ciascuno degli ordini.

Vincoli (41) e (46): i vincoli (45) ed il (46) assicurano che gli autisti vengano assegnati ad un ordine in import o export, solo quando vi è necessità di movimentazione, che è simboleggiata dalla differenza ($|z_{i,j,t+1} - z_{i,j,t}| > 0$). I vincoli (41) e (42) prendono in considerazione gli ordini del ciclo import, e impongono che durante il periodo di movimentazione dei veicoli, la quantità di posti allocati ed il numero medio di veicoli trasferibili dalla forza lavoro nel turno successivo, sia pari o maggiore al numero di posti allocati nel turno successivo. I vincoli (43) e (44) prendono in considerazione l'intervallo

di tempo compreso tra l'arrivo dell'ordine in export e la fine del turno di lavoro. Durante questo lasso di tempo la differenza tra i posti allocati al tempo t , e i veicoli trasferibili al tempo $t + 1$, deve essere minore della quantità di posti allocati al tempo $t + 1$.

Il modello proposto dai ricercatori è completo, dal momento che incorpora al suo interno entrambi i problemi di (WAP) e (YAP), evitando di risolvere problemi singoli che fornirebbero una soluzione sub-ottimale. Ad ogni modo la difficoltà computazionale elevata ha portato gli autori ad implementare nel modello algoritmi risolutivi di tipo euristico con metodo branch and bound, per risolvere il problema. Un altro passo fatto dai ricercatori è stato quello di proporre anche una versione semplificata del modello che tiene conto di un unico ordine $i \in I = \{1\}$. Questo problema prende il nome di *Single Order Planning algorithm (SOP)*.

Insiemi:

P : insieme delle pianificazioni possibili dell'ordine $i \in I$

Parametri:

$\delta_{i,p} \in \{0, 1\}$: 1 se la pianificazione p è sviluppata (scelta) per l'ordine $i \in I$; 0 in caso contrario, $\forall i \in I, \forall p \in P$;

$\gamma_{j,t,p}$: numero di posti di parcheggio della sezione di yard j allocati per la pianificazione p nell'intervallo di tempo t , $\forall j \in J, \forall p \in P, \forall t \in T$;

$\omega_{j,t,p}$: numero di autisti impegnati nella sezione di yard j e allocati per la pianificazione p nell'intervallo di tempo t , $\forall j \in J, \forall p \in P, \forall t \in T$;

c_p : totale della distanza di guida necessaria per la pianificazione $p, \forall p \in P$.

Variabili decisionali:

$h_p \in \{0, 1\}$: 1 se la pianificazione p è selezionata come parte della combinazione finale di pianificazione; 0 in caso contrario

Il (MIP) è riformulato come un modello di programmazione intera (IP) che seleziona la migliore combinazione di pianificazioni tra tutte le pianificazioni fattibili. Ogni pianificazione fattibile è composta da una matrice di relazioni d'ordine ($\delta_{i,p}$), uno schema di parcheggio ($\gamma_{j,t,p}$), uno schema di movimentazione ($\omega_{j,t,p}$) e una distanza di viaggio (c_p).

$$(\mathbf{IP}) \min \sum_{p \in P} c_p \cdot h_p, \quad (50)$$

Vincoli:

$$\sum_{p \in P} \delta_{i,p} \cdot h_p = 1, \forall i \in I, \quad (51)$$

$$\sum_{p \in P} \gamma_{j,t,p} \cdot h_p \leq Y_{j,t}, \forall j \in J, \forall t \in T, \quad (52)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \omega_{j,t,p} \cdot h_p \leq W_t, \forall t \in T, \quad (53)$$

$$h_p \in \{0, 1\}, \forall p \in P, \quad (54)$$

La funzione obiettivo (50) minimizza la distanza totale di guida. Il vincolo (51) garantisce la programmazione di tutti gli ordini. I vincoli (52) e (53) sono limitazioni delle risorse. Il vincolo (54) definisce il dominio della variabile decisionale.

Lo studio proposto dai ricercatori ha dimostrato grande capacità di ridurre la distanza di guida ed efficientare il processo per un totale del 33.72%⁴⁸.

3.3 – Modelli di Ottimizzazione: Storage Location Assignment Problem (SLAP)

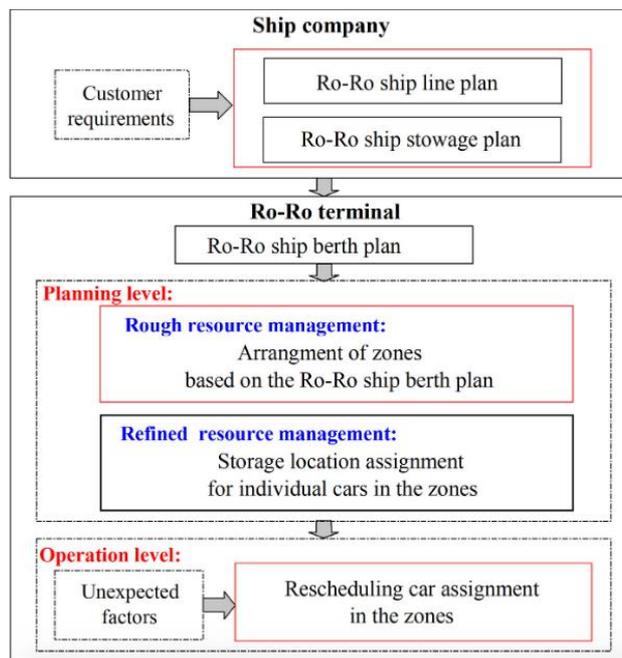
Il modello proposto di seguito è frutto della ricerca di *Chen et al. (2020)*⁴⁹ sui sistemi di efficientamento di parcheggio di un terminal Ro-Ro di tipo automotive. Dovendo individuare lo *stakeholder* a cui fa riferimento questa relazione, indicheremo sicuramente la *ship-side* e quindi le compagnie di navigazione, dal momento che il modello ottimizza il sistema di locazione delle auto nel piazzale con lo scopo di massimizzare il through-output del terminal. Questo modello completa ed amplia quanto detto nel modello di *Zhang et al. (2023)*. Per quest'ultimi, il piazzale era considerato in versione "macro", ovvero si consideravano le singole sezioni di un intero piazzale, ma erano ignorati i posti di sosta componenti la singola sezione. Quest'ultimo aspetto è ciò che differenzia l'algoritmo di *Chen et al. (2020)*. Lo *Storage Location Assignment Problem (SLAP)* individuato dai ricercatori, non solo considera i singoli posti presenti nella sezione di yard, ma costruisce dei layout basati sulla "classe" del veicolo e sul loro ordine di arrivo

⁴⁸ Di Zhang, Feng Cheng, Ziqiao Mei «Optimization of Joint Scheduling of yard allocation and transfer manpower assignment for automobile Ro-Ro terminal», 2023.

⁴⁹ X. Chen, F. Li, B. Jia, J. Wu, Z. Gao, R. Liu «Optimizing storage location assignment in an automotive Ro-Ro terminal», 2020.

e partenza dalla nave, allocando i posti auto in modo tale da eliminare *deadlock situations* (intralci) e permettendo vie di entrata ed uscita dal posto assegnato lungo le colonne della sezione di yard (essendo i movimenti trasversali, proibiti col fine di evitare danni imprevisti). Il susseguirsi di decisioni ed operazioni su cui si basa il modello *SLAP* è mostrato in *Figura 13* e spiegato di seguito.

Figura 13 – Problema di Ottimizzazione SLAP in relazione con i processi decisionali di un sistema terminal automotive Ro-ro.

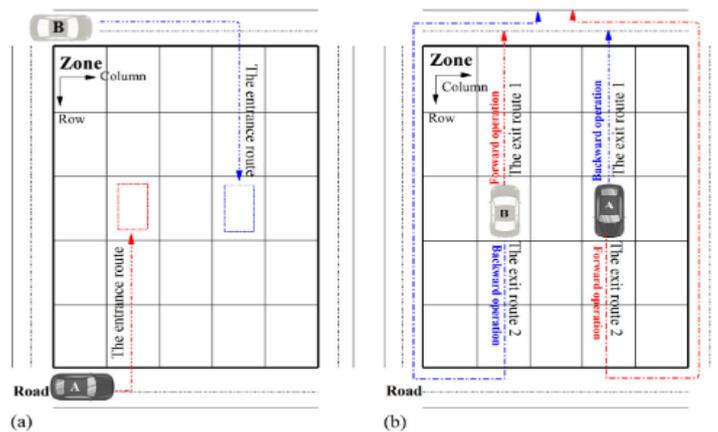


Fonte - X. Chen, F. Li, B. Jia, J. Wu, Z. Gao, R. Liu «*Optimizing storage location assignment in an automotive Ro-Ro terminal*», 2020

