



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΚΡΗΤΗΣ**

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Διπλωματική Εργασία

**Διαχείριση ζήτησης ηλεκτρικής
ενέργειας μεγάλων λιμένων με
πολυπρακτορικά συστήματα**

Σταύρος Γεννίτσαρης

Επιβλέπων: Φώτης Κανέλλος, Επίκουρος Καθηγητής

Χανιά, Δεκέμβριος 2017



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΚΡΗΤΗΣ**

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Διπλωματική Εργασία

**Διαχείριση ζήτησης ηλεκτρικής
ενέργειας μεγάλων λιμένων με
πολυπρακτορικά συστήματα**

Σταύρος Γεννίτσαρης

Εξεταστική Επιτροπή:

- 1. Φώτης Κανέλλος, Επίκουρος Καθηγητής**
- 2. Βασίλης Κουϊκόγλου, Καθηγητής**
- 3. Ευστράτιος Ιωαννίδης, Επίκουρος Καθηγητής**

Ευχαριστίες

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος σπουδών της σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης υπό την επίβλεψη του επίκουρου καθηγητή Φώτη Κανέλλου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Φώτη Κανέλλο για την παρότρυνση επιλογής του θέματος, τη βοήθεια, τη συμπαράσταση και την άριστη καθοδήγησή του, αλλά και τη δυνατότητα που μου έδωσε να έρθω σε επαφή με έναν τομέα ουσιαστικά άγνωστο σε εμένα μέχρι την ενασχόληση με την παρούσα εργασία.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την ηθική συμπαράσταση τους όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος, ιδιαίτερες ευχαριστίες σε όλους όσους περάσαμε μαζί τα τελευταία χρόνια και όσους ήταν δίπλα μου τους τελευταίους μήνες της εκπόνησης αυτής της εργασίας.

Περίληψη

Στο άμεσο μέλλον αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στους μεγάλους λιμένες εξαιτίας ενός μεγάλου αριθμού λειτουργικών, κανονιστικών και περιβαλλοντικών παραγόντων. Οι λιμένες θα κληθούν να αντιμετωπίσουν την πρόκληση να ακολουθήσουν την ατζέντα 20-20-20, η οποία απαιτεί αύξηση της ενεργειακής απόδοσης, τεχνολογική καινοτομία, περιορισμό του ανθρακικού αποτυπώματος και την συμμόρφωση με κανονιστικές διατάξεις που αποσκοπούν στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των δραστηριοτήτων της ναυτιλιακής βιομηχανίας. Στα μεγάλα λιμάνια υπάρχει ένα πλήθος διαφορετικών φορτίων που παρουσιάζουν κάποιο βαθμό ευελιξίας, όπως τα εμπορευματοκιβώτια ελεγχόμενης θερμοκρασίας, τα ηλεκτρικά οχήματα και τα συστήματα ηλεκτρικής τροφοδοσίας των ελλιμενισμένων πλοίων από το δίκτυο του λιμένα. Παράλληλα, οι περιοχές των λιμένων είναι κατάλληλες για την παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) που θα μπορούσαν να διαδραματίσουν βασικό ρόλο στα μελλοντικά έξυπνα ενεργειακά συστήματα λιμένων. Πολλές τεχνολογικές προκλήσεις εμφανίζονται συνεχώς στη λειτουργία των πολύπλοκων συστημάτων ισχύος των λιμένων λόγω των αυξανόμενων απαιτήσεων για πράσινη και αποδοτική λειτουργία. Οι παραπάνω απαιτήσεις θα μπορούσαν να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά με την ανάπτυξη έξυπνων συστημάτων διαχείρισης ενέργειας σε πραγματικό χρόνο. Η πολυπλοκότητα των μελλοντικών ενεργειακών συστημάτων λιμένων θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά με την αξιοποίηση έξυπνων τεχνολογιών όπως τα συστήματα πολλαπλών πρακτόρων. Ωστόσο, η έρευνα σχετικά με την εφαρμογή τέτοιων συστημάτων στα λιμάνια είναι ακόμα στην αρχή, καθιστώντας την προτεινόμενη μέθοδο καινοτόμα [1-3]. Στην παρούσα εργασία προτείνεται ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας σε πραγματικό χρόνο, το οποίο αξιοποιεί την τεχνολογία των πολύπολυπρακτορικάπρακτορικών συστημάτων, σε συστήματα ισχύος μεγάλων λιμένων. Η προτεινόμενη μέθοδος βασίζεται στη λογική της μεθόδου που προτείνεται στην [1] με την προσθήκη δυνατοτήτων διαχείρισης χερσαίων συστημάτων παροχής ενέργειας σε ελλιμενισμένα πλοία. Πιο συγκεκριμένα, η ζήτηση ενέργειας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας του λιμένα προσαρμόζεται κατάλληλα ώστε να ικανοποιεί μία προκαθορισμένη τιμή που ορίζει ο διαχειριστής του συστήματος του λιμένα, ενώ το συνολικό κόστος λειτουργίας των πλοίων που είναι συνδεδεμένα με τις εγκαταστάσεις παροχής ηλεκτρικής ενέργειας σε ελλιμενισμένα πλοία ελαχιστοποιείται και ταυτόχρονα περιορίζονται οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG). Η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόζεται σε μία ρεαλιστική μελέτη περίπτωσης ενός μεγάλου λιμένα, που το σύστημα ισχύος του αποτελείται από έναν μεγάλο αριθμό ευέλικτων φορτίων και ένα αιολικό πάρκο ανοικτής θάλασσας. Η αποδοτικότητα της προτεινόμενης μεθόδου αξιολογείται από λεπτομερείς προσομοιώσεις.

Abstract

In the near future the electricity consumption in ports could be increased significantly because of a multitude of operational, regulatory, and environmental factors. Ports are expected to face the challenges following the 20-20-20 agenda, which requires energy efficiency improvement, technological innovation, carbon footprint mitigation and the accomplishment of legislations that aim to reduce the environmental impact of marine industry activities. Large ports comprise a variety of flexible loads like refrigerated containers, electric vehicles and onshore electric power supplies to ships at berth. Moreover, harbor locations are suitable for power generation from renewable energy sources (RES) that could play a key role in future port smart energy systems. Technological challenges have been continuously arising in complex port power systems operation because of the growing requirements for green and efficient operation. It has become evident that above requirements could be effectively faced with the development of smart real-time power management systems. The complexity of future all-electric port energy systems could be efficiently handled by exploiting intelligent technologies such as Multi-Agent Systems. However, the research about the implementation of such systems in harbors is at the beginning, making the proposed method innovative. In this thesis a real-time demand side power management system using MAS is applied to large port power systems. The proposed method is based on the power management methodology proposed in [1]. The power demand of the port electric system is suitably adjusted to satisfy a set point defined by port operator while the total operation cost of the ships being plugged into shore power supply installations is minimized and their greenhouse gas emissions (GHG) are limited at the same time. The proposed method is applied to a realistic case study of a large port comprising a large number of flexible loads and one off-shore wind park. The efficiency of the proposed method is evaluated by detailed simulations.

Ακρωνύμια

ΑΕΠ	Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΟΗΕ	Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών
ΣΠΠ	Συστήματα Πολλαπλών Πρακτόρων
DAS	Day-Ahead Scheduling
DSM	Demand-side Management
ECA	Emissions Control Area
FEU	Forty foot Equivalent Unit
GHG	Greenhouse Gas
IMO	International Maritime Organization
MAS	Multi-Agent Systems
PM/A	Port Manager Agent
R/A	Reefer Agent
RC/A	Reefers' Cluster Agent
SECA	Sulphur Emissions Control Area
SPSS	Shore-Power Supply System
TEU	Twenty foot Equivalent Unit
V/A	Vessel Agent
VC/A	Vessels' Cluster Agent
WP/A	Wind Park Agent

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ABSTRACT	5
ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	6
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	7
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	10
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	14
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
1.1. Η ΚΟΙΝΩΝΙΚΗ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ	15
1.2. Ο ΚΡΙΣΙΜΟΣ ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΜΕΓΑΛΩΝ ΛΙΜΕΝΩΝ ΩΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΚΟΜΒΩΝ	17
1.3. Η ΤΑΣΗ ΓΙΑ ΕΞΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟ ΤΩΝ ΛΙΜΕΝΩΝ	18
1.4. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΞΥΠΝΩΝ ΚΑΙ ΠΡΑΣΙΝΩΝ ΛΙΜΕΝΩΝ	19
1.4.1. ΠΡΑΣΙΝΟΙ ΛΙΜΕΝΕΣ	19
1.4.2. ΈΞΥΠΝΟΙ ΛΙΜΕΝΕΣ	21
1.5 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	22
2. ΔΙΚΤΥΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΓΑΛΩΝ ΛΙΜΕΝΩΝ	24
2.1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΣΕ ΕΜΠΟΡΙΚΑ ΛΙΜΑΝΙΑ	24
2.1.1. ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΑ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ (REEFERS)	25
2.1.1.1. Βασικά χαρακτηριστικά εμπορευματοκιβωτίων ελεγχόμενης θερμοκρασίας	26
2.1.1.2. Τα εμπορευματοκιβώτια ελεγχόμενης θερμοκρασίας ως βασικό κομμάτι των μελλοντικών συστημάτων των έξυπνων λιμένων	28
2.1.2. ΣΥΝΔΕΣΗ ΠΛΟΙΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΟΥ ΛΙΜΕΝΑ (COLD IRONING)	28
2.1.3. ΓΕΡΑΝΟΙ, ΚΤΙΡΙΑΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΛΟΙΠΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΕΜΠΟΡΙΚΩΝ ΛΙΜΕΝΩΝ	31
2.2. ΠΙΘΑΝΕΣ ΠΗΓΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΜΕΓΑΛΑ ΕΜΠΟΡΙΚΑ ΛΙΜΑΝΙΑ	33
3. ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟ ΤΩΝ ΡΥΠΩΝ ΕΝΤΟΣ ΤΩΝ ΟΡΙΩΝ ΤΩΝ ΛΙΜΕΝΩΝ	35
3.1. ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΤΟΥ ΙΜΟ	35
3.2. ΟΔΗΓΙΕΣ ΤΗΣ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗΣ ΈΝΩΣΗΣ	38

3.2.1. ΟΔΗΓΙΕΣ ΠΟΥ ΑΦΟΡΟΥΝ ΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ ΤΩΝ ΠΛΟΙΩΝ	38
3.2.1.1. Οδηγία 2000/59/EC	38
3.2.1.2. Οδηγία 2005/35/EC	38
3.2.2. ΟΔΗΓΙΕΣ ΠΟΥ ΑΦΟΡΟΥΝ ΤΗ ΡΥΠΑΝΣΗ ΤΟΥ ΑΕΡΑ ΑΠΟ ΠΛΟΙΑ	39
3.2.2.1. Οδηγία 2012/33/EC	39
3.2.3. ΟΔΗΓΙΕΣ ΠΟΥ ΑΦΟΡΟΥΝ ΑΛΛΑ ΘΕΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΙΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΕΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ	40
4. ΕΥΦΥΕΙΣ ΠΡΑΚΤΟΡΕΣ ΚΑΙ ΠΟΛΥΠΡΑΚΤΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	42
4.1. ΟΡΙΣΜΟΣ ΠΡΑΚΤΟΡΑ ΚΑΙ ΠΟΛΥΠΡΑΚΤΟΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	42
4.1.1. ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΝΝΟΙΑΣ ΤΟΥ ΠΡΑΚΤΟΡΑ	42
4.1.2. ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΥΦΥΟΥΣ ΠΡΑΚΤΟΡΑ	43
4.1.3. ΟΡΙΣΜΟΣ ΠΟΛΥΠΡΑΚΤΟΡΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	45
4.2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΟΛΥΠΡΑΚΤΟΡΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	45
4.3. ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΥΦΥΩΝ ΠΡΑΚΤΟΡΩΝ ΣΤΑ ΠΟΛΥΠΡΑΚΤΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	47
4.3.1. ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΣ ΠΡΑΚΤΟΡΩΝ ΣΕ ΠΟΛΥΠΡΑΚΤΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	47
4.3.1.1. Συντονισμός πρακτόρων σε πολυπρακτορικά συστήματα με συγκεντρωτική αρχιτεκτονική	48
4.3.1.3. Σύγκρισή συγκεντρωτικής και κατανεμημένης αρχιτεκτονικής σχεδίασης πολυπρακτορικών συστημάτων	49
4.3.2. ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΠΡΑΚΤΟΡΩΝ ΣΕ ΠΟΛΥΠΡΑΚΤΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	50
4.3.3. ΔΙΑΠΡΑΓΜΑΤΕΥΣΕΙΣ ΠΡΑΚΤΟΡΩΝ ΣΕ ΠΟΛΥΠΡΑΚΤΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	51
4.3.3.1. Μοντέλα διαπραγμάτευσης πρακτόρων με τη μορφή δημοπρασίας	53
4.3.3.2. Μοντέλα διαπραγμάτευσης πρακτόρων βασισμένα στη θεωρία παιγνίων	54
4.3.3.3. Μοντέλα διαπραγμάτευσης πρακτόρων βασισμένα σε ευρετικές μεθόδους	55
4.3.3.4. Μοντέλα διαπραγμάτευσης πρακτόρων βασισμένα σε επιχειρήματα	56
4.3.4. ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΠΡΑΚΤΟΡΩΝ ΣΕ ΠΟΛΥΠΡΑΚΤΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	57
4.3.4.1. Μοντέλο επικοινωνίας μαυροπίνακα	58
4.3.4.2. Μοντέλο επικοινωνίας μέσω ανταλλαγής μηνυμάτων	59
4.3.4.3. Επίπεδα πρωτόκολλων επικοινωνίας	60
4.3.4.4. Γλώσσες επικοινωνίας πρακτόρων	61
5. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	64
5.1. ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΠΟΛΥΠΡΑΚΤΟΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	64
5.2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	69
5.2.1. ΠΡΑΚΤΟΡΑΣ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΩΤΙΟΥ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ (R/A)	69
5.2.2. ΠΡΑΚΤΟΡΑΣ ΠΛΟΙΟΥ (V/A)	71
5.2.3. ΠΡΑΚΤΟΡΑΣ ΤΗΣ ΟΜΑΔΑΣ ΠΡΑΚΤΟΡΩΝ ΠΛΟΙΩΝ (VC/A)	73
5.2.4. ΚΕΝΤΡΙΚΟΣ ΠΡΑΚΤΟΡΑΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΛΙΜΕΝΑ (PM/A)	73
5.3. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	74
6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΖΗΤΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΓΑΛΟΥ ΛΙΜΕΝΑ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΧΡΟΝΟ ΣΕ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ	78

6.1. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΓΙΑ ΣΕΝΑΡΙΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΧΩΡΙΣ ΟΡΙΑ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ	
82	
6.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΓΙΑ ΣΕΝΑΡΙΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΕ ΟΡΙΑ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ	95
6.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΔΥΟ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	109
7. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ, ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	112
7.1. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ	112
7.2. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΈΡΕΥΝΑ	112
7.3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	113
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	114
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	118
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΤΡΟΦΙΜΩΝ	118

