



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

---

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ»**

**Μεταπτυχιακή Διατριβή**

**Έξυπνη Διαχείριση Ενέργειας Σε Μεγάλα Εμπορικά  
Λιμάνια Με Πολυπρακτορικά Συστήματα**

**Βολάνης Ελευθέριος Στεφανής**

**Εξεταστική Επιτροπή**

- 1. Επικ. Καθηγητής Φώτιος Κανέλλος (επιβλέπων)**
- 2. Καθηγητής Αναστάσιος Πουλιέζος**
- 3. Καθηγητής Βασίλειος Κουϊκόγλου**

Χανιά, Μάιος 2017





ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ»

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Έξυπνη Διαχείριση Ενέργειας Σε Μεγάλα Εμπορικά Λιμάνια  
Με Πολυπρακτορικά Συστήματα

Βολάνης Ελευθέριος Στεφανής

Εξεταστική Επιτροπή

1. Επικ. Καθηγητής Φώτιος Κανέλλος (επιβλέπων)
2. Καθηγητής Αναστάσιος Πουλιέζος
3. Καθηγητής Βασίλειος Κουϊκόγλου

Χανιά, Μάιος 2017

ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ-ΣΤΕΦΑΝΗΣ Μ. ΒΟΛΑΝΗΣ

Διπλωματούχος Μηχανικός Παραγωγής και Διοίκησης

Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης

© 2017-All rights reserved

## Πρόλογος

Η ραγδαία αύξηση των εκπομπών αερίων υπεύθυνα για το φαινόμενο του θερμοκηπίου που οφείλονται στις πηγές παραγωγής ενέργειας, καθιστά επιτακτική την ανάγκη για αποδοτική διαχείριση και εξοικονόμηση ενέργειας. Η εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί με την ορθή πρόβλεψη της απαιτούμενης ζήτησης και την αποδοτική και έξυπνη διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας.

Η χρήση έξυπνων δικτύων για την διαχείριση των φορτίων κατανάλωσης αλλά και επικοινωνίας μεταξύ τους με την ταυτόχρονη χρήση πολυπρακτορικού συστήματος, αποτελεί αντικείμενο μελέτης για πολλούς ερευνητές. Σήμερα, τα λιμάνια αποτελούν κέντρα υψηλής ενεργειακής κατανάλωσης με αποτέλεσμα οι ρύποι τοπικά να είναι αυξημένοι. Έτσι, είναι επιτακτική η ανάγκη να εφαρμοστούν κατάλληλες τεχνικές διαχείρισης ενέργειας, ώστε να επιτευχθεί ο περιβαλλοντικός στόχος 20 – 20 – 20 στα ευρωπαϊκά λιμάνια.

Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο την κατάλληλη μετατόπιση του φορτίου στις ώρες χαμηλής ζήτησης που οδηγεί στην εύρυθμη λειτουργία του δικτύου του λιμένα το οποίο θα αναλυθεί και επιτευχθεί με χρήση αριθμητικής υπολογιστικής και προγραμματιστική γλώσσα τέταρτης γενιάς στο λογισμικό MATLAB . Το μοντέλο θα μετατοπίζει κατάλληλα το φορτίο σε όλο το λιμάνι και την περιβάλλουσα περιοχή εξασφαλίζοντας την αποδοτική λειτουργία και τη προστασία του ηλεκτρικού δικτύου του λιμένα από υπερφόρτωση.

## Ευχαριστίες

*Οφείλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της εργασίας μου κ. Φ. Κανέλλο Επίκουρο Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, ο οποίος μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα καινοτόμο και ενδιαφέρον θέμα, αποκομίζοντας έτσι γνώσεις στον τομέα της ενεργειακής διαχείρισης μεγάλων εμπορικών λιμένων. Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου για την ψυχολογική και οικονομική τους βοήθεια καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου*

## Περίληψη

Η πλήρης ηλεκτροδότηση των μεγάλων λιμένων και τα έξυπνα ενεργειακά δίκτυα συνθέτουν μια ελπιδοφόρα λύση όχι μόνο για τον περιορισμό των εκπομπών των αερίων που είναι υπεύθυνα για το φαινόμενο του θερμοκηπίου αλλά και για τη βελτίωση της αποδοτικότητας τους. Οι μεγάλοι λιμένες περιλαμβάνουν ποικίλα ηλεκτρικά φορτία με μεγάλη ευελιξία στον τρόπο λειτουργίας τους (εμπορευματοκιβώτια ελεγχόμενης θερμοκρασίας, ηλεκτρικά οχήματα, παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στα αγκυροβολημένα πλοία κ.λπ.), ενώ ταυτόχρονα έχουν τη δυνατότητα αξιοποίησης τοπικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (παράκτιος αέρας, παλίρροιες, κύματα κ.λπ.).

Τα έξυπνα δίκτυα παρέχουν αποδοτικές λύσεις για τη μεγιστοποίηση της ευελιξίας της απαιτούμενης ζήτησης σε ενέργεια και της αποδοτικότητας του λιμένα. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η επίτευξη των στόχων αυτών με χρήση μιας καινοτόμου μεθόδου βασισμένης στα πολυπρακτορικά συστήματα. Η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόζεται σε ρεαλιστική μελέτη περίπτωσης μεγάλου λιμένα που περιλαμβάνεται από διάφορα μεγάλα και ευέλικτα φορτία. Η αποδοτικότητα της προτεινόμενης μεθόδου αξιολογήθηκε από λεπτομερείς προσομοιώσεις.

## Abstract

Full electrification of large ports and intelligent energy networks compose a very promising solution, not only for limiting the in-port greenhouse gas emissions, but also improving their efficiency. Large ports comprise a variety of flexible loads like refrigerated containers, electric vehicles, electric power supply to ships at berth etc., while they usually have great potential for local energy generation from renewable energy resources, like offshore wind, tides, waves etc. Smart grids can provide efficient solutions for maximizing the flexibility of the port power demand and for increasing the efficiency of the port power systems including the extended port area.

The main goal of this paper is to propose an innovative power management method based on multi-agent systems that will achieve the above targets. The proposed method is applied to a realistic case study of a large port comprising a variety of large flexible loads. The efficiency of the proposed method is evaluated by detailed simulations.

## Ακρωνύμια

ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
AC	Alternating Current
ASC	Automatic Stacking Crane
CPEV/A	Cluster of Plugged in Electrical Vehicles Agent
CR/A	Cluster of Reefers Agent
CSPS/A	Cluster of Shore Power Suppliers Agent
DAI	Distributed Artificial Intelligence
DC	Direct Current
EV	Electrical Vehicle
MAS	Multi-Agent Systems
PEV	Plugged-in Electric Vehicle
PEVA/A	Plugged in Electrical Vehicles' Aggregation Agent
PEV/A	Plugged-in Electric Vehicle Agent
PM/A	Port Manager Agent
RA/A	Reefers' Aggregation Agent
R/A	Reefer Agent
RMG	Rail Mounted Gantry
SPS/A	Shore Power Supply Agent
TEU	Twenty-foot Equivalent Units

# Πίνακας Περιεχομένων

---

Πρόλογος .....	i
Ευχαριστίες .....	ii
Περίληψη .....	iii
Abstract .....	iv
Ακρωνύμια .....	v
Πίνακας Περιεχομένων .....	vi
Πίνακας Πινάκων .....	viii
Πίνακας Εικόνων .....	ix
1.Εισαγωγή .....	1
1.1 Ενεργειακή Κατανάλωση Μεγάλων Εμπορικών Λιμένων .....	1
1.2 Αντικειμενικός Σκοπός .....	3
1.3 Δομή Εργασίας .....	5
2.Σχετική Βιβλιογραφία .....	6
2.1 Γερανοί Μετακίνησης Εμπορευματοκιβωτίων .....	6
2.2 Πολυπρακτορικό Σύστημα Διαχείρισης Ηλεκτρικών Οχημάτων .....	6
2.3 Cold Ironing .....	7
2.4 Εμπορευματοκιβώτια ελεγχόμενης Θερμοκρασίας (Reefers) .....	7
3.Ηλεκτρικό Σύστημα Λιμένα .....	8
3.1 Ευέλικτα φορτία .....	8
3.1.1 Εμπορευματοκιβώτια ελεγχόμενης θερμοκρασίας (Reefers) .....	8
3.1.2 Συνδεδεμένα Ηλεκτρικά Οχήματα (PEVs) .....	14
3.1.3 Cold Ironing .....	19
3.2. Μη ευέλικτα φορτία λιμένα .....	26
3.2.1 Φωτισμός & Κτίρια .....	26
3.2.2 Γερανοί Λιμένα .....	26

4. Πολυπρακτορικά Συστήματα.....	34
4.1 Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας Λιμανιού με χρήση MAS .....	42
4.1.1 Πράκτορας Διαχείρισης Λιμένα .....	45
4.1.2 Ομάδες πρακτόρων ψυγείων και συνδεδεμένων ηλεκτρικών οχημάτων....	46
4.1.3 Πράκτορας Ψυγείου. ....	47
4.1.4 Πράκτορας Συνδεδεμένων Ηλεκτρικών Οχημάτων .....	49
4.1.5 Πράκτορας Σύνδεσης Πλοίου Στο Ηλεκτρικό Δίκτυο .....	50
5. Αποτελέσματα Προσομοίωσης .....	52
6. Συμπεράσματα & Μελλοντική Έρευνα .....	66
6.1 Σκοπός Εργασίας.....	66
6.2 Συμπεράσματα .....	67
6.3 Μελλοντική Έρευνα.....	68
Βιβλιογραφία .....	69
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	73
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Θερμικές Ιδιότητες των Τροφίμων .....	73
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Θερμοκρασίες Μεταφοράς και Αποθήκευσης Προϊόντων που Χρησιμοποιήθηκαν .....	76

# Πίνακας Πινάκων

---

Πίνακας 1: Εκπομπές Αερίων από τις βοηθητικές μηχανές των πλοίων.....	19
Πίνακας 2: Μέση κατανάλωση ισχύος διαφόρων τύπων πλοίων .....	24
Πίνακας 3: Διάφορα πλοία που επισκέφτηκαν το λιμάνι Long Beach στο Λος Άντζελες.....	25
Πίνακας 4:Μηνιαία κατανάλωση κτιρίων και φωτισμού για μεγάλο εμπορικό λιμάνι της Κίνας.....	26
Πίνακας 5: Τεχνικά Χαρακτηριστικά γερανών .....	30
Πίνακας 6: Αποτελέσματα Κατανάλωσης AC και DC γερανών .....	32
Πίνακας 7: Αριθμός Μονάδων ευέλικτων φορτίων του ηλεκτρικού συστήματος του λιμένα.....	52
Πίνακας 8: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Εμπορευματοκιβωτίων .....	53
Πίνακας 9: Τεχνικά Χαρακτηριστικά βοηθητικών μηχανών των πλοίων .....	54

# Πίνακας Εικόνων

---

Εικόνα 1: Κατανάλωση Ενέργειας ανά τύπο πηγής ενέργειας (ποσοστό) .....	2
Εικόνα 2: Λιμάνι Αμβούργου .....	3
Εικόνα 3: Ποσοστό Κατανάλωσης από διάφορα φορτία του λιμένα .....	9
Εικόνα 4: Ποσοστό εμπορευματοκιβωτίων τριών διαφορετικών τύπων στους λιμένες9	
Εικόνα 5: Κατανάλωση Ενέργειας (σε kWh) για κάθε TEU εμπορευματοκιβωτίου για κάθε πηγή παροχής ενέργειας.....	10
Εικόνα 6: Ροή αέρα εντός του εμπορευματοκιβωτίου.....	11
Εικόνα 7: Κύκλος λειτουργίας ψύξης εντός του εμπορευματοκιβωτίου.....	12
Εικόνα 8: Επισήμανση εξοπλισμού του εμπορευματοκιβωτίου και λειτουργία κατά τη ροή αέρα.....	13
Εικόνα 9: Ροή ενέργειας μεταξύ συνδεδεμένων ηλεκτρικών οχημάτων και ηλεκτρικού δικτύου του λιμένα.....	15
Εικόνα 10: Διαδικασία φόρτισης μπαταρίας Λιθίου .....	16
Εικόνα 11: Διαδικασία Επικοινωνίας μεταξύ του διαχειριστή, των εισερχόμενων και των σταθμευμένων ηλεκτρικών οχημάτων .....	18
Εικόνα 12: Μόνιμες παροχές ηλεκτρικής ενέργειας για ψύξη των εμπορευματοκιβωτίων στο κατάστρωμα πλοίου .....	21
Εικόνα 13: Διαδικασία ψύξης εμπορευματοκιβωτίων εντός του πλοίου .....	22
Εικόνα 14: Περιγραφή Συστήματος Παροχής Ηλεκτρικής Ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο του λιμένα στα πλοία κατά τον ελλιμενισμό τους .....	23
Εικόνα 15: Τύποι γερανών που χρησιμοποιούνται στις αποβάθρες για το φόρτωμα και ξεφόρτωμα εμπορευματοκιβωτίων από και προς τα πλοία .....	27
Εικόνα 16: Γερανοί αποβάθρας τύπου RMG .....	28
Εικόνα 17: Γερανοί αποβάθρας τύπου ASC.....	28
Εικόνα 18: Προφίλ κατανάλωσης ισχύος στους γερανούς εναλλασσόμενου ρεύματος .....	31
Εικόνα 19: Προφίλ κατανάλωσης ισχύος στους γερανούς συνεχούς ρεύματος.....	31
Εικόνα 20: Αυτόνομος Πράκτορας και το Περιβάλλον του .....	34
Εικόνα 21: Οργάνωση ενός πολυπρακτορικού συστήματος .....	37

Εικόνα 22: Βασικά παραδείγματα επικοινωνίας: a) ένας με ένα, b) εκπομπή μηνύματος σε όλους τους πράκτορες, c) εκπομπή μηνύματος σε πολλούς πράκτορες συγκεκριμένης ομάδας, d) επικοινωνία μεταξύ των ενδιαφερόμενων ομάδων.....	40
Εικόνα 23: Σχεδιάγραμμα του συστήματος MAS που αναπτύχθηκε για τον εξεταζόμενο λιμένα.....	43
Εικόνα 24: Διαδικασία Επικοινωνίας μεταξύ των πρακτόρων του συστήματος MAS που αναπτύχθηκε .....	46
Εικόνα 25: Ηλεκτρικό σύστημα πλοίου με την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο του λιμένα.....	50
Εικόνα 26: Φορτίο Περιβάλλουσας Περιοχής του Λιμένα .....	55
Εικόνα 27: Κατανάλωση ισχύος της περιβάλλουσας περιοχής του λιμένα και της ζήτησης του λιμένα με χρήση του συστήματος MAS που δημιουργήθηκε και χωρίς αυτό.....	55
Εικόνα 28: Διακύμανση της τιμής της εικονικής ενέργειας κατά τους τέσσερις γύρους διαπραγματεύσεων.....	56
Εικόνα 29: Κατανάλωση ισχύος λιμένα σε 24ωρη μέτρηση με τη χρήση του συστήματος MAS και χωρίς αυτό .....	57
Εικόνα 30: Συνολική ζήτηση ισχύος από τα πλοία και ποσά ισχύος που ανταλλάσσονται μεταξύ των πλοίων και του ηλεκτρικού δικτύου του λιμένα .....	58
Εικόνα 31: Κατανάλωση εμπορευματοκιβωτίων για ψύξη των προϊόντων .....	59
Εικόνα 32: Προφίλ κατανάλωσης των ηλεκτρικών συνδεδεμένων οχημάτων στο ηλεκτρικό δίκτυο του λιμένα .....	59
Εικόνα 33: Διακύμανση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια της ημέρας.....	60
Εικόνα 34: Μέση Διακύμανση θερμοκρασίας εντός των εμπορευματοκιβωτίων με 5 διαφορετικά προϊόντα με χρήση του συστήματος MAS που αναπτύχθηκε .....	61
Εικόνα 35: Μέση Διακύμανση θερμοκρασίας εντός των εμπορευματοκιβωτίων με 5 διαφορετικά προϊόντα χωρίς τη χρήση πολυπρακτορικού συστήματος.....	61
Εικόνα 36: Μέση διακύμανση θερμοκρασίας εντός των εμπορευματοκιβωτίων με 9 διαφορετικά προϊόντα με χρήση του συστήματος MAS που αναπτύχθηκε .....	62
Εικόνα 37: Μέση διακύμανση θερμοκρασίας εντός των εμπορευματοκιβωτίων με 9 διαφορετικά προϊόντα χωρίς τη χρήση του συστήματος MAS που αναπτύχθηκε .....	63

Εικόνα 38: Μέση διακύμανση θερμοκρασίας εντός των εμπορευματοκιβωτίων με <b>5</b> διαφορετικά προϊόντα με χρήση του συστήματος MAS που αναπτύχθηκε .....	63
Εικόνα 39: Μέση διακύμανση θερμοκρασίας εντός των εμπορευματοκιβωτίων με <b>5</b> διαφορετικά προϊόντα χωρίς τη χρήση του συστήματος MAS που αναπτύχθηκε .....	64
Εικόνα 40: Μέση διακύμανση θερμοκρασίας εντός των εμπορευματοκιβωτίων με <b>3</b> διαφορετικά προϊόντα με τη χρήση του συστήματος MAS και χωρίς αυτό.....	64
Εικόνα 41: Μέση διακύμανση θερμοκρασίας εντός των εμπορευματοκιβωτίων με <b>3</b> διαφορετικά προϊόντα με τη χρήση του συστήματος MAS και χωρίς αυτό.....	65

---

# 1.Εισαγωγή

---

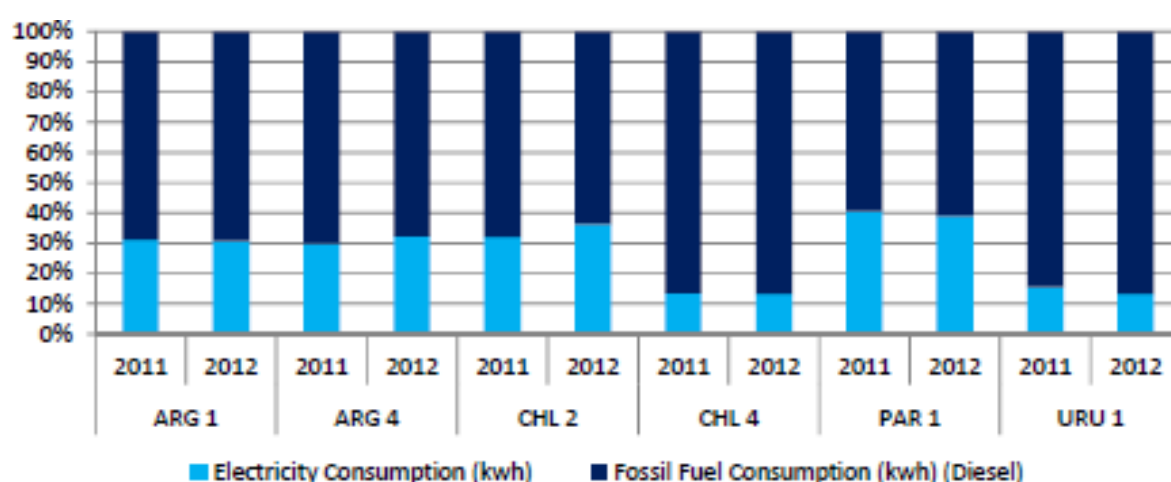
Η ναυτιλία αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην παγκόσμια οικονομία, καθώς περισσότερο από το 90% των προϊόντων παγκοσμίως μεταφέρεται μέσω θαλάσσης [1]. Παρά το γεγονός ότι οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα είναι χαμηλότερες με τη χρήση της ναυτιλίας σε σχέση με τις αεροπορικές μεταφορές, οι παγκόσμιες εκπομπές CO<sub>2</sub> λόγω αυτής, αποτελούν το 2.5% των παγκόσμιων εκπομπών και αναμένεται να αυξηθούν κατά 50 – 100% μέχρι το 2050 εάν δεν ληφθούν μέτρα [2]. Ένα μέρος των εκπομπών αυτών οφείλεται στις εκπομπές από τις διάφορες διεργασίες που εκτελούνται στα λιμάνια (π.χ. φόρτωμα και ξεφόρτωμα εμπορευματοκιβωτίων από τα πλοία). Παρόλο που οι λιμένες δεν συνδέονται άμεσα με τις πηγές εκπομπών μπορούν να ελεγχθούν έμμεσα με τον κατάλληλο έλεγχο των πηγών κατανάλωσης (π.χ. μείωση κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας) .

## 1.1 Ενεργειακή Κατανάλωση Μεγάλων Εμπορικών Λιμένων

Οι μεγάλοι λιμένες και οι περιβάλλουσες περιοχές αποτελούν σημαντικούς ενεργειακούς καταναλωτές και παράγοντες ρύπανσης, καθώς περιλαμβάνουν πολλές διαδικασίες με υψηλή ενεργειακή ζήτηση, βιομηχανίες και εφοδιαστικές αλυσίδες. Οι μεγάλοι ευρωπαϊκοί λιμένες αντιμετωπίζουν σημαντικές προκλήσεις για την πραγματοποίηση των κλιματικών στόχων 20 – 20 – 20 με χρήση μέτρων που οδηγούν στην αποδοτική και φιλική προς το περιβάλλον λειτουργία τους [3]. Η πλήρης ηλεκτροδότηση των μελλοντικών λιμένων αποτελεί μια ελπιδοφόρα λύση, όχι μόνο για τον περιορισμό των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου, αλλά και για τη βελτίωση της αποδοτικότητάς τους [4]. Εντούτοις, η αύξηση της ηλεκτροδότησης ενός λιμένα θέτει υψηλές απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια στο τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο διανομής. Τα διαφορετικά λειτουργικά χαρακτηριστικά των φορτίων του λιμένα σε συνδυασμό με την ανάγκη μετρίασης των προβλημάτων ένταξής τους στο ηλεκτρικό δίκτυο και της μείωσης των εκπομπών άνθρακα καθιστούν την έξυπνη διαχείριση της ενέργειας ως την πιο αποτελεσματική λύση.

Τα ηλεκτρικά φορτία στις περιοχές των λιμανιών βρίσκονται σε μικρές αποστάσεις μεταξύ τους και μπορούν να διασυνδεθούν εύκολα με σχετικά μικρής κλίμακας δίκτυα επικοινωνίας [5,6]. Επομένως, τα έξυπνα ενεργειακά δίκτυα με χαμηλό κόστος

μπορούν να εφαρμοστούν στα ηλεκτρικά συστήματα των λιμένων στο άμεσο μέλλον. Τα έξυπνα δίκτυα μπορούν να παρέχουν λύσεις για την αποδοτική λειτουργία των εγκαταστάσεων αποθήκευσης ενέργειας, όπως την αποθήκευση ενέργειας από ηλεκτρική σε θερμική (ψύξη εμπορευματοκιβωτίων), την αποθήκευση ενέργειας σε χώρους στάθμευσης ηλεκτρικών οχημάτων (EVs) (φόρτιση μπαταριών) και σε άλλα εύελικτα φορτία του λιμένα και με χρήση της τοπικής παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές [7]. Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι τα μεγάλα λιμάνια έχουν τη δυνατότητα παραγωγής σημαντικού ποσού ηλεκτρικής ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές με τη χρήση του παράκτιου αέρα, της παλίρροιας, κ.λπ.



**Εικόνα 1: Κατανάλωση Ενέργειας ανά τύπο πηγής ενέργειας (ποσοστό)**

Πηγή: G. Wilmsmeier et.al., "Energy Consumption and Efficiency: Emerging Challenges from Reefer Trade in South American Container Terminals.", ISU Corp., Issue N. 329, Number 1, 2014. Available: <http://www.cepal.org/en/publications/37282-energy-consumption-and-efficiency-emerging-challenges-reefer-trade-south-american>.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1 τέσσερα μεγάλα εμπορικά λιμάνια και σιδηροδρομικοί σταθμοί στις περιβάλλουσες περιοχές χρησιμοποιούν σε μεγάλο ποσοστό ορυκτό καύσιμο για την παραγωγή της απαιτούμενης ενέργειας αυξάνοντας τις τοπικές εκπομπές άνθρακα [8].

Κύριος σκοπός της εργασίας αυτής είναι η βελτιστοποίηση της λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος μιας εκτεταμένης περιοχής του λιμένα. Το προτεινόμενο σύστημα διαχείρισης ενέργειας του λιμανιού έχει ως στόχο να εξασφαλίσει τη μαζική ενεργειακή αποθήκευση ενέργειας κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης και την χρήση αυτής κατά τις ώρες αιχμής, όπου αυτό είναι δυνατό.

## 1.2 Αντικειμενικός Σκοπός

Οι εκπομπές των αερίων που οφείλονται για το φαινόμενο του θερμοκηπίου αυξάνονται συνεχώς, καθώς ανερχόμενες οικονομίες όπως η Κίνα βασίζονται στην καύση λιγνίτη για την παραγωγή του μεγαλύτερου ποσοστού ενέργειας. Έτσι, εκτός από τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από την υπερβολική καύση λιγνίτη εμφανίζονται και επιπτώσεις στην υγεία των κατοίκων στις περιοχές παραγωγής ενέργειας ή ακόμα και στις μεγάλες πόλεις (π.χ. νέφος Πεκίνου). Τα μεγάλα εμπορικά λιμάνια και οι περιβάλλοντες περιοχές στις οποίες συνήθως βρίσκονται και εμπορικοί σιδηροδρομικοί σταθμοί, αποτελούν υψηλούς ενεργειακούς καταναλωτές με αποτέλεσμα να υπάρχουν και υψηλά ποσοστά αερίων ρύπων στις περιοχές αυτές.



Εικόνα 2: Λιμάνι Αμβούργου

Πηγή: Hamburg Marketing GmbH, 'Energy Transition in the Port: an Economic Success Story', 2016.

Λόγω των προβλημάτων που δημιουργούνται, πολλά κράτη επιβάλλουν χρηματικά πρόστιμα ως μέτρο καταπολέμησης στις εταιρείες ή και στα κράτη κυρίως λόγω των ρύπων που συνεχώς αυξάνονται. Βέβαια, όπως έχει αποδειχτεί, το μέτρο αυτό δεν είναι αρκετό για την καταπολέμηση του προβλήματος και έτσι για παράδειγμα στην Ευρωπαϊκή Ένωση τέθηκε ο στόχος 20 – 20 – 20 (20% λιγότερες εκπομπές CO<sub>2</sub>, 20% εξοικονόμηση ενέργειας και 20% παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές). Επιπλέον, η αντικατάσταση όλων των οχημάτων εσωτερικής καύσης σε ηλεκτρικά οχήματα επιτρέπει στα λιμάνια να επιτύχουν τον στόχο αυτό ευκολότερα με τις κατάλληλες υποδομές, την αξιοποίηση των τοπικών ΑΠΕ (π.χ. παράκτιος αέρας) και τον κατάλληλο έλεγχο στις πηγές κατανάλωσης ενέργειας.

Στόχος της εργασίας αυτής, είναι η ανάπτυξη ενός μοντέλου ικανού να μετατοπίζει το φορτίο κατά τις ώρες υψηλής ζήτησης στις ώρες χαμηλής ζήτησης με την ταυτόχρονη εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του ηλεκτρικού δικτύου αλλά και την διεκπεραίωση όλων των απαιτούμενων διαδικασιών. Το μοντέλο θα ελέγχει την λειτουργία των εμπορευματοκιβωτίων ελεγχόμενης θερμοκρασίας, την φόρτιση και εκφόρτιση όλων των ηλεκτρικών οχημάτων που βρίσκονται στις περιοχές στάθμευσης εντός του λιμένα και την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στα πλοία κατά τον ελλιμενισμό τους με τον ταυτόχρονο έλεγχο της λειτουργίας των βοηθητικών μηχανών τους.

### 1.3 Δομή Εργασίας.

Η εργασία αποτελείται από 6 ενότητες:

- Στην ενότητα που ακολουθεί αναφέρονται διάφορες μορφές ελέγχου που έχουν πραγματοποιηθεί από ερευνητές μέχρι σήμερα στα επιμέρους τμήματα ενός λιμένα.
- Το ηλεκτρικό σύστημα του λιμένα όπως εξετάστηκε στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται και αναλύεται στην Ενότητα 3. Στην Ενότητα 3 επιπλέον αναλύονται και τα τμήματα του λιμένα στα οποία θα βελτιστοποιηθεί η λειτουργία τους.
- Στη συνέχεια, στην Ενότητα 4 παρουσιάζεται το πολυπρακτορικό σύστημα που αναπτύχθηκε για τον έλεγχο του λιμένα καθώς και τα προβλήματα βελτιστοποίησης και οι διεργασίες που εκτελεί ο επιμέρους πράκτορας.
- Έπειτα, στην Ενότητα 5 παρουσιάζεται η υπόθεση που θα βελτιστοποιήσει το σύστημα, καθώς επίσης αναλύονται τα αποτελέσματα της μεθόδου και συγκρίνονται με άλλη μορφή ελέγχου.
- Τέλος, στην Ενότητα 6 παραθέτονται τα πλεονεκτήματα της μεθόδου και τα συμπεράσματα και οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

## 2.Σχετική Βιβλιογραφία

---

### 2.1 Γερανοί Μετακίνησης Εμπορευματοκιβωτίων

Αρκετές μέθοδοι έχουν εφαρμοστεί για τη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> που οφείλονται στους λιμένες. Ένας τρόπος να μειωθεί η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας του λιμένα είναι ο περιορισμός της ταυτόχρονης χρήσης γερανών για τη μετακίνηση εμπορευματοκιβωτίων κατά τις ώρες αιχμής [9]. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, ορισμένοι γερανοί πρέπει να παραμένουν ανενεργοί έως ότου διεκπεραιωθεί η διαδικασία που εκτελείται από άλλο γερανό και να αδρανοποιηθεί προσωρινά έτσι ώστε να συνεχίσει ή να ξεκινήσει τη δραστηριότητα ο γερανός εκείνος που έχει προτεραιότητα βάσει προγράμματος. Η μέθοδος αυτή επιτυγχάνει σημαντική μείωση στην κατανάλωση ενέργειας αλλά και στην εκπομπή ρύπων εάν χρησιμοποιείται η ντιζελογεννήτρια που είναι εφοδιασμένοι οι γερανοί. Βέβαια, ο περιορισμός στη χρήση των γερανών μπορεί να οδηγήσει σε εκθετική αύξηση του χρόνου που απαιτείται για την ολοκλήρωση φόρτωσης ή εκφόρτωσης ενός πλοίου.

### 2.2 Πολυπρακτορικό Σύστημα Διαχείρισης Ηλεκτρικών Οχημάτων

Μία άλλη εναλλακτική μέθοδος που προτάθηκε από τους Καρφόπουλο και Χατζηαργυρίου [10] είναι η χρήση πολυπρακτορικών συστημάτων (Multi-agent systems (MAS)) σε χώρους στάθμευσης ηλεκτρικών οχημάτων για την ελεγχόμενη φόρτιση και εκφόρτισή τους. Τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να φορτίζουν κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης όπου το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλό και να τροφοδοτούν το δίκτυο με ηλεκτρική ενέργεια κατά τις ώρες αιχμής. Η μέθοδος αυτή δε χρησιμοποιήθηκε σε λιμένα αλλά σε περιοχές με χώρους στάθμευσης ηλεκτρικών οχημάτων. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί και στα λιμάνια καθώς ένας μεγάλος αριθμός των οχημάτων που χρησιμοποιούνται εντός του λιμένα είναι ηλεκτρικής φύσεως (π.χ. ανυψωτικά μηχανήματα, λεωφορεία, αυτοκίνητα κ.λπ.). Το πλεονέκτημα που έχουν οι μεγάλοι λιμένες, είναι ο μεγάλος αχρησιμοποίητος χώρος που μπορεί να μετατραπεί σε χώρο στάθμευσης τόσο των ηλεκτρικών οχημάτων του λιμένα όσο και των οχημάτων που χρησιμοποιούνται στις περιβάλλουσες περιοχές. Έτσι, στις ώρες υψηλής ζήτησης τα συνδεδεμένα ηλεκτρικά οχήματα θα μπορούν να παρέχουν ισχύ στο δίκτυο εξασφαλίζοντας έτσι, τη σταθερότητα του δικτύου αλλά

και τη μείωση κατανάλωσης και ρύπων. Στην παρούσα εργασία η μέθοδος αυτή αποτελεί σημαντικό παράγοντα στη βέλτιστη ενεργειακή κατανάλωση και στη σταθερότητα του δικτύου.