In base alle richieste dei clienti, le compagnie di navigazione programmano le navi Ro-Ro e creano i loro piani di stivaggio. I *Terminal Planner* pianificano le banchine ed i cancelli di arrivo per le navi Ro-Ro. Inoltre, sulla base dei dati relativi alle autovetture commerciali in fase di trasbordo, vengono selezionate una zona o zone adiacenti per lo stoccaggio delle autovetture. La selezione delle zone assegnate è strettamente legata al piano di attracco delle navi Ro-Ro. La gestione dei luoghi di sosta si concentra sull'assegnazione di singole autovetture nelle zone selezionate, con l'obiettivo di promuovere una gestione efficiente delle risorse del piazzale e di garantire l'ordinato svolgimento delle operazioni di ingresso delle auto nella zona di piazzale e nel posto di sosta, nonché delle operazioni di carico dei veicoli sulla nave Ro-Ro. Come è possibile

osservare nella *Figura 13*, la gestione delle risorse del piazzale (e lo *SLAP*) riguarda ancora il livello di pianificazione. Nella fase operativa, i veicoli commerciali arrivano in successione allo scalo ed entrano nelle posizioni loro assegnate. È possibile che l'arrivo anticipato o ritardato dei veicoli sia dovuto a fattori casuali. Pertanto, il piano di assegnazione delle risorse nella fase di pianificazione deve essere riprogrammato localmente per gestire gli eventi inattesi. L'assunto generale su cui si basa il modello *SLAP* è che gli autoveicoli che sono soggetti ad essere caricati sulla stessa nave, dovrebbe essere assegnati alla stessa zona di piazzale o a zone adiacenti il più possibile. La cosa si estende ovviamente ai singoli posti di sosta all'interno della zona di piazzale stessa. Lo *SLAP* enfatizza un car-layout che sia coerente con il piano di carico della nave ed eviti *deadlock situations*. Definiamo quest'ultima come una situazione in cui una auto-vettura, una volta raggiunto il suo luogo di sosta, che identificheremo con coordinate date da righe e colonne, non possa più muoversi da quella determinata posizione, o non possa più raggiungerla (per assunto si suppone che le autovetture vengano parcheggiate seguendo l'orientamento delle colonne della sezione di yard). Come si è anticipato poc'anzi, i movimenti all'interno della zona di yard sono contemplati per colonna, che siano essi in avanti o a marcia indietro rispetto alla posizione di sosta originale.

Figura 14 - Struttura yard – nessuna presenza di deadlock situation

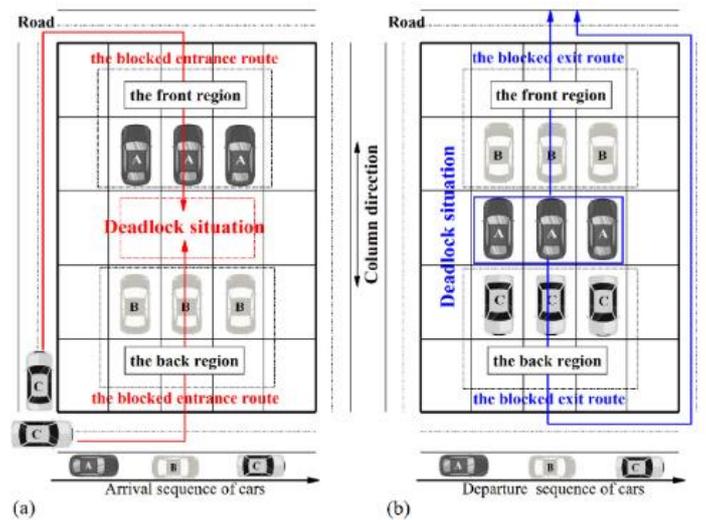


Fonte - X. Chen, F. Li, B. Jia, J. Wu, Z. Gao, R. Liu «Optimizing storage location assignment in an automotive Ro-Ro terminal», 2020

Come è possibile capire dal caso a) e b) della *figura 14*, data una sezione di yard $j \in J$ ed un posto di sosta al suo interno identificato dalla colonna - c e dalla riga - r , l'auto A e l'auto B non hanno alcun impedimento nel raggiungere, o abbandonare il suddetto posto, che sia a marcia avanti o indietro.

Se si osserva la *figura 15* invece, si possono constatare due diversi tipi di *deadlock situation*; date tre tipologie di macchine, nel caso a) le autovetture di tipo C non possono raggiungere la loro posizione di sosta, a causa del precedente posizionamento delle autovetture di tipo A e B nelle righe immediatamente superiori ed inferiori alla posizione schedulata per C. Nel caso b), le vetture di tipo B e C possono liberamente lasciare la propria posizione di sosta rispettivamente a marcia avanti ed indietro, mentre le autovetture di tipo A, sono bloccate in ogni movimento dalla presenza delle vetture sopra menzionate. La vettura di tipo A potrà muoversi solo quando una delle altre due avrà lasciato il suo posto di parcheggio.

Figura 15 - Struttura yard – presenza di 2 deadlock situation



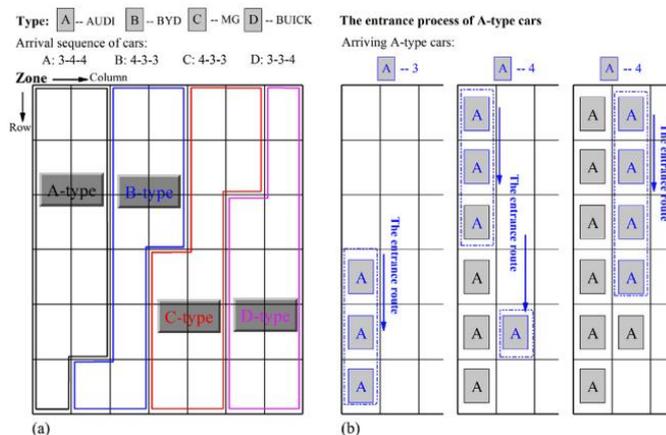
Fonte - X. Chen et al. «Optimizing storage location assignment in an automotive Ro-Ro terminal», 2020

Di seguito verranno presentate due regole di assegnamento, l'AR-CT e l'AR-CG. La prima, basata sul concetto di tipologia di auto, ha lo scopo di eliminare le *deadlock situations*, a discapito di un maggior numero di movimentazioni di piazzale. La seconda, poi utilizzata all'interno del modello *SLAP*, si fonda sul principio di gruppo-auto, legando vetture di tipologie diverse ad un unico gruppo unificato dalla medesima destinazione. Questa regola di assegnamento minimizza il grado di dispersione ed i movimenti delle autovetture, ma non garantisce l'assenza di *deadlock situations*, rendendo necessaria la formulazione di vincoli ad hoc nel modello per eliminare tale possibilità.

3.3.1 - Assignment Rule based on Car Type (AR-CT): Questa regola, utilizzata nella maggior parte dei terminal Ro-ro primo tra tutti il Shanghai Haitong Ro-ro Terminal,

prevede la differenziazione delle autovetture secondo la tipologia, come ad esempio il brand (Audi®, Mercedes® o Alfa Romeo®). Dopodiché, individuata la zona di yard in cui queste macchine dovranno sostare dipendentemente dalla banchina a cui la nave attraccherà, ad ogni classe di auto-vettura sarà assegnata una porzione di sezione di yard, con un numero definito di posti, assicurandosi che la seguente regola sia sempre rispettata: **massimo due tipologie di auto per colonna**. Avendo nota la sequenza di arrivo al terminal da parte delle auto-vetture, sarà compito del terminal planner, identificare la sequenza corretta ed il numero di posti auto per colonna da assegnare ad ogni tipologia in modo da rispettare la regola sopra indicata. Il pregio della AR-CT è quello di eliminare possibili *deadlock situation*.

Figura 16 – a) sequenza AR-CT, b) sequenza di ingresso auto per tipologia

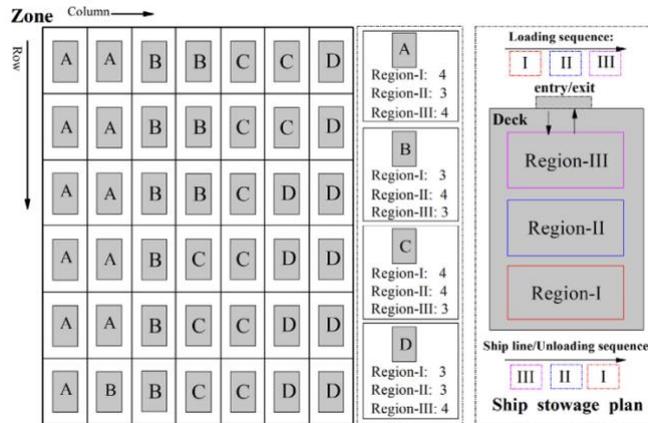


Fonte 1 - X. Chen et al. «Optimizing storage location assignment in an automotive Ro-Ro terminal», 2020

Come si può notare nella Figura 16, dati quattro diversi tipi di auto A-B-C-D, ed avendo nota la sequenza di arrivo di ogni categoria, è possibile ottenere lo scheduling completo dell'area di piazzale. Nella sezione a) si può notare come la regola delle colonne sia sempre rispettata, mentre nella sezione b) è mostrato come la sequenza di arrivo delle macchine tipo A sia gestita tra le diverse colonne, senza creare *deadlock situation*. Successivamente, una volta che tutte le vetture sono arrivate allo yard e sono posizionate nella loro zona di sosta, è il momento di schedulare l'ingresso in nave, tenendo conto che le partite di carico avranno destinazioni differenti con scali diversi. Possiamo ipotizzare uno yard contenente 42 veicoli, che devono essere imbarcati su di una nave Ro-Ro con piano di carico di tipo *FILO (First In Last Out)* programmata per tre destinazioni consecutive diverse. Nel caso delle macchine di tipo A (dodici in totale come mostrato dalla figura 16), si immagina che quattro di esse saranno sbarcate alla destinazione I, tre

di esse alla destinazione II, e altre tre alla destinazione III. Le destinazioni ed ordini di imbarco delle altre tipologie di auto sono schematizzati alla *Figura 17*.