Κατάλογος εικόνων και σχημάτων

Εικόνα 1.1 Χρονική εξέλιξη δεικτών παραγωγής, παγκόσμιου ΑΕΠ, θαλάσσιου εμπορίου και εμπορίου αγαθών για τα έτη 1975-2015 Πηγή: UNCTAD, 2015. Review of Maritime Transport, 2015. United Nations Conference on Trade and Development	15
Εικόνα 1.2 Η κίνηση εμπορευματοκιβωτίων στους 20 μεγαλύτερους λιμένες της Ε.Ε. τα έτη 2005 και 2010 Πηγή: Σταύρος Κολιός, Στέφανος-Κων/νος Πέτσιος, Χρυσόστομος Στύλιος, 2013. Πληροφοριακά Συστήματα Λιμένων. Σύγχρονες τάσεις και προοπτικές.	16
Εικόνα 1.3 Σχηματικό εννοιολογικό μοντέλο του πράσινου λιμένα Πηγή: Shao Chao-Feng, Ju Mei-ting, Yu Jing-lei, HU Cui-Juan, Chu Chun-li, 2009. The strategies and proposals for ecological port construction in China in Journal US-China Public Administration, Volume 6, No 7 (Serial No 50)	20
Εικόνα 2.1 Ποσοστιαία κατανομή κατανάλωσης ενέργειας σε μεγάλους εμπορικούς λιμένες της Λατινικής Αμερικής Πηγή: G. Wilmsmeier et.al, 2014. Energy Consumption and Efficiency: Emerging Challenges from Reefer Trade in South American Container Terminals, ISU Corp., Issue N. 329, Number 1, 2014	25
Εικόνα 2.2 Ροή ψυχρού αέρα σε εμπορευματοκιβώτιο ελεγχόμενης θερμοκρασίας Πηγή: http://skladovoy.ru/ispolzovanie-refkontejnera-v-kachestve-xolodilnyx-skladov.html	27
Εικόνα 2.3 Προτεινόμενη εφαρμογή cold ironing σε θέση ελλιμενισμού πλοίου Πηγή: T.G. Papoutsoglou (2012). A Cold Ironing Study on Modern Ports, Implementation and Benefits Thriving for Worldwide Ports, Master of Science Thesis, Dept. Naval Archit. & Marine Engin., National Tech. Univ. of Athens, Athens, Greece	29
Εικόνα 2.4 Ελλιμενισμένα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων Πηγή: http://acecargo.eu/services/sea-freight/	31
Εικόνα 2.5 Αποψη τερματικού σταθμού εμπορευματοκιβωτίων μεγάλου εμπορικού λιμένα Πηγή: http://acecargo.eu/services/sea-freight/	32
Εικόνα 3.1 Οι περιοχές ελέγχου εκπομπής ρύπων σύμφωνα με το παράρτημα VI της σύμβασης MARLOP 73/78 του IMO Πηγή: www.marlink.com	36
Εικόνα 3.2 Σχηματική αναπαράσταση των % m/m ορίων περιεκτικότητας καυσίμων πετρελαίου σε θείο και των κλιμακωτών αλλαγών κατά τη διάρκεια των ετών εντός και εκτός των περιοχών ελέγχου των εκπομπών ρύπων σύμφωνα με τον κανονισμό 14 της σύμβασης MARPOL 73/78 Πηγή: https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/modes/maritime/events/doc/2011_06_01_stakeholder-event/item2.pdf	37
Εικόνα 4.1 Πράκτορας και αλληλεπίδραση με το περιβάλλον του Πηγή: Weiss, G. (1999). Multi-agent systems: A modern approach to distributed artificial intelligence. Cambridge, MIT Press.	43
Εικόνα 4.2 Άξονες ομαδοποίησης χαρακτηριστικών πρακτόρων Πηγή: Γεωργούλη Κ. (2015). Τεχνητή Νοημοσύνη – Μία εισαγωγική προσέγγιση. ΣΕΑΒ. (Ηλεκτρονικό Σύγγραμμα) Διαθέσιμο: https://repository.kallipos.gr/pdfviewer/web/viewer.html?file=/bitstream/11419/3381/1/%CE%A4%CE%B5%CF%87%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%AE%20%CE%9D%CE%BF%CE%B7%CE%BC%CE%BF%CF%83%CF%8D%CE%BD%CE%B7.pdf	44
Εικόνα 4.3 Κατηγοριοποίηση πολυπρακτορικών συστημάτων με βάση το χαρακτήρα της συνεργασίας μεταξύ των πρακτόρων Πηγή: Glavic M. (2006). Agents and Multi-Agent Systems: A Short Introduction for Power Engineers. University of Liege. (Technical Report)	46

Εικόνα 4.4 Μοντέλο επικοινωνίας μαυροπίνακα	
Πηγή: Γεωργούλη Κ. (2015). Τεχνητή Νοημοσύνη – Μία εισαγωγική προσέγγιση. ΣΕΑΒ. (Ηλεκτρονικό Σύγγραμμα)	58
Εικόνα 4.5 Αρχιτεκτονική κεντρικής μονάδας ελέγχου στο μοντέλο επικοινωνίας μαυροπίνακα	
Πηγή: Γεωργούλη Κ. (2015). Τεχνητή Νοημοσύνη – Μία εισαγωγική προσέγγιση. ΣΕΑΒ. (Ηλεκτρονικό Σύγγραμμα)	59
Εικόνα 4.6 Μοντέλο επικοινωνίας πρακτόρων μέσω ανταλλαγής μηνυμάτων	
Πηγή: Γεωργούλη Κ. (2015). Τεχνητή Νοημοσύνη – Μία εισαγωγική προσέγγιση. ΣΕΑΒ. (Ηλεκτρονικό Σύγγραμμα)	60
Εικόνα 4.7 Η KQML είναι ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας τόσο μεταξύ πρακτόρων, όσο και μεταξύ πρακτόρων με προγράμματα	
Πηγή: Weiss, G. (1999). Multi-agent systems: A modern approach to distributed artificial intelligence. Cambridge, MIT Press.	62
Εικόνα 5.1 Δομή του πολυπρακτορικού συστήματος της προτεινόμενης μεθόδου ελέγχου ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος του λιμένα	66
Εικόνα 5.2 Η επικοινωνία των διαφόρων πρακτόρων στα διαφορετικά επίπεδα ιεραρχίας ως προς τον χρόνο στην προτεινόμενη δομή πολυπρακτορικού συστήματος	69
Εικόνα 5.3 Συνδυασμός της μεθόδου ελέγχου ζήτησης ισχύος σε πραγματικό χρόνο με τη διαδικασία πρόβλεψης για την επόμενη ημέρα	75
Εικόνα 5.4 Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου υλοποίησης της προτεινόμενης μεθόδου ελέγχου με πολυπρακτορικά συστήματα	77
Εικόνα 6.1 Εξέλιξη της τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης	78
Εικόνα 6.2 Καμπύλες ειδικού κόστους καυσίμου για τις βοηθητικές μηχανές των πλοίων που θεωρήθηκαν στην παρούσα μελέτη περίπτωσης	82
Εικόνα 6.3 Πρόβλεψη κατανάλωσης ισχύος από τα reefers (Σενάριο λειτουργίας 1)	83
Εικόνα 6.4 Πρόβλεψη παραγωγής ισχύος από το αιολικό πάρκο (Σενάριο λειτουργίας 1)	83
Εικόνα 6.5 Πρόβλεψη κατανάλωσης ισχύος από τα ελλιμενισμένα πλοία μέσω του SPS (Σενάριο λειτουργίας 1)	84
Εικόνα 6.6 Επιθυμητή κατανάλωση ενέργειας του λιμένα και συνολική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας με την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου ελέγχου και χωρίς αυτήν (Σενάριο λειτουργίας 1)	84
Εικόνα 6.7 Πρόβλεψη παραγωγής ενέργειας από το αιολικό πάρκο και πραγματική τιμή αιολικής παραγωγής (Σενάριο λειτουργίας 1)	85
Εικόνα 6.8 Ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος από τα reefers με την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου ελέγχου και προγραμματισμένη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας από τα reefers (Σενάριο λειτουργίας 1)	86
Εικόνα 6.10 Εξέλιξη των εσωτερικών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και θερμοκρασιακά όρια αποθήκευσης για τα reefers που περιέχουν σπαράγγια, μπρόκολα, λαχανάκια Βρυξελλών και λάχανα. (Σενάριο λειτουργίας 1)	87
Εικόνα 6.9 Εξέλιξη των εσωτερικών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και θερμοκρασιακά όρια αποθήκευσης για τα reefers που περιέχουν καρότα, αγγούρια, μελιτζάνες και κρεμμύδια (Σενάριο λειτουργίας 1)	87
Εικόνα 6.12 Εξέλιξη των εσωτερικών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και θερμοκρασιακά όρια αποθήκευσης για τα reefers που περιέχουν πατάτες, σπανάκι, ντομάτες και αβοκάντο (Σενάριο λειτουργίας 1)	88
Εικόνα 6.11 Εξέλιξη των εσωτερικών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και θερμοκρασιακά όρια αποθήκευσης για τα reefers που περιέχουν πορτοκάλια, λεμόνια, πεπόνια και βακαλάο (Σενάριο λειτουργίας 1)	88
Εικόνα 6.13 Εξέλιξη των εσωτερικών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και θερμοκρασιακά όρια αποθήκευσης για τα reefers που περιέχουν μοσχαρίσιο κρέας, χοιρινό κρέας, σταφύλια ευρωπαϊκού τύπου και μήλα (Σενάριο λειτουργίας 1)	89
Εικόνα 6.14 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 1 (Σενάριο λειτουργίας 1)	90

Εικόνα 6.15 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 2 (Σενάριο λειτουργίας 1)	90
Εικόνα 6.16 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 3 (Σενάριο λειτουργίας 1)	91
Εικόνα 6.17 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 4 (Σενάριο λειτουργίας 1)	91
Εικόνα 6.18 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 5 (Σενάριο λειτουργίας 1)	92
Εικόνα 6.19 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 6 (Σενάριο λειτουργίας 1)	92
Εικόνα 6.20 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 7 (Σενάριο λειτουργίας 1)	93
Εικόνα 6.21 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 8 (Σενάριο λειτουργίας 1)	93
Εικόνα 6.22 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 9 (Σενάριο λειτουργίας 1)	94
Εικόνα 6.23 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 10 (Σενάριο λειτουργίας 1)	94
Εικόνα 6.24 Εξέλιξη των συνολικά παραγόμενων ρύπων από τα ελλιμενισμένα πλοία κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης (Σενάριο λειτουργίας 1)	95
Εικόνα 6.26 Πρόβλεψη παραγωγής ενέργειας από το αιολικό πάρκο και πραγματική τιμή αιολικής παραγωγής (Σενάριο λειτουργίας 2)	96
Εικόνα 6.27 Πρόβλεψη παραγωγής ισχύος από το αιολικό πάρκο (Σενάριο λειτουργίας 2)	96
Εικόνα 6.28 Πρόβλεψη κατανάλωσης ισχύος από τα reefers (Σενάριο λειτουργίας 2)	97
Εικόνα 6.29 Πρόβλεψη κατανάλωσης ισχύος από τα ελλιμενισμένα πλοία μέσω του SPS (Σενάριο λειτουργίας 2)	97
Εικόνα 6.30 Επιθυμητή κατανάλωση ενέργειας του λιμένα και συνολική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας με την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου ελέγχου και χωρίς αυτήν (Σενάριο λειτουργίας 2)	98
Εικόνα 6.31 Ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος από τα reefers με την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου ελέγχου και προγραμματισμένη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας από τα reefers (Σενάριο λειτουργίας 2)	99
Εικόνα 6.32 Εξέλιξη των εσωτερικών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και θερμοκρασιακά όρια αποθήκευσης για τα reefers που περιέχουν σπαράγγια, μπρόκολα, λαχανάκια Βρυξελλών και λάχανα. (Σενάριο λειτουργίας 2)	100
Εικόνα 6.33 Εξέλιξη των εσωτερικών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και θερμοκρασιακά όρια αποθήκευσης για τα reefers που περιέχουν καρότα, αγγούρια, μελιτζάνες και κρεμμύδια (Σενάριο λειτουργίας 2)	101
Εικόνα 6.34 Εξέλιξη των εσωτερικών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και θερμοκρασιακά όρια αποθήκευσης για τα reefers που περιέχουν πατάτες, σπανάκι, ντομάτες και αβοκάντο (Σενάριο λειτουργίας 2)	101
Εικόνα 6.35 Εξέλιξη των εσωτερικών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και θερμοκρασιακά όρια αποθήκευσης για τα reefers που περιέχουν πορτοκάλια, λεμόνια, πεπόνια και βακαλάο (Σενάριο λειτουργίας 2)	102
Εικόνα 6.36 Εξέλιξη των εσωτερικών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και θερμοκρασιακά όρια αποθήκευσης για τα reefers που περιέχουν μοσχαρίσιο κρέας, χοιρινό κρέας, σταφύλια ευρωπαϊκού τύπου και μήλα (Σενάριο λειτουργίας 2)	102
Εικόνα 6.37 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 1 (Σενάριο λειτουργίας 2)	104
Εικόνα 6.38 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 2 (Σενάριο λειτουργίας 2)	104
Εικόνα 6.39 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 3 (Σενάριο λειτουργίας 2)	105

Εικόνα 6.40 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 4 (Σενάριο λειτουργίας 2)	105
Εικόνα 6.41 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 5 (Σενάριο λειτουργίας 2)	106
Εικόνα 6.42 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 6 (Σενάριο λειτουργίας 2)	106
Εικόνα 6.43 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 7 (Σενάριο λειτουργίας 2)	107
Εικόνα 6.44 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 8 (Σενάριο λειτουργίας 2)	107
Εικόνα 6.45 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 9 (Σενάριο λειτουργίας 2)	108
Εικόνα 6.46 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 10 (Σενάριο λειτουργίας 2)	108
Εικόνα 6.47 Εξέλιξη των συνολικά παραγόμενων ρύπων από τα ελλιμενισμένα πλοία κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης (Σενάριο λειτουργίας 2)	109
Εικόνα 6.48 Συνολική κατανάλωση ισχύος από τα reefers στα δύο σενάρια λειτουργίας	110
Εικόνα 6.49 Συνολική κατανάλωση ισχύος από τα ελλιμενισμένα πλοία μέσω του SPS	110
Εικόνα 6.50 Συνολικοί παραγόμενοι ρύποι από τα ελλιμενισμένα πλοία στα δύο σενάρια λειτουργίας	111