## 2.3 Cold Ironing

Τα τελευταία χρόνια κατά τον ελλιμενισμό των πλοίων γίνεται η σύνδεση τους με το ηλεκτρικό δίκτυο του λιμένα. Η μέθοδος αυτή, γνωστή ως “Cold Ironing” έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση ρύπων και της κατανάλωσης ενέργειας κατά τον ελλιμενισμό των πλοίων. Έτσι, όλες οι απαραίτητες διαδικασίες (π.χ. διατήρηση θερμοκρασίας εμπορευματοκιβωτίων, φόρτωμα και ξεφόρτωμα του πλοίου, κ.λπ.) γίνονται με τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας που τροφοδοτείται από το λιμάνι και με τη μερική ή μηδενική χρήση των βοηθητικών γεννητριών του πλοίου που χρησιμοποιούν χαμηλής ποιότητας καύσιμο. Στην εργασία αυτή, τα πλοία κατά τον ελλιμενισμό τους συνδέονται στο ηλεκτρικό δίκτυο και διατηρούν παράλληλα σε χρήση τις βοηθητικές τους μηχανές που όμως η χρήση τους ελέγχεται από το διαχειριστή του λιμένα. Έτσι, όταν το δίκτυο υπερφορτώνεται, τα πλοία συνεισφέρουν με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ταυτόχρονα εξασφαλίζονται όλες οι διαδικασίες του πλοίου που απαιτούν ποιοτική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. σταθερή συχνότητα και τάση).

## 2.4 Εμπορευματοκιβώτια ελεγχόμενης θερμοκρασίας (Reefers)

Μία επιπλέον μέθοδος για τη μείωση της κατανάλωσης είναι η αποτελεσματική διαχείριση ψύξης των εμπορευματοκιβωτίων. Το 2012 τα εμπορευματοκιβώτια ελεγχόμενης θερμοκρασίας (reefers) στο λιμάνι της Αμβέρσας που ήταν συνδεδεμένα στο δίκτυο ήταν 2900 ημερησίως [11]. Περίπου το 50% εξ αυτών βρίσκονταν σε λειτουργία ψύξης για τη διατήρηση των προϊόντων στην κατάλληλη θερμοκρασία καθιστώντας τα υπόλοιπα 1450 ως ευέλικτα φορτία στα οποία μπορεί να αποθηκευτεί ενέργεια ψύχοντας το εσωτερικό τους εάν η ζήτηση είναι χαμηλή και η εσωτερική τους θερμοκρασία επιτρέπεται να μεταβληθεί. Έτσι, τα εμπορευματοκιβώτια αποτελούν σημαντική μεταβλητή στο πρόβλημα διαχείρισης ενέργειας του λιμένα καθώς μπορεί πολύ εύκολα να προβλεφθεί η μείωση και η αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό τους παρέχοντας τη δυνατότητα της ελεγχόμενης σύνδεσης και αποσύνδεσης τους ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου.

## 3. Ηλεκτρικό Σύστημα Λιμένα

---

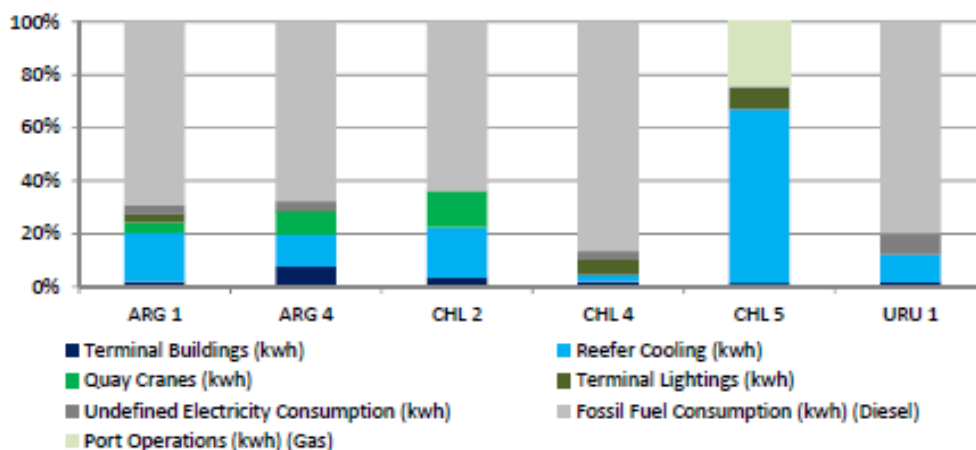
Το ηλεκτρικό σύστημα του λιμένα που εξετάζεται στην παρούσα εργασία αποτελείται από ποικίλα ευέλικτα και μη ευέλικτα φορτία με διαφορετικά λειτουργικά χαρακτηριστικά και περιορισμούς. Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μέγιστη αξιοποίηση της ευελιξίας των φορτίων χωρίς να παραβιάζονται οι περιορισμοί τους αλλά και η αποτελεσματική χρήση τους με την ταυτόχρονη ύπαρξη μη ευέλικτων φορτίων, ώστε να επιτευχθεί μείωση της κατανάλωσης ενέργειας εξασφαλίζοντας τη σταθερότητα του δικτύου και την εύρυθμη λειτουργία των απαραίτητων διαδικασιών του λιμένα.

### 3.1 Ευέλικτα φορτία

#### 3.1.1 Εμπορευματοκιβώτια ελεγχόμενης θερμοκρασίας (Reefers)

Ένα μεγάλο μέρος των θαλάσσιων μεταφορών προϊόντων γίνεται με τη χρήση εμπορευματοκιβωτίων ψύξης (reefers). Τα ψυγεία καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια ώστε να ψύξουν ή να καταψύξουν τα προϊόντα που εμπεριέχονται. Η απαραίτητη ενέργεια για να διατηρηθεί το περιεχόμενο των ψυγείων στην κατάλληλη θερμοκρασία αποτελεί ένα σημαντικό μέρος της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης του λιμένα [12]. Βέβαια, τα ψυγεία αποτελούν ένα αρκετά ευέλικτο φορτίο το οποίο μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στην αποδοτικότητα του συστήματος.

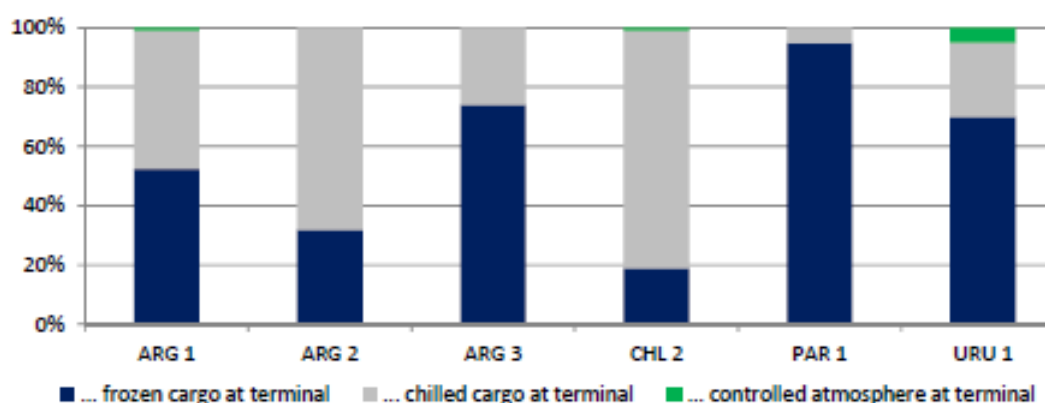
Τα προϊόντα εντός του εμπορευματοκιβωτίου χωρίζονται σε τρεις υποκατηγορίες (ψύξης, κατάψυξης και ελεγχόμενης ατμόσφαιρας) και θα πρέπει να αντιμετωπιστούν κατάλληλα από το διαχειριστή ώστε να εξασφαλίζεται η απαραίτητη παροχή ενέργειας για την διατήρηση της θερμοκρασίας εντός των αποδεκτών ορίων. Το φορτίο που απαιτείται για την ψύξη των εμπορευματοκιβωτίων φτάνει μέχρι και το 40% της συνολικής κατανάλωσης σε μεγάλους λιμένες και εμπορικούς σιδηροδρομικούς σταθμούς [8]. Στην Εικόνα 3 παρουσιάζονται οι πηγές και το ποσοστό κατανάλωσης ενέργειας σε τέσσερα μεγάλα εμπορικά λιμάνια και σταθμούς (Αργεντινής, Ουρουγουάης, Παραγουάης και Χιλής).



**Εικόνα 3: Ποσοστό Κατανάλωσης από διάφορα φορτία του λιμένα**

Πηγή: G. Wilmsmeier et.al., "Energy Consumption and Efficiency: Emerging Challenges from Reefer Trade in South American Container Terminals.", ISU Corp., Issue N. 329, Number 1, 2014. Available: <http://www.cepal.org/en/publications/37282-energy-consumption-and-efficiency-emerging-challenges-reefer-trade-south-american>.

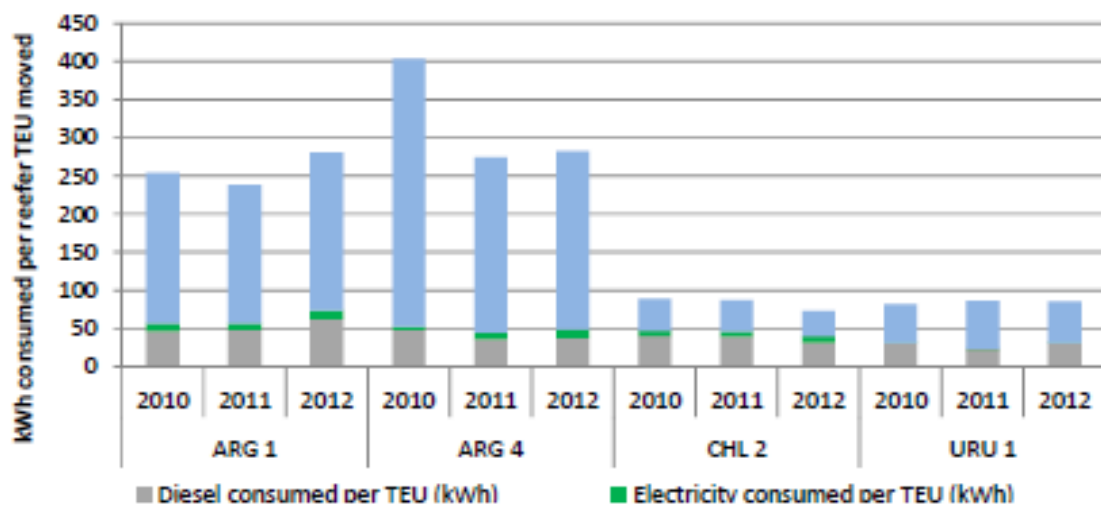
Όπως φαίνεται και στο παραπάνω διάγραμμα τα εμπορευματοκιβώτια ψύξης αποτελούν υψηλούς ενεργειακούς καταναλωτές. Η έξυπνη διαχείριση της ενέργειας που καταναλώνεται από τα εμπορευματοκιβώτια αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα στην τοπική μείωση των εκπομπών άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Επιπλέον, όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 4, τα εμπορευματοκιβώτια θα πρέπει να ταυτοποιηθούν ανάλογα με το προϊόν που περιέχουν και να αντιμετωπιστούν με διαφορετική στρατηγική.



**Εικόνα 4: Ποσοστό εμπορευματοκιβωτίων τριών διαφορετικών τύπων στους λιμένες**

Πηγή: G. Wilmsmeier et.al., "Energy Consumption and Efficiency: Emerging Challenges from Reefer Trade in South American Container Terminals.", ISU Corp., Issue N. 329, Number 1, 2014. Available: <http://www.cepal.org/en/publications/37282-energy-consumption-and-efficiency-emerging-challenges-reefer-trade-south-american>.

Στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται η ενεργειακή κατανάλωση των εμπορευματοκιβωτίων καθώς και το ποσοστό παραγωγής αυτής από ορυκτό καύσιμο (ντίζελ). Το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας παρέχεται από γεννήτριες ντίζελ. Έτσι είναι εμφανής η ανάγκη για τη μείωση χρήσης των γεννητριών ντίζελ για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται καθώς είναι αρκετά ρυπογόνες και θα πρέπει τα εμπορευματοκιβώτια να συνδέονται στο ηλεκτρικό δίκτυο του λιμένα. Η σύνδεση αυτή όχι μόνο θα μειώσει τις εκπομπές άνθρακα εντός του λιμένα, αλλά δίνεται και η δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας σε μορφή ψύξης μειώνοντας έτσι τη ζήτηση ενέργειας κατά τις ώρες αιχμής.

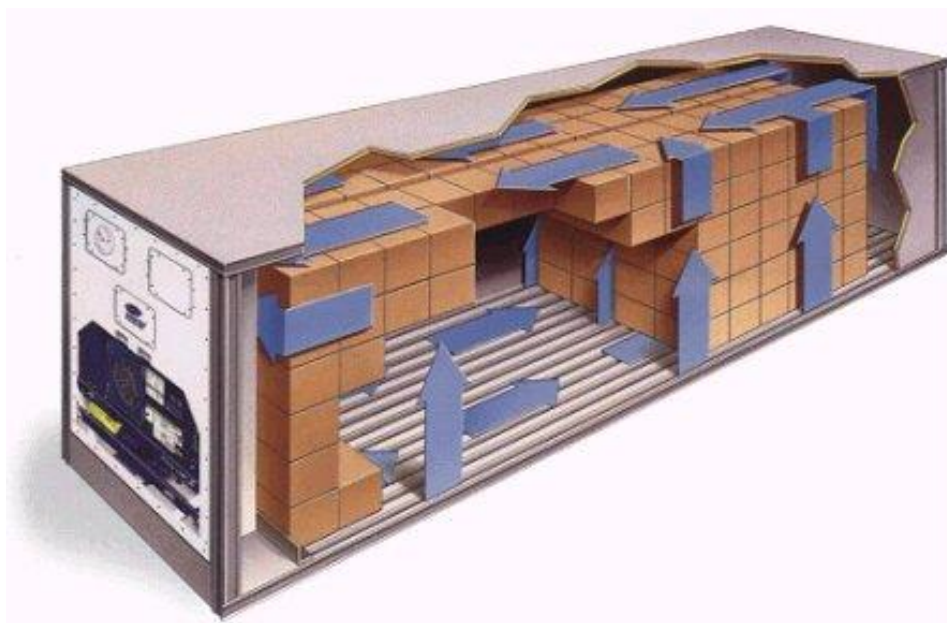


**Εικόνα 5: Κατανάλωση Ενέργειας (σε kWh) για κάθε TEU εμπορευματοκιβωτίου για κάθε πηγή παροχής ενέργειας**

Πηγή: G. Wilmsmeier et.al., "Energy Consumption and Efficiency: Emerging Challenges from Reefer Trade in South American Container Terminals.", ISU Corp., Issue N. 329, Number 1, 2014. Available: <http://www.cepal.org/en/publications/37282-energy-consumption-and-efficiency-emerging-challenges-reefer-trade-south-american>.

### Ροή Αέρα Εντός του Εμπορευματοκιβωτίου

Τα εμπορευματοκιβώτια ελεγχόμενης θερμοκρασίας ψύχονται με την παροχή κρύου αέρα στο κιγκλίδωμα που βρίσκεται κάτω από το φορτίο (η βάση στην οποία τοποθετείται το φορτίο) [13]. Στη συνέχεια, ο αέρας περνά μέσω του πατώματος και ρέει μέσα και γύρω από το φορτίο και τελικά φτάνει στην οροφή του εμπορευματοκιβωτίου όπου και εξάγεται στη μονάδα ψύξης. Ο ζεστός πλέον αέρας δροσίζεται και επιστρέφει ξανά στο κιγκλίδωμα. Στην Εικόνα 6 παρουσιάζεται η ροή του αέρα μέσα σ' ένα εμπορευματοκιβώτιο.

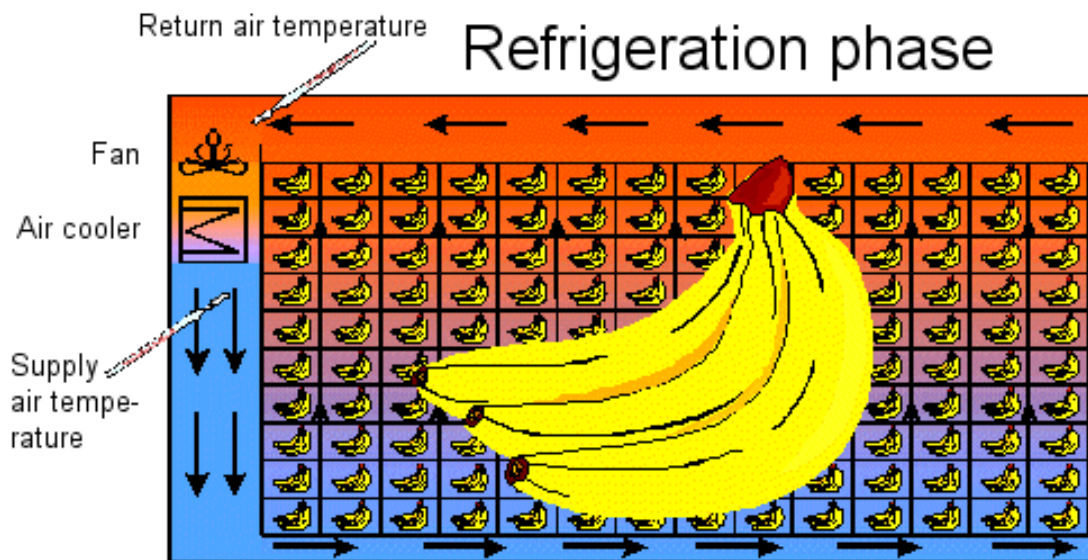


**Εικόνα 6: Ροή αέρα εντός του εμπορευματοκιβωτίου**

Πηγή: German Insurance Association (2016, October). *Container Handbook*[Online]. Available: [https://www.containerhandbuch.de/chb\\_e/wild/index.html](https://www.containerhandbuch.de/chb_e/wild/index.html)

Η θερμοκρασία του αέρα όταν επιστρέφει στη μονάδα ψύξης είναι αυξημένη κατά  $0.5 - 3^{\circ}\text{C}$ . Η θερμότητα αυτή, οφείλεται στη διαφορά θερμοκρασίας του περιβάλλοντος και του εσωτερικού του εμπορευματοκιβωτίου, στην ψύξη των προϊόντων εντός του εμπορευματοκιβωτίου και στην “αναπνοή” φρούτων και λαχανικών εάν υπάρχουν [13].

Κατά τη λειτουργία ψύξης σε χαμηλή θερμοκρασία, οι πιο κοινές μονάδες ψύξης ελέγχουν την επιστροφή θερμοκρασίας χρησιμοποιώντας μια μέθοδο εναλλαγής λειτουργίας δύο σημείων. Όταν η θερμοκρασία του αέρα επιστροφής είναι πάνω από την ονομαστική τότε η μονάδα ψύξης ψύχει σε πλήρη ισχύ. Μόλις επιτευχθεί η ονομαστική θερμοκρασία, η μονάδα ψύξης σταματά τη λειτουργία της και η κυκλοφορία του αέρα πραγματοποιείται μόνο με χρήση των ανεμιστήρων. Έπειτα, όταν η θερμοκρασία επιστροφής αυξηθεί περίπου  $0.5^{\circ}\text{C}$  πάνω από την ονομαστική, τότε η μονάδα ψύξης μπαίνει σε λειτουργία και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Η θερμοκρασία του αέρα που εφοδιάζει η μονάδα ψύξης το εμπορευματοκιβώτιο, θα πρέπει να είναι χαμηλότερη από την ονομαστική.



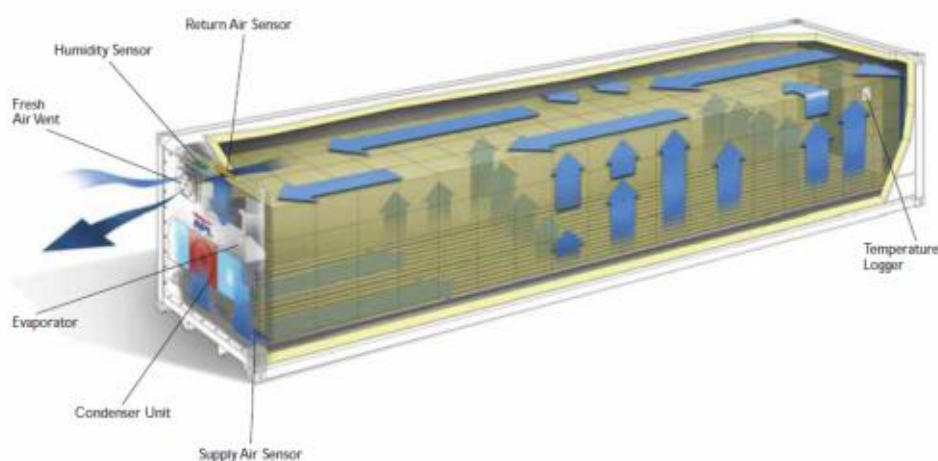
**Εικόνα 7: Κύκλος λειτουργίας ψύξης εντός του εμπορευματοκιβωτίου**

Πηγή: German Insurance Association (2016, October). *Container Handbook*[Online]. Available:

[https://www.containerhandbuch.de/chb\\_e/wild/index.html](https://www.containerhandbuch.de/chb_e/wild/index.html)

Η μέγιστη κατανάλωση ισχύος ενός τυπικού ψυγείου εμπορευματοκιβωτίου είναι περίπου  $10kW$ , ενώ η μέση ωριαία κατανάλωση ενέργειας είναι  $3 - 4 kWh$ .

- Μέγιστη Κατανάλωση  $10kW$
- Εύρος Θερμοκρασίας  $-25^{\circ}C/+25^{\circ}C$
- Μέση Ωριαία Κατανάλωση  $3 - 4 kWh$



**Εικόνα 8: Επισήμανση εξοπλισμού του εμπορευματοκιβωτίου και λειτουργία κατά τη ροή αέρα**

Πηγή: German Insurance Association (2016, October). Container Handbook[Online]. Available: [https://www.containerhandbuch.de/chb\\_e/wild/index.html](https://www.containerhandbuch.de/chb_e/wild/index.html)

Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη τη μέγιστη κατανάλωση ενός τυπικού ψυγείου και την υπόθεση ότι σε ένα λιμάνι βρίσκονται περίπου 1000 ψυγεία σε λειτουργία ψύξης, η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς ανέρχεται στα 10MW. Επιπλέον, μετρήσεις έχουν δείξει ότι σε κανονικές καιρικές συνθήκες ( $20^{\circ}C$ ) η εσωτερική θερμοκρασία ενός καλού μονωμένου εμπορευματοκιβωτίου αυξάνεται περίπου κατά  $1^{\circ}C$  σε 9 ώρες όταν δεν λειτουργεί [14,15]. Αυτό, καθιστά σαφές ότι τα ψυγεία είναι πολύ ευέλικτα φορτία που μπορούν εύκολα να μετατοπίσουν τη ζήτηση σε ενέργεια στο χρόνο.

Έτσι, όταν η ζήτηση είναι χαμηλή, τα εμπορευματοκιβώτια που μπορούν να τεθούν σε λειτουργία ψύξης ενεργοποιούνται, αποθηκεύοντας ενέργεια και ταυτόχρονα μειώνουν τη ζήτηση κατά τις ώρες αιχμής που δεν θα λειτουργούν. Βέβαια, η ευελιξία αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η αυξομείωση της θερμοκρασίας μπορεί εύκολα να υπολογιστεί για όλη τη διάρκεια της ημέρας. Επιπλέον, θα πρέπει

να σημειωθεί ότι σε καμία περίπτωση ανεξάρτητα από τη ζήτηση στο δίκτυο δεν θα πρέπει να παραβιαστούν τα όρια θερμοκρασίας στα οποία θα πρέπει να κυμαίνονται τα προϊόντα εντός του εμπορευματοκιβωτίου. Τέλος, με τη σωστή πρόβλεψη της θερμοκρασίας εντός των εμπορευματοκιβωτίων εξασφαλίζεται όχι μόνο η διατήρηση των προϊόντων εντός του εύρους θερμοκρασίας κατά τις ώρες υψηλής ζήτησης αλλά και κατά τις ώρες φόρτωσης και εκφόρτωσης των πλοίων. Στην παρούσα εργασία όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια αυτό επιτυγχάνεται με την ανάθεση ενός πράκτορα σε κάθε ψυγείο για τον έλεγχο της λειτουργίας του, ώστε να μετατοπίζεται η κατανάλωση ισχύος και ταυτόχρονα να διατηρείται η θερμοκρασία του φορτίου εντός αποδεκτών ορίων.

### **3.1.2 Συνδεδεμένα Ηλεκτρικά Οχήματα (PEVs)**

Η μαζική διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στο άμεσο μέλλον θα οδηγήσει στη μείωση των ρύπων που εκπέμπονται σε μεγάλες βιομηχανικές περιοχές. Ο σωστός προγραμματισμός αυτών και η εύρυθμη λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου που θα συνδέονται αποτελούν αντικείμενο μελέτης για πολλούς ερευνητές. Τα περισσότερα οχήματα που χρησιμοποιούνται στους λιμένες χρησιμοποιούν μηχανές εσωτερικής καύσης (π.χ. αυτοκίνητα, περνοφόρα, κ.λπ.) και θα πρέπει να αντικατασταθούν σε ηλεκτρικά οχήματα (EVs) συμβάλλοντας σημαντικά στη μείωση εκπομπής άνθρακα στο λιμάνι. Συνήθως, στα λιμάνια υπάρχει αρκετός αχρησιμοποίητος χώρος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως χώρος στάθμευσης των EVs, καθιστώντας δυνατή την συντονισμένη εκμετάλλευση της αποθηκευμένης ενέργειας των EVs μέσω ελεγχόμενης φόρτισης και εκφόρτισης αυτών [16]. Έτσι, τα ηλεκτρικά οχήματα μετατρέπονται σε ένα αρκετά ευέλικτο φορτίο στο σύστημα καθώς κατά τις ώρες αιχμής μπορούν να τροφοδοτούν το σύστημα με ενέργεια μέσω της ελεγχόμενης εκφόρτισης.



**Εικόνα 9: Ροή ενέργειας μεταξύ συνδεδεμένων ηλεκτρικών οχημάτων και ηλεκτρικού δικτύου του λιμένα**

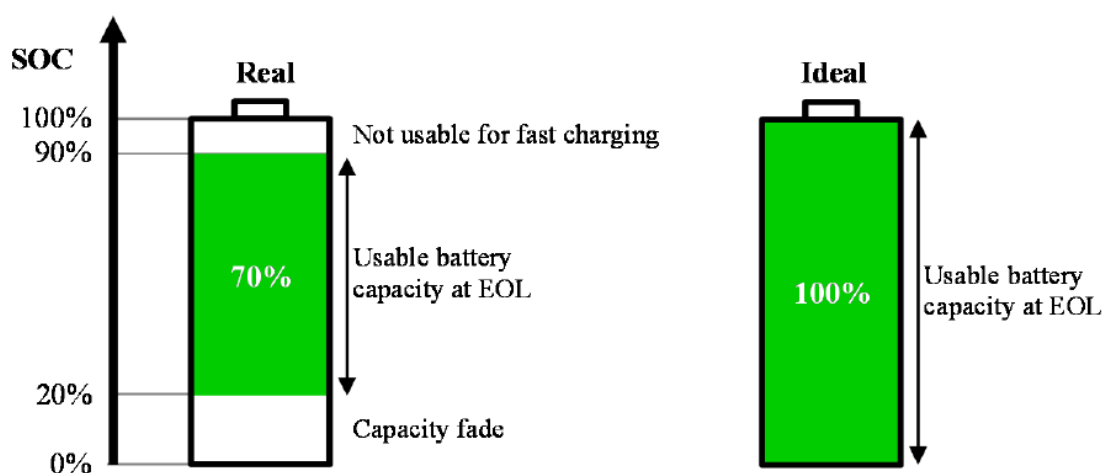
Πηγή: Sustainable Investment Group, “Electric Vehicle Charging Stations: Atlanta’s Friend or Foe?”, Copyright 2015, Sustainable Investment Group (SIG).

Ο διαχειριστής του λιμένα θα πρέπει να γνωρίζει τα χαρακτηριστικά μπαταρίας κάθε ηλεκτρικού οχήματος που συνδέεται στο δίκτυο, καθώς η ποσότητα ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί στην μπαταρία και η δυνατότητα να εκφορτιστεί παρέχοντας ενέργεια στο δίκτυο εξαρτώνται από ποικίλα χαρακτηριστικά [17]:

- Αναλογία ενέργειας-βάρους ή συγκεκριμένη ενέργεια (σταθμική ενεργειακή πυκνότητα), που απεικονίζει το ποσό ενέργειας που είναι διαθέσιμο σε βατώρες ανά κιλό της μπαταρίας ( $Wh/kg$ ).
- Αναλογία ενέργειας-όγκου ή ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα, που δηλώνει τον όγκο που απαιτείται για την παροχή της απαιτούμενης ενέργειας σε βατώρες ανά λίτρο ( $Wh/L$ ).
- Συγκεκριμένη ισχύς, η οποία απεικονίζει το ποσό ρεύματος που μπορεί να παρασχεθεί σε βατ ανά κιλό ( $W/kg$ ).
- Αναμενόμενη διάρκεια ζωής της μπαταρίας (τόσο ημερολογιακά όσο και σε μέγιστο αριθμό κύκλων φόρτισης).
- Χρόνος επαναφόρτισης της μπαταρίας και κατά πόσο είναι εφικτή η χρήση ταχείας φόρτισης.
- Διαχείριση θερμοκρασίας (ψύξη ή θέρμανση).
- Ασφάλεια μπαταριών κατά τη διάρκεια χρήσης (υπερθέρμανση).

Είναι σημαντικό ο διαχειριστής να γνωρίζει όσο το δυνατόν περισσότερα από τα παραπάνω χαρακτηριστικά για την αποφυγή εμφάνισης προβλημάτων τόσο στο ηλεκτρικό δίκτυο, όσο και στην εμφάνιση κινδύνου στο ανθρώπινο δυναμικό του λιμένα. Επιπλέον, δεδομένου ότι μια μπαταρία «γερνά» κατά τη χρήση της, η ικανότητα της για ελεγχόμενη φόρτιση και εκφόρτιση μειώνεται [18].

Η μείωση αυτή οφείλεται και στην ταχεία φόρτιση με την οποία μειώνεται το προσδόκιμο ζωής των μπαταριών εάν δεν είναι ελεγχόμενη. Στην Εικόνα 10 παρουσιάζεται μια μπαταρία λιθίου που χρησιμοποιείται στα περισσότερα ηλεκτρικά οχήματα [19,20].



**Εικόνα 10: Διαδικασία φόρτισης μπαταρίας Λιθίου**

Πηγή: M. Rogge, S. Wollny and D. U. Sauer. "Fast Charging Battery Buses for the Electrification of Urban Public Transport- A Feasibility Study Focusing on Charging Infrastructure and Energy Storage Requirements." *Energies*, 2015: 4587-4606.