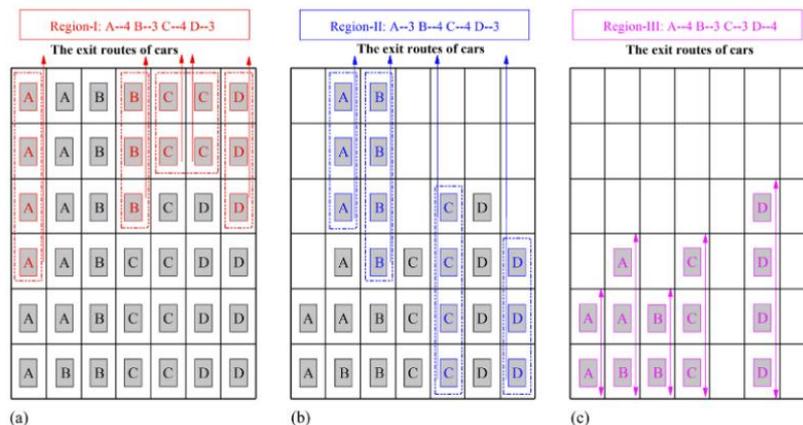
Figura 17 – Schema AR-CT - sequenza di imbarco e piano di carico della nave



Fonte - X. Chen et al. «Optimizing storage location assignment in an automotive Ro-Ro terminal», 2020

Focalizzandoci sugli ordini previsti alla destinazione I, abbiamo 4 macchine tipo A, 3 macchine tipo B, 3 macchine tipo C, 3 macchine tipo D. Per la destinazione II vi sono 3 macchine tipo A, 4 macchine tipo B, 4 macchine tipo C e 3 macchine tipo D. Capiamo quindi che l'ordine con cui le macchine sono state poste nella sezione di yard, non corrisponderà al modo in cui imbarcheranno sulla nave. Ed è qui che notiamo come il *layout* di tipo *AR-CT* non crei intralci. Per la destinazione I, preleveremo 4 macchine tipo A dalla 1° colonna, 3 macchine tipo B e tipo C dalla 3° colonna, e 3 macchine tipo D dalla 7° colonna, e così via fino a completare l'imbarco. Una possibile sequenza di caricazione è fornita dalla *Figura 18*.

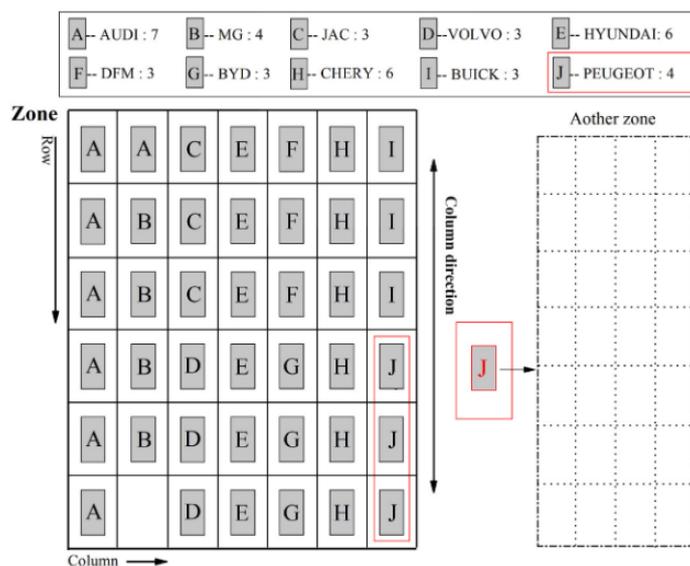
Figura 18 – Processo di imbarco autovetture con layout AR-CT



Fonte - X. Chen et al. «Optimizing storage location assignment in an automotive Ro-Ro terminal», 2020

Ad ogni modo, il *lay-out* AR-CT ha evidenti limiti quando il numero di tipologie di veicoli inizia ad essere elevato. Nella realtà, è molto comune che per singolo brand vi siano più tipologie di auto. Pensiamo alle auto Mercedes®: avremo il classe A, il classe B, classe E, berlina, SUV, macchina sportiva, ecc... Di conseguenza, data una sezione di piazzale limitata, è molto facile che la regola “massimo due tipologie per colonna” non possa essere rispettata senza evidenti inefficienze di piazzale, o utilizzando aree esterne ad esso. La *Figura 19*, fornisce un chiaro esempio di come, nel caso di un piazzale con 42 posti disponibili, a causa della regola richiamata sopra, non possa ospitare tutti e 42 i veicoli appartenenti alle 10 tipologie di auto presenti. Un autoveicolo della tipologia J dovrà essere riallocato, mentre il piazzale avrà utilizzato solo 41 dei posti disponibili. Inoltre, si pensi alla quantità di movimenti compiuti dagli autisti ed i tempi morti per cambiare continuamente colonna e ricercare la macchina giusta.

Figura 19 – Esempio dei limiti presentati da uno yard con lay-out di tipo AR-CT



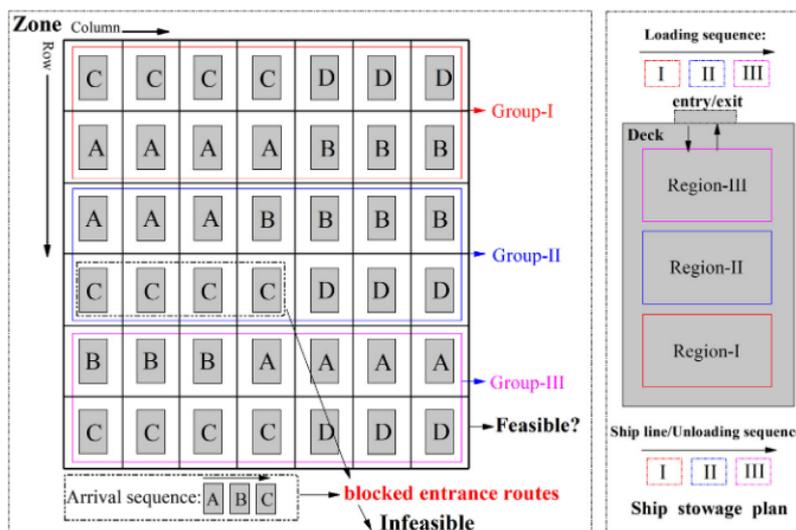
Fonte - X. Chen et al. «Optimizing storage location assignment in an automotive Ro-Ro terminal», 2020

3.3.2 - Assignment Rule based on Car Group (AR-CG):

Il *layout* AR-CG abbandona il concetto di tipologia e abbraccia quello di gruppo, identificato questa volta come l’insieme di autoveicoli, **assegnati alla stessa zona di carico** sulla nave Ro-ro di destinazione. Le macchine assegnate allo stesso gruppo – g, saranno di tipologia diversa, avranno sequenza di arrivo allo yard diversa, ma condideranno stessa sequenza di caricazione sulla nave e stessa zona di caricazione

all'interno di essa come previsto dal piano di carico. Onde evitare equivoci, la numerazione dei gruppi rispecchierà quella con numeri romani già applicata per le regioni di destinazione della nave. Pertanto, se si osserva la *Figura 20*, si può notare come il gruppo I, avrà come luogo di destinazione all'interno della nave la regione I, e di conseguenza sarà il primo ad essere caricato a bordo e l'ultimo a sbarcare (*FILO*). Ad ogni modo, se è vero che il *layout AR-CT* evitava le *deadlock situation* a scapito di un inefficiente gestione della zona di piazzale, il *layout AR-CG* ottimizza la gestione di piazzale ma non garantisce contro le *deadlock situation*. Se si osserva sempre la *Figura 20*, si può notare come i posti di sosta assegnati alle macchine di tipo C, appartenenti al gruppo II, non sono compatibili col loro ordine di arrivo, in quanto le macchine di tipo A del gruppo I e le macchine di tipo B del gruppo II, avranno già occupato le corsie sovrastanti e sottostanti. È opportuno quindi, nell'utilizzo del *layout AR-CG*, tenere conto di percorsi che permettano il parcheggio, dei cancelli di arrivo allo yard e della conformazione dei gruppi, nonché della loro sequenza di imbarco.