Κατάλογος Πινάκων

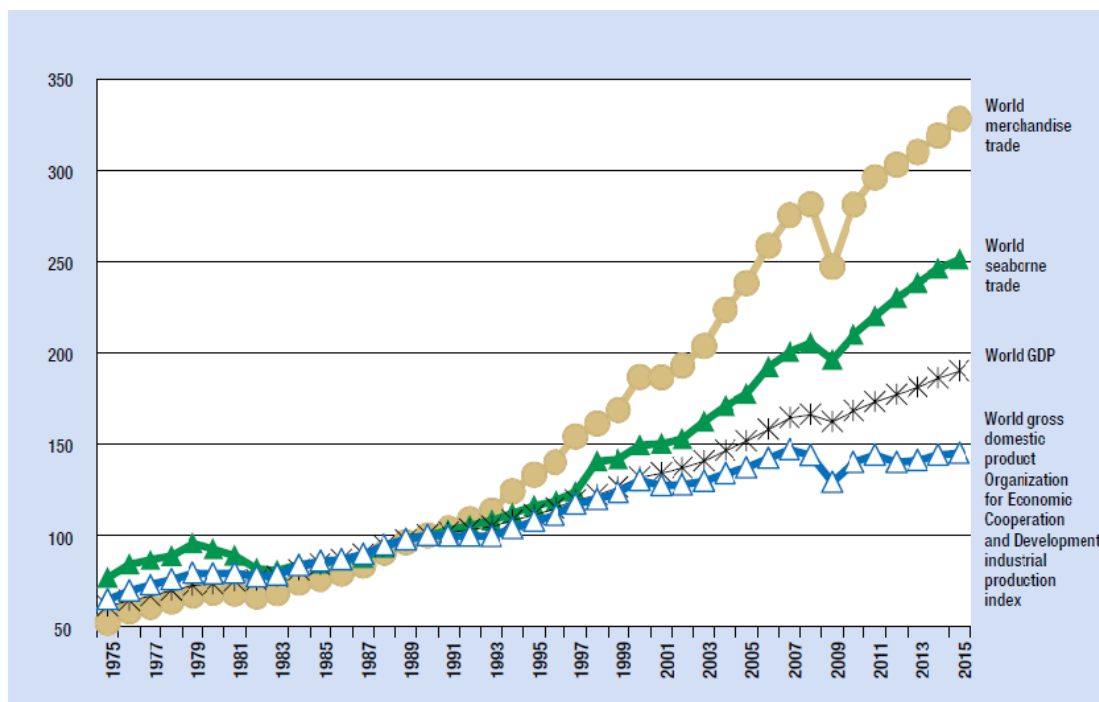
Πίνακας 1 Σύγκριση των εκπομπών αερίων ρύπων από κινητήρες ντίζελ και παροχή ενέργειας από το δίκτυο του λιμένα (Shore Power) Πηγή: T.G. Papoutsoglou (2012). A Cold Ironing Study on Modern Ports, Implementation and Benefits Thriving for Worldwide Ports, Master of Science Thesis, Dept. Naval Archit. & Marine Engin., National Tech. Univ. of Athens, Athens, Greece	30
Πίνακας 2 Τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος	79
Πίνακας 3 Χαρακτηριστικά των reefers που χρησιμοποιούνται στη μελέτη περίπτωσης	79
Πίνακας 4 Θερμικές ιδιότητες και θερμοκρασίες μεταφοράς και αποθήκευσης των προϊόντων που χρησιμοποιούνται στην μελέτη περίπτωσης	80

1. Εισαγωγή

1.1. Η κοινωνική και οικονομική σημασία των θαλάσσιων μεταφορών

Οι θαλάσσιες μεταφορές αποτελούν τη ραχοκοκαλιά του παγκόσμιου εμπορίου και βρίσκονται στο επίκεντρο των διεθνών δικτύων μεταφορών. Αποτελούν έναν σημαντικό αυτοτελή οικονομικό τομέα, που δημιουργεί απασχόληση, παράγει εισόδημα και έσοδα και διαπερνά οριζόντια άλλους τομείς και δραστηριότητες. Οι θαλάσσιες μεταφορές παίζουν κομβικό ρόλο στην βιομηχανική ανάπτυξη και την ανάπτυξη της παραγωγής. Ωστόσο, συμβάλλουν στην προσέγγιση των καταναλωτών, με τους ενδιάμεσους και τους παραγωγούς εμπορικών αγαθών, καθώς και στην προώθηση της περιφερειακής, οικονομικής και εμπορικής ολοκλήρωσης [4].

Παρά το γεγονός ότι το θαλάσσιο εμπόριο εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων, ο όγκος των θαλάσσιων μεταφορών εξακολουθεί να καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τις τάσεις και τις προοπτικές στο διεθνές μακροοικονομικό τοπίο. Οι όγκοι του ναυτιλιακού εμπορίου μπορούμε να πούμε πως κινούνται αναλογικά με την οικονομική ανάπτυξη, τη βιομηχανική δραστηριότητα και το εμπόριο αγαθών και προϊόντων (Εικόνα 1.1).



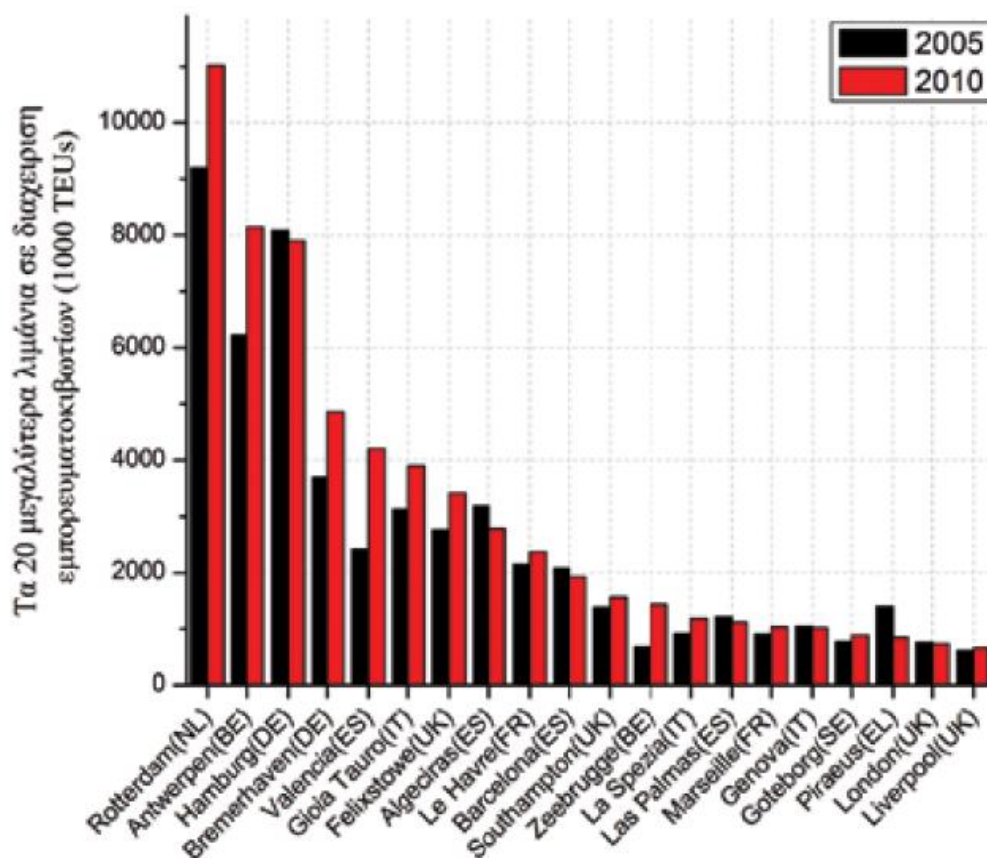
Εικόνα 1.1 Χρονική εξέλιξη δεικτών παραγωγής, παγκόσμιου ΑΕΠ, θαλάσσιου εμπορίου και εμπορίου αγαθών για τα έτη 1975-2015

Πηγή: UNCTAD, 2015. *Review of Maritime Transport, 2015*. United Nations Conference on Trade and Development

Σύμφωνα με την έκθεση για τις θαλάσσιες μεταφορές της Διάσκεψης των Ηνωμένων Εθνών για το εμπόριο και την ανάπτυξη [4], ο ρυθμός αύξησης του παγκόσμιου ΑΕΠ το 2015 δεν κατάφερε να φτάσει το επίπεδο πριν την εκδήλωση της οικονομικής κρίσης και περιορίστηκε στο 2,5%, εξαιτίας της μειωμένης θετικής επίδρασης των χαμηλών τιμών του πετρελαίου, που αντισταθμίστηκαν εν μέρει από τις αρνητικές επιπτώσεις στις επενδύσεις στον πετρελαϊκό τομέα, τη ζήτηση για εισαγωγές χωρών που εξάγουν πετρέλαιο και της επιβράδυνσης του ρυθμού οικονομικής μεγέθυνσης της Κίνας.

Παρόλα αυτά, ο όγκος των θαλάσσιων εμπορικών μεταφορών παγκοσμίως εκτιμάται πως το 2015 αντιπροσώπευε πάνω από το 80% του συνολικού όγκου εμπορευμάτων που διακινήθηκαν. Για την ίδια χρονιά, σε όρους χρηματικής αξίας, το μερίδιο του ναυτιλιακού εμπορίου εκτιμάται στο 55% από το Lloyd's, ενώ άλλοι αναλυτές προσδιορίζουν την αξία του θαλάσσιου εμπορίου πάνω από τα δύο τρίτα της συνολικής αξίας των εμπορευμάτων.

Εξάλλου, στους περισσότερους από τους μεγαλύτερους λιμένες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, κατά τα έτη 2005 και 2010, η κίνηση εμπορευματοκιβωτίων αυξήθηκε σημαντικά (Εικόνα 1.2).



Εικόνα 1.2 Η κίνηση εμπορευματοκιβωτίων στους 20 μεγαλύτερους λιμένες της Ε.Ε. τα έτη 2005 και 2010
 Πηγή: Σταύρος Κολιός, Στέφανος-Κων/νος Πέτσιος, Χρυσόστομος Στύλιος, 2013. Πληροφοριακά Συστήματα Λιμένων. Σύγχρονες τάσεις και προοπτικές.

Από όσα αναφέρονται παραπάνω, είναι προφανής η σημαντικότητα των δραστηριοτήτων που συνδέονται με τις θαλάσσιες μεταφορές για το διεθνές εμπόριο και την οικονομική μεγέθυνση, συνεπώς και η σημασία των μεγάλων εμπορικών λιμένων που παίζουν κομβικό ρόλο σε αυτές τις δραστηριότητες.

Κάθε λιμάνι, εμπορικό ή επιβατικό, αποτελεί έναν κρίκο στο δίκτυο μεταφοράς ανθρώπων, πρώτων υλών, αγαθών και εμπορευμάτων σε τοπικό, εθνικό και παγκόσμιο επίπεδο. Οι διαρκώς αυξανόμενες απαιτήσεις στον όγκο, την ταχύτητα, το κόστος, την ποιότητα και την ασφάλεια των θαλάσσιων μεταφορών καθιστούν τα μεγάλα λιμάνια, ιδιαίτερα τα εμπορικά, υποδομές στρατηγικού χαρακτήρα από οικονομική και κοινωνική άποψη, προσδίδοντας τους έναν σημαντικό ρόλο στην σχεδίαση της οικονομικής πολιτικής.

1.2. Ο κρίσιμος ρόλος των μεγάλων λιμένων ως ενεργειακών κόμβων

Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εργασίας, ορίζουμε ως ενεργειακό κόμβο μία περιοχή με μεγάλη γεωγραφική συγκέντρωση δραστηριοτήτων υψηλής ζήτησης και παροχής ενέργειας, όπου εντοπίζονται ενεργοβόρες βιομηχανικές δραστηριότητες, εγκαταστάσεις παραγωγής και δίκτυα διανομής ενέργειας, καθώς και άλλες συναφείς δραστηριότητες [5].

Οι δραστηριότητες ενός μεγάλου λιμένα που σχετίζονται με την ενέργεια μπορούν να συνοψιστούν σε δύο βασικές κατηγορίες, που σχετίζονται με την κατανάλωση και την παραγωγή ενέργειας.

Η κατανάλωση ενέργειας αφορά τη χρήση ηλεκτρισμού για δραστηριότητες που σχετίζονται με τον λιμένα, όπως η διακίνηση φορτίων, η ενεργειακή τροφοδότηση πλοίων, ο φωτισμός, οι διάφορες διεργασίες βιομηχανικού χαρακτήρα, καθώς και οι διοικητικές και λειτουργικές δραστηριότητες εντός του λιμένα. Στους μεγάλους λιμένες αναπτύσσεται ένα πλήθος δραστηριοτήτων που απαιτούν διαφορετικού μεγέθους ηλεκτρικά φορτία, αλλά σε κάθε περίπτωση οι συνολικές απαιτήσεις των μεγάλων λιμένων σε ηλεκτρική ενέργεια είναι σταθερά υψηλές. Περισσότερα σχετικά με τις βασικές και επιμέρους πηγές κατανάλωσης ενέργειας στους λιμένες αναλύονται στη ενότητα 2.1 του επόμενου κεφαλαίου.

Η παραγωγή ενέργειας αναφέρεται στις δραστηριότητες που πραγματοποιούνται στα όρια του λιμένα ή και σε κοντινές περιοχές και οι οποίες συνεπάγονται τη μετατροπή διαφόρων τύπων ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά των περιοχών στις οποίες βρίσκονται τα λιμάνια, οι μεγάλες εκτάσεις που καταλαμβάνουν, ο σημαντικός διαθέσιμος ελεύθερος χώρος που υπάρχει στις εγκαταστάσεις των μεγάλων λιμένων, καθώς και άλλοι παράγοντες, καθιστούν τις ευρύτερες περιοχές των λιμένων ιδανικές για την ανάπτυξη υποδομών παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, στην κατεύθυνση της αυτονομίας και της περιβαλλοντικής, οικονομικής και λειτουργικής αποδοτικότητας των λιμένων. Περισσότερα για την παραγωγή ενέργειας και τις πιθανές πηγές παραγωγής ενέργειας

στους μεγάλους λιμένες, με έμφαση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο και συγκεκριμένα στην ενότητα 2.2.

Οι μεγάλοι λιμένες και ιδιαίτερα οι εμπορικοί, χαρακτηρίζονται από τη γεωγραφική συγκέντρωση δραστηριοτήτων υψηλής ζήτησης και προμήθειας ενέργειας, λόγω της εγγύτητάς τους στις εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και στις μητροπολιτικές περιφέρειες, καθώς και λόγω της λειτουργίας τους ως κεντρικός κόμβος στα διεθνή δίκτυα μεταφοράς πρώτων υλών και εμπορευμάτων [5].

1.3. Η τάση για εξηλεκτρισμό των λιμένων

Ένα σύνολο λειτουργικών, κανονιστικών και περιβαλλοντικών παραγόντων αναμένεται να οδηγήσει σε αισθητή αύξηση της χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας στους λιμένες μέσα στα επόμενα χρόνια [6].