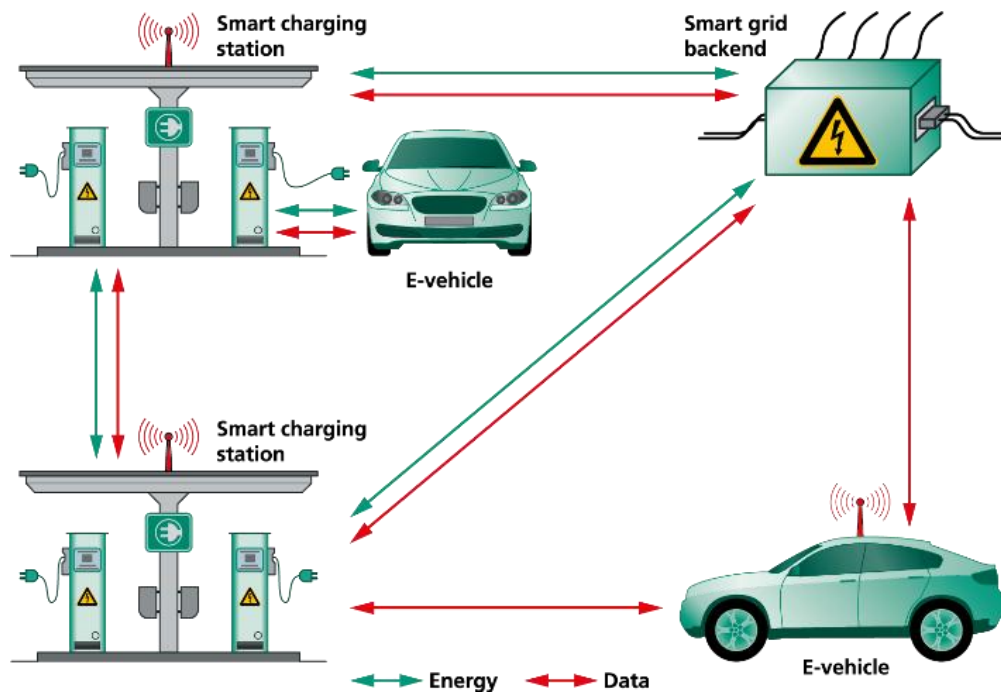
Οι μπαταρίες λιθίου είναι αρκετά ευαίσθητες στον τρόπο φόρτισης και εκφόρτισής τους. Ως εκ τούτου, ο διαχειριστής πρέπει να διασφαλίζει την ομαλή λειτουργία και τη μέγιστη αποδοτικότητα τόσο κατά την φόρτιση όσο και κατά την εκφόρτιση των μπαταριών ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη αποδοτικότητα του συστήματος του λιμένα [21,22].

Για τον έλεγχο της φόρτισης και εκφόρτισης των οχημάτων απαιτούνται οι κατάλληλες υποδομές επικοινωνίας. Η χρήση πολυπρακτορικών συστημάτων (MAS) είναι κατάλληλα για τον έλεγχο της κατάστασης των οχημάτων όπως προτάθηκε από τους Καρφόπουλο και Χατζηαργυρίου [10].

Προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη διαδικασία φόρτισης χωρίς να επηρεάζεται η λειτουργία του δικτύου, κάθε ηλεκτρικό όχημα θα πρέπει να μην λειτουργεί ανεξάρτητα αλλά να επικοινωνεί και να προσαρμόζεται στη μέση κατάσταση των υπόλοιπων οχημάτων που βρίσκονται εκείνη τη στιγμή στην περιοχή στάθμευσης. Η χαλαρή αυτή συσχέτιση που αναπτύσσεται μεταξύ των EVs επιτρέπει τον καθορισμό μίας σειράς εικονικών τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το κόστος φόρτισης [23,24]. Υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις, δημιουργείται μια τριγωνική ισότητα μεταξύ των απωλειών, του συντελεστή του φορτίου και τη διακύμανση του φορτίου στο δίκτυο διανομής [25]. Ελαχιστοποιώντας τη διακύμανση του φορτίου μπορεί ισοδύναμα να μεγιστοποιηθεί ο συντελεστής φορτίου και σύμφωνα με τον τύπο των Buller και Woodrow [26,27] η μεγιστοποίηση του συντελεστή του φορτίου οδηγεί στην ελαχιστοποίηση της απώλειας ενέργειας [25].

Η ανάπτυξη του πολυπρακτορικού συστήματος για τον έλεγχο των ηλεκτρικών οχημάτων αποτελείται από τρεις φάσεις (ανάλυση, σχέδιο και εφαρμογή) [28]. Κατά την ανάλυση, καθιερώνεται το περιβαλλοντικό μοντέλο, οι προκαταρκτικοί ρόλοι του κάθε πράκτορα, οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους και οι περιορισμοί. Όταν οι απαιτήσεις του συστήματος έχουν διαμορφωθεί, ο διαχειριστής καθορίζει λεπτομερώς το μοντέλο (κατηγορίες) του κάθε πράκτορα κατά τη διάρκεια της φάσης σχεδιασμού [29].

Κατά την εφαρμογή, τα πρότυπα από τις φάσεις ανάλυσης και σχεδιασμού χρησιμοποιούνται για να κωδικοποιηθεί το σύστημα .



**Εικόνα 11: Διαδικασία Επικοινωνίας μεταξύ του διαχειριστή, των εισερχόμενων και των σταθμευμένων ηλεκτρικών οχημάτων**

Πηγή: Metering & Smart Energy International, “Communication interface for EV energy management specified in Europe”, Copyright 2013, Metering & Smart Energy International.

Στην παρούσα εργασία, ένας πράκτορας τοποθετείται σε κάθε PEV για τον έλεγχο κατά τη φόρτιση και εκφόρτισή του, με στόχο τη μετατόπιση του φορτίου και την παροχή ενέργειας στο δίκτυο όταν αυτό κρίνεται απαραίτητο, χωρίς να παραβιάζονται οι τεχνικοί περιορισμοί των μπαταριών (π.χ. ταχεία φόρτιση).

### 3.1.3 Cold Ironing

Η ποσότητα ενέργειας που απαιτείται κατά τη διάρκεια ελλιμενισμού ενός πλοίου για την διεκπεραίωση διαφόρων λειτουργιών του (π.χ. φόρτωμα και ξεφόρτωμα εμπορευμάτων, λειτουργία ψυγείων κ.λπ.) καταλαμβάνει ένα σημαντικό ποσοστό επί της συνολικής κατανάλωσης του λιμένα. Μέχρι στιγμής, η απαιτούμενη ενέργεια παρέχεται από τις βοηθητικές μηχανές του πλοίου οι οποίες λειτουργούν με καύσιμα χαμηλού κόστους και ποιότητας με συνέπεια τις αυξανόμενες εκπομπές καυσαερίων. Ένας τρόπος για τη μείωση των εκπομπών από τα πλοία κατά τον ελλιμενισμό τους είναι η εκμετάλλευση της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας που βρίσκεται στους χώρους αγκυροβόλησης των πλοίων εντός του λιμένα, γνωστή και ως “cold ironing”[30-33]. Η μέθοδος “cold ironing” αναφέρεται στη σύνδεση του πλοίου στο ηλεκτρικό δίκτυο μέσω μιας παροχής ηλεκτρικής ενέργειας εντός του λιμένα με την προϋπόθεση ότι ο λιμένας έχει την υποδομή και πράσινη ενέργεια (π.χ. ανανεώσιμες πηγές) για να υποστηρίξει την απαιτούμενη ζήτηση [34-37].

Σε μεγάλα λιμάνια, όπως το λιμάνι του Λος Άντζελες, που φιλοξενεί περισσότερα από ένα κρουαζιερόπλοια ταυτόχρονα, η ζήτηση σε ηλεκτρική ενέργεια κυμαίνεται μεταξύ 8MW και 13MW για κάθε ένα κρουαζιερόπλοιο [38].

**Πίνακας 1: Εκπομπές Αερίων από τις βοηθητικές μηχανές των πλοίων**

Emissions (in g/kWh)	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	VOS	PM
Diesel Engines (2.7% S)	12.47	12.30	0.40	0.80
Diesel Engines (0.1% S)	11.80	0.46	0.40	0.30
Shore Power	0.35	0.46	0.02	0.03
Emissions (in g/kWh)	CO	CO <sup>2</sup>	CH <sub>4</sub>	N <sup>2</sup> O
Diesel Engine	0.9-1.3	690-720	0.004-0.01	0.031
Shore Power	0.0125	330	0.028	0.014
Reduction	99%	>50%	-	>50%

84

Πηγή: T.G. Papoutsoglou, “A Cold Ironing Study on Modern Ports, Implementation and Benefits Thriving for Worldwide Ports”, M.S. thesis, Dept. Naval Archit. & Marine Engin., National Tech. Univ. of Athens, Athens Greece. 2012.

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 1, η εφαρμογή της μεθόδου “cold ironing” μειώνει το κόστος και τις εκπομπές καυσαερίων αλλά ταυτόχρονα επηρεάζει την ποιότητα και την αξιοπιστία του συστήματος. Για παράδειγμα, τα λιμάνια που χρησιμοποιούνται από πολεμικά πλοία, η ηλεκτροδότηση του πλοίου γίνεται μέσω των βοηθητικών μηχανών για την παροχή της απαιτούμενης ενέργειας για την ναυσιπλοΐα και για τα οπλικά συστήματα, καθώς έτσι εξασφαλίζεται η ποιότητα της ενέργειας και είναι πιο αξιόπιστη σε σχέση με το ηλεκτρικό δίκτυο του λιμανιού [39]. Σε μικρά και απομονωμένα νησιά με μικρά αυτόνομα ηλεκτρικά συστήματα, η απαίτηση ενέργειας μεγάλων πλοίων (π.χ. κρουαζιερόπλοια) δεν μπορεί να παρασχεθεί πλήρως. Οι μεγάλες και απότομες διακυμάνσεις στο φορτίο ενός πλοίου μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στην ποιότητα και στην σταθερότητα του συστήματος. Στα περισσότερα λιμάνια η κατάλληλη ηλεκτρική υποδομή είναι συχνά ανεπαρκής και η τάση και η συχνότητα δεν είναι συμβατή μεταξύ των πλοίων και των λιμένων.

Το διάγραμμα ενεργειακής ροής από το δίκτυο μέχρι και τη διανομή του στο πλοίο παρουσιάζεται στη συνέχεια. Παρότι μπορεί να διαφέρει μερικώς, οι κύριες λειτουργίες παραμένουν ίδιες [38].

- Σύνδεση ρεύματος στο δίκτυο.
- Μετασχηματισμός της παραγόμενης τάσης σε τάση δικτύου διανομής.
- Μηχανισμός διανομής στο μετασχηματιστή ώστε να δημιουργηθεί το σημείο σύνδεσης με το λιμένα.
- Καλώδια και αγωγοί για μεταφορά ενέργειας στους μηχανισμούς διανομής.
- Μηχανισμοί διανομής κοντά στο αγκυροβόλιο για διανομή και παροχή ενέργειας στα σημεία σύνδεσης.
- Πολλαπλά σημεία σύνδεσης στην προβλήτα.
- Ευέλικτα καλώδια και σύστημα διαχείρισης συνδέσεων.
- Μετασχηματισμός και συγχρονισμός με το δίκτυο του πλοίου.

## Παροχή Ενέργειας

Η απαιτούμενη ενέργεια για την παροχή των πλοίων παρέχεται συνήθως απευθείας από το δίκτυο διανομής που συνδέεται με την πηγή παραγωγής ενέργειας. Έτσι, ελαχιστοποιείται το αντίκτυπο που έχει στο δίκτυο του λιμένα σε περίπτωση βλάβης ή υπερφόρτωσης. Η προερχόμενη τάση από την πηγή μπορεί να κυμαίνεται σε επίπεδα διανομής, μεταξύ  $10kV$  και  $40kV$  ή ακόμα και σε επίπεδο μεταφοράς  $60kV$  [38].

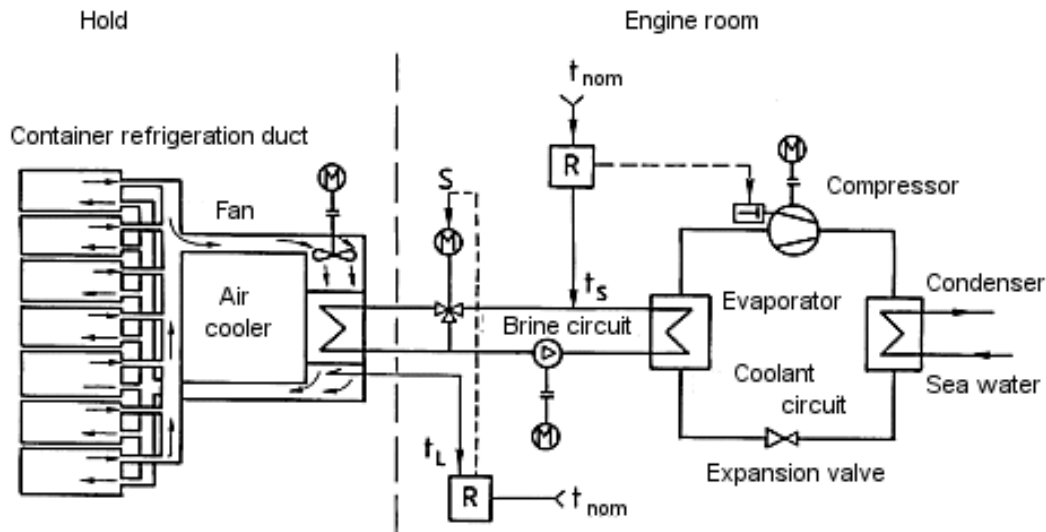
## Παροχή Αγκυροβολίου

Τα εμπορικά πλοία που μεταφέρουν εμπορευματοκιβώτια, συνήθως λειτουργούν με τριφασικό ρεύμα, με συχνότητα  $60Hz$  και τάση  $440V$  (τάση διανομής) ή  $6.6 kV$  όπου στην περίπτωση αυτή απαιτείται μετασχηματιστής τάσης ώστε να μειωθεί. Ένα πλοίο τύπου Maersk με χωρητικότητα  $14000 TEU$  έχει  $1300$  παροχές ρεύματος για εμπορευματοκιβώτια ψύξης και ένα αντίστοιχο χωρητικότητας  $10500 TEU$  έχει  $900$  παροχές. Θεωρώντας την ανάγκη για περίπου  $5kV$  τάση για κάθε παροχή, η συνολική απαιτούμενη ενέργεια μόνο για τα εμπορευματοκιβώτια ξεπερνάει τα  $4.5 MW$ . Έτσι, κατά την εγκατάσταση παροχών ηλεκτρικής ενέργειας στα πλοία από το δίκτυο θα πρέπει να εξετασθεί η ανάγκη σε ενέργεια των πλοίων που θα φιλοξενηθούν [38].



**Εικόνα 12: Μόνιμες παροχές ηλεκτρικής ενέργειας για ψύξη των εμπορευματοκιβωτίων στο κατάστρωμα πλοίου**

Πηγή: German Insurance Association (2016, October). *Container Handbook*[Online]. Available: [https://www.containerhandbuch.de/chb\\_e/wild/index.html](https://www.containerhandbuch.de/chb_e/wild/index.html)



**Εικόνα 13: Διαδικασία ψύξης εμπορευματοκιβωτίων εντός του πλοίου**

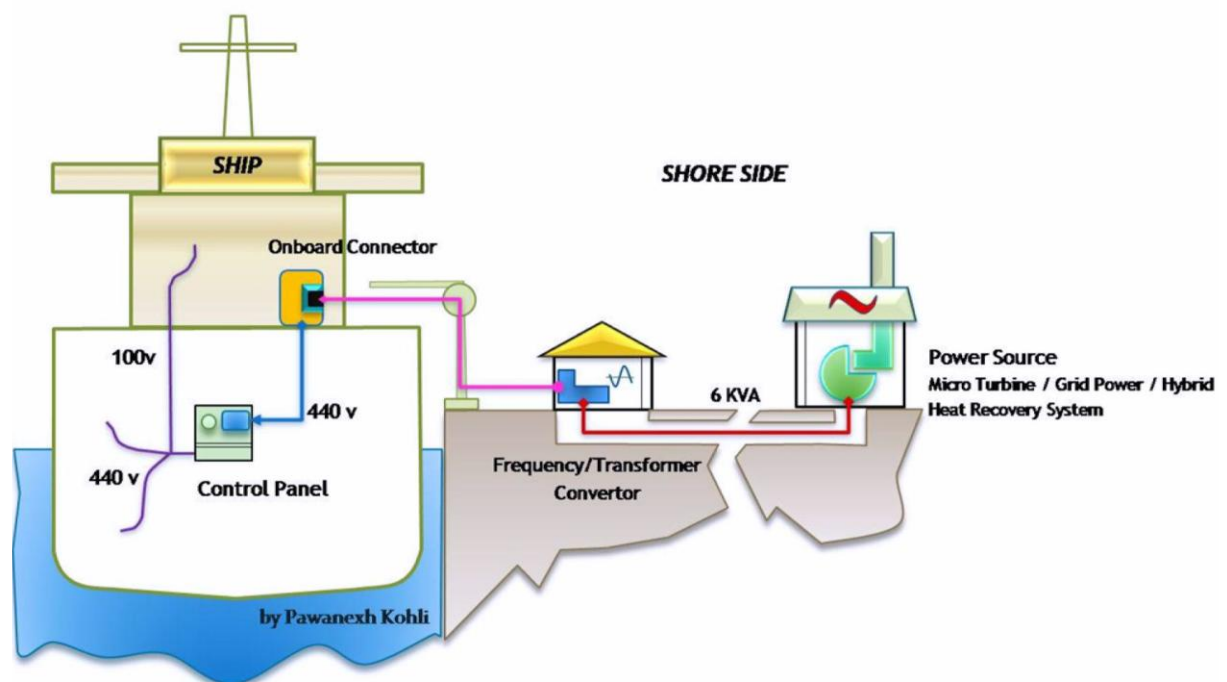
Πηγή: German Insurance Association (2016, October). Container Handbook[Online]. Available: [https://www.containerhandbuch.de/chb\\_e/wild/index.html](https://www.containerhandbuch.de/chb_e/wild/index.html)

## Ηλεκτρικό Σύστημα Πλοίου

Η πλειοψηφία των εν ενεργεία πλοίων έχει τάση διανομής 440V ή 6.6kV και συχνότητα 60Hz. Τα συστήματα διανομής με τάση 440V δεν είναι ιδανικά για την παροχή ενέργειας λόγω της υψηλής έντασης που απαιτείται. Προκειμένου να μειωθούν οι απώλειες που προκαλούνται από την αυξημένη ηλεκτρική αντίσταση, η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να ακολουθεί συγκεκριμένους κανόνες: Η τάση μέχρι την παροχή στο σημείο αγκυροβόλησης να είναι 6.6kV και να μετασχηματίζεται σε 440V, είτε στο σημείο παροχής, είτε μέσω μετασχηματιστή που βρίσκεται πάνω στο πλοίο. Στην περίπτωση που ο μετασχηματιστής βρίσκεται εντός του πλοίου, η διαδικασία διεξάγεται ομαλότερα και έτσι τα πλοία μπορούν να κατασκευάζονται και να τροποποιούνται ανάλογα με τις ανάγκες τους [38].

Η διαδικασία εναλλαγής της παροχής ηλεκτρικού ρεύματος από το πλοίο στο δίκτυο μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος απαιτεί την διακοπή παραγωγής ενέργειας από το πλοίο για ένα σύντομο χρονικό διάστημα και έπειτα να συνδεθεί με το δίκτυο του λιμένα. Ο δεύτερος τρόπος είναι η ταυτόχρονη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο και η λειτουργία των βοηθητικών μηχανών του πλοίου. Στην δεύτερη περίπτωση η παροχή ενέργειας στο πλοίο είναι ομαλή και συνεχής χωρίς απότομες διακυμάνσεις, που για παράδειγμα θα δημιουργούσαν

πρόβλημα σε ένα κρουαζιερόπλοιο με υψηλές και συνεχείς ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια [38]. Επιπλέον, μια διακοπή στην παροχή ενέργειας μπορεί να αποβεί καταστροφική για εμπορευματοκιβώτια που τα προϊόντα τους δεν έχουν μεγάλο εύρος ανοχής σε αυξομείωση της θερμοκρασίας ή πρέπει να παραμένουν σε σταθερή θερμοκρασία καθώς επίσης οι συνεχείς διακοπές παροχής ρεύματος επηρεάζουν το προσδόκιμο ζωής του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού του πλοίου. Επομένως, η συγχρονισμένη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από τις βοηθητικές γεννήτριες του πλοίου και από το ηλεκτρικό δίκτυο του λιμένα είναι η επικρατέστερη και ασφαλέστερη μέθοδος [38].



**Εικόνα 14: Περιγραφή Συστήματος Παροχής Ηλεκτρικής Ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο του λιμένα στα πλοία κατά τον ελλιμενισμό τους**

Πηγή: T.G. Papoutsoglou, "A Cold Ironing Study on Modern Ports, Implementation and Benefits Thriving for Worldwide Ports", M.S. thesis, Dept. Naval Archit. & Marine Engin., National Tech. Univ. of Athens, Athens. Greece. 2012

Τα εύκαμπτα καλώδια καθώς και το σύστημα διαχείρισης καλωδίων θα πρέπει να είναι τοποθετημένα επί τω πλοίο, καθώς η ευθυγράμμιση των καλωδίων με την παροχή εκτελείται από το προσωπικό του λιμένα και δεν θα πρέπει να παρεμποδίζονται η λειτουργία και οι βαθμοί ελευθερίας στις κινήσεις των γερανών [38]. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται η μέση ζήτηση σε ισχύς για διαφόρους τύπους πλοίων.

**Πίνακας 2: Μέση κατανάλωση ισχύος διαφόρων τύπων πλοίων**

<b>Containership</b>	<b>1 - 4 MW</b>
<b>Cruise Ship</b>	<b>7 MW</b>
<b>Reefer</b>	<b>2 - 5 MW</b>
<b>Ro-Ro</b>	<b>700 kW</b>
<b>Tanker</b>	<b>5 - 6 MW</b>
<b>Bulk - general cargo ship</b>	<b>300 kW - 1 MW</b>

*Πηγή: T.G. Papoutsoglou, "A Cold Ironing Study on Modern Ports, Implementation and Benefits Thriving for Worldwide Ports", M.S. thesis, Dept. Naval Archit. & Marine Engin., National Tech. Univ. of Athens, Athens. Greece. 2012.*

### **Διαδικασίες Κατά τον Ελλιμενισμό των Πλοίων**

Κατά τη διάρκεια ελλιμενισμού των πλοίων εκτελούνται αρκετές διαδικασίες που απαιτούν μεγάλα ποσά ενέργειας. Οι γερανοί που χρησιμοποιούνται για το φόρτωμα και ξεφόρτωμα των εμπορευματοκιβωτίων και το ρεύμα που απαιτείται για τον φωτισμό, τη διεκπεραίωση διαφόρων διαδικασιών και η διατήρηση της θερμοκρασίας των μπόιλερ αποτελούν πηγές υψηλής ενεργειακής κατανάλωσης. Με τη σύνδεση του πλοίου στο δίκτυο του λιμένα και την ελάχιστη λειτουργία των βοηθητικών μηχανών του πλοίου επιτυγχάνεται σημαντική μείωση στις εκπομπές καυσαερίων εντός του λιμένα αλλά και της περιβάλλουσας περιοχής [38].

Βέβαια, με τη χρήση της μεθόδου “cold ironing” μπορεί να μειώνονται οι εκπομπές καυσαερίων στην περιοχή του λιμένα, αλλά αυξάνονται στην περιοχή παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως, η αποτελεσματική και ορθή χρήση της μεθόδου γίνεται κυρίως σε λιμένες που εκμεταλλεύονται τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (παράκτιος αέρας, παλίρροια, κ.λπ.). Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται στοιχεία για διάφορα πλοία που επισκέφτηκαν το λιμάνι στην περιοχή Long Beach στο Λος Άντζελες.

**Πίνακας 3: Διάφορα πλοία που επισκέφτηκαν το λιμάνι Long Beach στο Λος Άντζελες**

SHIP NAME	VESSEL TYPE	YEAR BUILT	HOTELLING ENERGY DEMANDS kW	HOTELLING HOURS	CALLS PER YEAR
VICTORIA BRIDGE	CONTAINERSHIP	1998	600	44	10
HANFIN PARIS	CONTAINERSHIP	1997	4800	63	10
LIHUE	CONTAINERSHIP	1971	1700	50	16
OOCL CALIFORNIA	CONTAINERSHIP/REEFER	1996	5200	121	8
CHIQUITA JOY	REEFER	1994	3500	68	25
ECSTASY	CRUISESHIP	1991	7000	12	52
ALASKAN FRONTIEN	TANKER	2004	3780	33	15
CHEVRON WASHINGTON	TANKER	1976	2300	32	16
GROTON	TANKER	1982	300	56	24
ANSAC HARMONY	RO-RO	1998	1250	60	1
PYXIS	BULK CARRIER	1986	1510	17	9

*Πηγή: T.G. Papoutsoglou, “A Cold Ironing Study on Modern Ports, Implementation and Benefits Thriving for Worldwide Ports”, M.S. thesis, Dept. Naval Archit. & Marine Engin., National Tech. Univ. of Athens, Athens. Greece. 2012.*

## 3.2. Μη ευέλικτα φορτία λιμένα

Εκτός από τα ευέλικτα φορτία που αναφέρθηκαν, ο λιμένας απαρτίζεται και από διάφορα άλλα φορτία τα οποία στην εργασία αυτή θεωρήθηκαν ως μη ευέλικτα.

### 3.2.1 Φωτισμός & Κτίρια

Ο φωτισμός στους λιμένες είναι αρκετά ευαίσθητος σε σχέση με την ενέργεια που του παρέχεται και παρουσιάζει ανελαστική συμπεριφορά στον τρόπο λειτουργίας του. Επίσης, ποικίλα κτίρια μπορούν να υπάρχουν σε ένα λιμένα των οποίων οι απαιτήσεις σε ενέργεια εξαρτώνται από τον τρόπο χρήσης τους και μπορεί να ποικίλλουν σημαντικά [9]. Παρόλο που μερικά κτίρια μπορούν να θεωρηθούν ως ευέλικτα φορτία στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν ως ανελαστικά .

**Πίνακας 4:Μηνιαία κατανάλωση κτιρίων και φωτισμού για μεγάλο εμπορικό λιμάνι της Κίνας**

Container Terminal	Lighting load $P_L$ (kW)	Office load $P_O$ (kW)	Workshop load $P_W$ (kW)
Chinese terminal <sup>1</sup>			
AS3000 calculation	2400	1000	500
AS3000 assessment	2400	1000	500

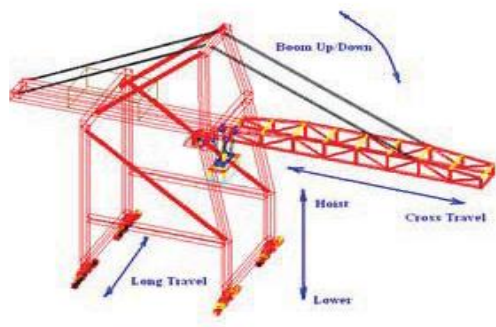
Πηγή: T. K. Tran, “Study of Electrical Usage and Demand at the Container Terminal”, Ph.D. dissertation, Centre for Intelligent Systems Research, Deakin Univ., Melbourne, Australia, 2012.

### 3.2.2 Γερανοί Λιμένα

Οι γερανοί που χρησιμοποιούνται στο λιμένα αποτελούν μια σημαντική πηγή κατανάλωσης ενέργειας, οι οποίοι ακόμα και σήμερα δεν είναι συνδεδεμένοι με το ηλεκτρικό δίκτυο αλλά χρησιμοποιούν δικές του γεννήτριες. Οι βασικές διεργασίες που εκτελούνται από τους γερανούς είναι οι εξής:

- Μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων από και προς τα πλοία.
- Μετακίνηση εμπορευματοκιβωτίων εντός της περιοχής αποθήκευσης.
- Μεταφορά τους από το χώρο αποθήκευσης στο χώρο φόρτωσής τους σε οχήματα.

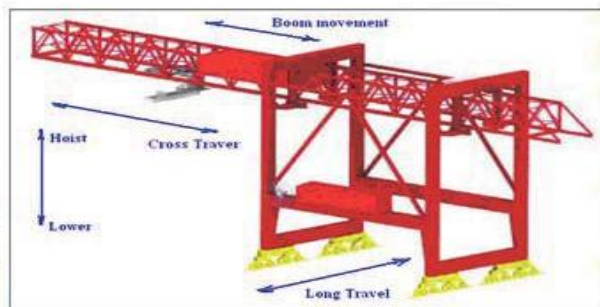
Οι γερανοί διαχωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τις δυνατότητες και τους περιορισμούς τους. Οι πιο συνήθεις γερανοί που χρησιμοποιούνται στις αποβάθρες είναι ενός πλαισίου (A frame), καθώς είναι ελαφρύτεροι και έχουν το χαμηλότερο κόστος κατασκευής. Αρθρωμένοι γερανοί με βραχίονα ή λαιμό χρησιμοποιούνται όταν υπάρχει περιορισμός ύψους των γερανών στην αποβάθρα. Στην περίπτωση που υπάρχει περιορισμός ύψους στην αποβάθρα με τα εμπορευματοκιβώτια λόγω κοντινού αερολιμένα χρησιμοποιούνται γερανοί χαμηλού προφίλ [9]. Στην Εικόνα 15 παρουσιάζονται οι διάφοροι τύποι γερανών που χρησιμοποιούνται.



**A Frame' Quay Cranes**



**Articulated Boom or Goose Neck Quay Cranes**



**Shuttle Boom or Low Profile Quay Cranes**

**Εικόνα 15: Τύποι γερανών που χρησιμοποιούνται στις αποβάθρες για το φόρτωμα και  
ξεφόρτωμα εμπορευματοκιβωτίων από και προς τα πλοία**

*Πηγή: T. K. Tran, "Study of Electrical Usage and Demand at the Container Terminal", Ph.D. dissertation, Centre for Intelligent Systems Research, Deakin Univ., Melbourne, Australia, 2012.*

Η διαχείριση των εμπορευματοκιβωτίων στους χώρους αποθήκευσής τους αλλά και η μεταφορά τους εντός του λιμένα μπορεί να γίνει και με χρήση γερανών. Οι γερανοί που είναι υπεύθυνοι για τη διαχείριση των εμπορευματοκιβωτίων ονομάζονται αυτόματοι γερανοί συσσώρευσης (ASCs) ενώ οι γερανοί που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά των εμπορευματοκιβωτίων ονομάζονται (RMGs) λόγω του ατσάλινου σκελετού που κινείται πάνω σε ράγες [9,40]. Στην Εικόνα 16 παρουσιάζονται οι γερανοί μεταφοράς RMGs και στην Εικόνα 17 οι γερανοί διαχείρισης ASCs.



**Εικόνα 16: Γερανοί αποβάθρας τύπου RMG**

Πηγή: T. K. Tran, “Study of Electrical Usage and Demand at the Container Terminal”, Ph.D. dissertation, Centre for Intelligent Systems Research, Deakin Univ., Melbourne, Australia, 2012.



**Εικόνα 17: Γερανοί αποβάθρας τύπου ASC**

Πηγή: T. K. Tran, “Study of Electrical Usage and Demand at the Container Terminal”, Ph.D. dissertation, Centre for Intelligent Systems Research, Deakin Univ., Melbourne, Australia, 2012.

Εξαιτίας της μεγάλης απόστασης που κινούνται τα εμπορευματοκιβώτια (μερικά εκατοντάδες μέτρα) και της διαχείρισης του υψηλού βάρους τους, οι μηχανές τους είναι ηλεκτρικές, που τροφοδοτούνται με υψηλά επίπεδα τάσης και το σύστημα κίνησης μπορεί να τροφοδοτείται είτε με εναλλασσόμενο ρεύμα (AC), είτε με συνεχές ρεύμα (DC). Στην περίπτωση που δεν είναι υποχρεωτική η χρήση συστήματος κίνησης με συνεχές ρεύμα όλες οι μηχανές χρησιμοποιούν εναλλασσόμενο ρεύμα, επειδή μπορούν να λειτουργήσουν στο μέγιστο επίπεδο του συντελεστή ισχύος ή κοντά σε αυτό [40].

Το προφίλ φορτίου των γερανών RMG και ASC είναι παρόμοιο με αυτό των γερανών αποβάθρας καθώς:

- Η κίνηση ανύψωσης και τοποθέτησης των εμπορευματοκιβωτίων είναι η ίδια για όλους τους γερανούς.
- Η μεγάλη διάρκεια κίνησης των γερανών αποβάθρας θα ήταν επικρατέστερη για την κατανάλωση αλλά οι γερανοί RMGs και ASCs αν και χρειάζονται μικρή απόσταση ανύψωσης ή τοποθέτησης των εμπορευματοκιβωτίων διανύουν μεγάλη απόσταση κατά τη μετακίνηση των εμπορευματοκιβωτίων.
- Η ζήτηση σε ενέργεια των γερανών RMGs και ASCs για την ανύψωση των εμπορευματοκιβωτίων είναι μικρότερη από των γερανών αποβάθρας λόγω βάρους, καθώς διανύουν μικρότερη απόσταση αλλά αντισταθμίζεται λόγω της ενέργειας που απαιτείται για να κινηθούν στις ράγες.