Figura 20 – Layout di tipo AR-CT con possibilità di deadlock situation



Fonte - X. Chen et al. «Optimizing storage location assignment in an automotive Ro-Ro terminal», 2020

La formula AR-CG propone un parametro quantitativo da legare ad ogni gruppo, definito come *grado di dispersione (dispersion degree - f_g)*. Esso è il rapporto tra il numero di posti della sezione di yard racchiusi all'interno di un gruppo-g, ed il numero di auto n_g presenti in un dato momento in quel gruppo. A questo si aggiunge una variabile binaria, che identifica col valore 1, il caso in cui tutte le auto del gruppo-g siano arrivate alla regione di destinazione, 0 altrimenti.

$$\theta_{g,([r_1,r_2],[c_1,c_2])} = \begin{cases} 1, & \text{se tutte le auto del gruppo } - g \text{ sono assegnate alla regione } ([r_1 - r_2], [c_1 - c_2]) \\ 0, & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (55)$$

$$f_g = \frac{(\sum_{r_1 \in R} \sum_{r_2 \in C} \sum_{r_2 \in R | r_2 \geq r_1} \sum_{c_2 \in C | c_2 \geq c_1} (r_2 - r_1 + 1) \cdot (c_2 - c_1 + 1) \cdot \theta_{g,([r_1 - r_2],[c_1 - c_2])})}{n_g} \quad (56)$$

Dove, $r_1, r_2 \in R | r_2 \geq r_1$ e $c_1, c_2 \in C | c_2 \geq c_1$ rappresentano rispettivamente le righe- r e le colonne- c della sezione di yard in cui è racchiusa la regione di sosta dedicata al gruppo- g ; n_g rappresenta il numero di auto-veicoli appartenenti a tale gruppo.

I ricercatori hanno formalizzato lo *SLAP* utilizzando un modello di programmazione intera-binaria che cerca di minimizzare il totale grado di dispersione di tutti i gruppi di veicoli, durante il periodo di trasferimento/stevedoring/handling considerato. Vista la complessità del modello, mi appresterò di seguito ad elencarne gli insiemi, parametri e variabili decisionali, dandone opportuna definizione; mentre descriverò i vincoli secondo le macrocategorie tematiche a cui essi fanno riferimento. Queste sono essenzialmente quattro:

- Vincoli di capacità;
- Vincoli per eliminare le *deadlock situations*;
- Vincoli per l'identificazione della regione di appartenenza del gruppo- g ;
- Vincoli per il dominio delle variabili decisionali.

Insiemi:

R : insieme delle righe della sezione di yard, indicizzate da $r \rightarrow R = \{1, 2, \dots, r, \dots, |R|\}$;

C : insieme delle colonne della sezione di yard, indicizzate da $c \rightarrow C = \{1, 2, \dots, c, \dots, |C|\}$;

U : insieme delle auto in arrivo nella sezione di yard, indicizzate da " u " o " v " $\rightarrow U = \{1, 2, \dots, u, \dots, v, \dots, |U|\}$;

W : insieme delle auto già presenti nella sezione di yard, indicizzate da $w \rightarrow W = \{1, 2, \dots, w, \dots, |W|\}$;

G : insieme dei gruppi di auto, indicizzati da $g \rightarrow G = \{1, 2, \dots, g, \dots, |G|\}$;

Parametri:

t_u^a : tempo di arrivo del veicolo u allo yard;

t_u^d : tempo di partenza del veicolo u allo yard;

$Y_w^{(r,c)} \in \{0,1\}$: 1 se l'auto esistente w è presente le posto (r, c) ; 0 altrimenti;

$B_{g,u} \in \{0,1\}$: 1 se l'auto in arrivo u appartiene al gruppo g ; 0 altrimenti;

$K_{u,v} \in \{0,1\}$: 1 se $t_u^d > t_v^a$ e $t_u^a < t_v^d$; 0 altrimenti;

$K_{u,w} \in \{0,1\}$: 1 se $t_u^d > t_w^a$ e $t_u^a < t_w^d$; 0 altrimenti;

$A_{u,v} \in \{0,1\}$: 1 se $t_u^a > t_v^a$; 0 altrimenti;

$A_{u,w} \in \{0,1\}$: 1 se $t_u^a > t_w^a$; 0 altrimenti;

$P_{u,v} \in \{0,1\}$: 1 se $t_u^d < t_v^d$; 0 altrimenti;

$P_{u,w} \in \{0,1\}$: 1 se $t_u^d < t_w^d$; 0 altrimenti;

Variabili decisionali:

$x_u^{(r,c)} \in \{0,1\}$: 1 se l'auto u occupa il posto (r, c) ; 0 altrimenti;

$\mu_{u,(r,c)}^I \in \{0,1\}$: 1 se $x_u^{(r,c)} = 1$ e la macchina arrivata precedentemente è assegnata alla regione frontale del posto (r, c) ; 0 altrimenti;

$\mu_{u,(r,c)}^{II} \in \{0,1\}$: 1 se $x_u^{(r,c)} = 1$ e la macchina arrivata precedentemente è assegnata alla regione posteriore del posto (r, c) ; 0 altrimenti;

$\lambda_{u,(r,c)}^I \in \{0,1\}$: 1 se $x_u^{(r,c)} = 1$ ed una macchina con partenza successiva a u è assegnata alla regione frontale del posto (r, c) ; 0 altrimenti;

$\lambda_{u,(r,c)}^{II} \in \{0,1\}$: 1 se $x_u^{(r,c)} = 1$ ed una macchina con partenza successiva a u è assegnata alla regione posteriore del posto (r, c) ; 0 altrimenti;

$\xi_{g,r} \in \{0,1\}$: 1 se esiste una macchina del gruppo- g all'interno della riga - r ; 0 altrimenti;

$\zeta_{g,c} \in \{0,1\}$: 1 se esiste una macchina del gruppo- g all'interno della colonna- c ; 0 altrimenti;

$\alpha_{g,r_1}^R \in \{0,1\}$: 1 se il bordo inferiore della sezione di yard adibita al gruppo- g è r_1 ; 0 altrimenti;

$\beta_{g,r_2}^R \in \{0,1\}$: 1 se il bordo superiore della sezione di yard adibita al gruppo- g è r_2 ; 0 altrimenti;

$\alpha_{g,c_1}^C \in \{0,1\}$: 1 se il bordo sinistro della sezione di yard adibita al gruppo- g è c_1 ; 0 altrimenti;

$\beta_{g,c_2}^C \in \{0,1\}$: 1 se il bordo destro della sezione di yard adibita al gruppo- g è c_2 ; 0 altrimenti;

$\gamma_{g,[r_1,r_2]}^R \in \{0,1\}$: 1 se $[r_1, r_2]$ sono rispettivamente il bordo inferiore e superiore della sezione adibita al gruppo-g; 0 altrimenti;

$\gamma_{g,[c_1,c_2]}^C \in \{0,1\}$: 1 se $[c_1, c_2]$ sono rispettivamente il bordo sinistro e destro della sezione adibita al gruppo-g; 0 altrimenti;

$\theta_{g,([r_1,r_2],[c_1,c_2])}$: 1 se la sezione $([r_1, r_2], [c_1, c_2])$ è la più piccola che racchiude tutto il gruppo-g di auto; 0 altrimenti.

Il modello assegna ad ogni autovettura una posizione (di coordinate $r \in R, c \in C$) all'interno dello yard, identificata dalla variabile decisionale binaria $x_u^{(r,c)}$. L'insieme delle macchine in arrivo è descritto da $U = \{1, 2, \dots, u, \dots, v, \dots, |U|\}$, l'insieme dei gruppi di auto sono indicizzati da $G = \{1, 2, \dots, g, \dots, |G|\}$. Se una determinata posizione (r, c) è occupata prima del periodo pianificato T_1 , allora non potrà essere assegnata ad una macchina in arrivo fintanto che la macchina esistente indicata dall'insieme $W = \{1, 2, \dots, w, \dots, |W|\}$ non sia partita. In questo caso il posto occupato sarà contraddistinto dal parametro $Y_w^{(r,c)}$ con valore 1. Ogni vettura u e w è contraddistinta da tre parametri: il tempo di arrivo alla postazione t_u^a , il suo tempo di partenza t_u^d ed il suo gruppo di appartenenza ($B_{g,u} = 1$ se l'autovettura u appartiene al gruppo-g).

La funzione obiettivo, che punta a minimizzare il grado di dispersione dei gruppi di auto all'interno del piazzale è presentata di seguito.

$$\min f = \sum_{g \in G} \left(\frac{(\sum_{r_1 \in R} \sum_{r_2 \in C} \sum_{r_2 \geq r_1} \sum_{c_2 \in C | c_2 \geq c_1} (r_2 - r_1 + 1) \cdot (c_2 - c_1 + 1) \cdot \theta_{g,([r_1-r_2],[c_1-c_2])})}{\sum_{u \in U} B_{g,u} + \sum_{w \in W} B_{g,w}} \right) \quad (57)$$

Detto ciò, il primo gruppo di vincoli presenti all'interno del modello sono vincoli di capacità. Viene da sé che l'auto in arrivo venga assegnata ad un unico posto (58), e che all'interno di un posto di parcheggio, al tempo considerato, possa esservi ospitata una sola macchina alla volta, che sia essa in arrivo o già presente (59),(60).

$$\sum_{r \in R} \sum_{c \in C} x_u^{(r,c)} = 1 \quad \forall u \in U \quad (58)$$

$$x_u^{(r,c)} + x_v^{(r,c)} \leq 2 - K_{u,v}, \quad \forall u, v \in U, u \neq v; r \in R, c \in C \quad (59)$$

$$x_u^{(r,c)} + Y_w^{(r,c)} \leq 2 - K_{u,w}, \quad \forall u \in U; w \in W; r \in R, c \in C \quad (60)$$

Ricordiamo che il tempo è indirettamente espresso con il parametro binario $K_{u,v}, K_{u,w}$, che assume valore 1 solo se rispettivamente $t_u^d > t_v^a$; $t_u^a < t_v^d$ e $t_u^d > t_w^a$; $t_u^a < t_w^d$.