Ενώ, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η κατανάλωση ενέργειας στα λιμάνια είναι ιδιαίτερα υψηλή, η ενεργειακή τους αποδοτικότητα είναι χαμηλή και η αξιοποίηση των δυνατοτήτων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι περιορισμένη. Ωστόσο, στο άμεσο μέλλον αναμένεται η αξιοποίηση της ηλεκτρικής ενέργειας ως συνέπεια της αυξανόμενης σημαντικότητας των ενεργειακών συναλλαγών, της εστίασης της αγοράς και της βιομηχανίας στην ενεργειακή απόδοση, αλλά και της ανάπτυξης έντονης δημόσιας περιβαλλοντικής συνείδησης [5].

Οι οργανισμοί των λιμένων αναμένεται να αντιμετωπίσουν μία σημαντική πρόκληση, προκειμένου να ακολουθήσουν την ατζέντα 20-20-20, που θέτει ως στόχους να μειωθούν οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά 20% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990, να αυξηθεί κατά 20% το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην τελική ενεργειακή κατανάλωση και να αυξηθεί στο 20% η ενεργειακή απόδοση μέχρι το 2020 [7]. Συνεπώς, η επίτευξη ενεργειακής απόδοσης, η τεχνολογική καινοτομία και ο περιορισμός του ανθρακικού αποτυπώματος, δηλαδή των εκπομπών των έξι αερίων του θερμοκηπίου του Πρωτοκόλλου του Κιότο και συγκεκριμένα του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), του μεθανίου (CH₄), του μονοξειδίου του αζώτου (N₂O), των υδροφθορανθράκων (HFCs), των υπερφθοριωμένων υδρογονανθράκων (PFCs) και του εξαφθοριούχου θείου (SF₆) αποτελούν μία σημαντική πρόκληση για τα λιμάνια που για να την αντιμετωπίσουν θα πρέπει να εξελιχθούν [8,9].

Παράλληλα, οι λιμένες καλούνται να συμμορφωθούν με τη νομοθεσία και τις κανονιστικές διατάξεις που αποσκοπούν στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των δραστηριοτήτων της ναυτιλιακής βιομηχανίας, όπως οι διατάξεις για τα όρια εκπομπής θείου του Διεθνούς Οργανισμού Ναυτιλίας (IMO) [10] και η οδηγία 2012/33/EC της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το θείο [11]. Η προσαρμογή των δραστηριοτήτων και της λειτουργίας των λιμένων στην περιβαλλοντική νομοθεσία αναμένεται να οδηγήσει στη σημαντική αύξηση της ηλεκτροδότησης των λιμένων.

Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας, που αναμένεται να αυξήσει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στα λιμάνια και να οδηγήσει αναπόφευκτα στον εξηλεκτρισμό τους τα επόμενα χρόνια είναι η υπό εξέλιξη ανάπτυξη επίγειων λύσεων παροχής

ηλεκτρικού ρεύματος στα αγκυροβολημένα πλοία, τεχνολογία η οποία είναι γνωστή και ως cold ironing [12]. Η υιοθέτηση του cold ironing και η ανάπτυξη λιμενικών εγκαταστάσεων που υποστηρίζουν την συγκεκριμένη τεχνολογία, θα μπορούσε να οδηγήσει σε δραστική μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG) που παράγονται εντός του λιμένα. Εξαιτίας του γεγονότος πως η συγκεκριμένη τεχνολογία, σε συνδυασμό με την εγκατάσταση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί να οδηγήσει και σε σημαντικά οφέλη από την άποψη του οικονομικού κόστους καθίσταται μία αξιόπιστη λύση για την επίτευξη των στόχων οικονομικής, λειτουργικής και περιβαλλοντικής αποδοτικότητας, που αναμένεται να υιοθετηθεί από όλο και περισσότερους οργανισμούς λιμένων τα επόμενα χρόνια. Περισσότερα για το cold ironing αναλύονται στην ενότητα 2.1.2 του επόμενου κεφαλαίου.

Όπως προκύπτει και από όσα αναφέρονται παραπάνω, η τάση που ήδη παρατηρείται για εξηλεκτρισμό των λιμένων, αναμένεται να συνεχιστεί και να ενταθεί τα επόμενα χρόνια, καθώς μοιάζει η πιο ελπιδοφόρα λύση για την μετάβαση σε μία αποδοτικότερη και πιο φιλική προς το περιβάλλον λειτουργία τους.

1.4. Χαρακτηριστικά έξυπνων και πράσινων λιμένων

Στην παρούσα εργασία προτείνεται και αναπτύσσεται μία «έξυπνη» μέθοδος για την διαχείριση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλα λιμάνια, αξιοποιώντας τεχνολογίες αιχμής, όπως οι πράκτορες και τα πολυπρακτορικά συστήματα. Βασικός στόχος της μεθόδου είναι η επίτευξη λειτουργικής, οικονομικής, αλλά και περιβαλλοντικής αποδοτικότητας, καθώς υπάρχουν περιορισμοί για τις εκπομπές ρύπων που παράγονται από τα αγκυροβολημένα πλοία. Η συγκεκριμένη μέθοδος στοχεύει να συμβάλει στην επίτευξη του στόχου τις μετατροπής των μεγάλων εμπορικών λιμένων σε οικολογικούς ή όπως είναι γνωστοί σε πράσινους λιμένες. Σημαντικό τμήμα ενός αξιόπιστου οδικού χάρτη για την επίτευξη αυτού του στόχου είναι η αξιοποίηση των σύγχρονων τεχνολογιών, με την εφαρμογή έξυπνων λύσεων και μεθόδων. Συνεπώς, πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση του προβλήματος και την ανάπτυξη της προτεινόμενης μεθόδου, είναι χρήσιμο να καθοριστούν με σαφήνεια οι έννοιες του πράσινου και του έξυπνου λιμένα.

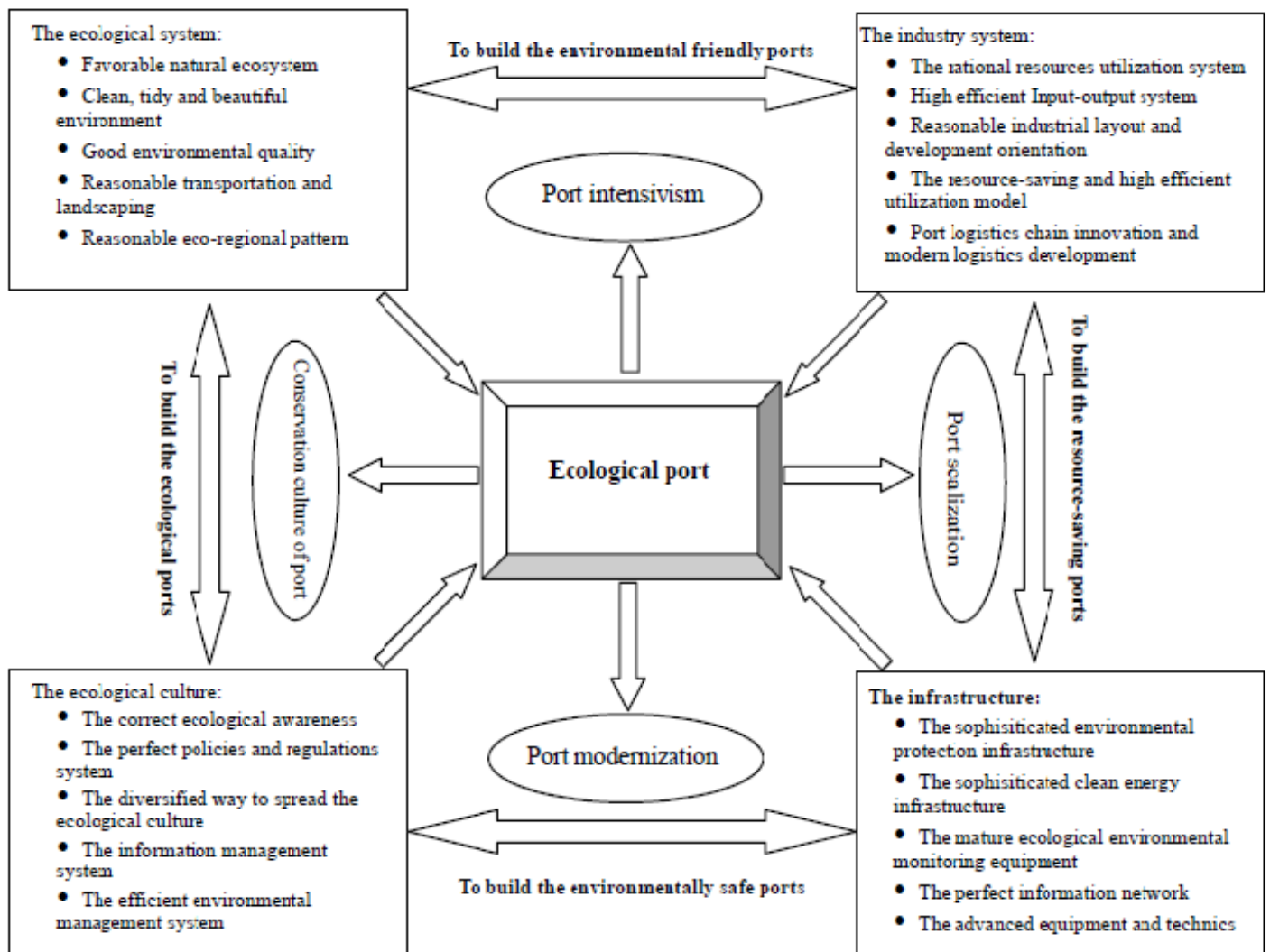
1.4.1. Πράσινοι λιμένες

Ως πράσινος λιμένας θεωρείται ένας λιμένας, όπου η λειτουργία και η οργάνωσή του βασίζεται στις αρχές της αειφόρου ανάπτυξης, που όμως δεν ανταποκρίνεται μόνο στις περιβαλλοντικές απαιτήσεις, αλλά συνδυάζει την ικανοποίηση τους με την επίτευξη σημαντικού οικονομικού οφέλους και την δημιουργία εισοδήματος. Το βασικό πρόβλημα σε έναν πράσινο λιμένα είναι η εξεύρεση ενός σημείου ισορροπίας μεταξύ του περιβαλλοντικού αντίκτυπου της λειτουργίας τους και του οικονομικού οφέλους. Συνεπώς, μία από τις βασικές αρχές που επιδιώκεται να ακολουθηθεί είναι η

κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη του λιμένα να μην υπερβαίνει τη φέρουσα ικανότητα του φυσικού συστήματος. Το σημείο ισορροπίας βασίζεται στον ορθό συνδυασμό της κατανάλωσης των φυσικών πόρων και του περιβάλλοντος με τις οικονομικές επιδιώξεις, πληρώνοντας την βασική προϋπόθεση ότι δεν θα συμβούν ποτέ μη αναστρέψιμες περιβαλλοντικές μεταβολές.

Κύριοι στόχοι ενός πράσινου λιμένα είναι η επίτευξη καλής ποιότητας περιβάλλοντος και υψηλής οικονομικής αποδοτικότητας στο λιμάνι, η κατασκευή λιμενικών εγκαταστάσεων με φιλικό προς το περιβάλλον χαρακτήρα, η διασφάλιση της συνολικής αρμονικής και βιώσιμης λειτουργίας του συστήματος που συνθέτουν η κοινωνία, η οικονομία και το περιβάλλον και η εδραίωση της ηγετικής και ανταγωνιστικής θέσης του λιμανιού στις σύγχρονες μεταφορές, την εφοδιαστική αλυσίδα, τις λιμενικές υπηρεσίες και το παραγωγικό σύστημα [13].

Στην εικόνα 1.3 παρατίθεται το εννοιολογικό μοντέλο του πράσινου λιμένα, όπως προτάθηκε από τους Shao, Ju, Yu, Hu και Chu.



Εικόνα 1.3 Σχηματικό εννοιολογικό μοντέλο του πράσινου λιμένα

Πηγή: Shao Chao-Feng, Ju Mei-ting, Yu Jing-lei, HU Cui-Juan, Chu Chun-li, 2009. The strategies and proposals for ecological port construction in China in Journal US-China Public Administration, Volume 6, No 7(Serial No 50)

Οι πράσινοι λιμένες αναμένεται να είναι ο κύριος προσανατολισμός στην ανάπτυξη των λιμενικών εγκαταστάσεων τα επόμενα χρόνια. Η ανάπτυξη πράσινων λιμένων είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος για την πρόληψη της ρύπανσης του περιβάλλοντος και των οικολογικών ζημιών και για την προστασία του οικοσυστήματος του λιμένα. Η έννοια του πράσινου λιμένα συνδυάζει την επιστημονική αντίληψη της πολιτιστικής ανάπτυξης και διατήρησης με τελικό στόχο την προώθηση της περιφερειακής οικονομικής, κοινωνικής και περιβαλλοντικής ανάπτυξης [13].

Ανακεφαλαιώνοντας, η έννοια του πράσινου λιμένα ενσωματώνει τις αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης σε όλες τις δραστηριότητες που σχετίζονται με την κατασκευή των λιμενικών υποδομών και τη λειτουργία του λιμένα, έτσι ώστε να αυξηθεί η αποδοτικότητα της αξιοποίησης των πόρων και κατ' επέκταση να επιτευχθεί η χαμηλότερη δυνατή κατανάλωση πόρων, να περιοριστούν οι αρνητικές επιπτώσεις στο περιφερειακό περιβάλλον, να εξασφαλιστεί η καλύτερη δυνατή ποιότητα του περιβάλλοντος στην περιοχή του λιμένα και να επιτευχθεί η κοινωνική ανάπτυξη και η οικονομική μεγέθυνση του λιμένα και της ευρύτερης περιοχής.

1.4.2. Έξυπνοι λιμένες

Οι έξυπνες λύσεις στα λιμάνια φαίνονται να αποτελούν μία αποτελεσματική λύση για να ανταπεξέλθουν στην υποτονική ανάπτυξη του θαλάσσιου εμπορίου λόγω των αβεβαιοτήτων της παγκόσμιας ζήτησης και την πτώση των ναύλων. Ως αποτέλεσμα, οι λιμένες των ανεπτυγμένων και των αναπτυσσόμενων χωρών επενδύουν κεφάλαια για την μετάβαση τους σε έξυπνους λιμένες, ενώ οι λιμένες σε υπανάπτυκτες χώρες αντλούν κεφάλαια από αναπτυξιακούς οργανισμούς για τον ίδιο σκοπό.

Η έννοια των έξυπνων λιμένων αναφέρεται σε ένα λιμάνι που είναι ασφαλές, φιλικό προς το περιβάλλον και αποτελεσματικό, καθώς όλες οι εγκαταστάσεις, που σχετίζονται με την ενέργεια, το νερό, τη μεταφορά κλπ., σχεδιάζονται, κατασκευάζονται και συντηρούνται χρησιμοποιώντας προηγμένα και ολοκληρωμένα υλικά, αισθητήρες, εξελιγμένα ηλεκτρονικά και αξιόπιστα δίκτυα που είναι διασυνδεδεμένα με τα μηχανογραφικά συστήματα του λιμένα που αποτελούνται από βάσεις δεδομένων και αλγόριθμους λήψης αποφάσεων [13].