### **Σύγκριση μεταξύ προφίλ φορτίου AC και DC**

Για τη σύγκριση των φορτίων κατανάλωσης μεταξύ των συστημάτων κίνησης AC και DC επιλέχθηκαν γερανοί με παρόμοια χαρακτηριστικά (μέγεθος, έτος κατασκευής, λειτουργικά χαρακτηριστικά κ.λπ.). Κατά τη διάρκεια εκφόρτωσης και φόρτωσης του πλοίου χρησιμοποιούνται μόνο κινήσεις ανύψωσης και διαγώνιας μετακίνησης. Οι κινήσεις αυτές παράγουν τη μέγιστη ζήτηση και αποτελούν περίπου το 99% της ενεργειακής κατανάλωσης. Επομένως, η μελέτη γίνεται κυρίως σε αυτές τις δύο κινήσεις [9,40]. Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των γερανών που χρησιμοποιήθηκαν.

**Πίνακας 5: Τεχνικά Χαρακτηριστικά γερανών**

Quay crane with	AC Drive	DC Drive
Safe Working Load	60T	50T
Main Transformer	2.2 MVA	1.25 MVA
Hoist motor	2 x 373kW	2 x 300kW
Hoist Speed - No Load	150 m/min	150 m/min
Hoist Speed - Full Load	75 m/min	75 m/min
Acceleration/Deceleration time	4.16 seconds	4.20 seconds
Cross travel Motor	2 x 100 kW	1 x 150 kW
Cross Travel Speed - No Load	210 m/min	180 m/min
Cross Travel Speed - Full Load	210 m/min	180 m/min
Acceleration/Deceleration time	5 seconds	5 seconds

Πηγή: T. K. Tran, “Study of Electrical Usage and Demand at the Container Terminal”, Ph.D. dissertation, Centre for Intelligent Systems Research, Deakin Univ., Melbourne, Australia, 2012.

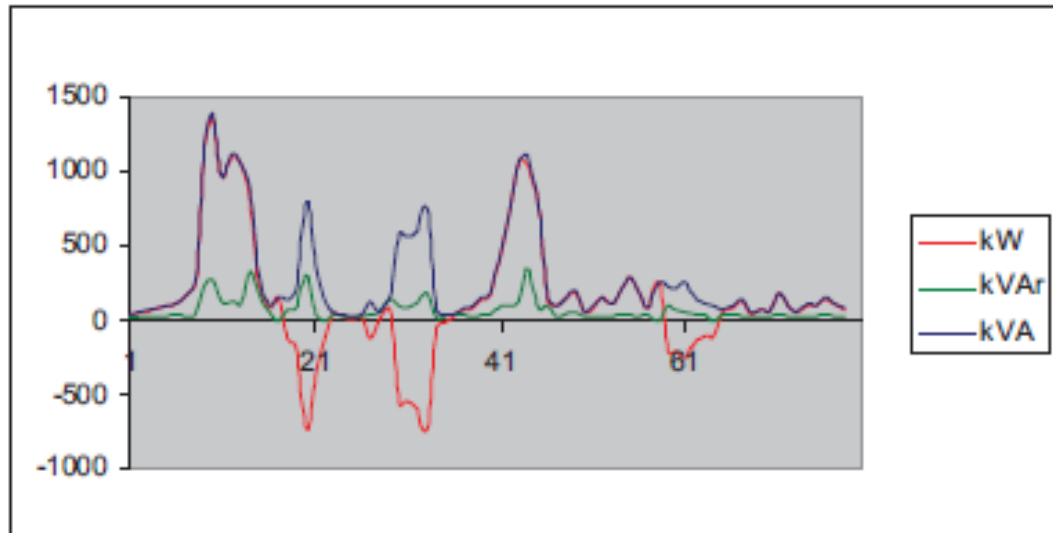
Ο γερανός της αποβάθρας χρησιμοποιεί εναλλασσόμενο ρεύμα για το σύστημα κίνησης με την τεχνολογία Ενεργών Μπροστινών Μερών που αποτελεί την πλήρη αντιστάθμιση των αρμονικών και του συντελεστή ισχύος. Ο γερανός που χρησιμοποιεί συνεχές ρεύμα για το σύστημα κίνησης είναι εξοπλισμένος με φίλτρο για την αντιμετώπιση των αρμονικών που παράγονται από το σύστημα [9,40].

### **Αποτελέσματα Σύγκρισης AC/DC**

Η ζήτηση κατά τις ώρες αιχμής είναι υψηλότερη για τους γερανούς εναλλασσόμενου ρεύματος καθώς:

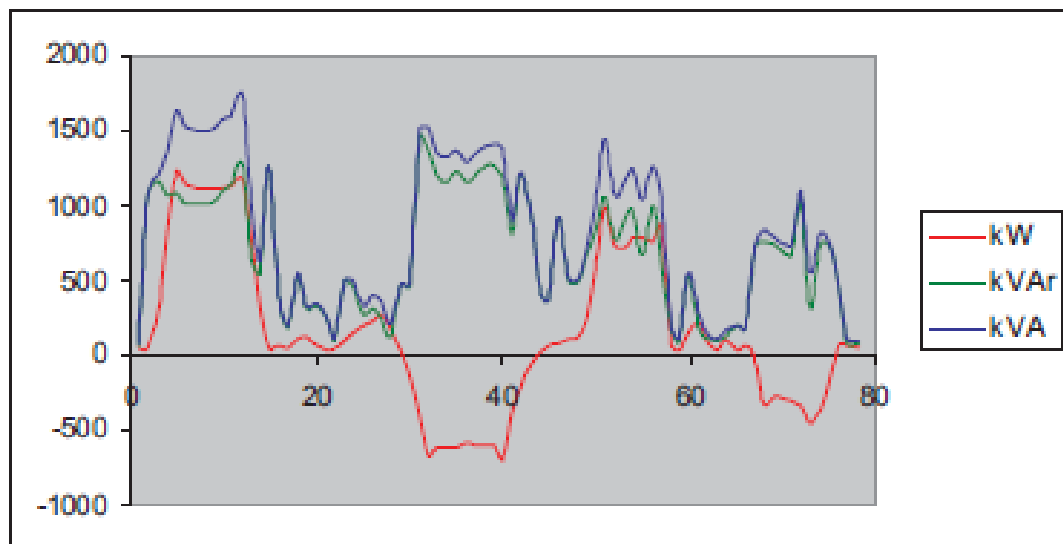
- Το μέγεθος των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος πρέπει να είναι μεγαλύτερο ώστε να παράγεται ίδια ροπή και ικανότητα υπερφόρτωσης με συνέπεια ύπαρξης μεγαλύτερου συστήματος ψύξης, μεγαλύτερη περιστροφική αδράνεια και μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος.
- Η τεχνολογία του συστήματος κίνησης εναλλασσόμενου ρεύματος απαιτεί δύο βήματα, μετατροπή και αναστροφή ενώ το σύστημα κίνησης συνεχούς ρεύματος χρειάζεται μόνο μετατροπή. Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται επιπρόσθετη ισχύς και μεγαλύτερες ψυκτικές μηχανές καθώς περισσότερη θερμότητα παράγεται από τις κινήσεις του συστήματος εναλλασσόμενου ρεύματος.

Στην Εικόνα 18 και 19 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της πραγματικής ισχύος ( $KW$ ), της άεργου ισχύος ( $kVAr$ ) και της φαινομενικής ισχύος ( $kVA$ ) των γερανών αποβάθρας για την ολοκλήρωση ενός κύκλου φόρτωσης.



**Εικόνα 18: Προφίλ κατανάλωσης ισχύος στους γερανούς εναλλασσόμενου ρεύματος**

Πηγή: T. K. Tran, “Study of Electrical Usage and Demand at the Container Terminal”, Ph.D. dissertation, Centre for Intelligent Systems Research, Deakin Univ., Melbourne, Australia, 2012.



**Εικόνα 19: Προφίλ κατανάλωσης ισχύος στους γερανούς συνεχούς ρεύματος**

Πηγή: T. K. Tran, “Study of Electrical Usage and Demand at the Container Terminal”, Ph.D. dissertation, Centre for Intelligent Systems Research, Deakin Univ., Melbourne, Australia, 2012.

Ένα κύκλος φόρτωσης περιλαμβάνει:

- Ασφάλιση του εμπορευματοκιβωτίου στο διανομέα για μια ασφαλή κίνηση.
- Ανύψωση του εμπορευματοκιβωτίου, τη διαγώνια κίνηση του εμπορευματοκιβωτίου στην πλευρά του πλοίου.
- Την τοποθέτηση του εμπορευματοκιβωτίου στην κατάλληλη θέση και απασφάλισή του.
- Ανύψωση και διαγώνια κίνηση μέχρι το σημείο αποθήκευσης των εμπορευματοκιβωτίων.
- Τοποθέτηση του διανομέα και ασφάλιση του επόμενου εμπορευματοκιβωτίου.

Τα αποτελέσματα της κατανάλωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.

**Πίνακας 6: Αποτελέσματα Κατανάλωσης AC και DC γερανών**

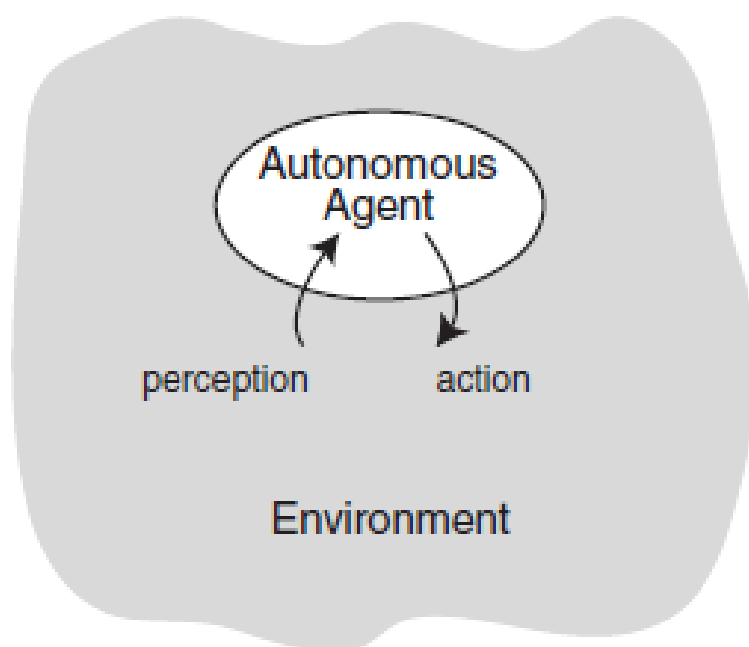
Quay Crane with	AC Drive	DC Drive	Differences
Load condition			
Number of loads	29	47	
Load Weights	From 7T to 48.4T	From 7T to 48.4T	
Results			
Net used energy (kWhr)	113.50	115.20	
Average used energy per For 26T load	3.91	2.45	
Peak demand (kW)	1476	1211	21.88%
Average demand (kW)	147.75	105.26	40.37%
Cal. Ave. demand (kW)	152.01	126.83	19.85%
Power factor - Real time	0.087 – 1	0.006 - 0.838	
Power factor - calculated	0.952	0.475	
Total Harmonic Distortion (THD)			
Line Current			
Ia (%)	1.9 - 51.9	5.6 - 49.7	
Ib (%)	1.6 - 830.3	5.3 - 56.9	
Ic (%)	1.6 - 93.1	63. -50.9	
Line Voltage			
Vab (%)	0.9 - 1.2	0.7 - 1.9	
Vbc (%)	0.9 - 1.2	0.8 - 2.0	
Va (%)	0.9 - 1.2	0.6 - 1.8	

Πηγή: T. K. Tran, “Study of Electrical Usage and Demand at the Container Terminal”, Ph.D. dissertation, Centre for Intelligent Systems Research, Deakin Univ., Melbourne, Australia, 2012.

Η κατανάλωση κατά τις ώρες αιχμής του γερανού εναλλασσόμενου ρεύματος ήταν 21.9% υψηλότερη από αυτή του συνεχούς ρεύματος. Για τη φόρτωση ενός εμπορευματοκιβωτίου βάρους 26 τόνων η κατανάλωση του γερανού AC ήταν 40% υψηλότερη. Ο γερανός εναλλασσόμενου ρεύματος κατανάλωσε κατά μέσο όρο περίπου 60% περισσότερη ενέργεια για να χειριστεί τα εμπορευματοκιβώτια κατά τη διάρκεια παρατήρησης [9,40]. Μελέτες έχουν δείξει ότι τα φορτία αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση της κατανάλωσης σε ώρες αιχμής του λιμένα και όχι να μετατοπίσουν το φορτίο τους στο χρόνο και για αυτό θεωρήθηκαν στην εργασία αυτή ως ανελαστικό φορτίο.

## 4. Πολυπρακτορικά Συστήματα

Τα πολυπρακτορικά συστήματα (Multi Agent Systems (MAS)) από την ανάπτυξή τους τη δεκαετία του '80, έχουν θεωρηθεί ως “κοινωνίες πρακτόρων”, δηλαδή ως ένα σύνολο πρακτόρων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους για τον συντονισμό της συμπεριφοράς τους και την επίτευξη κοινών στόχων [41]. Το ενδιαφέρον για τα πολυπρακτορικά συστήματα αυξάνεται όλο και περισσότερο τα τελευταία χρόνια. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται σε μεγάλη ποικιλία εφαρμογών όπως τον εναέριο έλεγχο, το ηλεκτρονικό εμπόριο, τα ηλεκτρονικά παιχνίδια ή την παραγωγή. Η απήχυσή τους αυτή, οφείλεται στο γεγονός ότι παρέχουν ελκυστικά μέσα για την κατανόηση, το σχεδιασμό και την εφαρμογή διαφόρων κατηγοριών σύνθετων διανεμημένων λογισμικών. Η αυξανόμενη τάση χρήσης της τεχνολογίας των πολυπρακτορικών συστημάτων οφείλεται στην αύξηση χρήσης του διαδικτύου, το οποίο αποτελείται από πράκτορες που λειτουργούν αυτόνομα και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους [42].



**Εικόνα 20: Αυτόνομος Πράκτορας και το Περιβάλλον του**

Πηγή: M. Schumacher, “Multi-Agent Systems”, in *Objective Coordination in Multi-Agent System Engineering*, Springer, 2001, pp 9-29.

## Χαρακτηριστικά Πολυπρακτορικών Συστημάτων

Όπως υποδεικνύεται από το όνομα τους, ένα πολυπρακτορικό σύστημα είναι ένα μακρο-σύστημα που αποτελείται από πολλαπλούς πράκτορες και κάθε πράκτορας αποτελεί ένα μικρο-σύστημα. Έτσι, τα πολυπρακτορικά συστήματα είναι αποτέλεσμα της οργάνωσης πολλαπλών πρακτόρων σε κοινό περιβάλλον. Η οργάνωση αυτή γίνεται υπό συγκεκριμένη υπόθεση και με την υιοθέτηση συγκεκριμένων στόχων.

Τα χαρακτηριστικά των πολυπρακτορικών συστημάτων όπως προτάθηκαν από [43] είναι:

- Σε ένα πολυπρακτορικό σύστημα, κάθε πράκτορας έχει υποκειμενική άποψη.
- Οι πληροφορίες κάθε πράκτορα μπορεί να είναι ελλιπείς, επειδή η “όρασή” του μπορεί να είναι περιορισμένη.
- Κάθε πράκτορας έχει την δική του δομή και κατάσταση λειτουργίας που δεν είναι προσβάσιμες από άλλους συμμετέχοντες στο σύστημα. Η κατάσταση λειτουργίας αλλάζει χωριστά ως αποτέλεσμα των κανόνων συμπεριφοράς του κάθε πράκτορα. Οι κανόνες αυτοί επηρεάζονται από τα στοιχεία στο περιβάλλον του πράκτορα.
- Κάθε πράκτορας επηρεάζει το περιβάλλον του με οποιαδήποτε ενέργεια.
- Τα στοιχεία είναι πλήρως αποκεντρωμένα και διανεμημένα στους συμμετέχοντες πράκτορες και στο περιβάλλον.

Σε επίπεδο μοντελοποίησης, οι πράκτορες σε ένα πολυπρακτορικό σύστημα διαμορφώνονται ο ένας μετά τον άλλο και λειτουργούν ανεξάρτητα από τους υπόλοιπους πράκτορες. Επιπλέον, κατά το στάδιο διαμόρφωσης, ενσωματώνεται συγκεκριμένη δομή στο περιβάλλον στο οποίο οι πράκτορες εξελίσσονται [43].

Μολονότι, μερικές φορές είναι δυνατή η δημιουργία ενός συστήματος με ένα μόνο πράκτορα, αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα τον περιορισμό του προβλήματος σε ένα πρόγραμμα ικανό να αλληλεπιδράσει με το χρήστη. Το σύστημα ενός πράκτορα για παράδειγμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη συστημάτων για παροχή βοήθειας στους χρήστες κατά τη λήψη αποφάσεων.

Ως εκ τούτου, οι εφαρμογές των συστημάτων MAS έχουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τα συστήματα μονού πράκτορα:

- Η ένταξη προβλημάτων που χρειάζονται διανεμημένα δεδομένα και έλεγχο αυτών, παρουσιάζονται και αναπτύσσονται με πιο φυσικό τρόπο με τη χρήση MAS.
- Τείνουν σε ευρωστία, επειδή η αποτυχία ενός πράκτορα μπορεί να αντιμετωπιστεί εύκολα εάν ένας άλλος πράκτορας αναλάβει την διεκπεραίωση των ανολοκλήρωτων εργασιών.
- Ένα πολυπρακτορικό σύστημα μπορεί εύκολα να επεκταθεί και να εξελιχθεί με την προσθήκη νέων πρακτόρων.
- Ικανότητα επαναπροσαρμογής του συστήματος για την αντιμετώπιση διαφορετικών προβλημάτων.

Αν και τα πολυπρακτορικά συστήματα παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα για την επίλυση διαφόρων προβλημάτων, κατά το στάδιο μοντελοποίησής τους παρουσιάζονται αρκετά προβλήματα που είτε εμφανίζονται στην κατασκευή των συστημάτων αυτών ή στην οπτική με την οποία θα αντιμετωπίσουν το πρόβλημα [42]. Έτσι βασικά ερωτήματα πρέπει να απαντηθούν όπως:

- Ποιες μορφές επικοινωνίες πρέπει να επιλεγθούν;
- Πώς θα πρέπει η επικοινωνία και ο υπολογισμός να εξισορροπηθούν;
- Όταν οι πράκτορες έχουν κοινό στόχο, πώς πρέπει να συντονιστούν μεταξύ τους;
- Πώς πρέπει να αντιμετωπίζονται οι διαμάχες μεταξύ των πρακτόρων;

### **Ανάπτυξη Πολυπρακτορικού Συστήματος**

Η αλληλεπίδραση μεταξύ των πρακτόρων σε ένα πολυπρακτορικό σύστημα είναι ζωτικής σημασίας. Εάν οι πράκτορες δεν είναι ικανοί να αλληλεπιδράσουν μεταξύ τους τότε η σφαιρική συμπεριφορά του συστήματος δεν είναι δυνατή. Έτσι, είναι απαραίτητη η διαμόρφωση και η οργάνωση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των πρακτόρων που συμμετέχουν στο σύστημα, διαφορετικά το σύστημα που θα αναπτυχθεί θα είναι προσανατολισμένο στον πράκτορα και όχι στο σφαιρικό σύνολο [42].

### Subjective Coordination

- Explicit: negotiation,  
planning,  
organization
  - Implicit
- 

### Objective Coordination

- Organization of the environment
- Agents interactions

#### Εικόνα 21: Οργάνωση ενός πολυπρακτορικού συστήματος

Πηγή: M. Schumacher, "Multi-Agent Systems", in *Objective Coordination in Multi-Agent System Engineering*, Springer, 2001, pp 9-29.

Η διαμόρφωση των πρακτόρων ενός πολυπρακτορικού συστήματος οδηγεί στην ανίχνευση πολλών εξαρτήσεων διαφορετικής φύσης. Οι εξαρτήσεις αυτές είτε στηρίζονται στο αποτέλεσμα της εξωτερικής σύνθεσης πολλαπλών πρακτόρων σε ένα ενιαίο σύστημα ή προκύπτουν από μεμονωμένη ή ιδιαίτερη οπτική που αποκτά κάθε πράκτορας λόγω της αλληλεπίδρασής του με άλλους πράκτορες [42]. Έτσι διακρίνονται δύο τύποι εξαρτήσεων [44] και ως συντονισμός ορίζεται η διαχείριση των εξαρτήσεων μεταξύ των δραστηριοτήτων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα δύο επίπεδα συντονισμού:

- Ένα πολυπρακτορικό σύστημα σχεδιάζεται με αντικειμενικές εξαρτήσεις που αντιστοιχούν σε εξαρτήσεις μεταξύ των πρακτόρων. Η διαχείριση των εξαρτήσεων αυτών ορίζεται ως αντικειμενικός συντονισμός καθώς οι εξαρτήσεις είναι γενικές για όλους τους πράκτορες.
- Οι πράκτορες έχουν υποκειμενικές εξαρτήσεις που αναφέρονται στις εξαρτήσεις προς τους άλλους πράκτορες. Η διαχείριση των υποκειμενικών εξαρτήσεων ορίζεται ως υποκειμενικός συντονισμός.

Ο υποκειμενικός συντονισμός είναι εξαρτώμενος από τον αντικειμενικό, επειδή ο πρώτος είναι βασισμένος και υποθέτει την ύπαρξη του δεύτερου. Οι μηχανισμοί που είναι δεσμευμένοι για να εξασφαλίσουν τον υποκειμενικό συντονισμό πρέπει να

έχουν πρόσβαση στον αντικειμενικό συντονισμό. Εάν αυτό δεν είναι δυνατό τότε δεν είναι δυνατή η ύπαρξη υποκειμενικού συντονισμού. Βέβαια, αυτό δεν σημαίνει ότι ο αντικειμενικός συντονισμός ανήκει στην οπτική των ενδοπρακτόρων, αλλά μόνο οι μηχανισμοί πρόσβασης έχουν υποκειμενική έκφραση στον πράκτορα. Η περίπτωση αυτή για του μηχανισμούς, είναι ουσιαστικά η αποστολή και λήψη πληροφοριών [42].

### **Αντικειμενικός Συντονισμός**

Ο αντικειμενικός συντονισμός αφορά κυρίως το στάδιο οργάνωσης του περιβάλλοντος του συστήματος MAS. Αυτό επιτυγχάνεται με δύο τρόπους:

- i. Με την περιγραφή του τρόπου οργάνωσης του περιβάλλοντος.
- ii. Με το χειρισμό των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των πρακτόρων.

### **Οργάνωση του περιβάλλοντος**

Η οργάνωση του περιβάλλοντος ποικίλλει σύμφωνα με το μέγεθος του MAS. Έτσι είναι απαραίτητος ο διαχωρισμός μεταξύ των ρητών και εννοούμενων οργανώσεων του περιβάλλοντος. Μια εννοούμενη οργάνωση δεν διαμορφώνει ρητά το περιβάλλον επειδή δίνεται ή επιβάλλεται από την υποκειμενική λογική δομή με την οποία εξελίσσεται το MAS. Αυτό συμβαίνει για παράδειγμα, στην περίπτωση των πρακτόρων που περιπλανιούνται στο διαδίκτυο όπου το περιβάλλον κτίζεται από τους κόμβους του δικτύου [42].

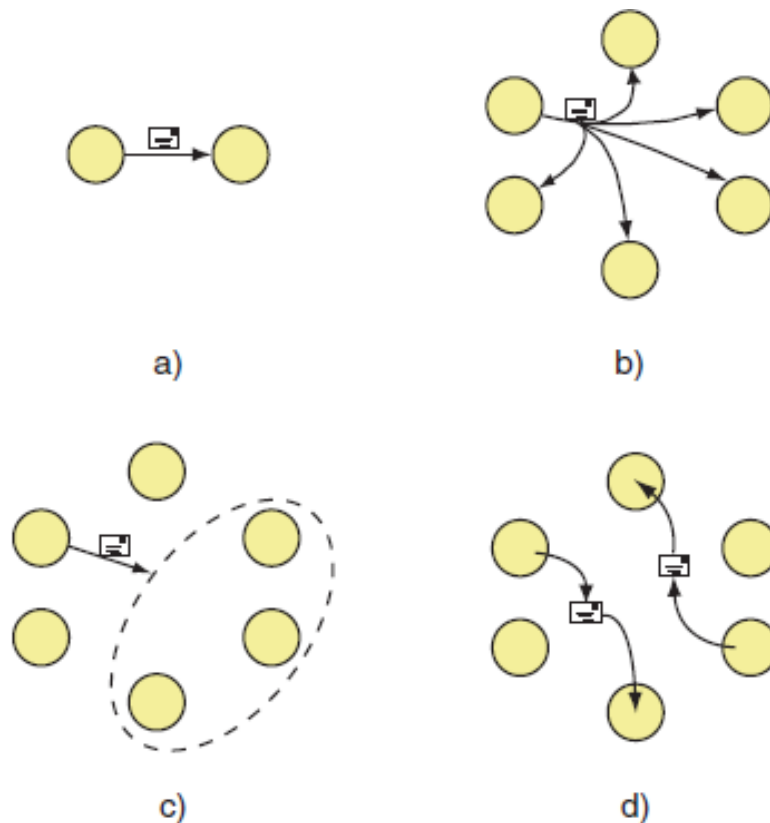
Μια ρητή οργάνωση, καθιερώνει ένα πρότυπο ενός περιβάλλοντος, το οποίο δεν απεικονίζει απαραίτητα την λογική δομή. Αυτό, μπορεί να πραγματοποιηθεί με την προσέγγιση του στόχου. Όταν, για παράδειγμα, κάποιος θέλει να προσομοιώσει ένα συνεχή φυσικό χώρο, δεν θα είναι σε θέση να κρατήσει τη συνοχή και έτσι θα πρέπει να καταστήσει το χώρο διακριτό [42].

## Αλληλεπίδραση Πρακτόρων

Ο χειρισμός των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των πρακτόρων απαιτεί την περιγραφή των αλληλεπιδράσεων μεταξύ ενός πράκτορα και του περιβάλλοντός του και των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των πρακτόρων. Ο πράκτορας έχει σχέση με το περιβάλλον του μέσω της προοπτικής που λειτουργεί και μπορεί να επηρεάσει την κατάσταση του περιβάλλοντός του με συγκεκριμένες ενέργειες. Η αλληλεπίδραση με το περιβάλλον μπορεί έπειτα να γίνει κατανοητή και να χρησιμοποιηθεί για τη διαβίβαση όλων των πληροφοριών μέσα στο περιβάλλον. Η επικοινωνία γίνεται έτσι μια ενέργεια που επηρεάζει το περιβάλλον [42].

Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των πρακτόρων βασίζονται κυρίως στην επικοινωνία μεταξύ τους. Έτσι, η επικοινωνία μπορεί να ταξινομηθεί σε τέσσερα βασικά παραδείγματα που παρουσιάζονται στην Εικόνα 22.

- **Επικοινωνία μεταξύ όμοιων πρακτόρων:** Τα μηνύματα στέλνονται απευθείας σε συγκεκριμένους πράκτορες. Αυτό πραγματοποιείται κυρίως με τον προσδιορισμό των συνεργατών. Επίσης, είναι δυνατή η ύπαρξη ενός ενδιάμεσου καναλιού που αναλαμβάνει τη διαβίβαση των στοιχείων χωρίς οι πράκτορες να γνωρίζουν ο ένας τον άλλο.
- **Αναμετάδοση:** Αποστέλλεται ένα μήνυμα σε όλους τους πράκτορες του συστήματος. Οι ενδιαφερόμενοι πράκτορες μπορούν να αξιολογήσουν τα δεδομένα ή να τα αγνοήσουν.
- **Ομαδική Επικοινωνία:** Ένα μήνυμα αποστέλλεται σε συγκεκριμένη ομάδα πρακτόρων.
- **Παραγωγική Επικοινωνία:** Η επικοινωνία πραγματοποιείται μέσω ενός πίνακα. Οι πράκτορες παράγουν τα επίμονα αντικείμενα (μηνύματα) στον πίνακα, ο οποίος διαβάζεται από τους άλλους πράκτορες. Η ανάγνωση μπορεί να γίνει ανεξάρτητα από το χρόνο παραγωγής μηνυμάτων. Κατά συνέπεια, η επικοινωνία είναι πλήρως αποσυνδεδεμένη.



**Εικόνα 22: Βασικά παραδείγματα επικοινωνίας: a) ένας με ένα, b) εκπομπή μηνύματος σε όλους τους πράκτορες, c) εκπομπή μηνύματος σε πολλούς πράκτορες συγκεκριμένης ομάδας, d) επικοινωνία μεταξύ των ενδιαφερόμενων ομάδων**

Πηγή: M. Schumacher, "Multi-Agent Systems", in *Objective Coordination in Multi-Agent System Engineering*, Springer, 2001, pp 9-29.

Επιπλέον, είναι δυνατό να προσδιοριστεί η επικοινωνία αν είναι ανώνυμη ή όχι. Η επώνυμη επικοινωνία προϋποθέτει ο αποστολέας του μηνύματος να γνωρίζει τον παραλήπτη και αντίθετα. Στην ανώνυμη επικοινωνία, ο πράκτορας που παράγει το μήνυμα αγνοεί τον παραλήπτη και ο παραλήπτης αγνοεί τον αποστολέα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη δημιουργία θυρών επικοινωνίας, όπου ο πράκτορας που τοποθετεί και διαβάζει τα μηνύματα είναι συνδεδεμένος με άλλες θύρες που ανήκουν σε άλλο πράκτορα [42].

## Υποκειμενικός Συντονισμός

Ο υποκειμενικός συντονισμός διακρίνεται σε δύο κατηγορίες, ρητών και εννοούμενων συντονισμών. Η διαφοροποίησή τους γίνεται σύμφωνα με τη διαχείριση των υποκειμενικών εξαρτήσεων. Έχουν παρουσιαστεί διάφορες τεχνικές για την κατηγοριοποίηση του ρητού υποκειμενικού συντονισμού [45]. Οι τεχνικές αυτές, εξετάζουν ως συντονισμό τη διαδικασία κατά την οποία οι πράκτορες λαμβάνουν υπόψη την τοπική επίδραση που έχουν οι πράξεις τους καθώς και οι πράξεις των υπόλοιπων πρακτόρων έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η συνοχή τους [45]. Κατά συνέπεια, οι τεχνικές αυτές είναι κατάλληλες για τον υποκειμενικό συντονισμό, καθώς προσπαθούν να επιλύσουν τις υποκειμενικές εξαρτήσεις μέσω δομών ενδοπρακτόρων που περιλαμβάνουν κατάλληλα πρωτόκολλα. Οι τεχνικές αυτές χαρακτηρίζονται ως ρητές, καθώς διαχειρίζονται ρητά το συντονισμό. Οι τεχνικές αυτές κατηγοριοποιήθηκαν σε τρεις κατηγορίες [Ossowski 1999], πολυπρακτορικός σχεδιασμός, διαπραγμάτευση και οργάνωση.

**Πολυπρακτορικός Σχεδιασμός:** Με τις τεχνικές πολυπρακτορικού σχεδιασμού, οι πράκτορες δημιουργούν ένα σχέδιο και δεσμεύονται να συμπεριφερθούν σύμφωνα με αυτό. Το σχέδιο αυτό, περιγράφει όλες τις ενέργειες που απαιτούνται για την επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί από τους πράκτορες. Ο σχεδιασμός μπορεί να είναι είτε αποκεντρωμένος είτε όχι.