I vincoli del secondo gruppo si preoccupano di evitare le *deadlock situations* descritte alla *figura 15*. A tale scopo, è necessario scrivere dei vincoli che garantiscano delle vie di accesso ed uscita ai parcheggi, e che tengano contemporaneamente conto dell'arrivo di nuovi veicoli u, v e dei veicoli w già presenti nel parcheggio. Come si è osservato nei parametri del modello, il problema si sdoppia, considerando prima le macchine che occupano i posti alla riga superiore rispetto a quello di riferimento, e poi a quelli che occupano la riga inferiore. A tal scopo, si sono individuati i parametri binari $A_{u,v}; A_{u,w}$ che descrivono l'ordine di arrivo tra due veicoli oppure con un veicolo pre-sistente; i parametri $P_{u,v}; P_{u,w}$ ripropongono lo stesso concetto per la partenza. Nelle variabili decisionali abbiamo evidenziato $\mu_{u,(r,c)}^I; \mu_{u,(r,c)}^{II}$ come un indicatore binario che riconosce se la zona frontale e posteriore del posto assegnato alla macchina u , sia già stato occupato da un'altra vettura v , oppure se vi sia già una vettura pre- esistente w . Lo stesso ma per le partenze si riscontra con le variabili $\lambda_{u,(r,c)}^I; \lambda_{u,(r,c)}^{II}$. Quanto detto finora è espresso come segue:

$$\begin{aligned} & \mu_{u,(r,c)}^I \\ & = \begin{cases} 1 \text{ se } x_u^{(r,c)} = 1, r > 1, \exists r' (1 \leq r' \leq r), \exists v \in U, v \neq u, x_u^{(r',c)} \cdot K_{u,v} \cdot A_{u,v} = 1; \text{ oppure } \exists w \in W, Y_w^{(r',c)} \cdot K_{u,w} \cdot A_{u,w} = 1 \\ 0, \text{ se } x_u^{(r,c)} = 1, r = 1 \\ 0, \text{ altrimenti} \end{cases} \end{aligned} \quad (61)$$

$$\begin{aligned} & \mu_{u,(r,c)}^{II} \\ & = \begin{cases} 1 \text{ se } x_u^{(r,c)} = 1, r < |R|, \exists r' (r \leq r' \leq |R|), \exists v \in U, v \neq u, x_u^{(r',c)} \cdot K_{u,v} \cdot A_{u,v} = 1; \text{ oppure } \exists w \in W, Y_w^{(r',c)} \cdot K_{u,w} \cdot A_{u,w} = 1 \\ 0, \text{ se } x_u^{(r,c)} = 1, r = 1 \\ 0, \text{ altrimenti} \end{cases} \end{aligned} \quad (62)$$

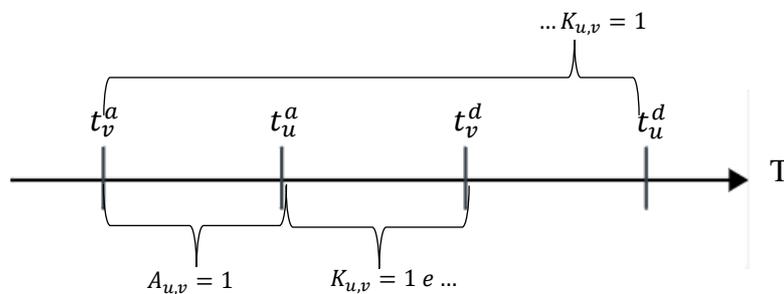
$$\begin{aligned} & \lambda_{u,(r,c)}^I \\ & = \begin{cases} 1 \text{ se } x_u^{(r,c)} = 1, r > 1, \exists r' (1 \leq r' \leq r), \exists v \in U, v \neq u, x_u^{(r',c)} \cdot K_{u,v} \cdot P_{u,v} = 1; \text{ oppure } \exists w \in W, Y_w^{(r',c)} \cdot K_{u,w} \cdot P_{u,w} = 1 \\ 0, \text{ se } x_u^{(r,c)} = 1, r = 1 \\ 0, \text{ altrimenti} \end{cases} \end{aligned} \quad (63)$$

$$\lambda_{u,(r,c)}^H = \begin{cases} 1 & \text{se } x_u^{(r,c)} = 1, r < |R|, \exists r' (r \leq r' \leq |R|), \exists v \in U, v \neq u, x_u^{(r',c)} \cdot K_{u,v} \cdot P_{u,v} = 1; \text{ oppure } \exists w \in W, Y_w^{(r',c)} \cdot K_{u,w} \cdot P_{u,w} = 1 \\ 0 & \text{se } x_u^{(r,c)} = 1, r = 1 \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (64)$$

Risulta opportuna una spiegazione più dettagliata. Sofferamoci sulle variabili (61) e (62).decisionali binarie per evitare gli intralci durante l'arrivo dei veicoli.

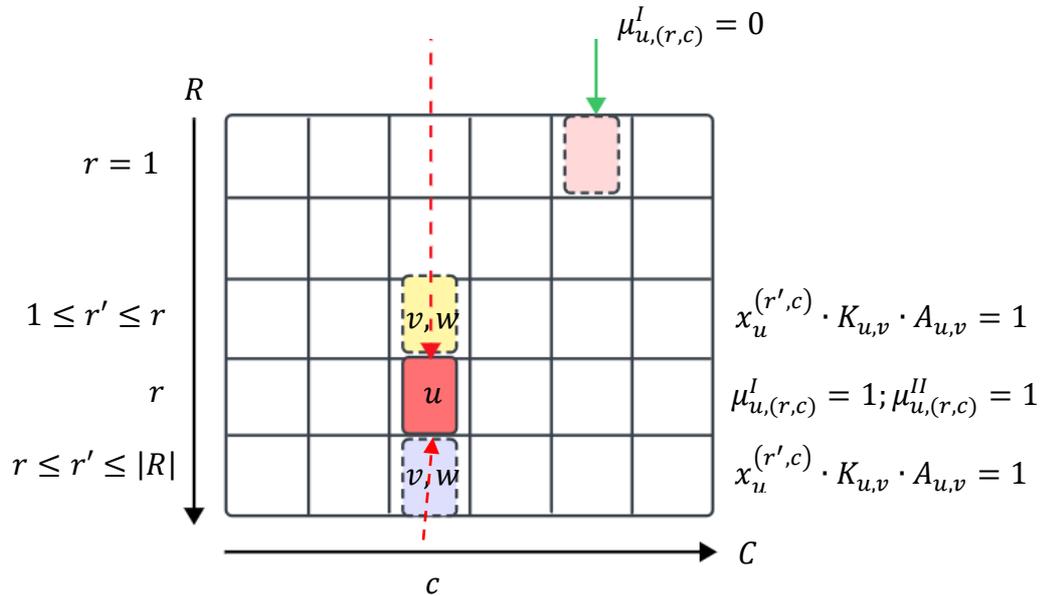
Si è detto che $\mu_{u,(r,c)}^I$ è uguale a 1 se $x_u^{(r,c)} = 1$ e la macchina arrivata precedentemente è assegnata alla regione frontale rispetto al posto (r, c) ; lo stesso si può dire per $\mu_{u,(r,c)}^H$ considerando la regione posteriore. Per parlare di regione frontale bisogna identificare da quale regione si inizia a contare. Pertanto, la regione in cui è parcheggiata l'auto ha coordinate (r, c) , dove $r > 1$, essendo che la riga 1, corrisponde al lembo superiore della regione di riferimento tracciata dalla sezione di yard; sarebbe impossibile creare una *deadlock situation* in questo caso, perché non vi sono ulteriori righe superiori a $r = 1$. Ecco quindi spiegato perché $\mu_{u,(r,c)}^I = 0$, se $x_u^{(r,c)} = 1$ e $r = 1$. Quando si verificherà un intralcio? Quando il veicolo - v precedente all'arrivo ($A_{u,v} = 1$) rispetto al veicolo - u , sarà posizionato in un parcheggio di coordinate (r', c) , avente stessa colonna ma riga $1 \leq r' \leq r$. La variabile binaria $x_u^{(r',c)} = 1$ e la partenza del veicolo- v è successiva all'auto- u . Il tutto è espresso col prodotto $x_u^{(r',c)} \cdot K_{u,v} \cdot A_{u,v} = 1$. Lo stesso vale nel caso di un'auto- w già esistente: $\exists w \in W, Y_w^{(r',c)} = 1$. Per quel che riguarda la regione posteriore al posto assegnato (r, c) , le considerazioni fatte si ripetono uguale con l'unica differenza che questa volta le righe in cui potrà verificarsi una *deadlock situation* saranno quelle comprese tra $r \leq r' \leq |R|$. Il tutto è riassunto nella *Figura 21* e nel *Grafico 4*.