Η έννοια του έξυπνου λιμένα αφορά μία προσέγγιση ανάπτυξης λιμενικών υποδομών, που αξιοποιεί τις δυνατότητες που δίνουν οι εξελίξεις στην τεχνολογία των επικοινωνιών και της πληροφορίας και τις τεχνολογίες που σχετίζονται με το Internet of Things, χρησιμοποιεί αυτόματα οχήματα και κάνει χρήση της ασύρματης συνδεσιμότητας, συνδυάζοντας την με αισθητήρες και έξυπνες συσκευές.

Η ύπαρξη δικτύων που παρέχουν αξιόπιστα δεδομένα, η αξιοποίηση των μεθόδων βελτιστοποίησης και μηχανικής μάθησης και η δυνατότητες που μας δίνει η πληροφορική για την συλλογή, αποθήκευση, διαχείριση και επεξεργασία δεδομένων και την πραγματοποίηση πολύπλοκων και απαιτητικών υπολογισμών, σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα και με μεγάλη ακρίβεια μας επιτρέπουν να προβούμε σε αναλύσεις δεδομένων στο χαμηλότερο δυνατό επίπεδο ανάλυσης. Η ανάλυση δεδομένων μας

επιτρέπει να αντλήσουμε ενδιαφέρουσες πληροφορίες και να προχωρήσουμε σε όσο το δυνατόν ακριβέστερες προβλέψεις.

Η συλλογή, επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων συμβάλει στη βελτίωση της ενεργειακής διαχείρισης, των διαδικασιών εφοδιασμού και μεταφορών, της διοικητικής διαχείρισης και των συνολικών λειτουργιών του λιμένα. Η βελτίωση των διεργασιών του λιμένα μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση των παραγόμενων εσόδων, με παράλληλη μείωση του λειτουργικού κόστους και των περιβαλλοντικών επιπτώσεών του.

Η έννοια του έξυπνου λιμένα εμπεριέχει τρία βασικά χαρακτηριστικά: τη συνδεσιμότητα, την προβλεψιμότητα και την βιωσιμότητα. Η έννοια της συνδεσιμότητας αναφέρεται στην ύπαρξη σύνδεσης μεταξύ των επιμέρους λειτουργιών του λιμένα, καθώς και καλής σύνδεσης με τους άμεσους χρήστες του, όσο και τους υπόλοιπους συμμετέχοντες στην αλυσίδα αξίας, όπως οι πολίτες, οι κρατικοί και κυβερνητικοί θεσμοί και οι εταιρίες. Η προβλεψιμότητα αναφέρεται στην αποφυγή απρόβλεπτων καταστάσεων και στην διασφάλιση ορθών και με ακρίβεια ποιοτικών ή ποσοτικών προβλέψεων για την κατάσταση του συνολικού συστήματος του λιμένα, αλλά και των υποσυστημάτων που το απαρτίζουν. Η επίτευξη της προβλεψιμότητας είναι μία ιδιαίτερα απαιτητική διαδικασία, καθώς προϋποθέτει αρχικά τον αυτοματισμό των διεργασιών, προκειμένου το σύστημα του λιμένα να λειτουργεί αντιδραστικά. Στη συνέχεια απαιτείται η επίτευξη ενός σημαντικού βαθμού ευφυΐας προκειμένου το σύστημα να λειτουργεί ενεργητικά και τελικά με την υιοθέτηση έξυπνων τεχνολογιών και εφαρμογών η λειτουργία του συστήματος να βασίζεται στην ακριβή πρόβλεψη. Τέλος, η βιωσιμότητα αναφέρεται στη συνεχή ενσωμάτωση των νέων τεχνολογιών και την χρήση των δεδομένων για τη βελτίωση της λειτουργίας του λιμένα.

Η βελτίωση του επιπέδου εξυπηρέτησης και της περιβαλλοντικής αποδοτικότητας και η μείωση του λειτουργικού κόστους, ως αποτέλεσμα της μετατροπής των μεγάλων λιμένων σε έξυπνους λιμένες, αναμένεται να μεταφραστούν σε άμεσα και έμμεσα οφέλη για τους χρήστες του λιμένα, οδηγώντας σε κοινωνική και οικονομική ανάπτυξη των λιμενικών οργανισμών και της ευρύτερης περιοχής τους.

1.5 Δομή της εργασίας

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται συνοπτικά η δομή της παρούσας εργασίας. Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφεται αναλυτικά η δομή του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας ενός μεγάλου εμπορικού λιμένα, τόσο όσον αφορά τις βασικές πηγές ζήτησης ισχύος, με έμφαση στα ευέλικτα φορτία, όσο και οι πιθανές πηγές παραγωγής ενέργειας που υπάρχουν στην επικράτεια ενός λιμένα. Στο Κεφάλαιο 3, γίνεται μία συνοπτική παράθεση των κανονιστικών διατάξεων του Διεθνούς Οργανισμού Ναυτιλίας (IMO) και της Ευρωπαϊκής Ένωσης, που αφορούν τον περιορισμό των εκπομπών αερίων ρύπων από τα πλοία. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται συνοπτικά η θεωρία πρακτόρων και πολυπρακτορικών συστημάτων, παραθέτοντας τους βασικούς ορισμούς των εννοιών που υιοθετούνται για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, τα χαρακτηριστικά

των πολυπρακτορικών συστημάτων και τις αλληλεπιδράσεις των πρακτόρων στα πλαίσια μίας κοινωνίας πρακτόρων. Στο Κεφάλαιο 5, περιγράφεται αναλυτικά η προτεινόμενη μέθοδος ελέγχου της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας ενός μεγάλου λιμένα σε πραγματικό χρόνο και συγκεκριμένα η δομή του πολυπρακτορικού συστήματος που την υλοποιεί, η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος, καθώς και ο αλγόριθμος επίλυσης της προτεινόμενης μεθόδου [1]. Στο Κεφάλαιο 6, παρουσιάζεται η εφαρμογή της μεθόδου σε μία ρεαλιστική μελέτη περίπτωσης και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για δύο διαφορετικά σενάρια. Τέλος, στο Κεφάλαιο 7, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας και συνοπτικές προτάσεις για επέκταση της μεθόδου και μελλοντική έρευνα.

2. Δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλων λιμένων

Όπως έχει προαναφερθεί, οι δραστηριότητες ενός μεγάλου λιμένα που σχετίζονται με την ενέργεια μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο βασικές κατηγορίες, που αφορούν την κατανάλωση και την παραγωγή ενέργειας. Στην πρώτη ενότητα του παρόντος κεφαλαίου αναλύονται τα χαρακτηριστικά των βασικών πηγών κατανάλωσης στα μεγάλα λιμάνια, με έμφαση στα εμπορικά. Στην δεύτερη ενότητα του παρόντος κεφαλαίου αναλύονται οι πιθανές πηγές παραγωγής ενέργειας στους μεγάλους λιμένες και την ευρύτερη περιοχή τους, με βάση τη διαθέσιμη τεχνολογία και τις υπάρχουσες ερευνητικές και πραγματικές εφαρμογές.

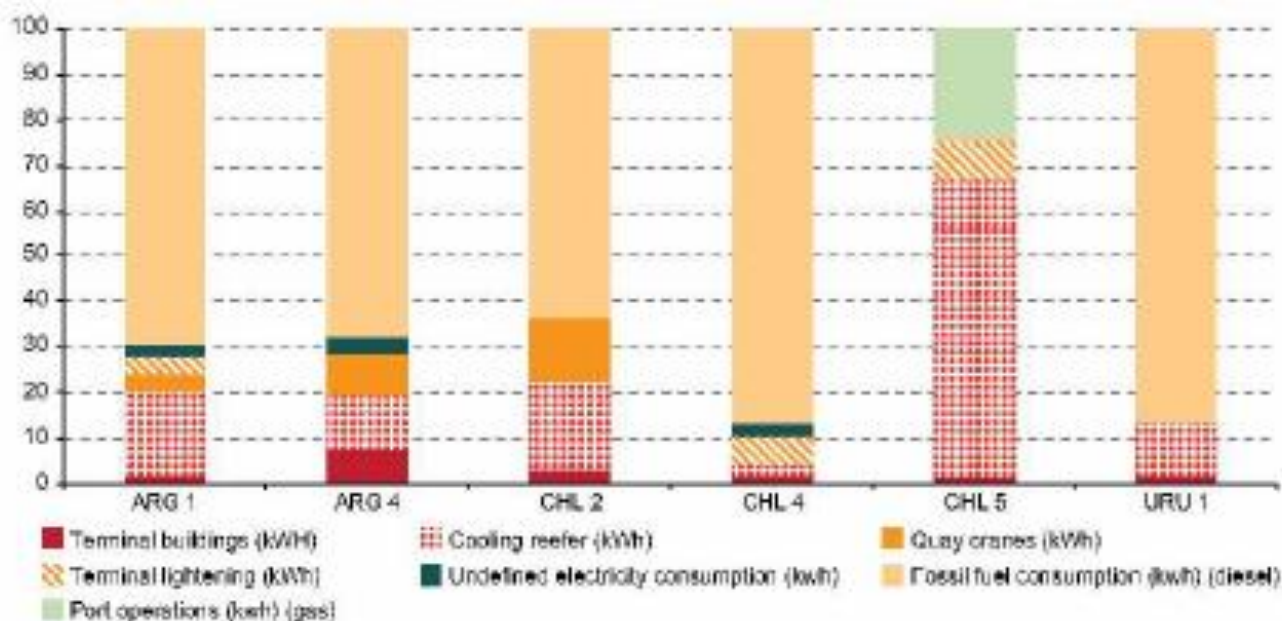
2.1. Βασικές πηγές κατανάλωσης σε εμπορικά λιμάνια

Η κατανάλωση ενέργειας στους μεγάλους λιμένες αφορά τη χρήση ηλεκτρισμού για δραστηριότητες που πραγματοποιούνται εντός του λιμένα, όπως η διακίνηση και αποθήκευση φορτίων και εμπορευματοκιβωτίων, η παροχή ενέργειας στα αγκυροβολημένα πλοία, καθώς και άλλες διοικητικές και λειτουργικές δραστηριότητες. Οι πηγές κατανάλωσης ενέργειας σε έναν μεγάλο λιμένα μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Δραστηριότητες που σχετίζονται άμεσα με τη λειτουργία του λιμένα, όπως είναι η λειτουργία των τερματικών σταθμών εμπορευματοκιβωτίων, η ασφάλεια, η λειτουργία των γερανών, η ηλεκτροδότηση των κτιρίων διοίκησης, η σήμανση και ο φωτισμός.
- Παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε λιμάνια που διαθέτουν συστήματα ηλεκτροδότησης ελλιμενισμένων πλοίων από την ξηρά (cold ironing).
- Δραστηριότητες που σχετίζονται έμμεσα με το λιμάνι ή αναπτύσσονται στην ευρύτερη περιοχή του λιμένα, όπως οι δραστηριότητες διύλισης, οι σιδηροδρομικές συνδέσεις, βιομηχανικές δραστηριότητες, όπως η χαλυβουργία και η μεταλλουργία και ο τουρισμός [5].

Σε ένα κοινό τερματικό εμπορευματοκιβωτίων, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κατανέμεται κατά μέσο όρο ως εξής:

- Τα εμπορευματοκιβώτια ελεγχόμενης θερμοκρασίας καταναλώνουν περίπου το 40%
- Οι χερσαίοι γερανοί φορτοεκφόρτωσης καταναλώνουν ένα ποσοστό περίπου 40%
- Ο φωτισμός του τερματικού σταθμού καταναλώνει περίπου 12% και
- Η λειτουργία των κτιρίων διοίκησης απαιτεί περίπου το 8% της συνολικής ζήτησης [15].



Εικόνα 2.1 Ποσοστιαία κατανομή κατανάλωσης ενέργειας σε μεγάλους εμπορικούς λιμένες της Λατινικής Αμερικής

Πηγή: G. Wilmsmeier et.al, 2014. *Energy Consumption and Efficiency: Emerging Challenges from Reefer Trade in South American Container Terminals*, ISU Corp., Issue N. 329, Number 1, 2014

Ο κύριος στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη μίας μεθόδου διαχείρισης της ζήτησης ενέργειας σε μεγάλους λιμένες, η οποία εκμεταλλεύεται τα ευέλικτα φορτία του λιμένα και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, προκειμένου να αποσβέσει τις αποκλίσεις της πραγματικής παραγωγής αιολικής ενέργειας από την προκαθορισμένη παραγωγή και της πραγματικής ζήτησης ισχύος των συνδεδεμένων πλοίων στις εγκαταστάσεις τροφοδοσίας του λιμένα από την προβλεπόμενη τιμή της, αυξάνοντας την οικονομική, κοινωνική και περιβαλλοντική αποδοτικότητα του λιμένα.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των μεθόδων διαχείρισης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας (DSM) είναι η συνδυαστική εκμετάλλευση του ελέγχου των φορτίων, του επαναπρογραμματισμού των λειτουργιών και της αποθήκευσης ενέργειας [16]. Τα φορτία που παρουσιάζουν κάποιο βαθμό ευελιξίας αποτελούν το κλειδί για την αποτελεσματική εφαρμογή των μεθόδων DSM. Επίσης, η αξιοποίηση των ευέλικτων φορτίων των λιμένων αποτελεί βασικό εργαλείο για την ανάπτυξη αποδοτικών και πράσινων λιμένων [17]. Για αυτό και σε αυτό το κεφάλαιο η ανάλυση επικεντρώνεται στα ευέλικτα φορτία των μεγάλων εμπορικών λιμένων και συγκεκριμένα στα εμπορευματοκιβώτια ελεγχόμενης θερμοκρασίας, γνωστά ως reefers (Ενότητα 2.1.1) και στα συστήματα ηλεκτρικής τροφοδοσίας που είναι εγκατεστημένα στους λιμένες και παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια στα αγκυροβολημένα πλοία (Ενότητα 2.1.2).

2.1.1. Εμπορευματοκιβώτια ελεγχόμενης θερμοκρασίας (Reefers)

Τα reefers είναι εμπορευματοκιβώτια ελεγχόμενης θερμοκρασίας που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά προϊόντων που διατηρούνται σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες, όπως τα φρούτα, το κρέας, τα ψάρια, τα θαλασσινά, τα λαχανικά, τα

γαλακτοκομικά, αλλά και μη εδώδιμα προϊόντα όπως λουλούδια και φαρμακευτικά προϊόντα σε μεγάλες οδικές και θαλάσσιες αποστάσεις. Τα εμπορευματοκιβώτια ελεγχόμενης θερμοκρασίας έχουν τη δυνατότητα να διατηρούν το φορτίο στις απαιτούμενες θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της μεταφοράς του.

Τα προϊόντα που μεταφέρονται ανήκουν σε τρεις βασικές κατηγορίες και συγκεκριμένα εκείνα που μεταφέρονται σε συνθήκες ψύξης, κατεψυγμένα ή σε ελεγχόμενες θερμοκρασίες. Ιδιαίτερα τα φορτία που ψύχονται ή διατηρούνται σε σταθερές θερμοκρασίες απαιτούν μία σταθερή παροχή ενέργειας, διότι ακόμη και οι παραμικρές θερμοκρασιακές μεταβολές μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά την ποιότητα του φορτίου [15].