**Διαπραγμάτευση:** Το στάδιο της διαπραγμάτευσης αποτελεί το σημαντικότερο στάδιο έρευνας της διανεμημένης τεχνητής νοημοσύνης (Distributed Artificial Intelligence) κατά το συντονισμό. Μπορεί να οριστεί ως η διαδικασία επικοινωνίας μια ομάδας πρακτόρων για την επίτευξη ενός κοινού στόχου [45]. Συχνά, λόγω των αντιφατικών απαιτήσεων που δημιουργούνται, η διαδικασία διαπραγμάτευσης μπορεί να δημιουργήσει συμφωνίες που μπορούν να επαναδιαπραγματευθούν αργότερα.

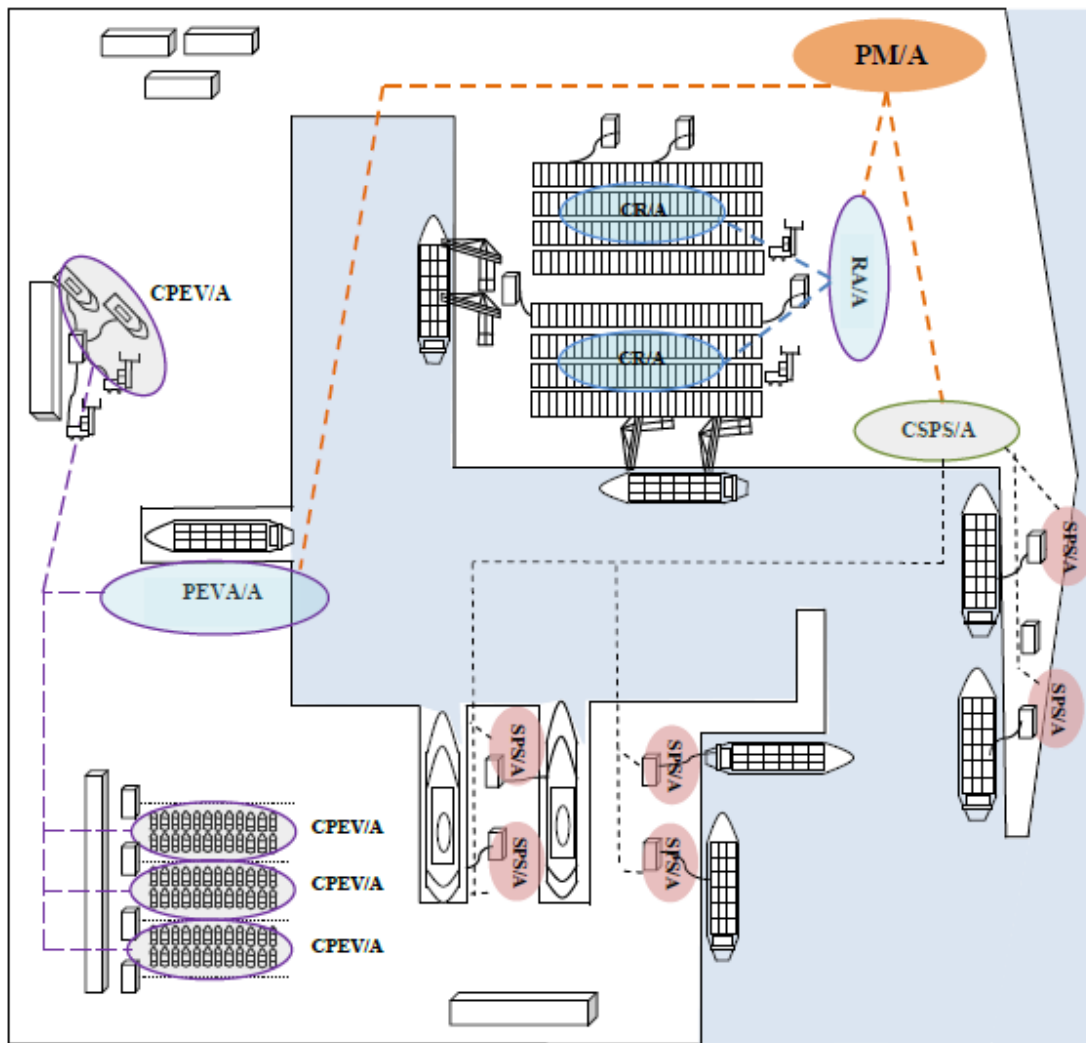
**Οργάνωση:** Οι τεχνικές οργάνωσης χρησιμοποιούν εργαλεία για την οργάνωση των πρακτόρων που ορίζουν τον ρόλο που έχει ο κάθε πράκτορας στο σύστημα. Ο ρόλος που έχει κάθε πράκτορας περιγράφει τις ευθύνες, τις δυνατότητες, τη συμπεριφορά και τις αρμοδιότητες του μέσα στο πολυπρακτορικό σύστημα. Έπειτα, ο κάθε πράκτορας λαμβάνει υπόψη τα οργανωτικά χαρακτηριστικά του ρόλου του στο MAS και λειτουργεί σύμφωνα με αυτά. Παρόλο που ο σκοπός της οργάνωσης ανήκει στον αντικειμενικό συντονισμό, η έννοια του ρόλου αναφέρεται χαρακτηριστικά σε μια υποκειμενική εξάρτηση προς τους άλλους ρόλους στο MAS [42].

## 4.1 Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας Λιμανιού με χρήση MAS

Συστήματα διαχείρισης ενέργειας με υιοθέτηση εννοιών υπολογισμού έχουν αποδειχθεί αποδοτικά για ηλεκτρικά συστήματα με περιορισμένο αριθμό μεταβλητών. Στην περίπτωση ενός μεγάλου λιμένα όπου αποτελείται από διαφορετικούς τύπους φορτίων, απαιτείται σημαντική υπολογιστική ικανότητα και υποδομή επικοινωνίας. Έτσι, τα αποκεντρωμένα συστήματα που χρησιμοποιούν πολυπρακτορικά συστήματα (multi-agent systems (MAS)), παρέχουν αποδοτικό έλεγχο των τμημάτων του συστήματος σε σύνθετα ηλεκτρικά συστήματα καθώς οι περισσότεροι απαιτούμενοι υπολογισμοί εκτελούνται τοπικά [46]. Στο εξεταζόμενο πρόβλημα, υιοθετήθηκαν διάφοροι τύποι πρακτόρων. Κάθε πράκτορας μπορεί να λαμβάνει αποφάσεις αυτόνομα με την επίλυση ενός τοπικού προβλήματος βελτιστοποίησης και να επικοινωνεί παράλληλα με τους άλλους πράκτορες ώστε να έχει μια μερική αντίληψη του περιβάλλοντός του. Οι πληροφορίες αυτές, χρησιμοποιούνται από κάθε πράκτορα για την βελτιστοποίηση του τοπικού προβλήματος.

Στην παρούσα εργασία, ένα πράκτορας τοποθετείται σε κάθε δυνατό σημείο σύνδεσης του πλοίου με το ηλεκτρικό σύστημα του λιμανιού προκειμένου να ελέγχει την ανταλλαγή ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ του πλοίου και το λιμένα. Επίσης, καθ' όλη τη διάρκεια σύνδεσης, η βοηθητική γεννήτρια του πλοίου παραμένει σε λειτουργία παράλληλα με την παροχή ενέργειας από το δίκτυο. Ο πράκτορας είναι αρμόδιος για τη βέλτιστη ανταλλαγή ενέργειας με την ταυτόχρονη διασφάλιση των τεχνικών και λειτουργικών περιορισμών του πλοίου και του ηλεκτρικού συστήματος του λιμένα.

Στην ενότητα που ακολουθεί αναλύεται η δομή του πολυπρακτορικού συστήματος (MAS) που χρησιμοποιήθηκε. Στην Εικόνα 23 παρουσιάζεται το σχεδιάγραμμα και η οργάνωση του συστήματος MAS.



**Εικόνα 23: Σχεδιάγραμμα του συστήματος MAS που αναπτύχθηκε για τον εξεταζόμενο λιμένα**

#### **Οι πράκτορες του συστήματος MAS παραθέτονται ως εξής:**

Ο πράκτορας διαχείρισης του λιμένα (Port Manager Agent (PM/A)) είναι υπεύθυνος για την παροχή της απαιτούμενης ενέργειας και την ταυτόχρονη διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του ηλεκτρικού δικτύου με την κατάλληλη μετατόπιση του φορτίου κατά τις ώρες αιχμής. Ο πράκτορας λαμβάνει τα αθροισμένα προφίλ φορτίου από τους πράκτορες που είναι υπεύθυνοι για τον έλεγχο των ευέλικτων φορτίων. Κατόπιν, ο PM/A υπολογίζει εικονικές τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας που αντιστοιχούν σε υψηλότερες τιμές όταν η ζήτηση είναι υψηλή. Έτσι, ο πράκτορας επιτυγχάνει τη μετατόπιση του φορτίου του λιμανιού στις ώρες χαμηλής ζήτησης. Η στρατηγική τιμολόγησης που ακολουθεί ο PM/A θα αναλυθεί στη συνέχεια.

Η ομάδα πρακτόρων των ψυγείων (Cluster of Reefers Agent (CR/A), των συνδεδεμένων ηλεκτρικών οχημάτων (Cluster of Plugged-in Electrical Vehicles Agent (CPEV/A) και η ομάδα πρακτόρων των σημείων σύνδεσης των πλοίων με το ηλεκτρικό δίκτυο (Cluster of Shore Power Suppliers Agent (CSPS/A) είναι πράκτορες που παρέχουν βοηθητικές υπηρεσίες επικοινωνίας στο σύστημα. Συνήθως, βρίσκονται στους μετασχηματιστές μεσαίας και χαμηλής τάσης (MV/LV) που τροφοδοτούν αποκλειστικά ομάδες ψυγείων, συνδεδεμένων ηλεκτρικών οχημάτων και ομάδες παροχής ενέργειας στα πλοία. Η κύρια λειτουργία τους είναι το άθροισμα των προφίλ που παρέχεται από τα ψυγεία, τα οχήματα και τα πλοία τα οποία επιβλέπουν. Επιπλέον, ελέγχουν εάν τα τεχνικά όρια του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού παραβιάζονται (π.χ. η παρεχόμενη ισχύς υπερβαίνει την ονομαστική ισχύ των μετασχηματιστών). Στην περίπτωση αυτή, παράγουν κατάλληλα σήματα ελέγχου που διαβιβάζονται στα ψυγεία, στις παροχές ηλεκτρικού ρεύματος στα πλοία και στα συνδεδεμένα ηλεκτρικά οχήματα. Έπειτα οι CR/As, οι CSPS/As και οι CPEV/As διαβιβάζουν τα αθροισμένα προφίλ φορτίων τους στους αντίστοιχους πράκτορες ελέγχου των ομάδων τους. Επίσης, η κάθε ομάδα ψυγείων, οχημάτων και παροχής ηλεκτρικού ρεύματος διαβιβάζουν την τιμολογιακή πολιτική που λαμβάνεται από τα ανώτερα στρώματα ελέγχου του συστήματος σε κάθε ένα ψυγείο, συνδεδεμένο ηλεκτρικό όχημα και σε κάθε παροχή ηλεκτρικού ρεύματος αντίστοιχα. Ανάλογα με το μέγεθος και την πολυπλοκότητα του εξεταζόμενου ηλεκτρικού συστήματος του λιμένα δημιουργείται διαφορετικός αριθμός ομάδων πρακτόρων (CR/As, CSPS/As και CPEV/As) για τον έλεγχο κάθε τομέα.

Οι πράκτορες αθροίσματος ψυγείων (Reefers' Aggregation Agent (RA/A)), συνδεδεμένων ηλεκτρικών οχημάτων (Plugged-in Electrical Vehicles' Aggregation Agent (PEVA/A)) αποτελούν εικονικούς πράκτορες που παρέχουν κυρίως υπηρεσίες επικοινωνίας και επιπλέον αθροίζουν τα προφίλ φορτίου που λαμβάνουν από όλες τις ομάδες ψυγείων και ηλεκτρικών οχημάτων του λιμένα. Αρχικά, προωθούν τις εικονικές τιμές ηλεκτρικής ενέργειας που υπολογίζονται από τον PM/A στους πράκτορες CR/As, CPEV/As και έπειτα λαμβάνουν από αυτούς τα αθροισμένα προφίλ φορτίου κάθε ομάδας. Στη συνέχεια, αθροίζουν τα προφίλ των ομάδων και τα προωθούν στον διαχειριστή (PM/A). Επιπρόσθετα, υπολογίζουν τη μέση κατανάλωση ενέργειας από τα ψυγεία και τα PEVs έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί στην επόμενη επικοινωνία. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται μια χαλαρή συσχέτιση μεταξύ των ελαστικών φορτίων ίδιου τύπου.

Ο πράκτορας ελέγχου των ψυγείων (Reefer Agent (R/A), παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στα πλοία (Shore Power Supply Agent (SPS/A) και ο πράκτορας των συνδεδεμένων οχημάτων (Plugged-in Electric Vehicle Agent (PEV/A), είναι πράκτορες που αντιπροσωπεύουν τα ψυγεία, τα σημεία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στα πλοία και τα συνδεδεμένα ηλεκτρικά οχήματα στον PM/A με έκφραση των προτιμήσεων τους για το προφίλ λειτουργίας τους. Ουσιαστικά, υπολογίζουν τα βέλτιστα προφίλ λειτουργίας σύμφωνα με την τιμολογιακή πολιτική που ορίζεται από τον PM/A και τους τεχνικούς και λειτουργικούς τους περιορισμούς. Τα τοπικά προβλήματα βελτιστοποίησης που υπόκεινται σε περιορισμούς και λύνονται από τους πράκτορες R/A, SPS/A, PEV/A αναλύονται στη συνέχεια.

Στην Εικόνα 24 παρουσιάζονται τα σήματα επικοινωνίας που ανταλλάσσονται από τους πράκτορες του συστήματος MAS που χρησιμοποιήθηκε και η χρονική ακολουθία που πραγματοποιήθηκε.

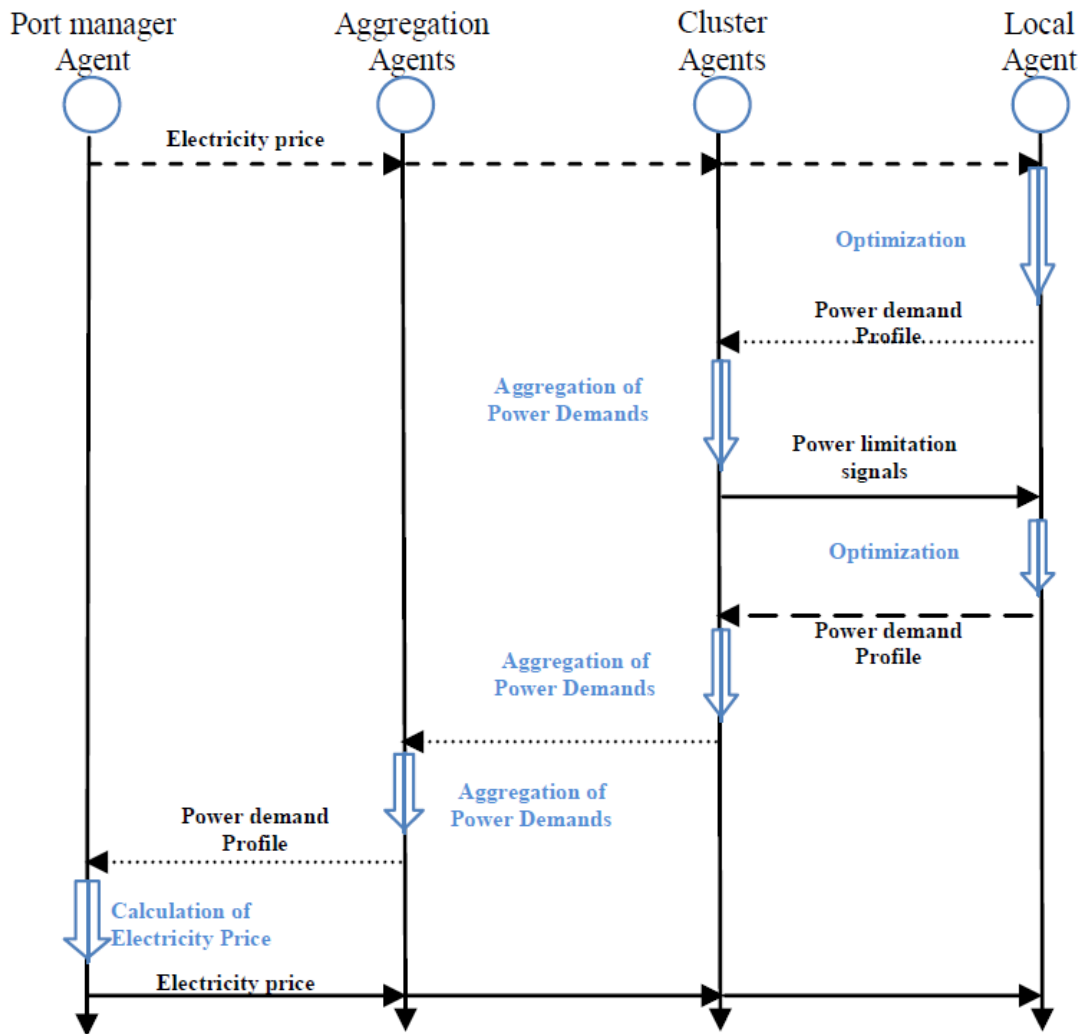
#### 4.1.1 Πράκτορας Διαχείρισης Λιμένα

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, ο PM/A είναι υπεύθυνος για τον υπολογισμό εικονικών τιμών ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούνται από τους πράκτορες RA/As, SPS/As και PEV/As, με σκοπό να καθοριστούν οι βέλτιστες απαιτήσεις τους σε ισχύ. Η τιμολογιακή πολιτική που υιοθετήθηκε στην εργασία αυτή, στοχεύει στην εξασφάλιση της αποδοτικότερης λειτουργίας του ηλεκτρικού δικτύου του λιμένα αλλά και της περιβάλλουσας περιοχής του. Αυτό επιτυγχάνεται με την υπόθεση ότι όσο υψηλότερη είναι η ζήτηση τόσο υψηλότερο είναι και το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά συνέπεια οι εικονικές τιμές υπολογίζονται ως εξής:

$$EP(t, k) = EP_{max} \cdot \frac{I\hat{P}L(t) + EPL(t, k - 1)}{ILP_{max}} \quad (1)$$

Όπου:

$EP(t, k)$	Εικονική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας που υπολογίζεται από τον PM/A.
$t$	Χρονική στιγμή που υπολογίζεται η εικονική τιμή.
$k - th$	Γύρος διαπραγματεύσεων μεταξύ των πρακτόρων
$EP_{max}$	Μέγιστη τιμή της εικονικής ηλεκτρικής ενέργειας
$I\hat{P}L(t)$	Προβλεπόμενο ανελαστικό φορτίο της περιβάλλουσας περιοχής του λιμένα.
$ILP_{max}$	Μέγιστο φορτίο της περιοχής του λιμένα
$EPL(t, k - 1)$	Προβλεπόμενο φορτίο κατά τον $k - 1(th)$ γύρο διαπραγματεύσεων



**Εικόνα 24: Διαδικασία Επικοινωνίας μεταξύ των πρακτόρων του συστήματος MAS που αναπτύχθηκε**

Η διαδικασία που απεικονίζεται στην Εικόνα 24 επαναλαμβάνεται σε κάθε γύρο διαπραγματεύσεων που πραγματοποιείται μεταξύ του διαχειριστή και των τοπικών πρακτόρων μέχρις ότου η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας να συγκλίνει σε μια σταθερή τιμή.

#### **4.1.2 Ομάδες πρακτόρων ψυγείων και συνδεδεμένων ηλεκτρικών οχημάτων.**

Οι ομάδες πρακτόρων των ψυγείων και συνδεδεμένων ηλεκτρικών οχημάτων CR/As και CPEV/As αντίστοιχα βρίσκονται στην περιοχή των μετασχηματιστών χαμηλής και μεσαίας τάσης και εξυπηρετούν κυρίως υπηρεσίες επικοινωνίας. Επιπλέον, αθροίζουν τα προφίλ ισχύος που λαμβάνουν από τους πράκτορες R/As και PEV/As που εποπτεύουν. Με βάση τα αθροισμένα αυτά προφίλ, κάθε ομάδα ελέγχει

εάν η ονομαστική ισχύς του μετασχηματιστή μεσαίας και χαμηλής τάσης παραβιάζεται και αν παραβιάζεται υπολογίζει τα κατάλληλα σήματα ελέγχου που διαβιβάζονται σε κάθε ψυγείο και όχημα. Τα σήματα αυτά υπολογίζονται με την ακόλουθη διαδικασία. Αρχικά, υπολογίζεται η διαφορά της αθροισμένης ισχύος που απαιτείται και της ονομαστικής ισχύος του μετασχηματιστή.

$$\Delta P(t) = P_{cluster}(t) - P_{nom} \quad (2)$$

Αν η  $\Delta P(t)$  είναι θετική τότε εφαρμόζεται μείωση της ισχύος κατά  $\Delta P(i, t)$  στο  $i$ -ιοστό ψυγείο ή PEV.

$$\Delta P(i, t) = -\frac{P_{nom}(i)}{P_{cluster, nom}} \cdot \Delta P(t) \quad (3)$$

Όπου  $P_{nom}(i)$  είναι η ονομαστική ισχύς του  $i$ -ιοστού ψυγείου ή PEV και  $P_{cluster, nom}$  είναι η ονομαστική ισχύς της ομάδας στην οποία ανήκει. Τέλος, το σήμα περιορισμού  $L_r(i, t)$  υπολογίζεται ως εξής:

$$L_r(i, t) = \frac{P(i, t) + \Delta P(i, t)}{P_{nom}(i)} \quad (4)$$

#### 4.1.3 Πράκτορας Ψυγείου.

Το μοντέλο που υιοθετήθηκε για τον υπολογισμό της διακύμανσης της εσωτερικής θερμοκρασίας του εμπορευματοκιβωτίου και χρησιμοποιείται από τον κάθε πράκτορα που ελέγχει το κάθε ψυγείο αναλύεται στη συνέχεια.

Όταν το  $i$ -ιοστό ψυγείο δεν βρίσκεται σε λειτουργία ψύξης, η αύξηση της εσωτερικής θερμοκρασίας στο χρόνο  $\Delta(t)$  υπολογίζεται ως εξής:

$$T(i, t + t_{off}) - T(i, t) = (T_{amb}(t) - T(i, t)) \cdot \left(1 - e^{\frac{A \cdot k}{10^3 \cdot m \cdot c_p} \cdot t_{off}}\right) \quad (5)$$

Όπου:

$T_i$ (°C)	Εσωτερική θερμοκρασία του $i$ -ιοστού ψυγείου
$T_{amb}$ (°C)	Εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος
$t_{off}$ (s)	Χρόνος εκτός λειτουργίας
$A$ (m <sup>2</sup> )	Εμβαδόν του εμπορευματοκιβωτίου
$k$ (W/m <sup>2</sup> · K)	Συντελεστής μεταφοράς θερμοκρασίας του ψυγείου
$m$ (kg)	Συνολική μάζα των προϊόντων εντός του ψυγείου
$c_p$ (kJ/kg · K)	Θερμοχωρητικότητα του προϊόντος

Κατά τη λειτουργία ψύξης η θερμοκρασία μειώνεται ως εξής:

$$T(i, t) - T(i, t + t_{on}) = \frac{P_R(i, t) \cdot t_{on}}{m \cdot c_p} \quad (6)$$

Όπου:

$$\begin{array}{ll} t_{on} \text{ (s)} & \text{Χρόνος σε λειτουργία ψύξης} \\ P_R(i, t) \text{ (kW)} & \text{Η ψυκτική ικανότητα του ψυγείου} \end{array}$$

Το πρόβλημα προς βελτιστοποίηση που επιλύει ο i-ιστός πράκτορας ψυγείου είναι,

$$\min \sum_{t=t_0}^T \left\{ P_{e,R}(i, t) \cdot EP(t) \cdot \Delta t + d_R \cdot \left| \left( \bar{P}_{e,R}(t - \Delta t) - P_{e,R}(i, t) \right) \right| \cdot \Delta t \right\} \quad (7)$$

υπό τους περιορισμούς,

$$0 \leq P_{e,R}(i, t) \leq L_r(i, t) \cdot P_{e,R,nom}(i) \quad (8)$$

$$T_{\min}(i) \leq T(i, t) \leq T_{\max}(i) \quad (9)$$

$$T(i, T) = T(i, t_0) \quad (10)$$

Όπου,  $P_{e,R}(i, t)$  είναι η ισχύς που καταναλώνεται από το i-ιστό ψυγείο στο χρόνο  $t$ ,  $\bar{P}_{e,R}(t - \Delta t)$  είναι η μέση κατανάλωση ισχύος ανά ψυγείο τη χρονική στιγμή  $t$  μέχρι τη χρονική στιγμή  $\Delta t$ ,  $d_R$  είναι ο συντελεστής αντιστοίχισης του πρώτου και δεύτερου όρου της (7),  $P_{e,R,nom}(i)$  είναι η ονομαστική ηλεκτρική ισχύς του i-ιστού ψυγείου,  $L_r(i, t)$  είναι το σήμα περιορισμού μείωσης της ισχύος που υπολογίζεται από τον CR/A,  $T(i, t_0)$  και  $T(i, T)$  είναι η μέση εσωτερική θερμοκρασία του εμπορευματοκιβωτίου στην αρχή και στο τέλος της διαδικασίας βελτιστοποίησης, αντίστοιχα.

Ο δεύτερος όρος της αντικειμενικής συνάρτησης (7) επιτρέπει τη χαλαρή συσχέτιση μεταξύ των πρακτόρων των ψυγείων (R/As), καθώς τους επιβάλλεται να ακολουθήσουν τη γενική τάση που εμφανίστηκε στον προηγούμενο κύκλο διαπραγματεύσεων μεταξύ αυτών και του διαχειριστή (PM/A).

#### 4.1.4 Πράκτορας Συνδεδεμένων Ηλεκτρικών Οχημάτων

Ο δυναμικός τρόπος λειτουργίας των συνδεδεμένων ηλεκτρικών οχημάτων κατά τη διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης παρουσιάζεται στη συνέχεια. Όταν το  $i$ -ιοστό ηλεκτρικό όχημα φορτίζεται για χρόνο  $\Delta t$  η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας υπολογίζεται σύμφωνα με,

$$SoC(i, t) - SoC(i, t - \Delta t) = P_{PEV}(i, t) \cdot n_{ch} \cdot \Delta t \quad (11)$$

Αντίστοιχα, κατά τη διαδικασία εκφόρτισης υπολογίζεται σύμφωνα με,

$$SoC(i, t) - SoC(i, t - \Delta t) = \frac{P_{PEV}(i, t)}{n_{dis}} \cdot \Delta t \quad (12)$$

Όπου:

$SoC(i, t)$ (kWh)	Κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας
$P_{PEV}$	Ηλεκτρική ισχύς που ανταλλάσσεται μεταξύ PEV και ηλεκτρικού δικτύου.
$n_{ch}$	Συντελεστής φόρτισης
$n_{dis}$	Συντελεστής εκφόρτισης

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που επιλύεται από τον πράκτορα PEV/A είναι,

$$\min \sum_{t=t_0}^T \{P_{PEV}(i, t) \cdot EP(t) \cdot \Delta t + d_{PEV} \cdot |(\bar{P}_{PEV}(t - \Delta t) - P_{PEV}(i, t))| \cdot \Delta t\} \quad (13)$$

που υπόκειται στους περιορισμούς,

$$P_{PEV,min}(i) \leq P_{PEV}(i, t) \leq L_{PEV}(i, t) \cdot P_{PEV,max}(i) \quad (14)$$

$$SoC_{min}(i) \leq SoC(i, t) \leq SoC_{max}(i) \quad (15)$$

$$SoC(i, t_{i,f}) = SoC(i)_{max} \quad (16)$$

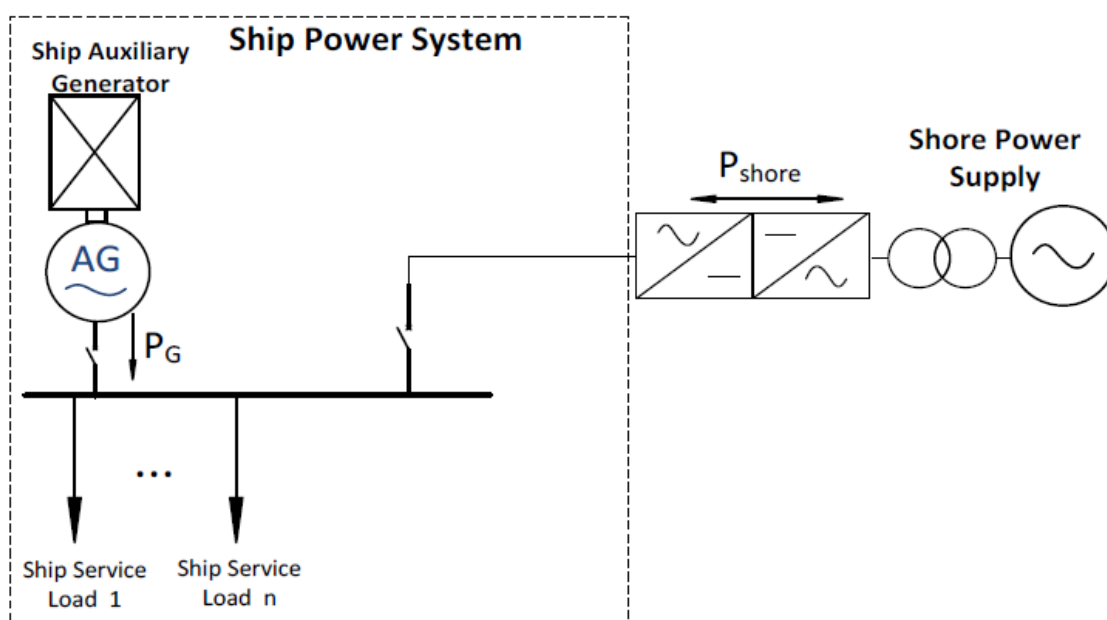
Όπου:

$\bar{P}_{PEV}(t - \Delta t)$	Μέση κατανάλωση κάθε PEV από τη χρονική στιγμή $t$ μέχρι τη $t - \Delta t$
$P_{PEV,max}(i)$	Μέγιστη ηλεκτρική ισχύς του $i$ -ιοστού PEV που μπορεί να ανταλλαχθεί με το ηλεκτρικό δίκτυο
$P_{PEV,min}(i)$	Ελάχιστη ηλεκτρική ισχύς του $i$ -ιοστού PEV που μπορεί να ανταλλαχθεί με το ηλεκτρικό δίκτυο
$d_{PEV}$	Συντελεστής αντιστοίχισης του πρώτου και δεύτερου όρου
$L_{PEV}(i, t)$	Σήμα ελέγχου περιορισμού της ισχύος, υπολογισμένο από τον CPEV/A
$SoC_{max}(i)$	Μέγιστη αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια από το $i$ -ιοστό PEV
$t_{i,f}$	Χρόνος όπου το $i$ -ιοστό PEV αποσυνδέεται από το ηλεκτρικό δίκτυο

Επιπλέον, αντίστοιχα με τα ψυγεία, ο δεύτερος όρος της αντικειμενικής εξίσωσης (13) επιτρέπει χαλαρή συσχέτιση μεταξύ των PEV/As.

#### 4.1.5 Πράκτορας Σύνδεσης Πλοίου Στο Ηλεκτρικό Δίκτυο

Το διάγραμμα του ηλεκτρικού συστήματος του πλοίου που συνδέεται με την παροχή ηλεκτρικού δικτύου του λιμένα παρουσιάζεται στην Εικόνα 25. Στην παρούσα εργασία, κατά τον ελλιμενισμό του πλοίου, οι βοηθητικές γεννήτριές του ήταν σε λειτουργία παράλληλα με την παροχή από το ηλεκτρικό δίκτυο για την εξασφάλιση της αξιόπιστης ολοκλήρωσης όλων των διαδικασιών που θα χρειαστεί να εκτελέσει το πλοίο.