Grafico 4 – Parametri $A_{u,v}; K_{u,v}$ a confronto sull'asse dei tempi T



Fonte – Elaborazione propria

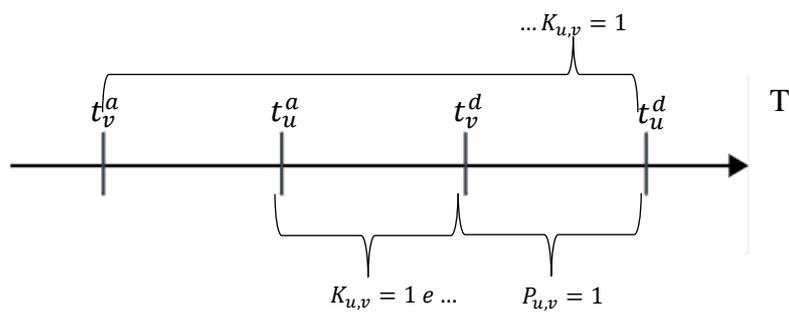
Figura 21- Spiegazione grafica dei parametri $\mu_{u,(r,c)}^I$; $\mu_{u,(r,c)}^{II}$ all'interno dello yard e rappresentazione delle due deadlock situation per la via di ingresso al parcheggio della vettura - u.



Fonte – Elaborazione propria

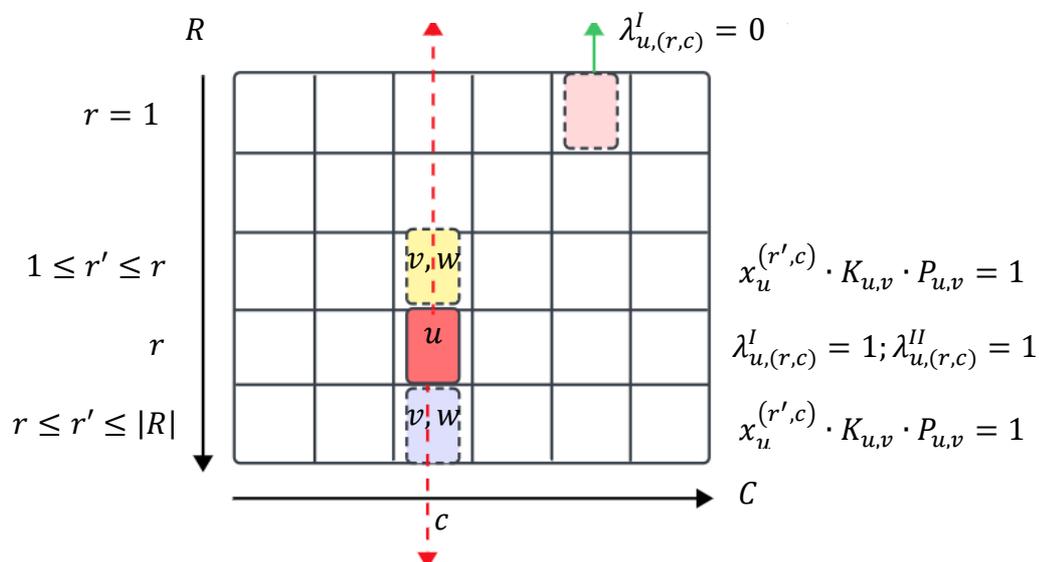
Uguualmente, le considerazioni fatte sulle due possibili *deadlock situation* si ripropongono, questa volta per le vie di uscita dal parcheggio, tramite le equazioni (63) (64), e riprodotte nel Grafico 5 e nella Figura 22.

Grafico 5- Parametri $P_{u,v}$; $K_{u,v}$ a confronto sull'asse dei tempi T



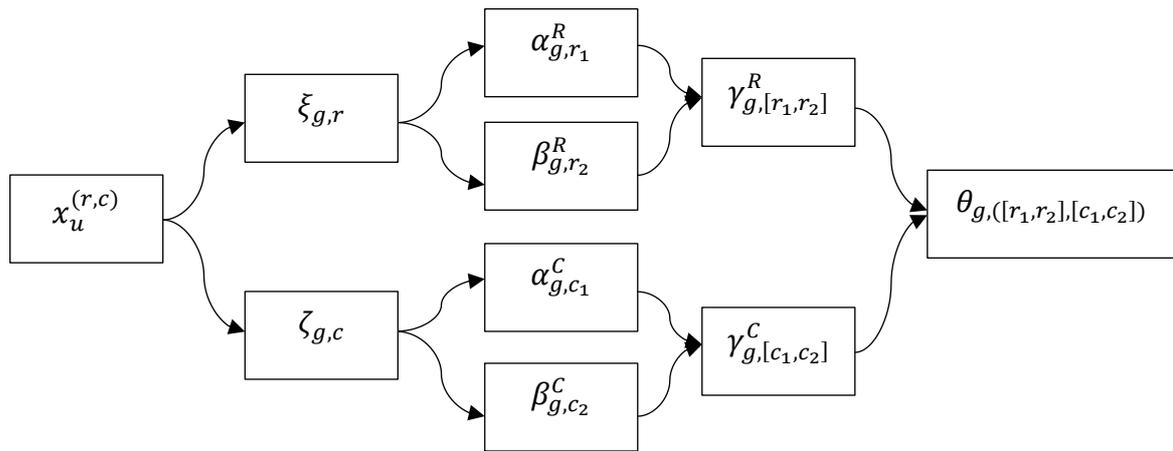
Fonte – Elaborazione Propria

Figura 22 - Spiegazione grafica dei parametri $\lambda_{u,(r,c)}^I$; $\lambda_{u,(r,c)}^{II}$ all'interno dello yard e rappresentazione delle due deadlock situation per la via di uscita dal parcheggio della vettura - u .



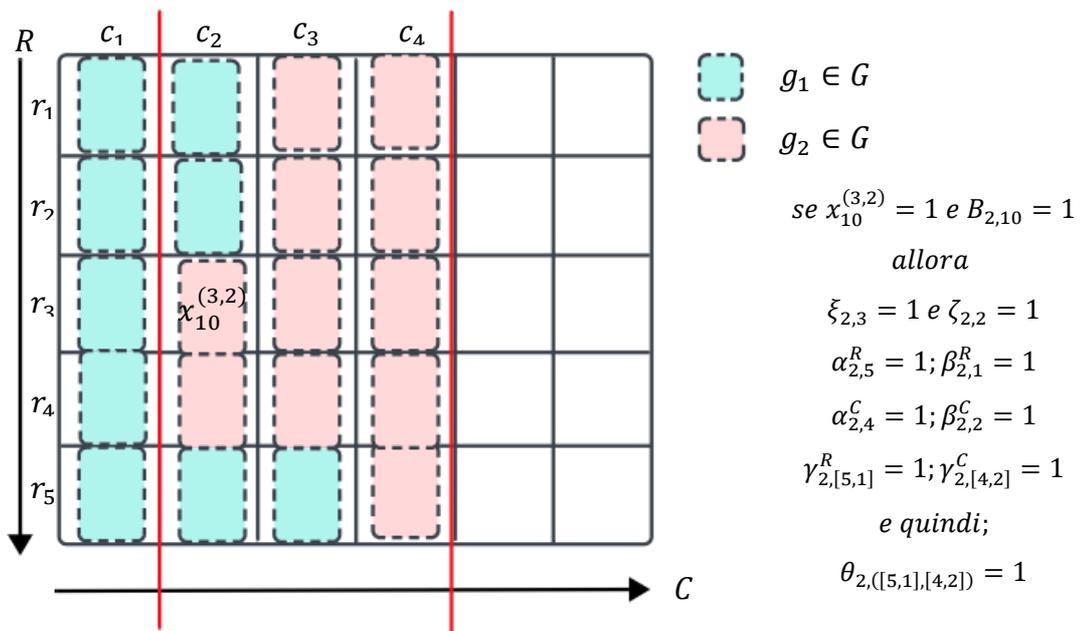
L'ultimo gruppo di vincoli identifica la regione di piazzale di appartenenza del gruppo- g di auto. Questa serie di vincoli mette in relazione la variabile decisionale binaria $x_u^{(r,c)}$ con $\theta_{g,([r_1,r_2],[c_1,c_2])}$. Il primo step consiste nell'identificazione del gruppo- g di appartenenza della autovettura- u , tramite il parametro binario $B_{g,u}$. Data la posizione della autovettura- u , appartenente al gruppo- g , tramite la variabile binaria $x_u^{(r,c)} = 1$, possiamo determinare rispettivamente le colonne e le righe in cui esistono veicoli appartenenti al gruppo- g tramite le variabili $\xi_{g,r}$; $\zeta_{g,c}$. Il secondo step consiste nel determinare le rispettive righe e colonne che compongono i limiti superiori ed inferiori, destri e sinistri, della regione in cui sono racchiuse le macchine appartenenti al gruppo- g . Questi limiti sono contraddistinti da quattro variabili binarie α_{g,r_1}^R ; β_{g,r_2}^R ; α_{g,c_1}^C ; β_{g,c_2}^C . Di conseguenza i rispettivi bordi superiori e inferiori sono distinti da un'unica variabile $\gamma_{g,[r_1,r_2]}^R$, mentre i bordi destri e sinistri sono sintetizzati dalla variabile $\gamma_{g,[c_1,c_2]}^C$. Il terzo ed ultimo step identifica la regione rettangolare che racchiude le auto del gruppo- g selezionato, sintetizzandolo con la variabile binaria $\theta_{g,([r_1,r_2],[c_1,c_2])}$. Lo schema sottostante (Figura 23) riassume la relazione logica esistente tra $x_u^{(r,c)}$ e $\theta_{g,([r_1,r_2],[c_1,c_2])}$.

Figura 23 - Relazione logica tra le Variabili decisionali Binarie del problema SLAP con layout AR-CG.