2.1.1.1. Βασικά χαρακτηριστικά εμπορευματοκιβωτίων ελεγχόμενης θερμοκρασίας

Όσον αφορά το μέγεθος των εμπορευματοκιβωτίων τα εμπορευματοκιβώτια μήκους 20 ποδιών και τα εμπορευματοκιβώτια μήκους 40 ποδιών είναι τα πιο διαδεδομένα και βρίσκουν ένα πλήθος εφαρμογών, λόγω της τιμής και της ευρείας διαθεσιμότητάς τους, αλλά και της ευκολίας στοίβαξής τους, καθώς υπάρχει η δυνατότητα τοποθέτησης δύο ή περισσότερων τέτοιων εμπορευματοκιβωτίων δίπλα-δίπλα. Το μήκος μετράται από τα ακραία σημεία κατά μήκος της μακρύτερης πλευράς του δοχείου. Στην αγορά των θαλάσσιου εμπορίου, τα εμπορευματοκιβώτια προσδιορίζονται με βάση τις μακρύτερες πλευρές τους.

Όταν αναφερόμαστε στη χωρητικότητα των εμπορευματοκιβωτίων έχει επικρατήσει διεθνώς η χρήση της μονάδα TEU. Το TEU αντιπροσωπεύει την Εξισωτική Μονάδα είκοσι ποδιών (Twenty foot Equivalent Unit) και χρησιμοποιείται για να δηλώσει ένα εμπορευματοκιβώτιο μήκους 20 ποδιών. Ένα εμπορευματοκιβώτιο μήκους 40 ποδιών ισοδυναμεί με 2 TEU. Επιπλέον, η μονάδα FEU χρησιμοποιείται για να δηλώσει εμπορευματοκιβώτια μήκους 40 ποδιών.

Όσον αφορά την τεχνολογία, υπάρχουν δύο βασικοί τύποι reefers που έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται ευρέως:

Ο πρώτος τύπος εμπορευματοκιβωτίων λειτουργεί σαν μονωμένο δοχείο, χωρίς να έχει εγκατεστημένη δικιά του μονάδα ψύξης. Τα συγκεκριμένα reefers έχουν δύο ανοίγματα στα ακραία τοιχώματα μέσω των οποίων μπορεί να διοχετευθεί ψυχρός αέρας μέσα στο δοχείο και να εξαχθεί ζεστός αέρας. Ο ψυχρός αέρας ωθείται μέσω του κάτω ανοίγματος μέσα στο δοχείο, κατανέμεται σε όλο το φορτίο μέσω ενός πλέγματος σχήματος T και στη συνέχεια ρέει διαμέσου του φορτίου στην κορυφή του δοχείου και εξάγεται μέσω του άνω ανοίγματος [18].

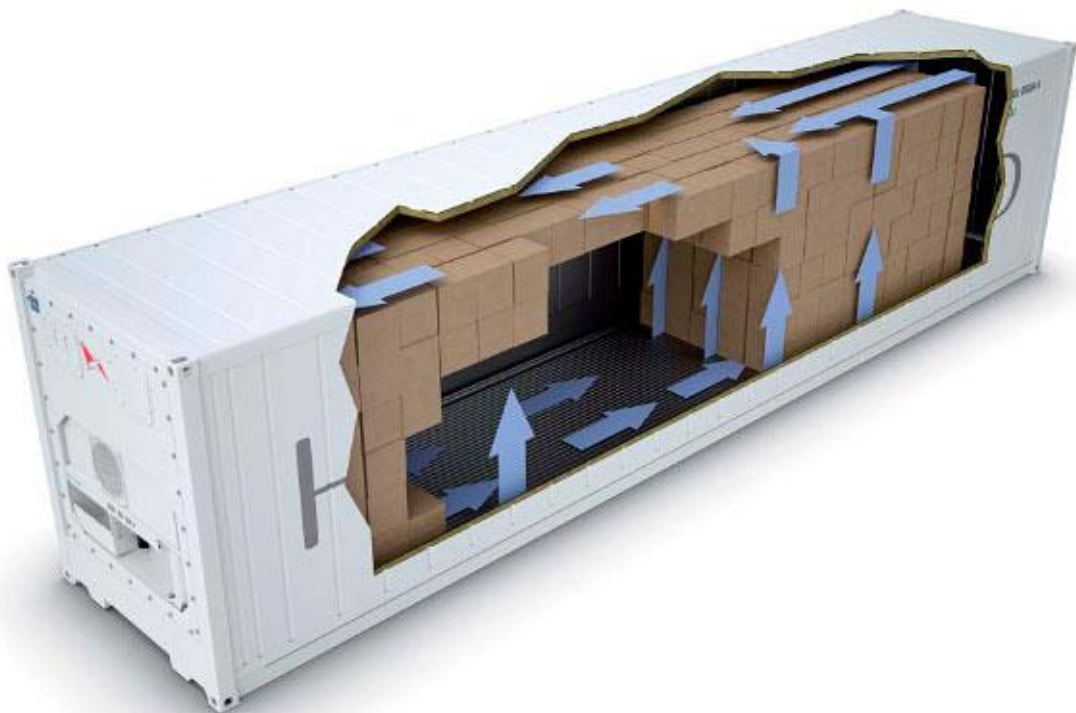
Επομένως, η λειτουργία τους εξαρτάται από την παροχή ψυχρού αέρα από κάποια εξωτερική πηγή. Χρησιμοποιούνται μονάδες ψύξης διαφόρων τύπων, μόνιμα εγκατεστημένες στα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων ή στους τερματικούς σταθμούς φορτοεκφόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων.

Τα εμπορευματοκιβώτια αυτά είναι διαθέσιμα σε τρία μεγέθη, ανάλογα με την περιοχή στην οποία διακινούνται: εμπορευματοκιβώτια ύψους 8 ποδιών, και μήκους 20 ποδιών που χρησιμοποιούνται κατά τη μεταφορά εμπορευμάτων από την Αυστραλία, τη Νέα Ζηλανδία και τη Νότια Αμερική στην Ευρώπη, εμπορευματοκιβώτια ύψους 8½ ποδιών, και μήκους 20 ποδιών για μεταφορές προϊόντων μεταξύ της Νότιας Αφρικής και της Ευρώπης και εμπορευματοκιβώτια ύψους 8½ ποδιών, και μήκους 40 ποδιών για θαλάσσιες μεταφορές μεταξύ της δυτικής ακτής της Νότιας Αμερικής και της Ευρώπης [18].

Η τεχνολογία αυτών των εμπορευματοκιβωτίων αναπτύχθηκε πριν από τη δεκαετία του 70. Η πρώτη γενιά πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων συμβατών με εμπορευματοκιβώτια τέτοιου τύπου είναι πλέον ηλικίας άνω των είκοσι πέντε ετών και αναμένεται σύντομα να αντικατασταθούν από πλοία με μεγαλύτερη χωρητικότητα για reefers ολοκληρωμένου τύπου [18].

Ο δεύτερος τύπος εμπορευματοκιβωτίων είναι τα reefers ολοκληρωμένου τύπου. Τα συγκεκριμένα εμπορευματοκιβώτια έχουν ενσωματωμένη δική τους μονάδα ψύξης, που είναι ασφαλισμένη στο ακραίο τοίχωμα και βασίζονται σε τριφασική ηλεκτρική τροφοδοσία από τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων ή το δίκτυο του λιμένα κατά τη διάρκεια που το πλοίο είναι αγκυροβολημένο.

Ο ψυχρός αέρας διοχετεύεται μέσα από σχάρες που βρίσκονται στο κάτω μέρος του εμπορευματοκιβωτίου και ρέει μέσα και γύρω από τα προϊόντα που είναι αποθηκευμένα σε αυτό. Στη συνέχεια όταν φτάνει στην οροφή οι ανεμιστήρες ανακυκλοφορίας ωθούν τον αέρα να περάσει μέσα από τη μονάδα ψύξης και ο οποίος τελικά ανακατευθύνεται στις σχάρες στο κάτω μέρος του εμπορευματοκιβωτίου. Η ροή του αέρα εντός ενός reefer φαίνεται στην εικόνα 2.2.



Εικόνα 2.2 Ροή ψυχρού αέρα σε εμπορευματοκιβώτιο ελεγχόμενης θερμοκρασίας
Πηγή: <http://skladovoy.ru/ispolzovanie-refkontejnera-v-kachestve-xolodilnyx-skladov.html>

2.1.1.2. Τα εμπορευματοκιβώτια ελεγχόμενης θερμοκρασίας ως βασικό κομμάτι των μελλοντικών συστημάτων των έξυπνων λιμένων

Τα εμπορευματοκιβώτια ελεγχόμενης θερμοκρασίας αποτελούν βασικό κομμάτι των συστημάτων ψύξης που χρησιμοποιούνται στο θαλάσσιο εμπόριο. Τα συστήματα αυτά διαφέρουν από τα σταθερά συστήματα ψύξης, μεταξύ άλλων, στο γεγονός ότι τα συστήματα ψύξης που εφαρμόζονται στις θαλάσσιες μεταφορές πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε να ανταποκρίνονται στην πιθανότητα συχνής απενεργοποίησης και επανεκκίνησης. Τα reefers σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων μπορεί να λειτουργούν συνεχώς επί εβδομάδες, αλλά υπό ορισμένες συνθήκες μπορεί να ξεκινούν και να σταματούν τη λειτουργία τους καθημερινά. Τα ψυχόμενα εμπορευματοκιβώτια συνήθως κλείνουν μετά την εκφόρτωση του φορτίου και επανεκκινούνται πριν φορτωθεί το νέο φορτίο [19]. Το γεγονός ότι είναι σχεδιασμένα να ανταποκρίνονται σε συχνές μεταβολές της κατάστασης λειτουργίας τους, τα καθιστά αρκετά ευέλικτα.

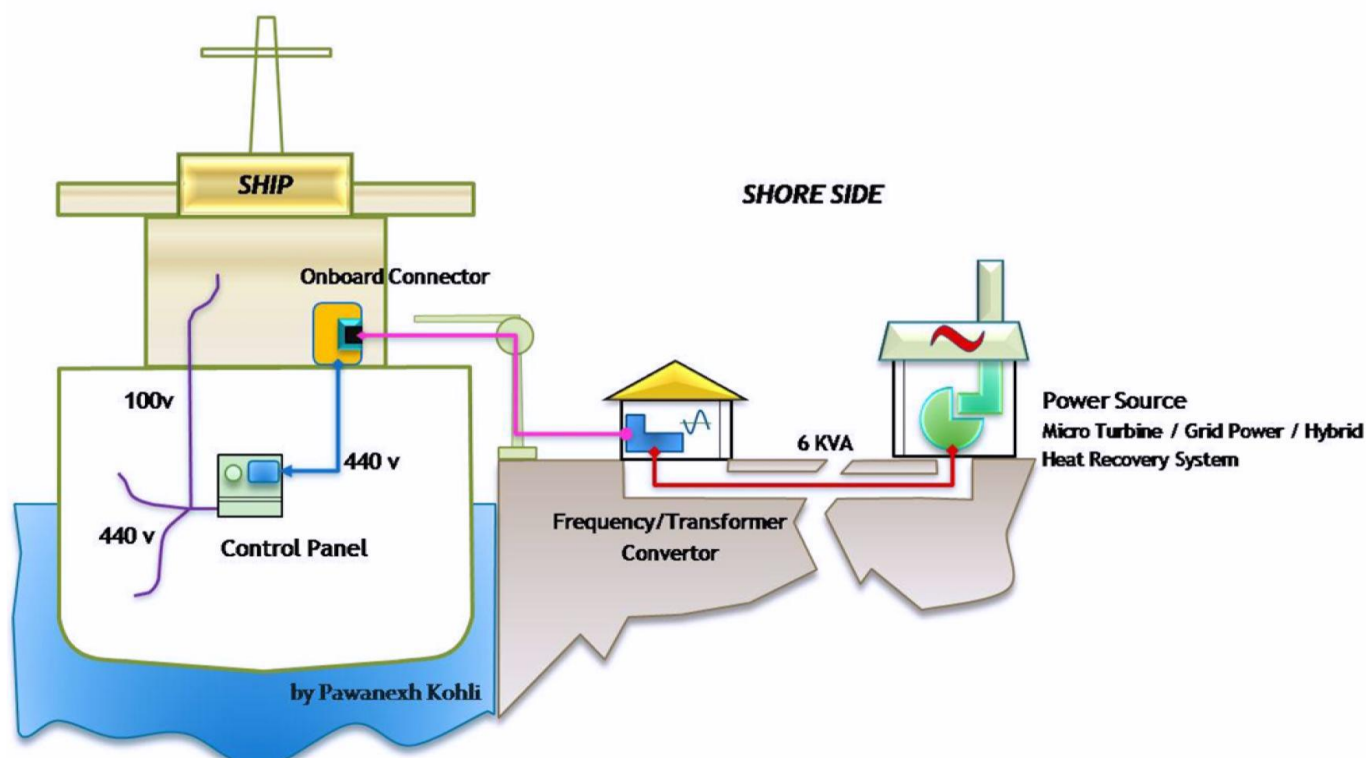
Σε μεγάλους εμπορικούς λιμένες, όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.4, σημαντικό ποσοστό της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας καταναλώνεται από τα reefers. Η ενέργεια που απαιτείται για την ψύξη του περιεχομένου των εμπορευματοκιβωτίων αποτελεί σημαντικό μέρος της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας των λιμένων [15,20]. Παρά το γεγονός ότι τα reefers είναι πολύ ευέλικτα φορτία, η ευελιξία τους δεν έχει αξιοποιηθεί ιδιαίτερα στα συστήματα διαχείρισης του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας των λιμένων [21].

Τα reefers φιλοξενούνται σε μεγάλους αριθμούς στους εμπορικούς λιμένες και παραμένουν στο λιμάνι για περίπου δύο-τρεις μέρες. Όταν ένα καλά μονωμένο εμπορευματοκιβώτιο ελεγχόμενης θερμοκρασίας σβήνει, η εσωτερική του θερμοκρασία αυξάνεται κατά περίπου 1°C κάθε 9 ώρες [22, 23]. Η ονομαστική κατανάλωση ενέργειας ενός τυπικού reefer είναι περίπου 10kW, ενώ ο μέσος συντελεστής χρήσης κυμαίνεται μεταξύ 0,3 και 0,4 [18]. Ως εκ τούτου, δεδομένου ότι σε ένα μεγάλο λιμάνι φιλοξενούνται μερικές χιλιάδες reefers, η μέγιστη ισχύς που μπορεί να αντληθεί από αυτά ανέρχεται σε αρκετά MW [1]. Συνεπώς, όπως προκύπτει από τα παραπάνω, τα reefers είναι πολύ ευέλικτα φορτία σε σχέση με τον χρόνο και την κατανάλωση ισχύος [3] και αναμένεται να αποτελέσουν βασικό κομμάτι των ενεργειακών συστημάτων των μελλοντικών έξυπνων λιμένων [17].