**Εικόνα 25: Ηλεκτρικό σύστημα πλοίου με την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο του λιμένα.**

Το κόστος λειτουργίας μιας βοηθητικής γεννήτριας του πλοίου, ορισμένο ως κόστος παραγωγής μιας MWh, μπορεί να προσεγγιστεί ικανοποιητικά από ένα πολυώνυμο δεύτερης τάξης της παραγόμενης ισχύος.

$$OC_{AG}(P_G) = a_0 + a_1 P_G + a_2 P_G^2 \quad (m.u./MWh) \quad (17)$$

Όπου,  $P_G$  είναι η παραγόμενη ισχύς από τη βοηθητική γεννήτρια,  $OC_{AG}$  είναι το κόστος παραγωγής της γεννήτριας,  $a_0$ ,  $a_1$  και  $a_2$  είναι τεχνικοί παράμετροι και  $m.u.$  ορίζεται η νομισματική μονάδα.

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που επιλύεται από τον *i*-ιοστό πράκτορα υπεύθυνο για τη σύνδεση του πλοίο με το ηλεκτρικό δίκτυο (SPS/A) είναι:

$$\min \sum_{t=t_0}^T \left\{ P_{shore}(i, t) \cdot EP(t) \cdot \Delta t + P_G(i, t) \cdot OC_{AG}(P_G(i, t)) \cdot \Delta t + d_s \cdot |(\bar{P}_{shore}(t - \Delta t) - P_{shore}(i, t))| \cdot \Delta t \right\} \quad (18)$$

υπό τους περιορισμούς:

$$P_G(i, t) + P_{shore}(i, t) = L_{ship}(i, t) \quad (19)$$

$$P_{G,min}(i) \leq P_G(i, t) \leq P_{G,max}(i) \quad (20)$$

$$P_{shore,min}(i) \leq P_{shore}(i, t) \leq L_{shore}(i, t) \cdot P_{shore,max}(i) \quad (21)$$

Όπου:

$P_{shore}$	Ισχύς που παρέχεται από το ηλεκτρικό δίκτυο
$\bar{P}_{shore}(t - \Delta t)$	Μέση συνολική παροχή ηλεκτρικής ισχύος στα πλοία από χρονική στιγμή $t$ μέχρι τη $\Delta t$
$d_s$	Συντελεστής αντιστοίχισης του πρώτου και δεύτερου όρου
$L_{ship}$	Απαιτούμενο φορτίο για την εκτέλεση των διαδικασιών του πλοίου κατά τον ελλιμενισμό
$P_{G,max}$	Μέγιστη ισχύς που παράγεται από την <i>i</i> -ιοστή βοηθητική γεννήτρια
$P_{G,min}$	Ελάχιστη ισχύς που παράγεται από την <i>i</i> -ιοστή βοηθητική γεννήτρια
$L_{shore}(i, t)$	Σήμα περιορισμού της ισχύος υπολογισμένο από τον CSPS/A

Πρέπει να σημειωθεί ότι η ισχύς που παρέχεται από το ηλεκτρικό δίκτυο ( $P_{shore}$ ) μπορεί να είναι αρνητική καθώς η ονομαστική ισχύς της βοηθητικής γεννήτριας του πλοίου μπορεί να είναι μεγαλύτερη από το απαιτούμενο φορτίο του πλοίου. Τέλος, ο δεύτερος όρος της αντικειμενικής συνάρτησης (18) επιτρέπει χαλαρή συσχέτιση μεταξύ των πρακτόρων SPS/As.

## 5.Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Στην ενότητα που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των φορτίων του λιμένα που θα εφαρμοστεί το μοντέλο που κατασκευάστηκε για τη βελτιστοποίηση διαχείρισης της ενέργειας που καταναλώνεται. Στον Πίνακα 7 παρουσιάζεται ο αριθμός των μονάδων κάθε ευέλικτου φορτίου που χρησιμοποιήθηκε.

**Πίνακας 7: Αριθμός Μονάδων ευέλικτων φορτίων του ηλεκτρικού συστήματος του λιμένα**

Φορτίο	Αριθμός
Εμπορευματοκιβώτια Ψύξης	3500
Ηλεκτρικά Συνδεδεμένα Οχήματα	3000
Παροχές ηλεκτρικής ενέργειας σε πλοία	10

Η λύση του προβλήματος δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση απλού συγκεντρωτικού αλγορίθμου, καθώς θα απαιτούσε μεγάλο χρονικό διάστημα για την ολοκλήρωση των υπολογισμών, επειδή το πρόβλημα προς επίλυση αποτελείται από 631,700 περιορισμούς και 156,240 αποφάσεις που πρέπει να ληφθούν σε κάθε βήμα προσομοίωσης. Το ηλεκτρικό σύστημα του λιμένα προσομοιώθηκε για περίπτωση δύο σεναρίων λειτουργίας σε ένα υπολογιστή με τυπικά χαρακτηριστικά χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού 4<sup>ης</sup> γενιάς Matlab. Αρχικά, η προτεινόμενη μέθοδος διαχείρισης ενέργειας του λιμένα, εφαρμόζεται και τα αποτελέσματα που προκύπτουν συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα στον ίδιο λιμένα χωρίς κάποια μορφή διαχείρισης ενέργειας.

Στον Πίνακα 8, παρουσιάζονται τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την περιγραφή των γεωμετρικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών των εμπορευματοκιβωτίων ψύξης σύμφωνα με τους κατασκευαστές [13,14]. Χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι εμπορευματοκιβωτίων με διαφορετικά λειτουργικά χαρακτηριστικά και διαφορετικό μέγεθος ( 6m και 12m ). Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν 20 διαφορετικές κατηγορίες προϊόντων, με διαφορετική θερμοκρασία αποθήκευσης και διαφορετικές ανοχές στην αυξομείωση της θερμοκρασίας [Παράρτημα Α]. Το επιτρεπόμενο εύρος θερμοκρασίας που κυμαίνονταν τα προϊόντα ήταν σύμφωνα με τα επιτρεπτά υγειονομικά όρια που χρησιμοποιούνται από όλες τις μεταφορικές εταιρίες (Παράρτημα Β). Επιπρόσθετα,

στα εμπορευματοκιβώτια χωρίς έλεγχο, το εύρος θερμοκρασίας που λειτουργούσαν περιορίστηκε στον  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  από την αρχική θερμοκρασία εντός του εμπορευματοκιβωτίου. Βέβαια, με την προτεινόμενη μέθοδο διαχείρισης, η θερμοκρασία εντός των εμπορευματοκιβωτίων κυμαινόταν σε ένα ευρύτερο φάσμα.

**Πίνακας 8: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Εμπορευματοκιβωτίων**

Ψυκτική Ικανότητα $P_R(\text{kW})$			Κατανάλωση $P_{e,R}(\text{kW})$	
Τεχνικά Χαρακτηριστικά Μηχανής Ψύξης			Τεχνικά Χαρακτηριστικά Μηχανής Ψύξης	
$T(^{\circ}\text{C})$	1	2	1	2
21	13.7	13.5	10.7	12.0
2	9.9	11.4	9.1	10.5
-18	5.9	5.6	6.1	6.0
-29	3.8	3.02	5.7	4.5
Μήκος Εμπορευματοκιβωτίου (ft)				
20	40		$k (\text{W/m}^2\cdot\text{K})$	0.4
<i>Εμβαδόν, <math>A(\text{m}^2)</math></i>	73.56	135.26	$c_p (\text{kJ/kg}\cdot\text{K})$	1.46-4.06
<i>Βάρος, <math>m(\text{kg})</math></i>	17880-21000	22300-26240	Εύρος Θερμοκρασίας ( $^{\circ}\text{C}$ )	-25 / +18

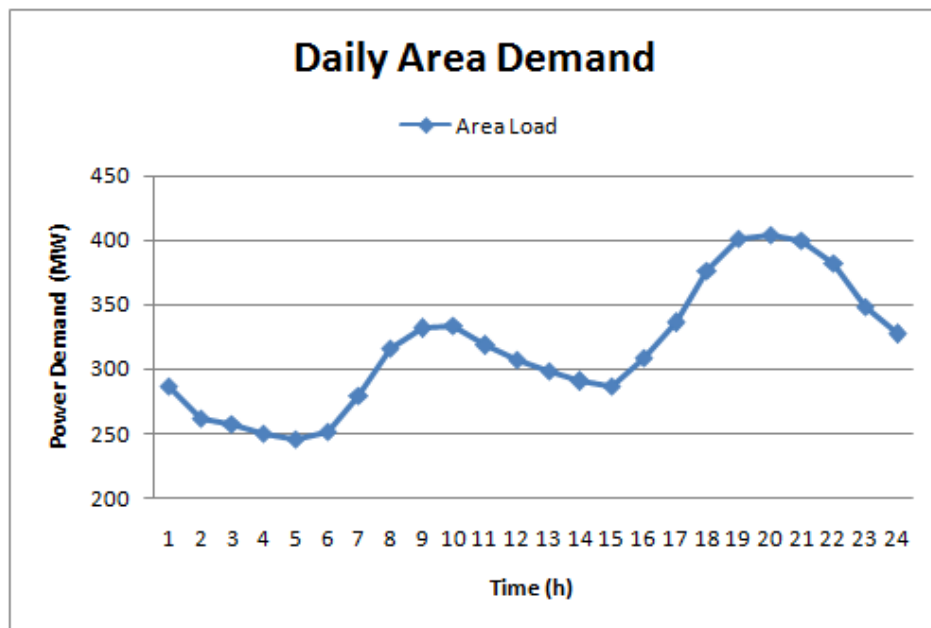
Τα ηλεκτρικά συνδεδεμένα οχήματα είχαν μέση ικανότητα μπαταριών 30kWh και με ονομαστική ισχύ φόρτισης τα 5kW. Οι συντελεστές αποδοτικότητας κατά τη φόρτιση (nch) και εκφόρτιση (ndis) αυτών θεωρήθηκε ως 90%. Ο συνολικός αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων που ήταν συνδεδεμένα με το δίκτυο στις 12:00πμ ήταν 1500 και αποσυνδέονταν σταδιακά από τις 7:00πμ μέχρι τις 2:00μμ, ενώ 1500 οχήματα συνδέονταν σταδιακά από τις 3:00μμ μέχρι τις 9:00μμ και παρέμεναν συνδεδεμένα μέχρι το τέλος της μέρας. Τα ηλεκτρικά οχήματα στα οποία δεν υπήρχε έλεγχος, θεωρήθηκε ότι καταναλώνουν την απαραίτητη ισχύ ώστε να επιτύχουν το επιθυμητό ποσοστό φόρτισης της μπαταρίας μέχρι το πέρας της περιόδου φόρτισης.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των βοηθητικών γεννητριών των 10 πλοίων που ήταν συνδεδεμένα με το ηλεκτρικό δίκτυο του λιμένα δίνονται στον Πίνακα 9. Θεωρήθηκε ότι ο εξοπλισμός που βρίσκεται στις παροχές του λιμένα, επιτρέπει ως μέγιστη αμφίδρομη ροή ισχύος τα 6MW. Χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά προφίλ ζήτησης ενέργειας των πλοίων, τα οποία αντιστοιχούν σε διαφορετικούς τύπους πλοίων (κρουαζιερόπλοια, φορτηγά πλοία, κ.λπ.). Επιπλέον, για τα πλοία στα οποία δεν υπήρχε έλεγχος, έγινε η υπόθεση ότι απορροφούν το 50% της μέγιστης ζήτησής τους από το ηλεκτρικό δίκτυο του λιμένα.

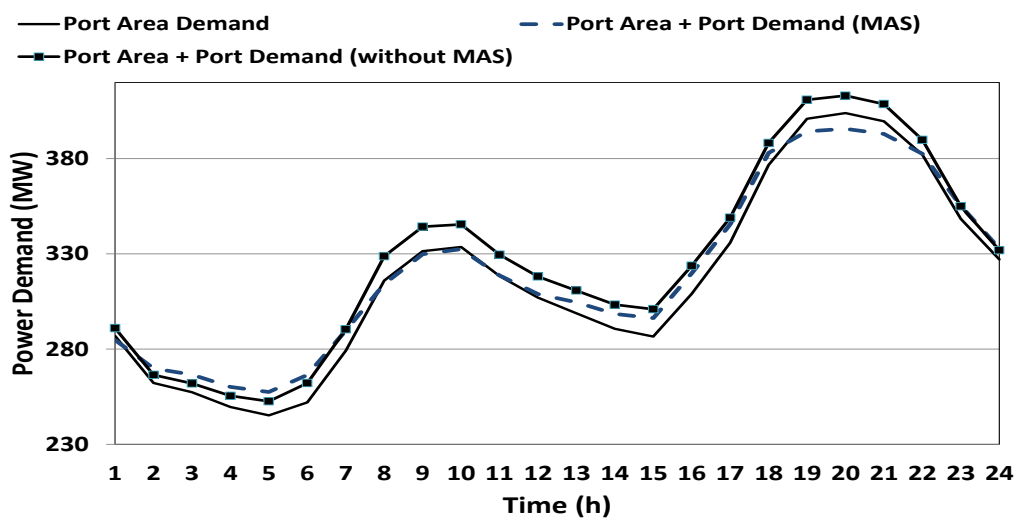
**Πίνακας 9: Τεχνικά Χαρακτηριστικά βοηθητικών μηχανών των πλοίων**

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΛΟΙΟΥ			
	Ονομαστική Ισχύς (MW)	Τεχνικό Ελάχιστο (MW)	Κόστος Λειτουργίας (m.u.*/MWh)
Aux. Gen. 1	7	0.7	$20 + 29.25 \cdot P + 2.25 \cdot P^2$
Aux. Gen. 2	7	0.7	$22.5 + 28.35 \cdot P + 2.25 \cdot P^2$
Aux. Gen. 3	7	0.7	$23.75 + 27 \cdot P + 2.25 \cdot P^2$
Aux. Gen. 4	7	0.7	$22.5 + 28.8 \cdot P + 2.55 \cdot P^2$
Aux. Gen. 5	7	0.7	$23.75 + 29.25 \cdot P + 2.4 \cdot P^2$
Aux. Gen. 6	7	0.7	$17.5 + 31.5 \cdot P + 2.4 \cdot P^2$
Aux. Gen. 7	7	0.7	$18.75 + 31.5 \cdot P + 2.25 \cdot P^2$
Aux. Gen. 8	7	0.7	$25 + 30.6 \cdot P + 2.25 \cdot P^2$
Aux. Gen. 9	7	0.7	$25 + 33.75 \cdot P + 2.4 \cdot P^2$
Aux. Gen. 10	7	0.7	$22.5 + 33.75 \cdot P + 2.4 \cdot P^2$

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στις Εικόνες 27-41. Στην Εικόνα 26 παρουσιάζεται το φορτίο της περιβάλλουσας περιοχής του λιμένα.



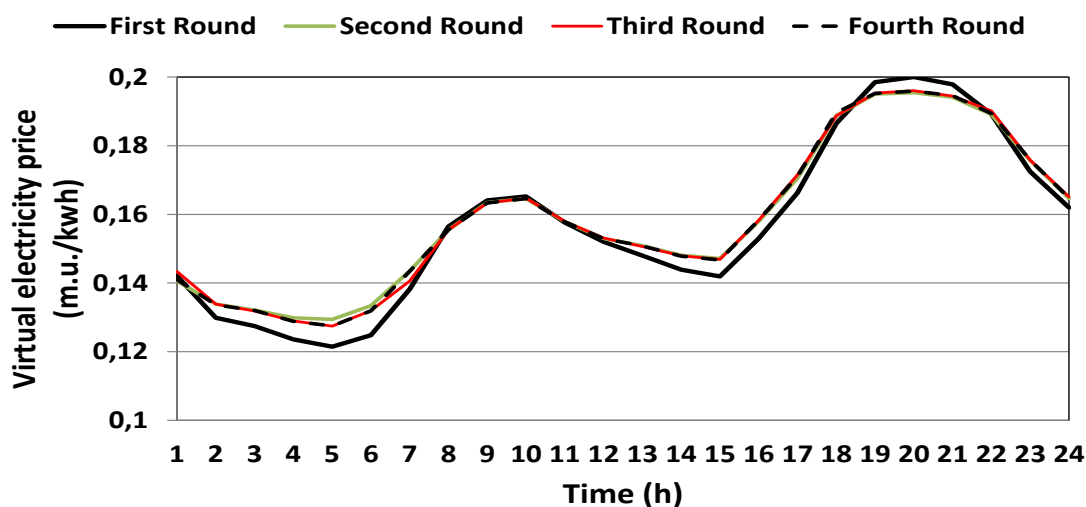
Εικόνα 26: Φορτίο Περιβάλλουσας Περιοχής του Λιμένα



Εικόνα 27: Κατανάλωση ισχύος της περιβάλλουσας περιοχής του λιμένα και της ζήτησης του λιμένα με χρήση του συστήματος MAS που δημιουργήθηκε και χωρίς αυτό

Στην Εικόνα 27 παρουσιάζεται το συνολικό φορτίο του λιμένα και της περιβάλλουσας περιοχής με χρήση του συστήματος MAS αλλά και χωρίς αυτό. Είναι προφανές ότι το προτεινόμενο πολυπρακτορικό σύστημα μετατοπίζει τη ζήτηση ισχύος των ελαστικών φορτίων του λιμένα στις ώρες χαμηλής ζήτησης. Αυτό συμβαίνει επειδή, η εικονική τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλότερη στις περιόδους χαμηλής ζήτησης και υψηλότερη όταν η ζήτηση αυξάνεται.

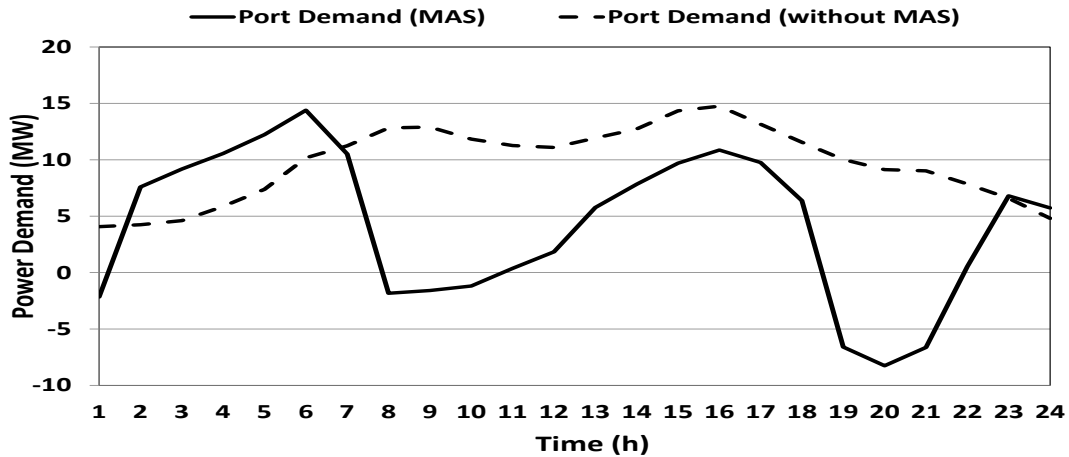
Στην Εικόνα 28, παρουσιάζεται η εξέλιξη της εικονικής τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια τεσσάρων γύρων διαπραγματεύσεων μεταξύ των τοπικών πρακτόρων και του διαχειριστή (PM/A).



**Εικόνα 28: Διακύμανση της τιμής της εικονικής ενέργειας κατά τους τέσσερις γύρους διαπραγματεύσεων**

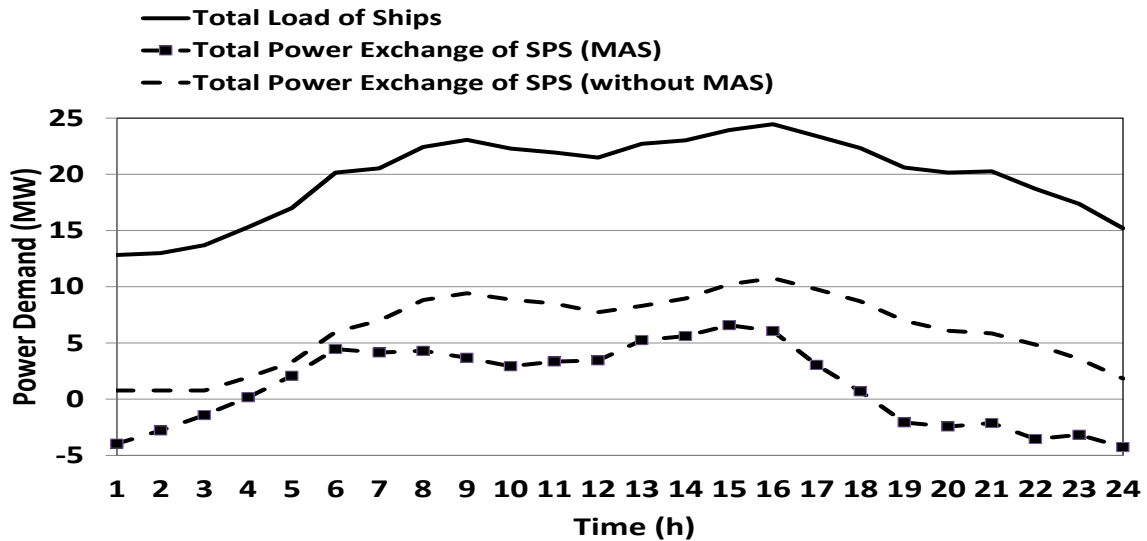
Αποδείχθηκε, ότι μόνο τέσσερις γύροι διαπραγματεύσεων χρειάστηκαν, καθώς η εικονική τιμή που ορίστηκε από τον PM/A ήταν ίδια κατά τον τρίτο και τέταρτο γύρο. Κατά συνέπεια, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η ισορροπία μπορεί να επιτευχθεί εύκολα στο εξεταζόμενο σύστημα.

Η ζήτηση σε ισχύ των διαφόρων ευέλικτων φορτίων του λιμένα παρουσιάζεται στις Εικόνες 29-32. Επιπρόσθετα, στις ίδιες Εικόνες παρουσιάζεται και η ζήτηση του κάθε φορτίου με τη προτεινόμενη μέθοδο διαχείρισης και συγκρίνεται με αυτή χωρίς διαχείριση. Πιο συγκεκριμένα, η συνολική ζήτηση του λιμένα, το συνολικό φορτίο των πλοίων κατά τον ελλιμενισμό τους, η συνολική ανταλλαγή ισχύος μεταξύ των πλοίων και του ηλεκτρικού δικτύου του λιμένα, η κατανάλωση για την φόρτιση των ηλεκτρικών συνδεδεμένων οχημάτων και η ψύξη των εμπορευματοκιβωτίων παρουσιάζονται στις Εικόνες 29-32.



**Εικόνα 29: Κατανάλωση ισχύος λιμένα σε 24ωρη μέτρηση με τη χρήση του συστήματος MAS και χωρίς αυτό**

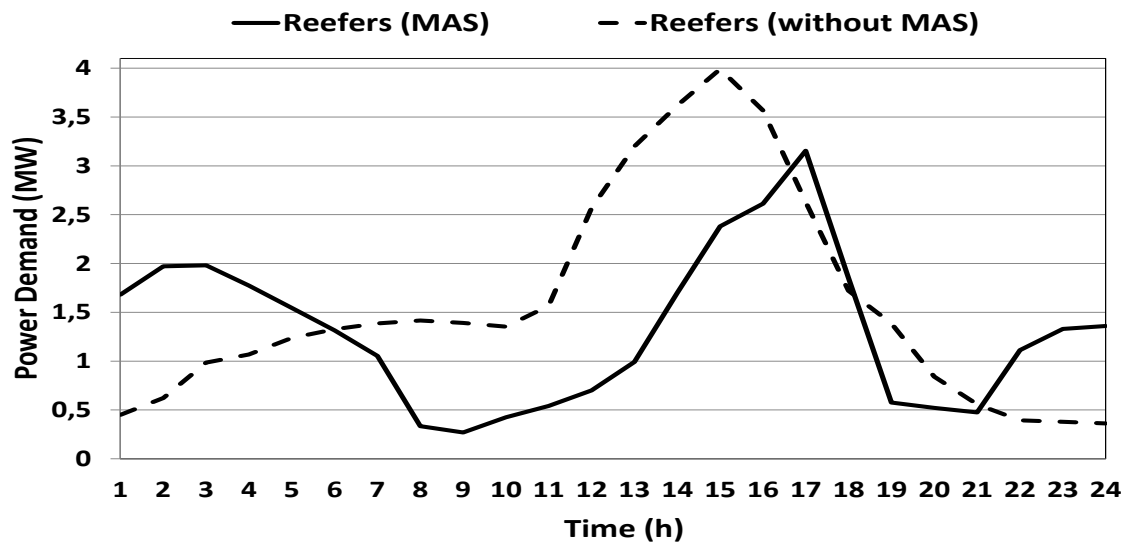
Στην Εικόνα 29, παρουσιάζεται η σημαντική διαφορά στη διακύμανση της ζήτησης του ηλεκτρικού φορτίου του λιμένα μεταξύ της προτεινόμενης μεθόδου και χωρίς αυτήν. Οι αρνητικές τιμές που λαμβάνει η ζήτηση, οφείλονται στην παροχή ισχύος από τα πλοία και από τα συνδεδεμένα ηλεκτρικά οχήματα. Όπως φαίνεται και από την Εικόνα 29 η καμπύλη της συνολικής ζήτησης του λιμένα ακολουθεί την καμπύλη της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας. Στο διάστημα μεταξύ 00:00 και 07:00, όπου η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλή, η κατανάλωση είναι υψηλότερη σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο, καθώς εκείνες τις ώρες επιλέχθηκε ως βέλτιστη για ψύξη των εμπορευματοκιβωτίων, τη φόρτιση των ηλεκτρικών συνδεδεμένων οχημάτων και την παροχή ενέργειας στα πλοία.



**Εικόνα 30: Συνολική ζήτηση ισχύος από τα πλοία και ποσά ισχύος που ανταλλάσσονται μεταξύ των πλοίων και του ηλεκτρικού δικτύου του λιμένα**

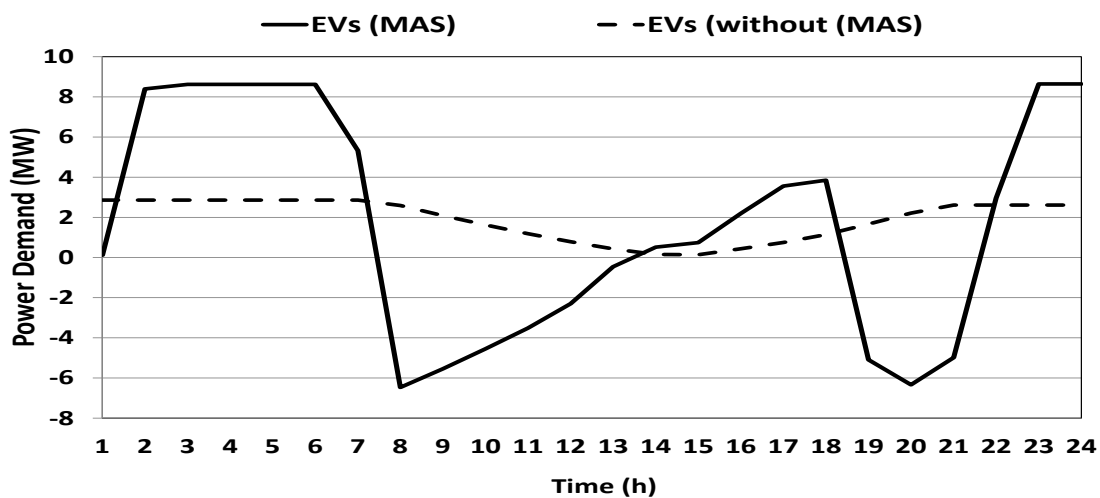
Στην Εικόνα 30 παρουσιάζεται η ανταλλαγή ισχύος μεταξύ του ηλεκτρικού δικτύου του λιμένα και των πλοίων που έχουν συνδεθεί στο σύστημα. Με την χρήση του πολυπρακτορικού συστήματος διαχείρισης ενέργειας που προτείνεται, επιτυγχάνονται υψηλότερα ποσά ισχύος που παρέχονται στο δίκτυο από τις βοηθητικές μηχανές των πλοίων κατά τις ώρες όπου η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλή.

Το προφίλ κατανάλωσης ισχύος των εμπορευματοκιβωτίων παρουσιάζεται στην Εικόνα 31. Με τη συγκεκριμένη μέθοδο, επιτυγχάνεται καλύτερη μετατόπιση του φορτίου στις ώρες όπου η ζήτηση και η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλότερη.



Εικόνα 31: Κατανάλωση εμπορευματοκιβωτίων για ψύξη των προϊόντων

Στην Εικόνα 32, παρουσιάζεται το προφίλ κατανάλωσης των συνδεδεμένων ηλεκτρικών οχημάτων.

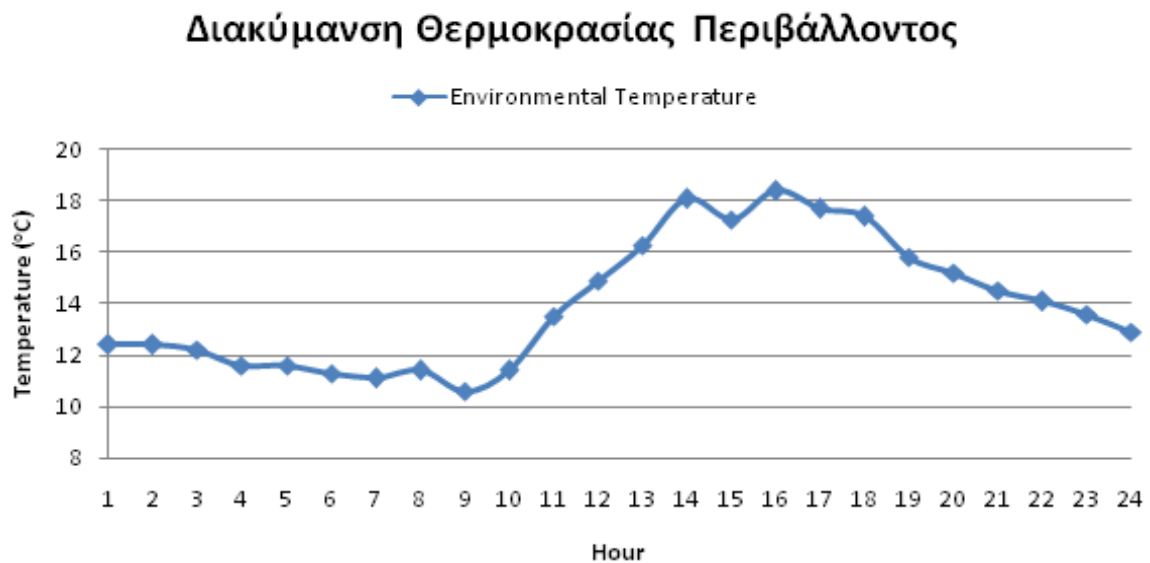


Εικόνα 32: Προφίλ κατανάλωσης των ηλεκτρικών συνδεδεμένων οχημάτων στο ηλεκτρικό δίκτυο του λιμένα

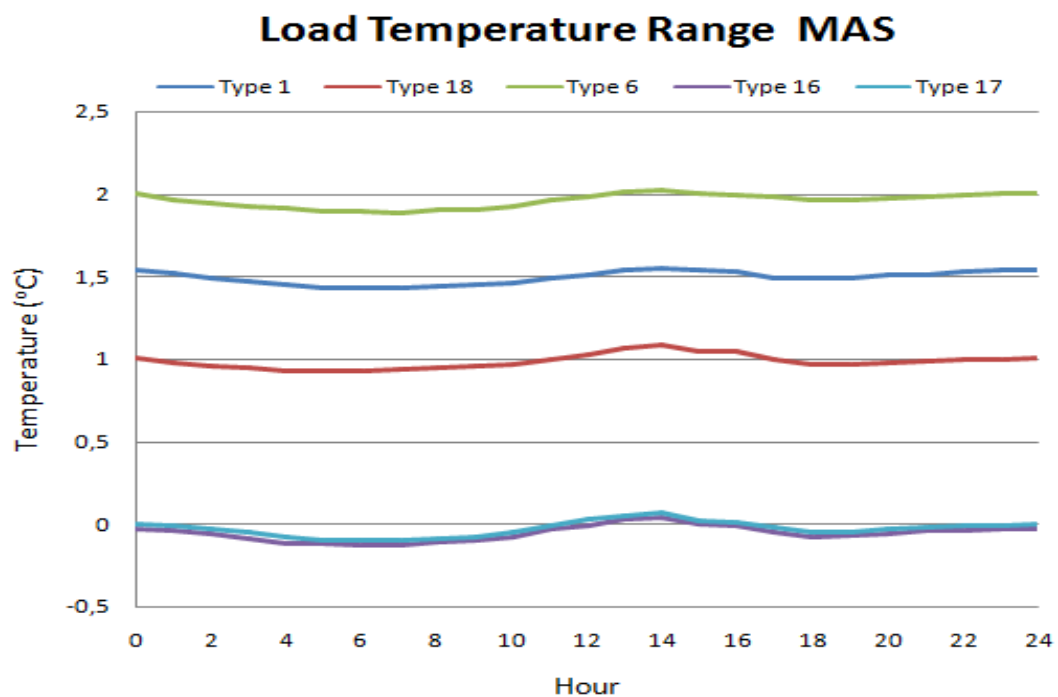
Είναι εμφανές, ότι χωρίς διαχείριση η κατανάλωση παραμένει σταθερή και τα ποσά ισχύος που παρέχονται από τα οχήματα στο ηλεκτρικό δίκτυο είναι μηδενικά. Αντίθετα, με τη χρήση του συστήματος MAS, η κατανάλωση παρουσιάζει απότομες εναλλαγές, καθώς η βέλτιστη λειτουργία ήταν η ταυτόχρονη φόρτιση κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης που η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας ήταν χαμηλή επιτυγχάνοντας έτσι την παροχή σημαντικών ποσών ενέργειας στο σύστημα κατά τις ώρες υψηλής

ζήτησης. Η διαφορά μεταξύ της ενέργειας που παρέχεται στο σύστημα φτάνει μέχρι και τα 6MW ενώ τις ίδιες ώρες κατά τη μέθοδο χωρίς έλεγχο υπήρχε κατανάλωση ισχύος λόγω φόρτισης οχημάτων.