Fonte – Elaborazione propria

Figura 23 -Rappresentazione grafica della relazione logica tra le variabili decisionali binarie e descrizione dei limiti fisici della regione di yard dedicata alle auto del gruppo-2.



Fonte – Elaborazione propria

Dalla figura 23 si sono ottenuti i limiti della regione interessata dal gruppo 2. Data un'auto appartenente al gruppo $g_2 \in G$ tale che la variabile binaria $B_{2,10} = 1$, posizionata in colonna 2, riga 3 per cui la variabile decisionale binaria $x_{10}^{(3,2)} = 1$, si può affermare che nella colonna 2 e nella riga 3 esistano macchine appartenenti al gruppo g_2 , pertanto

$\xi_{2,3} = 1$ e $\zeta_{2,2} = 1$, reiterando questo processo per ogni singola cella si arriva ad ottenere i limiti spaziali del rettangolo che racchiude le auto del gruppo 2. Dalla figura è facilmente riconoscibile che le auto del secondo gruppo sono contenute all'interno della 2° e 4° colonna, e della 1° e 5° riga. Quanto detto è espresso dalle variabili binarie $\alpha_{2,5}^R = 1; \beta_{2,1}^R = 1, \alpha_{2,4}^C = 1; \beta_{2,2}^C = 1, \gamma_{2,[5,1]}^R = 1; \gamma_{2,[4,2]}^C = 1$. Seguendo il filo logico espresso già in *figura 23*, si ottiene che le auto del gruppo 2, sono racchiuse tra le colonne individuate, ed il tutto è simboleggiato dalla variabile binaria $\theta_{2,([5,1],[4,2])} = 1$. Per calcolare il *dispersion degree* basta dividere il numero di celle totali racchiuse dai limiti dell'area, per il numero di auto di quel gruppo effettivamente racchiuse al suo interno. $f_2 = \frac{(5 \times 3)}{11} = 1,36$. Lo *SLAP* reitera questo processo in modo da ottenere per ciascun gruppo il minimo livello di dispersione, rispettando vincoli di capacità e di intralcio. L'analisi dei ricercatori confronta le due regole di assegnazione—AR-CT e AR-CG— applicate specificamente al Terminal Ro-Ro di Shanghai Haitong, concentrandosi sui loro impatti in un contesto di scala e complessità crescenti, riassumendone i risultati in *Tabella 12*.

Tabella 12 – Confronto tra il *dispersion degree* ed i tempi computazionali di AR-CT e AR-CG.

| # | Type number | Group number | Lower bound | Zone scale | Car number | AR-CT | | | AR-CG | | |
|---------|-------------|--------------|-------------|------------|------------|--------|-------|-------------|-------|-------|-------------|
| | | | | | | f | gap | CPU time /s | f | gap | CPU time /s |
| 1 | 10 | 6 | 6 | 20*10 | 120 | 31.656 | 4.276 | 0.015 | 6.609 | 0.102 | 39.238 |
| 2 | | | | | 150 | 28.360 | 3.727 | 0.015 | 7.224 | 0.204 | 52.431 |
| 3 | | | | | 180 | 29.691 | 3.949 | 0.015 | 6.995 | 0.166 | 65.642 |
| 4 | | | | 26*12 | 240 | 35.161 | 4.860 | 0.015 | 6.761 | 0.127 | 104.430 |
| 5 | | | | | 270 | 28.439 | 3.740 | 0.015 | 6.546 | 0.091 | 118.552 |
| 6 | | | | | 300 | 26.139 | 3.357 | 0.015 | 6.741 | 0.124 | 131.146 |
| 7 | | | | 32*14 | 360 | 29.700 | 3.950 | 0.015 | 6.599 | 0.100 | 169.325 |
| 8 | | | | | 390 | 36.401 | 5.067 | 0.015 | 6.674 | 0.112 | 180.702 |
| 9 | | | | | 420 | 37.121 | 5.187 | 0.015 | 7.134 | 0.189 | 204.874 |
| 10 | | | | 38*16 | 480 | 25.050 | 3.175 | 0.015 | 6.605 | 0.101 | 233.178 |
| 11 | | | | | 510 | 29.038 | 3.840 | 0.015 | 7.095 | 0.183 | 258.834 |
| 12 | | | | | 540 | 29.726 | 3.954 | 0.015 | 6.527 | 0.088 | 272.421 |
| Average | | | | | | | 4.090 | | | 0.132 | |

Nota – $gap = \frac{(f - Lower\ Bound)}{Lower\ Bound}$

Fonte - X. Chen et al. «Optimizing storage location assignment in an automotive Ro-Ro terminal», 2020

Con l'espansione delle dimensioni della zona da 20x10 a 38x16 e l'aumento del numero di auto assegnate da 120 a 540 attraverso dodici scenari casuali, diventano evidenti i limiti della regola di assegnazione AR-CT. Le auto, classificate in dieci tipologie e organizzate in sei gruppi secondo il piano di stivaggio delle navi Ro-Ro, mostrano diversi livelli di dispersione nel layout. La *tabella 12* indica che il layout ottimale—riflesso da un grado

di dispersione di 1.0—è raramente raggiunto sotto AR-CT. Il gap medio del grado di dispersione per le soluzioni AR-CT è di circa 4.090, evidenziando una significativa dispersione dei gruppi di auto e un utilizzo inefficiente delle risorse di stoccaggio. Ad esempio, nello scenario 1, il grado totale di dispersione per i sei gruppi raggiunge circa 31.656. Al contrario, la regola di assegnazione AR-CG dimostra una performance notevolmente migliore, con un gap medio di solo 0.132 rispetto al grado di dispersione ideale. Questa maggiore compattezza suggerisce un allineamento più efficace con le operazioni di carico delle navi. Da un punto di vista computazionale, AR-CT è veloce e semplice, richiedendo tempi di elaborazione minimi. Al contrario, AR-CG è più esigente dal punto di vista computazionale, con una media di circa 272.421 secondi per 540 auto, sebbene questa durata rimanga gestibile. La struttura di AR-CT consente un massimo di due tipologie di auto per colonna per garantire percorsi accessibili, ma fatica a ottimizzare lo spazio di stoccaggio. Nonostante queste limitazioni, AR-CT è comunemente utilizzato nella gestione dei piazzali grazie alle sue capacità di routing efficaci in condizioni incerte. Nel frattempo, sebbene AR-CG ottimizzi l'utilizzo delle risorse e i processi di carico, affronta sfide nell'adattarsi a fattori operativi imprevedibili.

In conclusione, mentre AR-CT offre semplicità e praticità nel routing delle autovetture, AR-CG migliora significativamente l'efficienza del layout, richiedendo tuttavia una gestione attenta per affrontare le incertezze operative. Il risultato finale è la sostanziale riduzione di movimenti delle auto, aumentando l'efficienza generale del sistema terminal, minimizzando i tempi di *handling*, massimizzando l'impiego delle squadre di autisti e riducendo sostanzialmente il rischio di danni alle vetture dovute al *repositioning*.

Conclusioni

Il mio elaborato ha voluto analizzare il trasporto Ro-ro, che come evidenziato dagli studi di settore a livello Europeo e Italiano, ha registrato una regolare crescita a partire dall'istituzione delle SSS e MoS (*White Paper 2001*), che ne hanno accelerato l'implementazione sul territorio europeo. Alla crescita del commercio mondiale con la successiva crescita del compartimento Ro-ro, i sistemi terminalisti hanno avuto difficoltà ad adattare le proprie strutture ed i propri mezzi alle nuove e rinvigorite esigenze del mercato. Le Autorità di Sistema Portuale sono sottoposte a una forte pressione per aumentare la loro produttività operativa, non potendo in molti casi aumentare la propria capacità di piazzale per evidenti limiti spaziali (si pensi al porto di Genova). Competere con gli altri porti su scala globale è reso sempre più difficile a causa di diversi fattori, come la crescita del commercio internazionale, l'aumento delle dimensioni delle navi, lo sviluppo delle tecnologie informatiche e di movimentazione dei carichi e l'evoluzione delle richieste dei clienti. Se i porti marittimi non riescono ad aumentare la loro efficienza operativa, devono abbassare i prezzi per non rimanere indietro rispetto a questa feroce concorrenza. Pertanto, l'aumento dell'efficienza delle operazioni portuali non è solo cruciale per la produttività e la redditività del singolo porto, ma ha anche un contributo significativo all'economia del Paese e alla competitività internazionale (*Keceli et al, 2013*)⁵⁰. Il presente elaborato ha voluto analizzare i metodi sviluppati in letteratura per l'efficientamento del sistema terminal Ro-ro. Si è prima analizzato il problema della capacità, evidenziando come lo studio attento di determinati *KPI's* possa fornire una solida stima dello stato attuale del terminal Ro-ro, e possa anche indirizzare investimenti verso progetti futuri. Si è poi passati allo studio dei Decision Support System (*DSI*), esplicandone la struttura e gli elementi che lo compongono, dimostrando come lo studio dei *KPI's* e l'utilizzo di metodi simulativi o di modelli di ottimizzazione, in realtà faccia parte di uno stesso processo che vuole analizzare la situazione corrente dandone una valutazione quantitativa basata su dati (studio dei *KPI's*), per poi implementare (o aggiornare) un modello esistente che fornisca una soluzione ottimale relativa all'utilizzo