2.1.2. Σύνδεση πλοίων στο δίκτυο του λιμένα (Cold Ironing)

Ο όρος cold ironing αναφέρεται στη σύνδεση του πλοίου με το δίκτυο παροχής ηλεκτρικού ρεύματος του λιμένα, επιτρέποντας τη διακοπή λειτουργίας των βοηθητικών μηχανών ντίζελ του πλοίου. Ο όρος cold ironing προέρχεται από την περίοδο που πολλά πλοία λειτουργούσαν με κινητήρες με επίστρωση σιδήρου. Ενώ αυτά τα σκάφη βρίσκονταν αγκυροβολημένα στο λιμάνι, δεν υπήρχε ανάγκη για τροφοδότηση της φωτιάς για την παραγωγή ατμού, που χρησιμοποιούνταν για την

πρώωση του πλοίου. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την μείωση της εξωτερικής θερμοκρασίας της μηχανής, ώσπου τελικά κρύωναν [12].



Εικόνα 2.3 Προτεινόμενη εφαρμογή cold ironing σε θέση ελλιμενισμού πλοίου

Πηγή: T.G. Papoutsoglou (2012). A Cold Ironing Study on Modern Ports, Implementation and Benefits Thriving for Worldwide Ports, Master of Science Thesis, Dept. Naval Archit. & Marine Engin., National Tech. Univ. of Athens, Athens, Greece

Κατά τη διάρκεια που το πλοίο βρίσκεται αγκυροβολημένο στο λιμάνι, απαιτούνται σημαντικές ποσότητες ενέργειας για την ολοκλήρωση διαδικασιών όπως η φόρτωση, η εκφόρτωση, η θέρμανση, η ψύξη, ο φωτισμός, η συνέχιση διαφόρων αναγκών διεργασιών και η λειτουργία του εξοπλισμού άμεσης ανάγκης. Αυτή η ενέργεια παρέχεται από τις βοηθητικές μηχανές του πλοίου, οι οποίες όμως λειτουργούν καίγοντας βαρύ μαζούτ [24], που αποτελεί προϊόν της απόσταξης του πετρελαίου, καθώς είναι αρκετά φθηνότερο, περίπου 30%, σε σχέση με άλλα καύσιμα. Ως αποτέλεσμα τα πλοία παράγουν αυξημένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, όσο είναι αγκυροβολημένα, επιδεινώνοντας αισθητά την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα στην ευρύτερη περιοχή του λιμένα.

Η ανάπτυξη υποδομών, για την υποστήριξη εγκαταστάσεων σύνδεσης των πλοίων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας του λιμένα, κατά τη διάρκεια του ελλιμενισμού τους θα οδηγήσει σε δραστική μείωση των εκπομπών των πλοίων [25-29]. Συγκεκριμένα, έχει διαπιστωθεί ότι η σύνδεση όλων των ελλιμενισμένων πλοίων στο ηλεκτρικό δίκτυο του λιμένα, μπορεί να μειώσει τις εκπομπές αερίων ρύπων κατά 48-70%, 3-60%, 40-60% και 57-70% για το CO₂, SO₂, NO_x και BC, αντίστοιχα [30]. Η ενέργεια που απαιτείται για τη συνέχιση των δραστηριοτήτων του πλοίου μπορεί να προέλθει

από διάφορες πηγές, όπως το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας του λιμένα ή της ευρύτερης περιοχής του, καθώς και από τοπική παραγωγή ενέργειας από εγκαταστάσεις ΑΠΕ [12].

Πίνακας 1 Σύγκριση των εκπομπών αερίων ρύπων από κινητήρες ντίζελ και παροχή ενέργειας από το δίκτυο του λιμένα (Shore Power)

Πηγή: T.G. Papoutsoglou (2012). *A Cold Ironing Study on Modern Ports, Implementation and Benefits Thriving for Worldwide Ports*, Master of Science Thesis, Dept. Naval Archit. & Marine Engin., National Tech. Univ. of Athens, Athens, Greece

Emissions (in g/kWh)	NO _x	SO _x	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 ²	CH ₄	N ² 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%

Η χρήση πράσινης ενέργειας, όπως είναι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, για την κάλυψη της απαιτούμενης παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στα ελλιμενισμένα πλοία, μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερο τελικό όφελος για τον λιμενικό οργανισμό [26]. Συγκεκριμένα, η συνδυασμένη χρήση ΑΠΕ και cold ironing μπορεί να οδηγήσει τόσο σε μείωση του κόστους λειτουργίας όσο και σε μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μεταξύ 2% και 8% [31]. Στον πίνακα 1 φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάπτυξης εγκαταστάσεων cold ironing στην περίπτωση του λιμανιού του Antwerp στο Βέλγιο.

Παράλληλα, τα συστήματα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στα πλοία που βρίσκονται αγκυροβολημένα στο λιμάνι από το δίκτυο του λιμένα, παρέχουν έναν σημαντικό βαθμό ευελιξίας, καθώς υπάρχει η εναλλακτική παροχής ηλεκτρικής ενέργειας από τις βοηθητικές μηχανές των πλοίων.

Η πρώτη υποδομή cold ironing εγκαταστάθηκε στο λιμάνι του Gothenburg το 2000 για πλοία ro-ro, όπου η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια παρέχονταν μερικώς από αιολική ενέργεια. Το λιμάνι του Λος Άντζελες είναι το πρώτο λιμάνι στον κόσμο που χρησιμοποίησε τεχνικές cold ironing για πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων [3].

Η σύσταση 2006/336/EC της Ευρωπαϊκής Ένωσης προτείνει την τεχνολογία του cold ironing ως τη βέλτιστη λύση όσον αφορά την μείωση του λειτουργικού κόστους και τον περιορισμό των εκπομπών ρύπων [3]. Τα επόμενα χρόνια αναμένεται η αυξανόμενη υιοθέτηση του cold ironing διεθνώς, κυρίως από τους οργανισμούς των μεγάλων λιμένων, ενώ ήδη υπάρχουν περισσότερα από 20 λιμάνια παγκοσμίως που εφαρμόζουν την προαναφερόμενη τεχνολογία στην ηλεκτρική τους υποδομή [30].



Εικόνα 2.4 Ελλιμενισμένα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων

Πηγή: <http://acecargo.eu/services/sea-freight/>

2.1.3. Γερανοί, κτιριακές εγκαταστάσεις και λοιπές λειτουργίες εμπορικών λιμένων

Εκτός από τα εμπορευματοκιβώτια ελεγχόμενης θερμοκρασίας και τα συστήματα τροφοδότησης των ελλιμενισμένων πλοίων με ηλεκτρική ενέργεια, που αναφέρονται στις προηγούμενες ενότητες, ένα πλήθος διαφορετικού τύπου φορτίων περιλαμβάνονται στους μεγάλους λιμένες. Τα κυριότερα από αυτά είναι η γερανοί, ο φωτισμός και οι διάφορες εγκαταστάσεις, όπως τα κτήρια διοίκησης. Οι επίγειοι γερανοί του λιμένα χρησιμοποιούνται για μεταφορά φορτίων από και προς τα πλοία, καθώς και για μετακινήσεις φορτίων εντός του χώρου του λιμένα. Σημαντικό μέρος της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται από τον λιμένα αφορά τους γερανούς [21].

Όσον αφορά τη λειτουργία τους, οι γερανοί είναι εξοπλισμένοι με δικές τους ηλεκτρικές γεννήτριες. Γενικά, είναι δυνατή η σύνδεσή των γερανών με το σύστημα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας του λιμένα, η οποία θα συμβάλει στην πιο φιλική προς το περιβάλλον λειτουργία τους σε σχέση με τη χρήση άλλων πηγών ενέργειας και κατ' επέκταση στον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Στην περίπτωση των γερανών, το επίπεδο της αναπτυχθείσας τεχνολογίας είναι εξαιρετικά σημαντικό όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας. Έχει αποδειχθεί πως

υπάρχει ισχυρός θετικός συσχετισμός μεταξύ της ηλικίας των γερανών και της κατανάλωσης ενέργειας. Ως εκ τούτου, πέρα από την ηλεκτροδότηση και η τεχνολογική ανανέωση των γερανών θα μπορούσε να συμβάλει στην αποδοτικότερη λειτουργία τους και να αποτελέσει μέρος μίας ολοκληρωμένης μακροπρόθεσμης στρατηγικής πράσινου μετασχηματισμού των λιμένων [15]. Ωστόσο, θεωρείται πως η όποια ευελιξία παρέχουν οι γερανοί ως ηλεκτρικά φορτία είναι πολύ βραχυπρόθεσμοι χαρακτήρα, καθώς η λειτουργία τους υπόκειται σε αυστηρούς χρονικούς περιορισμούς [21].

Ο φωτισμός των εγκαταστάσεων του λιμένα αποτελεί ένα φορτίο έντασης ενέργειας, αλλά πολύ περιορισμένης ευελιξίας. Επίσης, στις εγκαταστάσεις του λιμένα υπάρχει ένα πλήθος κτιρίων με πολύ διαφορετικά προφίλ ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Στην πραγματικότητα, υπάρχουν διαθέσιμα διάφορα συστήματα ενεργειακής διαχείρισης κτιρίων για τον βέλτιστο προγραμματισμό των ενεργειακών λειτουργιών τους, αλλά η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στον έλεγχο και την αξιοποίηση της ευελιξίας των μεγάλων φορτίων που υπάρχουν στους λιμένες. Ως εκ τούτου, οι γερανοί του λιμένα, ο φωτισμός και τα κτίρια του λιμανιού θεωρούνται στην εργασία αυτή ως ανελαστικά φορτία.



Εικόνα 2.5 Άποψη τερματικού σταθμού εμπορευματοκιβωτίων μεγάλου εμπορικού λιμένα
Πηγή: <http://acecargo.eu/services/sea-freight/>

2.2. Πιθανές πηγές παραγωγής ενέργειας σε μεγάλα εμπορικά λιμάνια

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η συνολική αποδοτικότητα των λιμένων θα αυξηθεί σημαντικά αν ο εξηλεκτρισμός των λειτουργιών τους συνδυαστεί με την τοπική παραγωγή ενέργειας. Παράλληλα, πολλοί λιμένες, ιδιαίτερα οι μεγάλοι λιμένες, παρέχουν την δυνατότητα παραγωγής ενέργειας από διάφορες πηγές, όπως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τα βιοκαύσιμα, λόγω του μεγάλου διαθέσιμου χώρου για την ανάπτυξη εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας, της τοποθεσίας τους και άλλων παραγόντων.

Οι λιμένες παίζουν ήδη ρόλο στην ανακύκλωση υλικών και στη διαχείριση αποβλήτων, ενώ ο ρόλος τους στις συγκεκριμένες διαδικασίες αναμένεται να γίνει ακόμα πιο σημαντικός τα επόμενα χρόνια. Εκτός από τα σημαντικά οφέλη που θα αποκομίσουν από την άποψη της αύξησης του όγκου των μεταφερόμενων φορτίων, η διαχείριση ανακυκλώσιμων υλικών και αποβλήτων μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας. Συγκεκριμένα, από τα απόβλητα μπορούν να παραχθούν σημαντικές ποσότητες θερμικής ενέργειας ή μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή βιοαερίου και ηλεκτρικής ενέργειας [5].

Επιπλέον, η ανάπτυξη των βιοκαυσίμων αποτελεί τόσο μία ευκαιρία επέκτασης των λιμενικών δραστηριοτήτων σε δραστηριότητες όπως η διανομή και αποθήκευση βιοκαυσίμων, όσο και μία πιθανή πηγή παραγωγής ενέργειας για τους λιμένες [5].

Όμως, η παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ φαίνεται να είναι η πιο αποδοτική και με μεγάλες δυνατότητες ανάπτυξης πιθανή πηγή παραγωγής ενέργειας στα λιμάνια και για αυτό αποκτά όλο και σημαντικότερο ρόλο στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας των λιμένων. Σημαντικό πλεονεκτήματα της εγκατάστασης των ΑΠΕ είναι η παραγωγή ενέργειας με αποδοτικό και φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο, αλλά και η δυνατότητα ένταξής τους σε ολοκληρωμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας λιμένων, σε συνδυασμό με τεχνολογίες όπως το cold ironing, αυξάνοντας τη συνολική αποδοτικότητα του συστήματος, όπως αναλύθηκε σε προηγούμενες ενότητες.

Η γεωγραφική θέση των λιμενικών εγκαταστάσεων δημιουργεί μεγάλες δυνατότητες για παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ. Συγκεκριμένα, μπορούν να αναπτυχθούν επίγειες και παράκτιες εγκαταστάσεις παραγωγής αιολικής ενέργειας, να αξιοποιηθεί η δυνατότητα παραγωγής ενέργειας από τα κύματα, τις διαφοροποιήσεις της παλίρροιας και τη γεωθερμική ενέργεια. Επιπλέον, μπορούν να αξιοποιηθούν οι μεγάλες επιφάνειες που είναι διαθέσιμες στις κτηριακές εγκαταστάσεις των λιμένων για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ, χωρίς όμως οι υποδομές αυτές να είναι κατάλληλες για την εκτεταμένη εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας [5]. Για παράδειγμα, στα πλαίσια του ερευνητικού project CLIMEPORT, έχουν εγκατασταθεί υπεράκτια υβριδικά συστήματα υδροηλεκτρικής ενέργειας, φωτοβολταϊκά συστήματα και συστήματα παραγωγής αιολικής ενέργειας σε μεγάλους λιμένες [3].

Ωστόσο, η αυξανόμενη ηλεκτροδότηση ενός λιμένα σε συνδυασμό με τη μεταβλητότητα που χαρακτηρίζει την παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) θα δημιουργήσει υψηλές απαιτήσεις για τη λειτουργία του

συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Ιδιαίτερα στην περίπτωση της αιολικής ενέργειας, οι περισσότερες προκλήσεις σχετίζονται με τον ένα ή τον άλλο τρόπο με την στοχαστική φύση του ανέμου. Ο άνεμος αποτελεί μία πηγή ενέργειας που χαρακτηρίζεται από υψηλή αβεβαιότητα, μεγάλη μεταβλητότητα και χαμηλή προβλεψιμότητα [32]. Συνεπώς, απαιτείται η λήψη δραστικών μέτρων και η ανάπτυξη συστημάτων διαχείρισης προκειμένου να μετριαστούν τα προβλήματα στη λειτουργία του ηλεκτρικού συστήματος που προκύπτουν από την εξαιρετικά μεταβαλλόμενη εναλλαγή ισχύος μεταξύ του λιμένα και του ηλεκτρικού συστήματος [1]. Τα έξυπνα συστήματα διαχείρισης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, όπως αυτό που αναπτύσσεται στην παρούσα εργασία μπορεί να αποτελέσουν μία αποτελεσματική και αποδοτική λύση σε αυτό το πρόβλημα.