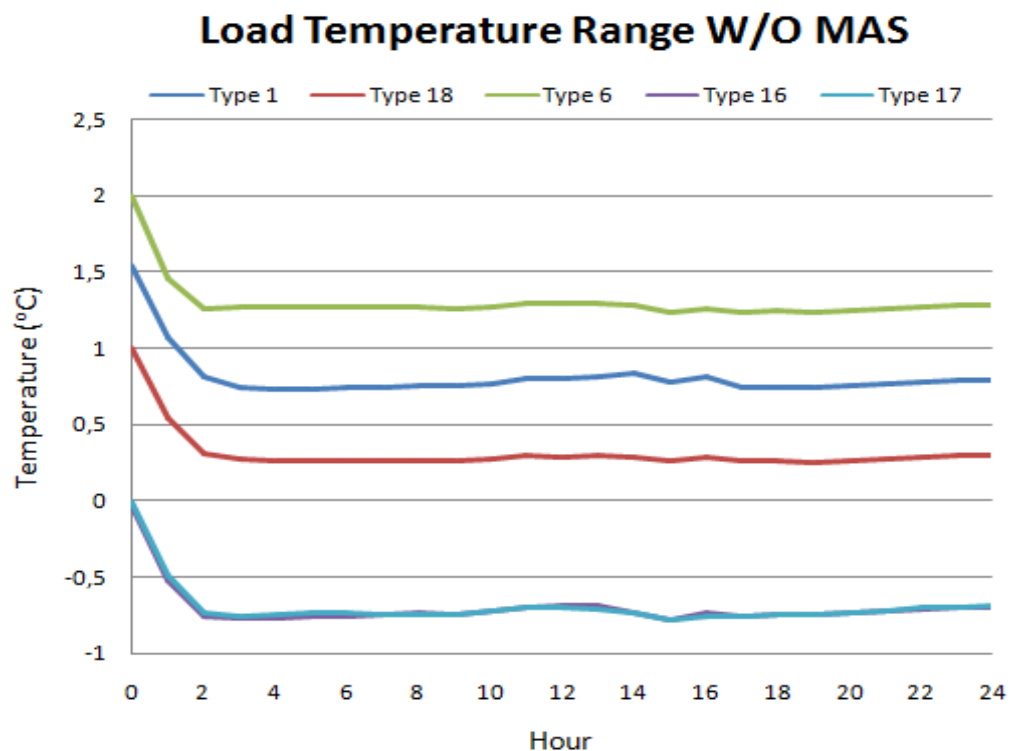
Η θερμοκρασία περιβάλλοντος σε εικοσιτετράωρη ωριαία μέτρηση παρουσιάζεται στην Εικόνα 33. Οι θερμοκρασίες που χρησιμοποιήθηκαν αντιστοιχούν σε πραγματικές μετρήσεις θερμοκρασίας για την περιοχή του λιμένα που επελέγη κατά το μήνα Νοέμβρη.



**Εικόνα 33:** Διακύμανση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια της ημέρας

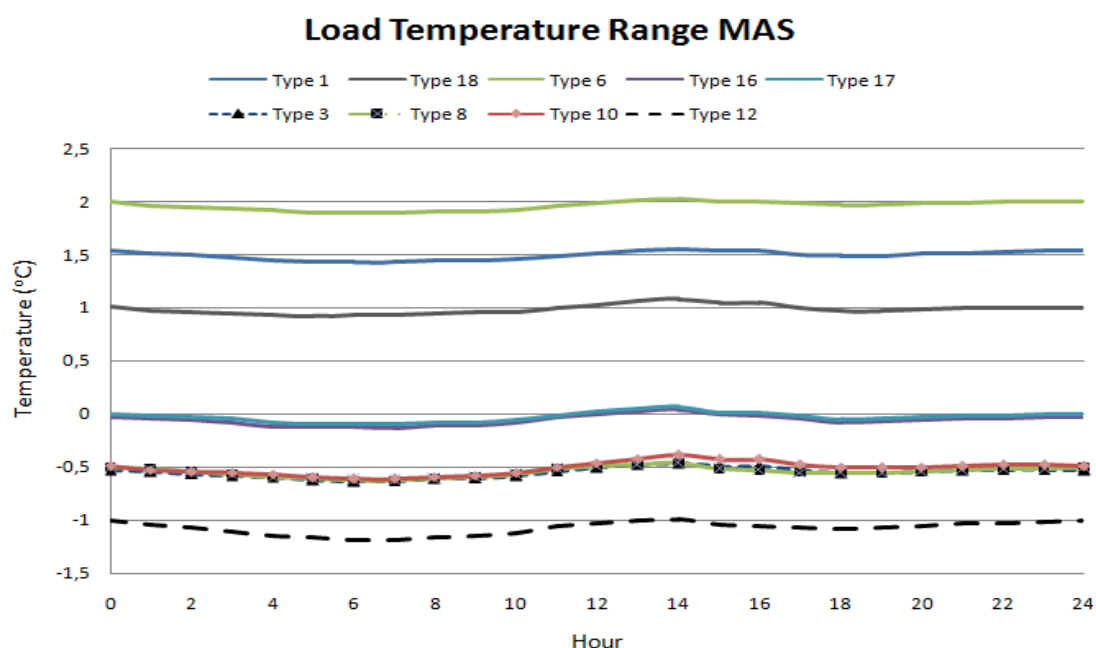


Εικόνα 34: Μέση Διακύμανση θερμοκρασίας εντός των εμπορευματοκιβωτίων με 5 διαφορετικά προϊόντα με χρήση του συστήματος MAS που αναπτύχθηκε

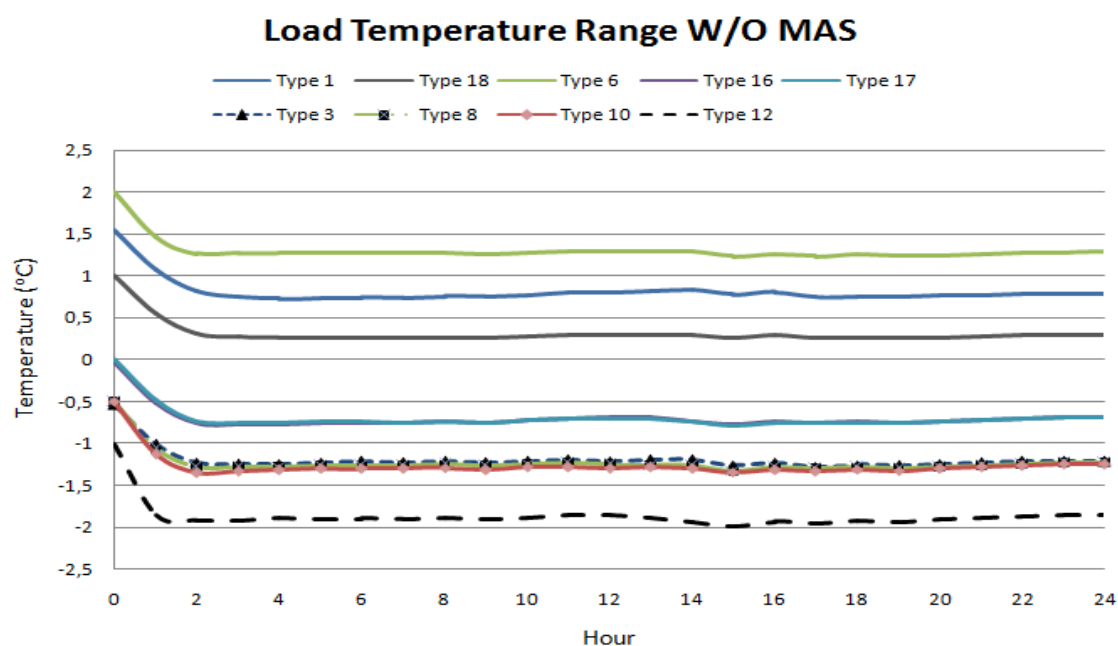


Εικόνα 35: Μέση Διακύμανση θερμοκρασίας εντός των εμπορευματοκιβωτίων με 5 διαφορετικά προϊόντα χωρίς τη χρήση πολυπρακτορικού συστήματος

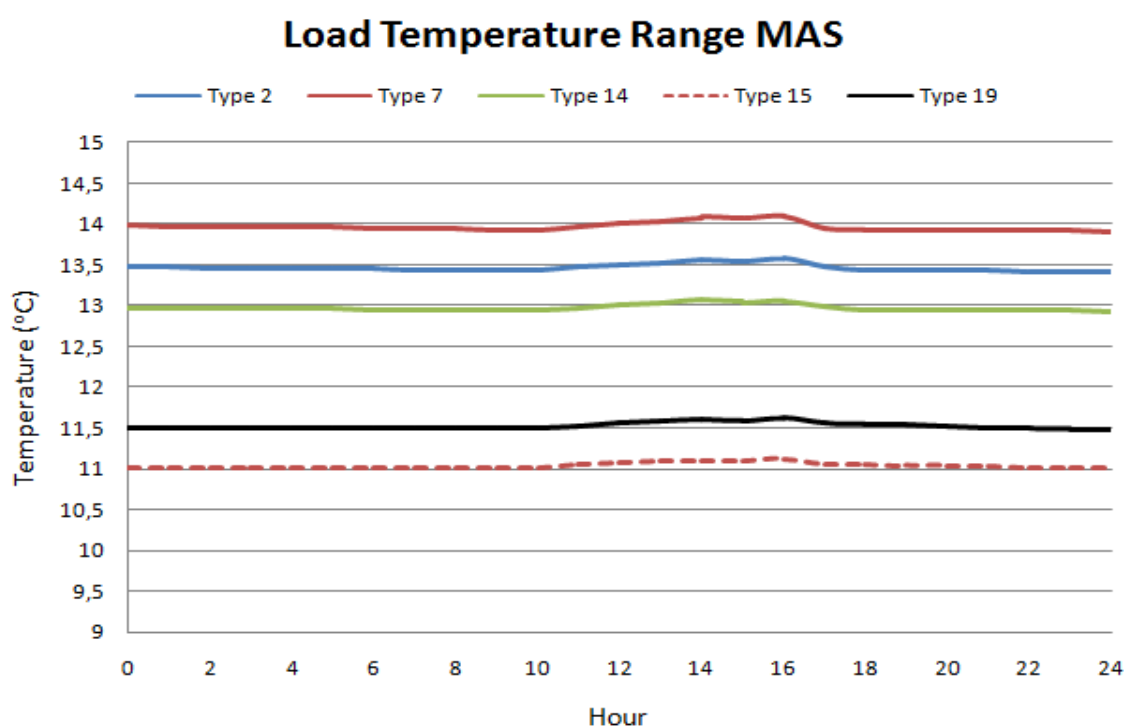
Στην Εικόνα 34 παρουσιάζεται η μέση διακύμανση θερμοκρασίας για τα εμπορευματοκιβώτια που περιέχουν τέσσερα διαφορετικά προϊόντα με ελεγχόμενη τη λειτουργία τους και αντίστοιχα στην Εικόνα 35 παρουσιάζεται η μέση διακύμανση για τα ίδια εμπορευματοκιβώτια χωρίς έλεγχο της λειτουργίας τους. Όπως φαίνεται, στην Εικόνα 34 η θερμοκρασία αυξομειώνεται ομαλά και η θερμοκρασία βρίσκεται εντός αποδεκτών ορίων σύμφωνα με τις προδιαγραφές των προϊόντων και στο τέλος της ημέρας η θερμοκρασία βρίσκεται στα ίδια επίπεδα όπως ξεκίνησε έτσι ώστε να επαναπρογραμματιστεί η λειτουργία τους. Επιπλέον, η αυξομείωση της θερμοκρασίας ακολουθεί την ίδια καμπύλη με εκείνη της ζήτησης κατά τη διάρκεια της ημέρας και την τιμολογιακή πολιτική που ορίζει ο διαχειριστής. Αντίθετα, στην Εικόνα 35, η θερμοκρασία μειώνεται κατά τις πρώτες ώρες λειτουργίας και παραμένει σταθερή, με ελάχιστες διακυμάνσεις στην θερμοκρασία, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η συνολική ζήτηση του λιμένα ή η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, η θερμοκρασία στο τέλος της ημέρας παραμένει αρκετά χαμηλή σε σχέση με εκείνη στο ξεκίνημα λειτουργίας τους. Παρόμοιο μοτίβο παρουσιάζεται και στις θερμοκρασίες εντός των εμπορευματοκιβωτίων που παρουσιάζονται στις Εικόνες 36-41.



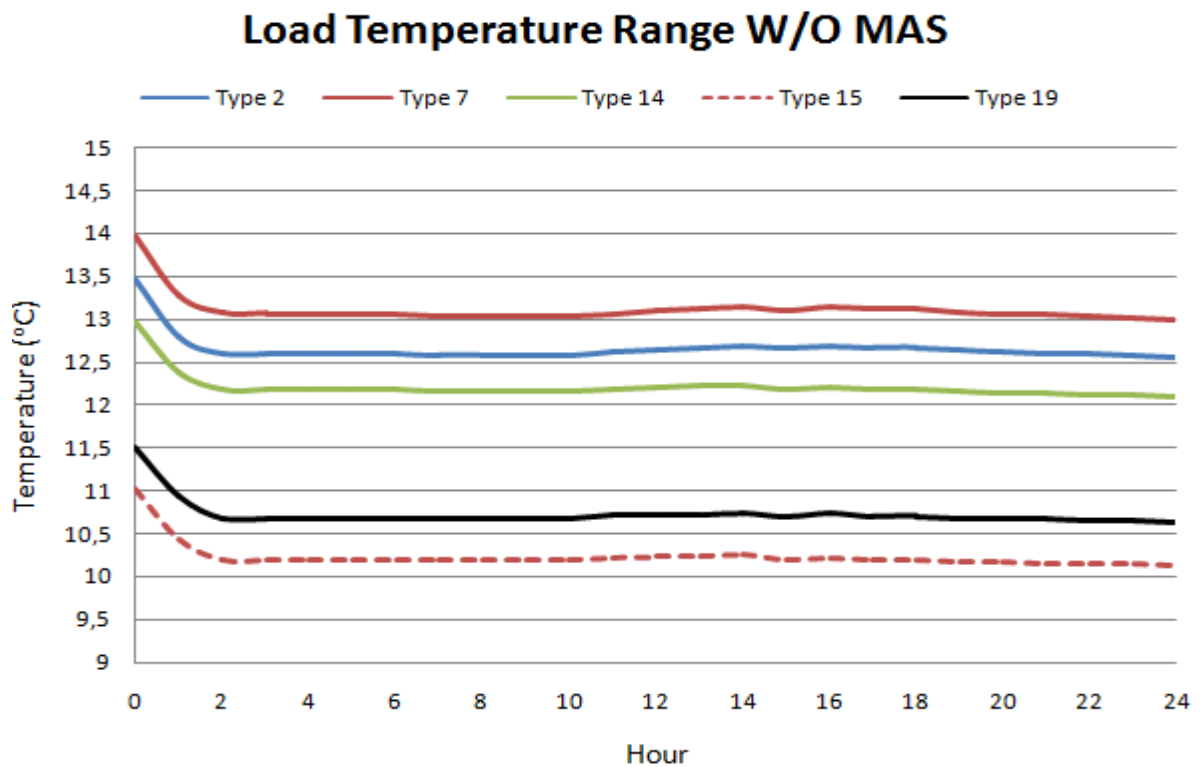
**Εικόνα 36: Μέση διακύμανση θερμοκρασίας εντός των εμπορευματοκιβωτίων με 9 διαφορετικά προϊόντα με χρήση του συστήματος MAS που αναπτύχθηκε**



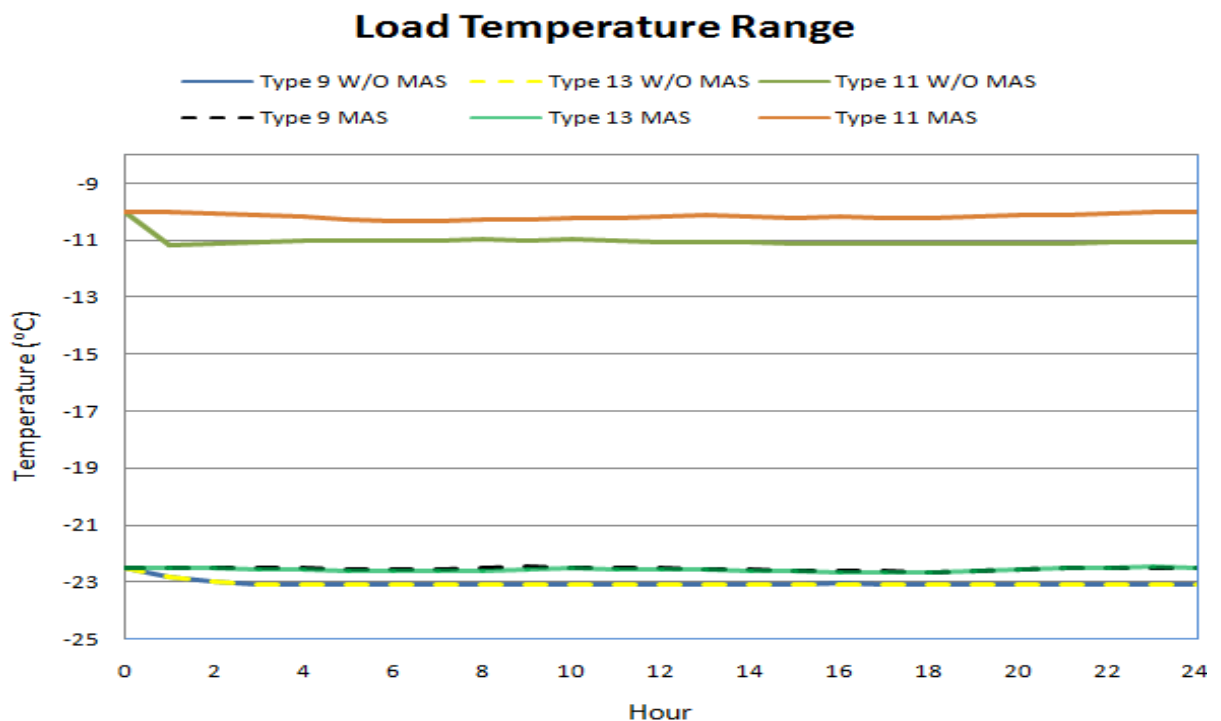
Εικόνα 37: Μέση διακύμανση θερμοκρασίας εντός των εμπορευματοκιβωτίων με 9 διαφορετικά προϊόντα χωρίς τη χρήση του συστήματος MAS που αναπτύχθηκε



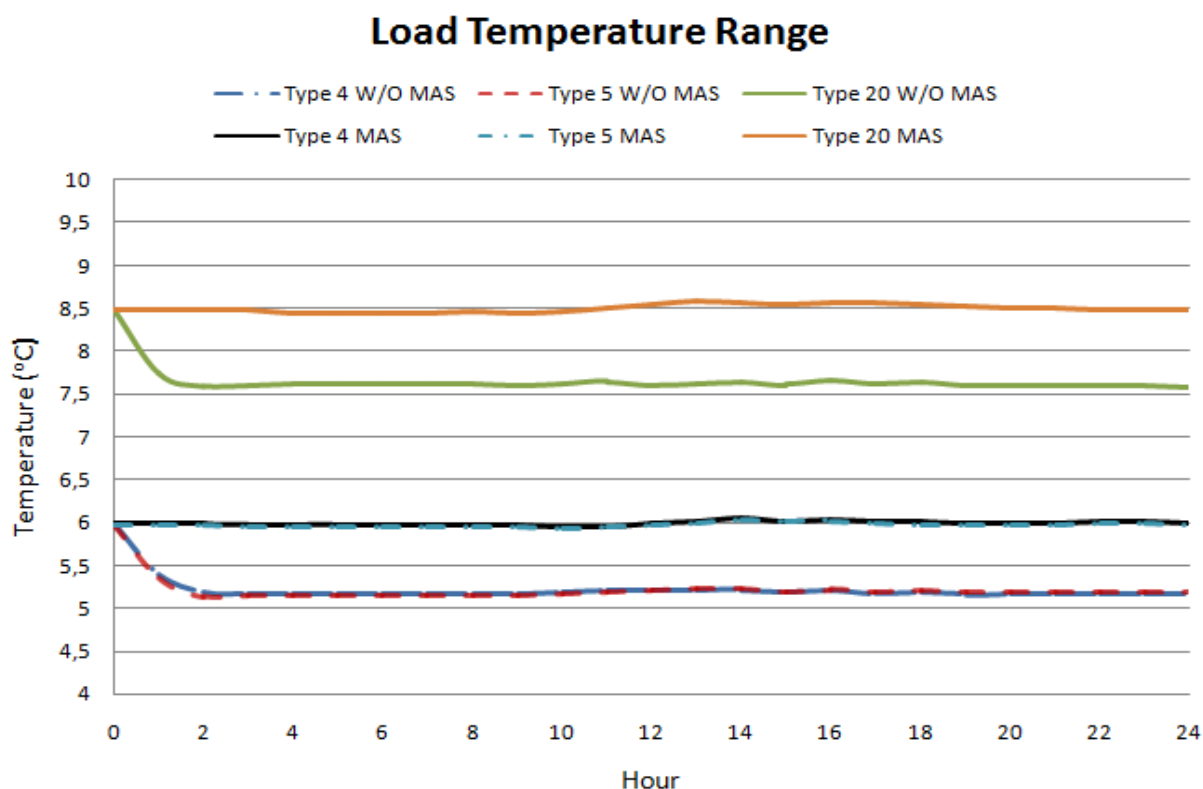
Εικόνα 38: Μέση διακύμανση θερμοκρασίας εντός των εμπορευματοκιβωτίων με 5 διαφορετικά προϊόντα με χρήση του συστήματος MAS που αναπτύχθηκε



Εικόνα 39: Μέση διακύμανση θερμοκρασίας εντός των εμπορευματοκιβωτίων με 5 διαφορετικά προϊόντα χωρίς τη χρήση του συστήματος MAS που αναπτύχθηκε



Εικόνα 40: Μέση διακύμανση θερμοκρασίας εντός των εμπορευματοκιβωτίων με 3 διαφορετικά προϊόντα με τη χρήση του συστήματος MAS και χωρίς αυτό



**Εικόνα 41: Μέση διακύμανση θερμοκρασίας εντός των εμπορευματοκιβωτίων με 3 διαφορετικά προϊόντα με τη χρήση του συστήματος MAS και χωρίς αυτό**

Στις Εικόνες 36-41 είναι έντονες οι διαφορές στις θερμοκρασίες κατά τις πρώτες ώρες λειτουργίας (περίπου 1°C), κάτι που οφείλεται στην μη ύπαρξη ελέγχου, καθώς τα εμπορευματοκιβώτια είναι προγραμματισμένα να λειτουργούν όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει κάποια όρια, αντίθετα η ελεγχόμενη λειτουργία εξετάζει τη συνολική ζήτηση του λιμένα, την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας και τη θερμοκρασία εντός του εμπορευματοκιβωτίου προτού τεθεί σε λειτουργία. Είναι προφανές, ότι σε όλες τις περιπτώσεις η θερμοκρασία εντός των εμπορευματοκιβωτίων είναι αρκετά σταθεροποιημένη, ανεξάρτητα από τις εναλλαγές της περιβαλλοντικής θερμοκρασίας.

# 6.Συμπεράσματα & Μελλοντική Έρευνα

---

## 6.1 Σκοπός Εργασίας

Κύριος σκοπός της εργασίας αυτής, ήταν η δημιουργία ενός υπολογιστικού μοντέλου ικανού να διαχειρίζεται αρκετούς περιορισμούς και μεταβλητές που συνθέτουν ένα μεγάλο εμπορικό λιμάνι και την περιβάλλουσα περιοχή του, ώστε να επιτευχθεί η μετατόπιση του φορτίου κατά τις ώρες υψηλής ζήτησης χωρίς να διαταράσσεται η λειτουργία και η σταθερότητα του ηλεκτρικού δικτύου του.

Θα πρέπει να αναφερθεί προς τους αναγνώστες ότι το μοντέλο που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία ώστε να βελτιστοποιηθεί η συνολική λειτουργία του δικτύου του λιμένα που αποτελείται από ποικίλα φορτία με διαφορετικά χαρακτηριστικά, περιορισμούς και τρόπο λειτουργίας, είναι καινοτόμο και δεν έχει εφαρμοστεί κάτι παρόμοιο στη σχετική βιβλιογραφία. Έτσι, για την ομαλή και σωστή διεξαγωγή των προσομοιώσεων του μοντέλου, χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά στοιχεία για τα διάφορα φορτία του λιμένα σύμφωνα με τις διεθνείς προδιαγραφές και πραγματικές καταγεγραμμένες τιμές κατανάλωσης.

Επιπρόσθετα, ο διαχωρισμός σε ευέλικτα και μη ευέλικτα φορτία έγινε έπειτα από μελέτη σχετικής βιβλιογραφίας για κάθε φορτίο και προσομοιώσεων. Βέβαια, σχετικές προσομοιώσεις υπέδειξαν ότι η συμπεριφορά τους ήταν παρόμοια με την βιβλιογραφία αλλά η κατανάλωσή τους παρουσίαζε σημαντικές διαφορές, καθώς η λειτουργία και η συμπεριφορά τους διαμορφώνονταν σύμφωνα με τα γειτονικά ίδιου τύπου φορτία και τη συνολική κατανάλωση του συστήματος. Τέλος, τα συμπεράσματα και οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα αναλύονται στη συνέχεια.

## 6.2 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία, προτάθηκε μια καινοτόμος μέθοδος διαχείρισης της ενέργειας μεγάλων λιμένων, που περιλαμβάνουν ποικίλα ευέλικτα και μη φορτία στο σύστημά τους. Η μέθοδος επιλύεται με χρήση πολυπρακτορικού συστήματος. Η επιλογή χρήσης πολυπρακτορικού συστήματος ήταν απαραίτητη εξαιτίας της πολυπλοκότητας του εξεταζόμενου συστήματος όπου απαιτείται μια γρήγορη και αξιόπιστη λύση. Η ιεραρχική δομή του προτεινόμενου MAS, οι στόχοι κάθε πράκτορα και ο τρόπος που έχουν σχεδιαστεί για να επιτευχθούν αναλύεται λεπτομερώς. Οι κύριοι στόχοι του προτεινόμενου πολυπρακτορικού συστήματος, είναι η διασφάλιση της σταθερότητας του δικτύου χωρίς να παραβιάζεται κανένας περιορισμός των διαφόρων φορτίων του συστήματος με την ταυτόχρονη μετατόπιση του φορτίου.

Η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου, εξετάστηκε από τα αποτελέσματα προσομοίωσης σε μελέτη περίπτωσης που αντιπροσωπεύει ένα μεγάλο λιμένα που περιέχει χιλιάδες εμπορευματοκιβώτια ελεγχόμενης θερμοκρασίας και συνδεδεμένα ηλεκτρικά οχήματα, καθώς επίσης και αρκετές παροχές ηλεκτρικής ενέργειας σε πλοία κατά τον ελλιμενισμό τους. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, επιβεβαίωσαν την αποδοτικότητα της προτεινόμενης μεθόδου καθώς χρειάστηκαν μερικοί μόνο γύροι διαπραγματεύσεων μεταξύ των πρακτόρων, ώστε να επιτευχθεί μια λύση που ικανοποιεί πλήρως τους λειτουργικούς περιορισμούς του συστήματος.

## 6.3 Μελλοντική Έρευνα

Παρά τον εκτεταμένο χρόνο και προσπάθεια που χρειάστηκαν για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, μπορούν να γίνουν αρκετές αλλαγές και τροποποιήσεις ώστε να βελτιωθεί η προτεινόμενη μέθοδος.

Αρχικά, η μελέτη περίπτωσης που υιοθετήθηκε και εξετάστηκε μπορεί να τροποποιηθεί από τις εκάστοτε ανάγκες του λιμένα στον οποίο θα εφαρμοστεί. Έτσι, τα λιμάνια στα οποία δεν υπάρχουν οι απαραίτητες υποδομές για παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στα πλοία κατά τον ελλιμενισμό τους μπορεί να αφαιρεθεί και στη θέση της να τοποθετηθεί ένα άλλο ευέλικτο φορτίο. Στην παρούσα εργασία, οι γερανοί θεωρήθηκαν ως μη ευέλικτο φορτίο σύμφωνα με τη λειτουργία τους στο συγκεκριμένο λιμένα. Βέβαια, υπάρχουν αρκετές μέθοδοι σύμφωνα με τις οποίες, οι γερανοί μπορούν να θεωρηθούν ως ευέλικτο φορτίο με την επιβολή αυστηρών περιορισμών στη λειτουργία τους.

Επιπρόσθετα, στην προτεινόμενη μέθοδο η πρόβλεψη και η δημιουργία του προφίλ λειτουργίας κάθε ευέλικτου φορτίου γινόταν στην αρχή της ημέρας και δεν εξετάστηκαν τυχόν αλλαγές κατά τη διάρκεια της ημέρας. Στα μεγάλα λιμάνια, αν και το πρόγραμμα εργασιών είναι συγκεκριμένο για κάθε ημέρα, μπορούν να συμβούν αλλαγές όπως για παράδειγμα η καταστροφή εξαρτημάτων στους εξοπλισμούς διαφόρων φορτίων ή η αλλαγή στο πρόγραμμα ελλιμενισμού κάποιου πλοίου ή αλλαγή στον απόπλου κάποιου πλοίου. Έτσι, η μέθοδος αυτή μπορεί να τροποποιηθεί κατάλληλα, ώστε τα δεδομένα των πρακτόρων, οι αποφάσεις από το διαχειριστή, το φορτίο της περιβάλλουσας περιοχής και η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας να μη βασίζονται σε πρόβλεψη αλλά σε πραγματικό χρόνο. Οι υπολογιστικές απαιτήσεις, οι χιλιάδες περιορισμοί και παράμετροι που θα πρέπει να εξετάζει συνεχώς ο διαχειριστής το καθιστά αρκετά χρονοβόρο και απαιτούνται οι κατάλληλες υπολογιστικές υποδομές ώστε να είναι αποδοτικό και η σχέση κόστους-αποτελέσματος να είναι συμφέρουσα.

Τέλος, το σύστημα μπορεί να τροποποιηθεί κατάλληλα ώστε η λειτουργία των φορτίων του λιμένα να εξαρτάται από τους ρύπους και το κόστος και όχι μόνο από την πλασματική τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας που ορίζει ο διαχειριστής.