⁵⁰ *Keceli et al. – “A simulation model for decision support in Ro-Ro terminal operations”, 2013*

delle risorse (forza lavoro, capitale e tempo) disponibili all'interno del terminal, portando ad un sistema che faccia un utilizzo più efficiente dei suoi input, migliorando l'output finale, sempre espresso in termini di KPI's (es. throughput portuale, tempo di servizio e tempo di attesa). Si è più volte detto che la bibliografia esistente relativa al terminal Ro-ro (ed in particolare al *pure Ro-ro*) sia scarsa, soprattutto se confrontata con il trasporto containerizzato, oltre ad aver evidenziato come la tendenza generale sia quella di far sempre più utilizzo di metodi simulativi attraverso specifici software (tra i quali Arena ® o Witness ®) per risolvere problemi di efficienza terminalista. Gli ultimi due paragrafi hanno analizzato nel dettaglio due particolari modelli di ottimizzazione dedicati al trasporto Ro-ro di tipo Car-Cargo. I modelli *YMA (Yard and Manpower Allocation)* e lo *SLAP (Storage Location Assignment Problem)*, cercano di risolvere rispettivamente il problema di assegnamento della forza lavoro e dei posti auto all'interno delle aree del piazzale. Sono stati scelti perché è mia profonda convinzione che possano essere, con le giuste accortezze relative ai vincoli, generalizzati per il trasporto *pure Ro-ro*. Entrambi i modelli hanno dimostrato, dagli studi dei ricercatori, di efficientare in modo sostanziale le decisioni operative all'interno del terminal, minimizzando i tempi di lavorazione (mantenendo invariata la forza lavoro, il tempo di processo e gli orari di lavoro) e di attesa della nave, e minimizzando il tempo di servizio, a parità di area disponibile. Il commento finale è che lo studio e l'applicazione sul campo (secondo le necessità di ogni terminal) di modelli di ottimizzazione misti e metodi simulativi, insieme al "*know-how*" del management marittimo-portuale e alla loro visione economica, possano fornire un supporto positivo al processo decisionale, alla produttività terminalista dei sistemi Ro-ro e di conseguenza beneficiare l'intero sistema paese.

Ringraziamenti

Questa tesi rappresenta per me il capitolo finale di un processo di crescita personale e lavorativa durato 5 anni, contando anche il percorso triennale. Una scelta guidata dall'ambizione e dalla voglia di specializzarsi nel campo marittimo, ma che è stata costellata di difficoltà dovute in particolar modo alla mia professione. Il mare si conferma ancora una volta come la grande costante e partner della mia vita, alla quale si lega in una grande danza dai passi imprevedibili. Pertanto, alla fine di questo percorso è opportuno ringraziare chi mi ha permesso di trovare la forza per completare questo progetto personale. Ringrazio la mia relatrice Prof.ssa Daniela Ambrosino, che ha saputo mostrare un grande lato umano nel capire le mie esigenze personali e lavorative. Ringrazio Tiziana ed Enrico, i miei genitori, e Giulia, mia sorella, che hanno saputo pazientemente assecondare le mie ansie e paure, dandomi conforto quando il concatenarsi degli impegni universitari e lavorativi non sembrava dare spazio ad alcun progresso. Ringrazio la mia collega e amica di università Cristina Rossi, che ha avuto l'infinita pazienza di fornirmi materiale di studio, informazioni utili sui corsi e sugli esami, ogni volta che ritornavo a casa dopo mesi di imbarco. Infine, ringrazio me stesso, per aver osato laddove sarebbe stato molto più semplice mollare.

Bibliografia

1. Abourraja et al, - «A simulation-based decision support framework devoted to Ro–Ro terminals: Design, implementation and evaluation», 2023;
2. Abourraja, Mohamed Nezar, Nicole Kringos, e Sebastiaan Meijer. «Exploiting Simulation Model Potential in Investigating Handling Capacity of Ro-Ro Terminals: The Case Study of Norvik Seaport». *Simulation Modelling Practice and Theory* 117 (maggio 2022);
3. Ambrosino, Daniela, e Haoqi Xie. «Optimization Approaches for Defining Storage Strategies in Maritime Container Terminals». *Soft Computing* 27, fasc. 7 (aprile 2023);
4. Balaban, Mariusz, e Tom Mastaglio. «RoPax/RoRo: Exploring the Use of Simulation as Decision Support System»;
5. Bassi, Francesca, e Salvatore Ingrassia. "Statistica per le analisi di mercato - metodi e strumenti" - 1a ed. Pearson;
6. Borra, Simone, e Agostino Di Ciaccio. "Statistica - metodologie per le scienze economiche e sociali" - Terza. Vol. unico. Mc Graw Hill Education;
7. Carlo, Héctor J., Iris F.A. Vis, e Kees Jan Roodbergen. «Storage Yard Operations in Container Terminals: Literature Overview, Trends, and Research Directions». *European Journal of Operational Research* 235, fasc. 2 (giugno 2014): 412–30;
8. «Comunicato stampa SRM “Italian Maritime Economy”»;
9. De Jong - «Value of Time in Freight Transport», 2021;
10. Di Zhang, Feng Chen, Ziqiao Mei - «Optimization of Joint Scheduling of yard allocation and transfer manpower assignment for automobile Ro-Ro terminal», 2023;
11. Esmer, Soner - «Performance Measurements of Container Terminal Operations»;
12. Feo-Valero et al. - «The Value of Time in Freight Transport», 2021;
13. Fusco, Saurì «Performance indicator for Roll-on-Roll-off Terminals. A Planning Assesment tool, 2009»;
14. Iannone, Raffaele, Salvatore Miranda, Leandro Prisco, Stefano Riemma, e Debora Sarno. «Proposal for a Flexible Discrete Event Simulation Model for Assessing the Daily Operation Decisions in a Ro–Ro Terminal». *Simulation Modelling Practice and Theory* 61 (febbraio 2016): 28–46;
15. Karapetyan, Daniel, e Abraham P. Punnen. «A Reduced Integer Programming Model

- for the Ferry Scheduling Problem». *Public Transport* 4, fasc. 3 (marzo 2013): 151–63;
16. Keceli et al. – “A simulation model for decision support in Ro-Ro terminal operations”, 2013
 17. Kurt Bodewig, “Shaping the future policies of European Maritime Space - MoS 2022”;
 18. Lupi, Farina, Orsi, Pratelli - «The capability of Motorways of the Sea of being competitive against road transport. The case of the Italian mainland and Sicily», 2016;
 19. Mar-Ortiz, Julio, Norberto Castillo-García, e María D. Gracia. «A Decision Support System for a Capacity Management Problem at a Container Terminal». *International Journal of Production Economics* 222 (aprile 2020);
 20. Marzano V, Tocchi D, Fiori C, Tinessa F, Simonelli F, Cascetta E, «Ro-ro_Ro-pax Maritime transport in Italy- A policy - oriented market analysis, 2020»;
 21. Monaco, Maria Flavia, Marcello Sammarra, e Gregorio Sorrentino. «The Terminal-Oriented Ship Stowage Planning Problem». *European Journal of Operational Research* 239, fasc. 1 (novembre 2014): 256–65;
 22. Morales-Fusco et al. - «Quality indicators and capacity calculation for Ro», 2010;
 23. Özkan, Emin Deniz, Selçuk Nas, e Nil Güler. «Capacity Analysis of Ro-Ro Terminals by Using Simulation Modeling Method». *The Asian Journal of Shipping and Logistics* 32, fasc. 3 (settembre 2016): 139–47;
 24. «Rapporto RAM - Le autostrade del mare in Italia»;
 25. Marzano V, Tocchi D, Fiori C, Tinessa F, Simonelli F, Cascetta E, «Ro-ro_Ro-pax Maritime transport in Italy- A policy - oriented market analysis, 2020»;
 26. Stahlbock, Robert, e Stefan Voß. «Operations Research at Container Terminals: A Literature Update». *OR Spectrum* 30, fasc. 1 (12 novembre 2007): 1–52;
 27. X. Chen, F. Li, B. Jia, J. Wu, Z. Gao, R. Liu «Optimizing storage location assignment in an automotive Ro-Ro terminal», 2020;
 28. Xu, Guoning, Weida Wu, Qingxin Chen, Ning Mao, e Zhiying Wu. «Ferry Scheduling Optimization Considering Arrival Time Uncertainty and In-Place Time Differences». *Applied Sciences* 13, fasc. 20 (11 ottobre 2023).

Sitografia

1. «Eurostat 2024, Short Sea Shipping». Consultato 15 luglio 2024. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/mar_sg_am_cw/default/table?lang=en&category=mar.mar_s;
2. Google maps. Consultato il 10 luglio 2024. https://www.google.it/maps/place/Genova+GE/@44.4471038,8.7256801,40935m/data=!3m2!1e3!4b1!4m6!3m5!1s0x12d34152dcd49aad:0x236a84f11881620a!8m2!3d44.4071448!4d8.9347381!16zL20vMGhrbmY?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI0MDgyNy4wIKXMDSOASAFQAw%3D%3D;
3. «KPI's for Shipping Terminal». Consultato 5 luglio 2024. <https://www.linkedin.com/pulse/port-performance-indicators-calculations-kubilay-gurbuz/>;
4. «White paper EU». Consultato 10 luglio 2024. <https://eur-lex.europa.eu/IT/legal-content/glossary/white-paper.html>;