# Βιβλιογραφία

---

- [1]. K. Marquart, T. Haasdijk, G. B. Ferrari, and R. Schmidhalter, “Shore-to-ship power”, *ABB Review*, no. 4, pp. 56-60, 2010.
- [2]. T. W. P. Smith et.al., “Third IMO GHG Study 2014”, International Maritime Organization (IMO), London, UK, Apr. 2015.
- [3]. G. Buiza, S. Cepolina, A. Dobrijevic, M. Del Mar Cerbápn, O. Djordjevic, and C. González, “Current situation of the Mediterranean container ports regarding the operational, energy and environment areas”, *Proc. IEEE IESM Int. Conference Ind. Eng. and Syst. Manag.*, pp. 530, Oct. 2015.
- [4]. A. Gialketsi, G.J. Tsekouras, F.D. Kanellos, J. Prousalidis, “Reducing pollutant emissions in ports: Optimized design & operation of the electrical power generation system, based on the classification of Ship Total Load Demand Profiles”, *INEC 2012*, 15-17 May, 2012, Edinburgh, pp. 254-263.
- [5]. N. D. Hatziargyriou , “Microgrids: The key to unlock distributed energy resources”, *IEEE Power Energy Mag., Guest Editorial, Special Issue on Microgrids*, vol. 6, no. 3, pp. 26-29, May/Jun. 2008.
- [6]. V.C. Güngör, D. Sahin, T. Kocak, S. Ergut, C. Buccella, C. Cecati, and G. P. Hancke, “Smart grid technologies: Communication technologies and standards”, *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 7, no. 4, pp. 529-539, Nov. 2011.
- [7]. P. Palensky, and D. Dietrich, “Demand side management: Demand response, intelligent energy systems, and smart loads”, *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 7, no. 3, pp. 381-388, Aug. 2011.
- [8]. G. Wilmsmeier et.al., “*Energy Consumption and Efficiency: Emerging Challenges from Reefer Trade in South American Container Terminals*”, ISU Corp., Issue N. 329, Number 1, 2014. Available: <http://www.cepal.org/en/publications/37282-energy-consumption-and-efficiency-emerging-challenges-reefer-trade-south-american>
- [9]. T. K. Tran, “Study of Electrical Usage and Demand at the Container Terminal”, Ph.D. dissertation, Centre for Intelligent Systems Research, Deakin Univ., Melbourne, Australia, 2012.
- [10]. E. L. Karfopoulos, and N. D. Hatziargyriou , “A multi-agent system for controlled charging of a large population of electric vehicles,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 2, pp. 1196-1204, 2013.
- [11]. D. Geysen and J. Verbeeck, “ *Application of Smart Energy Networks*”, Show case, Antwerp: e-harbours, electric.

- [12]. R. Heij, "Opportunities for peak shaving electricity consumption at container terminals," M.S. thesis, Dept. Transp. and Log., Delft Univ., Delft, Netherlands, 2015.
- [13]. German Insurance Association (2016, October). *Container Handbook* [Online]. Available: [https://www.containerhandbuch.de/chb\\_e/wild/index.html](https://www.containerhandbuch.de/chb_e/wild/index.html)
- [14]. ISO/IEC 668:2013(E), 6<sup>th</sup> Edition, Series 1 freight containers Classification, dimensions and ratings, Geneva, Switzerland, 2013.
- [15]. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, "Thermal Properties of Foods," ch. 9 in ASHRAE Handbook-Refrigeration: SI edition, Atlanta, GA, 2006.
- [16]. I. Momber, T. Gomez, M. Rivier, and C. Mateo, "Benefits of EV supplier-aggregators and distribution system operators from applying smart charging of plug-in electric vehicles", in *Proc. Cigre Int. Symp.the Electric Power System of the Future: Integrating Supergrids and Microgrids*, Bologna, Italy, Sep. 2011.
- [17]. Board, Air Resources, "*Technology Assessment: Medium-and Heavy-Duty Battery Electric Trucks and Buse*", DRAFT, Air Resources Board, Oct. 2015.
- [18]. *Sustainable Investment Group*, "*Electric Vehicle Charging Stations: Atlanta's Friend or Foe?*", Copyright 2015, Sustainable Investment Group (SIG).
- [19]. M. Rogge, S. Wollny and D. U. Sauer. "Fast Charging Battery Buses for the Electrification of Urban Public Transport- A Feasibility Study Focusing on Charging Infrastructure and Energy Storage Requirements ", *Energies*, 2015: 4587-4606.
- [20]. Y. He, B. Venkatesh, L. Guan, "Optimal Scheduling for Charging and Discharging of Electric Vehicles," in *Smart Grid, IEEE Trans.*, vol. 3, no. 3., pp. 1095-1105, Sept. 2012.
- [21]. J. A. P. Lopes, F. J. Soares, and P. M. R. Almeida, "Integration of electric vehicles in the electric power system," *Proc. IEEE*, vol. 99, no. 1, pp. 168-183, Jan. 2011.
- [22]. A. Karnama, F. O. Resende, and J. A. P. Lopes, "Optimal management of battery charging of electric vehicles: A new microgrid feature", in *Proc. IEEE PowerTech Conference*, Trondheim, Norway, Jun. 2011.
- [23]. Z. Ma, D. Callaway, and I. Hiskens, "Decentralized charging control for large population of plug-in electric vehicles," in *Proc. 49th IEEE Decision and Control (CDC) Conf.*, Yokohama, Japan, Dec. 2010
- [24]. Z. Ma, D. Callaway, and I. Hiskens, "Decentralized charging control for large population of plug-in electric vehicles: Application of the Nash certainty equivalence principle," in *Proc. IEEE Int. Control Applications (CCA) Conf.*, Yokohama, Japan, Sep. 2010.

- [25]. E. Sortomme, M. M. Hindi, S. D. J. MacPherson, and S. S. Venkata, "Coordinated charging of plug-in hybrid electric vehicles to minimize distribution system losses," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 2, no. 1, pp. 198–205, Mar. 2011.
- [26]. M. W. Gustafson, J. S. Baylor, and S. S. Mulnix, "The equivalent hours loss factor revisited," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 3, no. 4, pp.1502–1508, Nov. 1988.
- [27]. O. M. Mikic, "Variance-based energy loss computation in low voltage distribution networks," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 1, pp. 179–187, Feb. 2007.
- [28]. F. Zambonelli, N. Jennings, and W. Michael, "Developing multiagent systems: The Gaia methodology," *ACM Trans. Softw. Eng. Methodol.*, vol. 12, no. 3, pp. 317–370, Jul. 2003.
- [29]. Metering & Smart Energy International, "*Communication interface for EV energy management specified in Europe*", Copyright 2013, Metering & Smart Energy International.
- [30]. G. Sulligoi, D. Bosich, R. Pelaschiar, G. Lipardi, F. Tosato, "Shore-to-Ship Power", in *Proc. IEEE*, vol. 103, no. 12, pp. 2381-2400, Dec. 2015.
- [31]. P. Ericsson, "Shore-side power supply-a feasibility study and a technical solution for an on-shore electrical infrastructure to supply vessels with electrical power while in port," M.S. thesis, Dept. Energy and Environ., Chalmers Univ., Göteborg, Sweden, 2008.
- [32]. G. J. Tsekouras, F. D. Kanellos, "Ship to shore connection — Reliability analysis of ship power system," *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Lausanne, 2016, pp. 2955-2961.
- [33]. P.E. Dev Paul, and P. B. Chavdarian, "A closer look at the grounding of shore-to-ship power supply system", *Conference Rec. – Ind. and Commercial Power Syst. Tech. Conference*, May 2009.
- [34]. J.M. Prousalidis, G.J. Tsekouras, F.D. Kanellos, "New challenges emerged from the development of more efficient electric energy generation units", *Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), 2011 IEEE*, Proceeding, pp.374,381, 10-13 April 2011.
- [35]. P. Michalopoulos, F. D. Kanellos, G. J. Tsekouras and J. M. Prousalidis, "A Method for Optimal Operation of Complex Ship Power Systems Employing Shaft Electric Machines," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 2, no. 4, pp. 547-557, Dec. 2016.
- [36]. Y. Khersonsky, M. Islam, K. Peterson, "Challenges of connecting shipboard marine systems to medium voltage shore-side electrical power", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 43, no. 3, pp. 838-844, May 2007.

- [37]. D. Paul, and V. Haddadian, "Transient overvoltage protection of shore-to-ship power supply system", *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 47, no. 3, pp. 1193-1200, May 2011.
- [38]. T.G. Papoutsoglou, "A Cold Ironing Study on Modern Ports, Implementation and Benefits Thriving for Worldwide Ports", *M.S. thesis, Dept. Naval Archit. & Marine Engin., National Tech. Univ. of Athens, Athens Greece. 2012.*
- [39]. P.E. Dev Paul, and P.E. VahikHaddian, "Shore-to-ship power supply system for a cruise ship", *Conference Rec. - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, Oct. 2008.
- [40]. T. Tran, S. Nahavandi and R. Reid, "Power demand and energy usage of container crane - Comparison between AC and DC drive," in *Proc. Universities Power Engineering Conference*, 2008.
- [41]. J. Ferber, O. Gutknect and F. Michel, "From Agents to Organizations: An Organizational View of Multi-agent Systems", In *Agent-Oriented Software Engineering IV*, by J. P. Muller and J. Odell P. Giorgini, Melbourne, Australia, Springer, 2003, pp. 214-230.
- [42]. M. Schumacher, "*Multi-Agent Systems*", in *Objective Coordination in Multi-Agent System Engineering*, Springer, 2001, pp. 9-29.
- [43]. N. R. Jennings, K. Sycara, and M. Wooldridge, "A Roadmap of Agent Research and Development", in "*Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*", Vol.1, 1998, pp. 7-38.
- [44]. M. Schumacher, F. Chantemargue, and B. Hirsbrunner, "The STL++ Coordination Language: a Base for Implementing Distributed Multi-Agent Applications", P. Ciancarini and Alexander L. Wolf, editors, in *Proc. of the Third Internat. Conf. on Coord. Models and Lang.*, vol.1594 of *Lecture Notes in Computer Science*, Amsterdam, The Netherlands, Springer Verlag. April 26-28 1999.
- [45]. N.R. Jennings, "Coordination Techniques for Distributed Artificial Intelligence", in "*Foundations of Distributed Artificial*". John Wiley and Sons, 1996.
- [46]. S. D. J. McArthur, E. M. Davidson, V.M. Catterson, A. L. Dimeas, N. D. Hatziaargyriou, F. Ponci, and T. Funabashi, "Multi-agent systems for power engineering applications - part I: Concepts, approaches, and technical challenges", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 4, pp. 1743-1752, Nov. 2007.
- [47]. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, "Thermal Properties of Foods," ch. 9 in *ASHRAE Handbook-Refrigeration: SI edition*, Atlanta, GA, 2006.

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Θερμικές Ιδιότητες των Τροφίμων

Food Item	Moisture Content, %	Protein, %	Fat, %	Carbohydrate		Ash, %	Initial Freezing Point, °C	Specific Heat Above Freezing, kJ/(kg·K)	Specific Heat Below Freezing kJ/(kg·K)	Latent Heat of Fusion, kJ/kg
	$x_{w0}$	$x_p$		Total, % $x_c$	Fiber, % $x_f$					
<b>Vegetables</b>										
Artichokes, globe	84.94	3.27	0.15	10.51	5.40	1.13	-1.2	3.90	2.02	284
Jerusalem	78.01	2.00	0.01	17.44	1.60	2.54	-2.5	3.63	2.25	261
Asparagus	92.40	2.28	0.20	4.54	2.10	0.57	-0.6	4.03	1.79	309
Beans, snap	90.27	1.82	0.12	7.14	3.40	0.66	-0.7	3.99	1.85	302
lima	70.24	6.84	0.86	20.16	4.90	1.89	-0.6	3.52	2.07	235
Beets	87.58	1.61	0.17	9.56	2.80	1.08	-1.1	3.91	1.94	293
Broccoli	90.69	2.98	0.35	5.24	3.00	0.92	-0.6	4.01	1.82	303
Brussels sprouts	86.00	3.38	0.30	8.96	3.80	1.37	-0.8	3.90	1.91	287
Cabbage	92.15	1.44	0.27	5.43	2.30	0.71	-0.9	4.02	1.85	308
Carrots	87.79	1.03	0.19	10.14	3.00	0.87	-1.4	3.92	2.00	293
Cauliflower	91.91	1.98	0.21	5.20	2.50	0.71	-0.8	4.02	1.84	307
Celeriac	88.00	1.50	0.30	9.20	1.80	1.00	-0.9	3.90	1.89	294
Celery	94.64	0.75	0.14	3.65	1.70	0.82	-0.5	4.07	1.74	316
Collards	90.55	1.57	0.22	7.11	3.60	0.55	-0.8	4.01	1.86	302
Corn, sweet, yellow	75.96	3.22	1.18	19.02	2.70	0.62	-0.6	3.62	1.98	254
Cucumbers	96.01	0.69	0.13	2.76	0.80	0.41	-0.5	4.09	1.71	321
Eggplant	92.03	1.02	0.18	6.07	2.50	0.71	-0.8	4.02	1.83	307
Endive	93.79	1.25	0.20	3.35	3.10	1.41	-0.1	4.07	1.69	313
Garlic	58.58	6.36	0.50	33.07	2.10	1.50	-0.8	3.17	2.19	196
Ginger, root	81.67	1.74	0.73	15.09	2.00	0.77	—	3.75	1.94	273
Horseradish	78.66	9.40	1.40	8.28	2.00	2.26	-1.8	3.70	2.12	263
Kale	84.46	3.30	0.70	10.01	2.00	1.53	-0.5	3.82	1.86	282
Kohlrabi	91.00	1.70	0.10	6.20	3.60	1.00	-1.0	4.02	1.90	304
Leeks	83.00	1.50	0.30	14.15	1.80	1.05	-0.7	3.77	1.91	277
Lettuce, iceberg	95.89	1.01	0.19	2.09	1.40	0.48	-0.2	4.09	1.65	320
Mushrooms	91.81	2.09	0.42	4.65	1.20	0.89	-0.9	3.99	1.84	307
Okra	89.58	2.00	0.10	7.63	3.20	0.70	-1.8	3.97	2.05	299
Onions	89.68	1.16	0.16	8.63	1.80	0.37	-0.9	3.95	1.87	300
dehydrated flakes	3.93	8.95	0.46	83.28	9.20	3.38	—	—	—	13
Parsley	87.71	2.97	0.79	6.33	3.30	2.20	-1.1	3.93	1.94	293
Parsnips	79.53	1.20	0.30	17.99	4.90	0.98	-0.9	3.74	2.02	266
Peas, green	78.86	5.42	0.40	14.46	5.10	0.87	-0.6	3.75	1.98	263
Peppers, freeze-dried	2.00	17.90	3.00	68.70	21.30	8.40	—	—	—	7
sweet, green	92.19	0.89	0.19	6.43	1.80	0.30	-0.7	4.01	1.80	308
Potatoes, main crop	78.96	2.07	0.10	17.98	1.60	0.89	-0.6	3.67	1.93	264
sweet	72.84	1.65	0.30	24.28	3.00	0.95	-1.3	3.48	2.09	243
Pumpkins	91.60	1.00	0.10	6.50	0.50	0.80	-0.8	3.97	1.81	306
Radishes	94.84	0.60	0.54	3.59	1.60	0.54	-0.7	4.08	1.77	317
Rhubarb	93.61	0.90	0.20	4.54	1.80	0.76	-0.9	4.05	1.83	313
Rutabaga	89.66	1.20	0.20	8.13	2.50	0.81	-1.1	3.96	1.92	299
Salsify (vegetable oyster)	77.00	3.30	0.20	18.60	3.30	0.90	-1.1	3.65	2.05	257
Spinach	91.58	2.86	0.35	3.50	2.70	1.72	-0.3	4.02	1.75	306
Squash, summer	94.20	0.94	0.24	4.04	1.90	0.58	-0.5	4.07	1.74	315
winter	87.78	0.80	0.10	10.42	1.50	0.90	-0.8	3.89	1.87	293
Tomatoes, mature green	93.00	1.20	0.20	5.10	1.10	0.50	-0.6	4.02	1.77	311
ripe	93.76	0.85	0.33	4.64	1.10	0.42	-0.5	4.08	1.79	313
Turnip	91.87	0.90	0.10	6.23	1.80	0.70	-1.1	4.00	1.88	307
greens	91.07	1.50	0.30	5.73	3.20	1.40	-0.2	4.01	1.74	304
Watercress	95.11	2.30	0.10	1.29	1.50	1.20	-0.3	4.08	1.69	318
Yams	69.60	1.53	0.17	27.89	4.10	0.82	—	3.47	2.06	232
<b>Fruits</b>										
Apples, fresh	83.93	0.19	0.36	15.25	2.70	0.26	-1.1	3.81	1.98	280
dried	31.76	0.93	0.32	65.89	8.70	1.10	—	2.57	2.84	106
Apricots	86.35	1.40	0.39	11.12	2.40	0.75	-1.1	3.87	1.95	288
Avocados	74.27	1.98	15.32	7.39	5.00	1.04	-0.3	3.67	1.98	248
Bananas	74.26	1.03	0.48	23.43	2.40	0.80	-0.8	3.56	2.03	248
Blackberries	85.64	0.72	0.39	12.76	5.30	0.48	-0.8	3.91	1.94	286
Blueberries	84.61	0.67	0.38	14.13	2.70	0.21	-1.6	3.83	2.06	283
Cantaloupes	89.78	0.88	0.28	8.36	0.80	0.71	-1.2	3.93	1.91	300
Cherries, sour	86.13	1.00	0.30	12.18	1.60	0.40	-1.7	3.85	2.05	288
sweet	80.76	1.20	0.96	16.55	2.30	0.53	-1.8	3.73	2.12	270
Cranberries	86.54	0.39	0.20	12.68	4.20	0.19	-0.9	3.91	1.93	289

Food Item	Moisture Content, %	Protein, %	Fat, %	Carbohydrate		Ash, %	Initial Freezing Point, °C	Specific Heat Above Freezing, kJ/(kg·K)	Specific Heat Below Freezing kJ/(kg·K)	Latent Heat of Fusion, kJ/kg
	$x_{wo}$	$x_p$	$x_f$	Total, %	Fiber, %	$x_a$				
Currents, European black	81.96	1.40	0.41	15.38	0.00	0.86	-1.0	3.71	1.95	274
red and white	83.95	1.40	0.20	13.80	4.30	0.66	-1.0	3.85	1.98	280
Dates, cured	22.50	1.97	0.45	73.51	7.50	1.58	-15.7	2.31	2.30	75
Figs, fresh	79.11	0.75	0.30	19.18	3.30	0.66	-2.4	3.70	2.25	264
dried	28.43	3.05	1.17	65.35	9.30	2.01	—	2.51	4.13	95
Gooseberries	87.87	0.88	0.58	10.18	4.30	0.49	-1.1	3.95	1.96	293
Grapefruit	90.89	0.63	0.10	8.08	1.10	0.31	-1.1	3.96	1.89	304
Grapes, American	81.30	0.63	0.35	17.15	1.00	0.57	-1.6	3.71	2.07	272
European type	80.56	0.66	0.58	17.77	1.00	0.44	-2.1	3.70	2.16	269
Lemons	87.40	1.20	0.30	10.70	4.70	0.40	-1.4	3.94	2.02	292
Limes	88.26	0.70	0.20	10.54	2.80	0.30	-1.6	3.93	2.03	295
Mangos	81.71	0.51	0.27	17.00	1.80	0.50	-0.9	3.74	1.95	273
Melons, casaba	92.00	0.90	0.10	6.20	0.80	0.80	-1.1	3.99	1.87	307
honeydew	89.66	0.46	0.10	9.18	0.60	0.60	-0.9	3.92	1.86	299
watermelon	91.51	0.62	0.43	7.18	0.50	0.26	-0.4	3.97	1.74	306
Nectarines	86.28	0.94	0.46	11.78	1.60	0.54	-0.9	3.86	1.90	288
Olives	79.99	0.84	10.68	6.26	3.20	2.23	-1.4	3.76	2.07	267
Oranges	82.30	1.30	0.30	15.50	4.50	0.60	-0.8	3.81	1.96	275
Peaches, fresh	87.66	0.70	0.90	11.10	2.00	0.46	-0.9	3.91	1.90	293
dried	31.80	3.61	0.76	61.33	8.20	2.50	—	2.57	3.49	106
Pears	83.81	0.39	0.40	15.11	2.40	0.28	-1.6	3.80	2.06	280
Persimmons	64.40	0.80	0.40	33.50	0.00	0.90	-2.2	3.26	2.29	215
Pineapples	86.50	0.39	0.43	12.39	1.20	0.29	-1.0	3.85	1.91	289
Plums	85.20	0.79	0.62	13.01	1.50	0.39	-0.8	3.83	1.90	285
Pomegranates	80.97	0.95	0.30	17.17	0.60	0.61	-3.0	3.70	2.30	270
Prunes, dried	32.39	2.61	0.52	62.73	7.10	1.76	—	2.56	3.50	108
Quinces	83.80	0.40	0.10	15.30	1.90	0.40	-2.0	3.79	2.13	280
Raisins, seedless	15.42	3.22	0.46	79.13	4.00	1.77	—	2.07	2.04	52
Raspberries	86.57	0.91	0.55	11.57	6.80	0.40	-0.6	3.96	1.91	289
Strawberries	91.57	0.61	0.37	7.02	2.30	0.43	-0.8	4.00	1.84	306
Tangerines	87.60	0.63	0.19	11.19	2.30	0.39	-1.1	3.90	1.93	293
<b>Whole Fish</b>										
Cod	81.22	17.81	0.67	0.0	0.0	1.16	-2.2	3.78	2.14	271
Haddock	79.92	18.91	0.72	0.0	0.0	1.21	-2.2	3.75	2.14	267
Halibut	77.92	20.81	2.29	0.0	0.0	1.36	-2.2	3.74	2.18	260
Herring, kippered	59.70	24.58	12.37	0.0	0.0	1.94	-2.2	3.26	2.27	199
Mackerel, Atlantic	63.55	18.60	13.89	0.0	0.0	1.35	-2.2	3.33	2.23	212
Perch	78.70	18.62	1.63	0.0	0.0	1.20	-2.2	3.71	2.15	263
Pollock, Atlantic	78.18	19.44	0.98	0.0	0.0	1.41	-2.2	3.70	2.15	261
Salmon, pink	76.35	19.94	3.45	0.0	0.0	1.22	-2.2	3.68	2.17	255
Tuna, bluefin	68.09	23.33	4.90	0.0	0.0	1.18	-2.2	3.43	2.19	227
Whiting	80.27	18.31	1.31	0.0	0.0	1.30	-2.2	3.77	2.15	268
<b>Shellfish</b>										
Clams	81.82	12.77	0.97	2.57	0.0	1.87	-2.2	3.76	2.13	273
Lobster, American	76.76	18.80	0.90	0.50	0.0	2.20	-2.2	3.64	2.15	256
Oysters	85.16	7.05	2.46	3.91	0.0	1.42	-2.2	3.83	2.12	284
Scallop, meat	78.57	16.78	0.76	2.36	0.0	1.53	-2.2	3.71	2.15	262
Shrimp	75.86	20.31	1.73	0.91	0.0	1.20	-2.2	3.65	2.16	253
<b>Beef</b>										
Brisket	55.18	16.94	26.54	0.0	0.0	0.80	—	3.19	2.33	184
Carcass, choice	57.26	17.32	24.05	0.0	0.0	0.81	-2.2	3.24	2.31	191
select	58.21	17.48	22.55	0.0	0.0	0.82	-1.7	3.25	2.24	194
Liver	68.99	20.00	3.85	5.82	0.0	1.34	-1.7	3.47	2.16	230
Ribs, whole (ribs 6-12)	54.54	16.37	26.98	0.0	0.0	0.77	—	3.16	2.32	182
Round, full cut, lean and fat	64.75	20.37	12.81	0.0	0.0	0.97	—	3.39	2.18	216
full cut, lean	70.83	22.03	4.89	0.0	0.0	1.07	—	3.52	2.12	237
Sirloin, lean	71.70	21.24	4.40	0.0	0.0	1.08	-1.7	3.53	2.11	239
Short loin, porterhouse steak, lean	69.59	20.27	8.17	0.0	0.0	1.01	—	3.49	2.14	232
T-bone steak, lean	69.71	20.78	7.27	0.0	0.0	1.27	—	3.49	2.14	233
Tenderloin, lean	68.40	20.78	7.90	0.0	0.0	1.04	—	3.45	2.14	228
Veal, lean	75.91	20.20	2.87	0.0	0.0	1.08	—	3.65	2.09	254

Food Item	Moisture Content, %	Protein, %	Fat, %	Carbohydrate		Ash, %	Initial Freezing Point, °C	Specific Heat Above Freezing, kJ/(kg·K)	Specific Heat Below Freezing kJ/(kg·K)	Latent Heat of Fusion, kJ/kg
	$x_{w0}$	$x_p$	$x_f$	Total, % $x_c$	Fiber, % $x_{fb}$	$x_a$				
<b>Pork</b>										
Backfat	7.69	2.92	88.69	0.0	0.0	0.70	—	2.17	2.98	26
Bacon	31.58	8.66	57.54	0.09	0.0	2.13	—	2.70	2.70	105
Belly	36.74	9.34	53.01	0.0	0.0	0.49	—	2.80	3.37	123
Carcass	49.83	13.91	35.07	0.0	0.0	0.72	—	3.08	3.10	166
Ham, cured, whole, lean	68.26	22.32	5.71	0.05	0.0	3.66	—	3.47	2.22	228
country cured, lean	55.93	27.80	8.32	0.30	0.0	7.65	—	3.16	2.31	187
Shoulder, whole, lean	72.63	19.55	7.14	0.0	0.0	1.02	-2.2	3.59	2.20	243
<b>Sausage</b>										
Braunschweiger	48.01	13.50	32.09	3.13	0.0	3.27	—	3.01	2.40	160
Frankfurter	53.87	11.28	29.15	2.55	0.0	3.15	-1.7	3.15	2.31	180
Italian	51.08	14.25	31.33	0.65	0.0	2.70	—	3.10	2.37	171
Polish	53.15	14.10	28.72	1.63	0.0	2.40	—	3.14	2.36	178
Pork	44.52	11.69	40.29	1.02	0.0	2.49	—	2.95	2.43	149
Smoked links	39.30	22.20	31.70	2.10	0.0	4.70	—	2.82	2.45	131
<b>Poultry Products</b>										
Chicken	65.99	18.60	15.06	0.0	0.0	0.79	-2.8	4.34	3.32	220
Duck	48.50	11.49	39.34	0.0	0.0	0.68	—	3.06	2.45	162
Turkey	70.40	20.42	8.02	0.0	0.0	0.88	—	3.53	2.28	235
<b>Egg</b>										
White	87.81	10.52	0.0	1.03	0.0	0.64	-0.6	3.91	1.81	293
dried	14.62	76.92	0.04	4.17	0.0	4.25	—	2.29	2.10	49
Whole	75.33	12.49	10.02	1.22	0.0	0.94	-0.6	3.63	1.95	252
dried	3.10	47.35	40.95	4.95	0.0	3.65	—	2.04	2.00	10
Yolk	48.81	16.76	30.87	1.78	0.0	1.77	-0.6	3.05	2.25	163
salted	50.80	14.00	23.00	1.60	0.0	10.60	-17.2	3.01	3.79	170
sugared	51.25	13.80	22.75	10.80	0.0	1.40	-3.9	3.07	2.54	171
<b>Lamb</b>										
Composite of cuts, lean	73.42	20.29	5.25	0.0	0.0	1.06	-1.9	3.60	2.14	245
Leg, whole, lean	74.11	20.56	4.51	0.0	0.0	1.07	—	3.62	2.14	248
<b>Dairy Products</b>										
Butter	17.94	0.85	81.11	0.06	0.0	0.04	—	2.40	2.65	60
<b>Cheese</b>										
Camembert	51.80	19.80	24.26	0.46	0.0	3.68	—	3.10	3.34	173
Cheddar	36.75	24.90	33.14	1.28	0.0	3.93	-12.9	2.77	3.07	123
Cottage, uncreamed	79.77	17.27	0.42	1.85	0.0	0.69	-1.2	3.73	1.99	266
Cream	53.75	7.55	34.87	2.66	0.0	1.17	—	3.16	2.91	180
Gouda	41.46	24.94	27.44	2.22	0.0	3.94	—	2.87	2.77	138
Limburger	48.42	20.05	27.25	0.49	0.0	3.79	-7.4	3.03	2.82	162
Mozzarella	54.14	19.42	21.60	2.22	0.0	2.62	—	3.15	2.46	181
Parmesan, hard	29.16	35.75	25.83	3.22	0.0	6.04	—	2.58	2.94	97
Processed American	39.16	22.15	31.25	1.30	0.0	5.84	-6.9	2.80	2.75	131
Roquefort	39.38	21.54	30.64	2.00	0.0	6.44	-16.3	2.80	3.36	132
Swiss	37.21	28.43	27.45	3.38	0.0	3.53	-10.0	2.78	2.88	124
<b>Cream</b>										
Half and half	80.57	2.96	11.50	4.30	0.0	0.67	—	3.73	2.16	269
Table	73.75	2.70	19.31	3.66	0.0	0.58	-2.2	3.59	2.21	246
Heavy whipping	57.71	2.05	37.00	2.79	0.0	0.45	—	3.25	2.32	193
<b>Ice Cream</b>										
Chocolate	55.70	3.80	11.0	28.20	1.20	1.00	-5.6	3.11	2.75	186
Strawberry	60.00	3.20	8.40	27.60	0.30	0.70	-5.6	3.19	2.74	200
Vanilla	61.00	3.50	11.00	23.60	0.0	0.90	-5.6	3.22	2.74	204
<b>Milk</b>										
Canned, condensed, sweetened	27.16	7.91	8.70	54.40	0.0	1.83	-15.0	2.35	—	91
Evaporated	74.04	6.81	7.56	10.04	0.0	1.55	-1.4	3.56	2.08	247
Skim	90.80	3.41	0.18	4.85	0.0	0.76	—	3.95	1.78	303
Skim, dried	3.16	36.16	0.77	51.98	0.0	7.93	—	1.80	—	11
Whole	87.69	3.28	3.66	4.65	0.0	0.72	-0.6	3.89	1.81	293
dried	2.47	26.32	26.71	38.42	0.0	6.08	—	1.85	—	8
Whey, acid, dried	3.51	11.73	0.54	73.45	0.0	10.77	—	1.68	—	12
sweet, dried	3.19	12.93	1.07	74.46	0.0	8.35	—	1.69	—	11

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Θερμοκρασίες Μεταφοράς και Αποθήκευσης Προϊόντων που Χρησιμοποιήθηκαν

N	Product	Cp Below0/Abov0+	Temperature °C	Freezing/point
1	Apple	0.42/0.92	-1 +4	-1.1
2	Bananas	-/0.8	+13 +14	-0.8
3	Grapes (European)	0.45/0.88	-1 0	-2.1
4	Oranges	0.44/0.92	+2 +10	-0.8
5	Potatoes	0.46/0.87	+4 +8	-0.6
6	Cheese(cottage low fat)	0.47/0.89	0 +4	-1.2
7	Chocolate	-/0.76	+10 +18	-
8	Eggs	0.4/0.76	-2 +1	-
9	Fish(frozen lean)	0.43/0.82	-25 -20	-2.2
10	Fish(chilled oily)	0.38/0.68	-1 0	-2.2
11	Margarine	0.35/0.7	-12 -8	-
12	Meat(chilled pork fatty)	0.32/0.51	-2 0	-
13	Meat(frozen beef lean)	0.42/0.776	-25 -20	-
14	Lemons	0.46/0.92	+11 +15	-1.4
15	Tomatoes	0.49/0.93	+7 +15	-0.6
16	Shrimps	0.51/0.87	-25 -20	-2.2
17	Clams	0.50/0.89	-25 -20	-2.2
18	Asparagus	0.47/0.93	0 +2	-2.5
19	Cucumbers	0.4/0.97	+10 +13	-0.5
20	Avocados	0.37/0.72	+4 +13	-0.3