3. Διεθνείς κανονισμοί για τον περιορισμό των ρύπων εντός των ορίων των λιμένων

3.1. Κανονισμοί του IMO

Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (International Maritime Organization-IMO) αποτελεί μία εξειδικευμένη υπηρεσία του ΟΗΕ και συνιστά την αρχή που καθορίζει τα παγκόσμια πρότυπα σχετικά με τη διεθνή ναυτιλία, για ζητήματα όπως η ασφάλεια, το περιβάλλον, το νομικό πλαίσιο, η τεχνική συνεργασία και η αποτελεσματικότητα της ναυτιλίας.

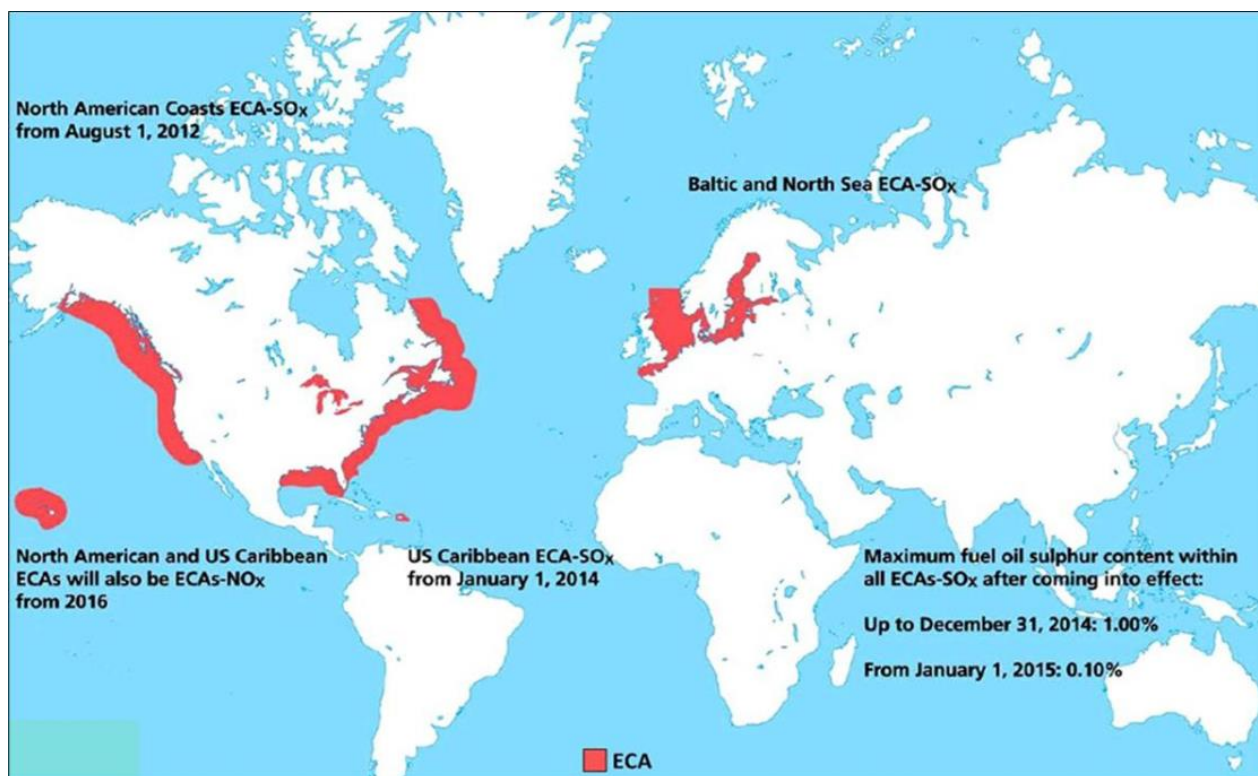
Ο IMO ιδρύθηκε στη Γενεύη, το 1948, ως Διεθνής Οργανισμός Ναυτιλιακής συνεργασίας (IMCO - International Maritime Cooperation Organization) και μετονομάστηκε σε IMO το 1982, ενώ η πρώτη συνεδρίαση του οργανισμού πραγματοποιήθηκε το 1959. Ο Οργανισμός αποτελεί έναν διακυβερνητικό, διεθνή ναυτιλιακό οργανισμό που έχει 170 κράτη – μέλη και 3 συνδεδεμένα μέλη. [33]

Η σύμβαση για την πρόληψη της μόλυνσης του περιβάλλοντος από πλοία (MARPOL, Maritime Pollution) υιοθετήθηκε το 1973 και αποτελεί μία από τις σημαντικότερες συμβάσεις του IMO. Ιδιαίτερα, το Παράρτημα VI της σύμβασης MARPOL 73/78, που τέθηκε σε ισχύ στις 19 Μαΐου 2005, περιλαμβάνει πολλές νέες πτυχές που αφορούν τόσο το σχεδιασμό των πλοίων, όσο και επιχειρησιακά ζητήματα.

Στο Παράρτημα VI περιλαμβάνονται οι κανονισμοί 12-18 της σύμβασης για την πρόληψη της μόλυνσης του περιβάλλοντος από πλοία, που ρυθμίζουν μία σειρά από ζητήματα, τα οποία αναφέρονται συνοπτικά παρακάτω:

- Κανονισμός 12 - Εκπομπές από ουσίες που καταστρέφουν το όζον από ψυκτικές εγκαταστάσεις και εξοπλισμό πυρόσβεσης.
- Κανονισμός 13 - Εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NOx) από κινητήρες ντίζελ.
- Κανονισμός 14 - Εκπομπές οξειδίων του θείου (SOx) από πλοία.
- Κανονισμός 15 - Εκπομπές πτητικών οργανικών ενώσεων (VOC) από τις δεξαμενές πετρελαίου των πετρελαιοφόρων πλοίων.
- Κανονισμός 16 - Εκπομπές από αποτεφρωτήρες πλοίων.
- Κανονισμός 18 - Ποιότητα καυσίμου.

Οι λεπτομερείς περιορισμοί που εισάγουν οι κανονισμοί του IMO αποτελούν έναν παράγοντα που αναπόφευκτα θα οδηγήσει στον εξηλεκτρισμό των λιμενικών εγκαταστάσεων, αλλά και των ίδιων των πλοίων.



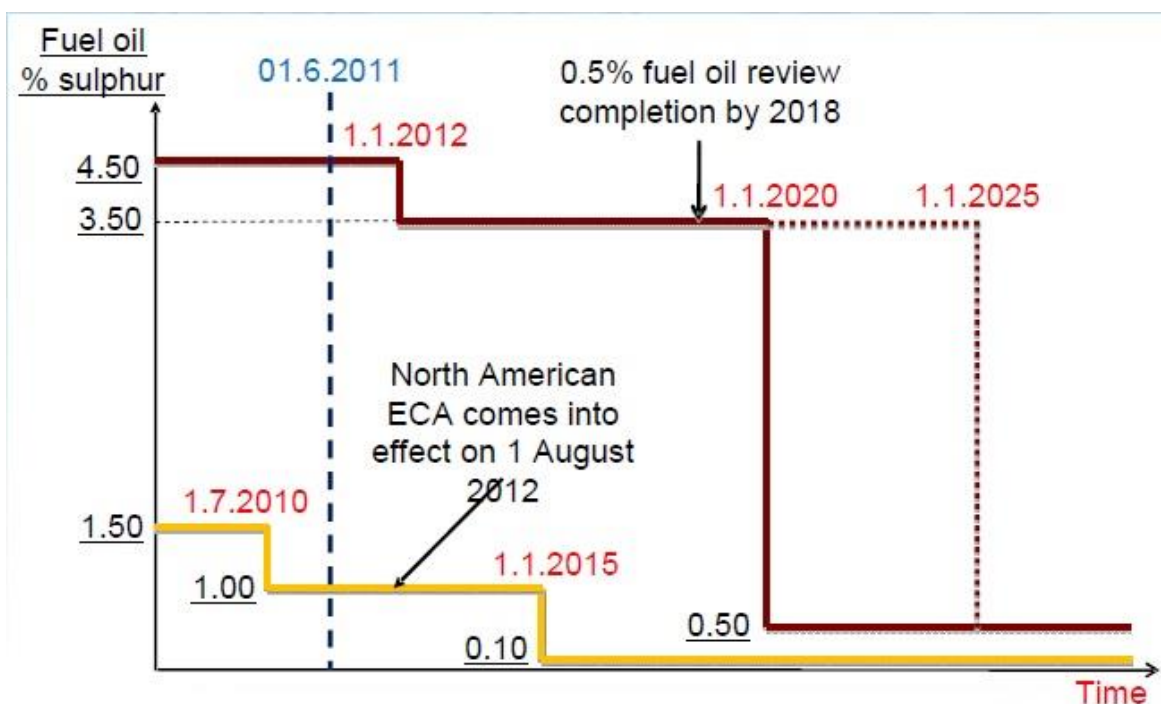
Εικόνα 3.1 Οι περιοχές ελέγχου εκπομπής ρύπων σύμφωνα με το παράρτημα VI της σύμβασης MARLOP 73/78 του IMO
Πηγή: www.marlink.com

Ιδιαίτερα ο κανονισμός 14, που αφορά τον έλεγχο εκπομπών SO_x και σωματιδιακής ύλης και εφαρμόζεται για όλα τα καύσιμα και τον εξοπλισμό που βρίσκεται στο πλοίο, συμπεριλαμβανομένων τόσο των κύριων όσο και των βοηθητικών κινητήρων εισάγει λεπτομερείς ποσοτικούς περιορισμούς που αφορούν την περιεκτικότητα των καυσίμων σε θείο. Αυτά τα όρια διαφοροποιούνται εντός των περιοχών ελέγχου των εκπομπών ρύπων (Emission Control Areas - ECA), όπως αυτές ορίζονται στην Εικόνα 3.1, που έχουν τεθεί για τον περιορισμό των εκπομπών SO_x και σωματιδίων και εκτός αυτών των περιοχών και επιτυγχάνονται κατά κύριο λόγο με τον περιορισμό της μέγιστης περιεκτικότητας σε θείο των πετρελαιοειδών που χρησιμοποιούνται από τα πλοία. Τα προαναφερόμενα όρια περιεκτικότητας σε θείο για τα καύσιμα πετρελαίου (εκφρασμένα σε % m/m - δηλαδή κατά μάζα) υπόκεινται σε σειρά κλιμακωτών αλλαγών κατά τη διάρκεια των ετών, όπως φαίνεται σχηματικά στην Εικόνα 3.2, αλλά και στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 2. Όρια % m/m περιεκτικότητας καυσίμων πετρελαίου σε θείο εντός και εκτός των περιοχών ελέγχου των εκπομπών ρύπων σύμφωνα με τον κανονισμό 14 της σύμβασης MARPOL 73/78
 Πηγή: [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Sulphur-oxides-\(SOx\)-%E2%80%93-Regulation-14.aspx](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Sulphur-oxides-(SOx)-%E2%80%93-Regulation-14.aspx)

Outside an ECA established to limit SOx and particulate matter emissions	Inside an ECA established to limit SOx and particulate matter emissions
4.50% m/m prior to 1 January 2012	1.50% m/m prior to 1 July 2010
3.50% m/m on and after 1 January 2012	1.00% m/m on and after 1 July 2010
0.50% m/m on and after 1 January 2020	0.10% m/m on and after 1 January 2015

Ο στόχος του 0.50% m/m για το 2020 και μετά εκτός των περιοχών ECA, ενδέχεται να αναθεωρηθεί και να αναβληθεί για την 1η Ιανουαρίου 2025, ανάλογα με το αποτέλεσμα μίας επανεξέτασης που θα ολοκληρωθεί μέχρι το 2018 σχετικά με τη διαθεσιμότητα του απαιτούμενου καυσίμου.



Εικόνα 3.2 Σχηματική αναπαράσταση των % m/m ορίων περιεκτικότητας καυσίμων πετρελαίου σε θείο και των κλιμακωτών αλλαγών κατά τη διάρκεια των ετών εντός και εκτός των περιοχών ελέγχου των εκπομπών ρύπων σύμφωνα με τον κανονισμό 14 της σύμβασης MARPOL 73/78
 Πηγή: https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/modes/maritime/events/doc/2011_06_01_stakeholder-event/item2.pdf

3.2. Οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Η μείωση της ρύπανσης από τις ναυτιλιακές δραστηριότητες αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της πολιτικής της ΕΕ για την ασφάλεια στη θάλασσα από τις αρχές του 1993. Συγκεκριμένα, περίπου οι μισές οδηγίες και κανονισμοί της ΕΕ που αφορούν τη θαλάσσια ασφάλεια έχουν σαφή προσανατολισμό την προστασία του περιβάλλοντος και σχεδόν όλες οι ρυθμιστικές διατάξεις συμβάλλουν τουλάχιστον έμμεσα σε αυτόν τον σκοπό. [34]

3.2.1. Οδηγίες που αφορούν τη διαχείριση των απορριμμάτων και των υπολειμμάτων φορτίου των πλοίων

Έχουν εκδοθεί δύο διαφορετικές οδηγίες της Ε.Ε. που στοχεύουν στην βέλτιστη εφαρμογή των διεθνών κανόνων και προτύπων σχετικά με τη διαχείριση των αποβλήτων που προκύπτουν από τις δραστηριότητες της ναυτιλίας.

3.2.1.1. Οδηγία 2000/59/EC

Η Οδηγία 2000/59/EC [35] σχετικά με τις λιμενικές εγκαταστάσεις παραλαβής αποβλήτων πλοίων και υπολειμμάτων φορτίου, εκδόθηκε το Νοέμβριο του 2000 από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο.

Η οδηγία αυτή, ουσιαστικά συμπληρώνει τη σύμβαση MARPOL του IMO, η οποία επικεντρώνεται κυρίως στις υποχρεώσεις των πλοίων κατά τη θαλάσσια πορεία. Συγκεκριμένα, θεσπίζεται η υποχρέωση για τους ευρωπαϊκούς λιμένες και τις μαρίνες σκαφών αναψυχής να διατηρούν εγκαταστάσεις αποκομιδής αποβλήτων. Παράλληλα, καθορίζονται οι κανόνες σχετικά με το πότε τα πλοία θα υποχρεούνται να χρησιμοποιούν αυτές τις εγκαταστάσεις. Ειδικότερα, η οδηγία επιβάλλει υποχρεώσεις σε όλους τους λιμένες της ΕΕ να παρέχουν επαρκείς εγκαταστάσεις για την παραλαβή αποβλήτων πλοίων και καταλοίπων φορτίου βάσει συγκεκριμένων σχεδίων διαχείρισης αποβλήτων εντός του λιμένα που αναπτύσσονται για κάθε λιμένα ξεχωριστά και ταυτόχρονα καθορίζει τις βασικές αρχές με βάση τις οποίες θα προκύπτουν τα τέλη χρήσης αυτών των εγκαταστάσεων. Τα πλοία υποχρεούνται να παραδίδουν τα απόβλητά τους στις ειδικές εγκαταστάσεις, εκτός εάν διαθέτουν επαρκή χωρητικότητα αποθήκευσης για να μεταβούν στον επόμενο λιμένα. Τέλος, η συγκεκριμένη οδηγία περιλαμβάνει επίσης διατάξεις σχετικά με την διαδικασία της προηγούμενης κοινοποίησης της παράδοσης αποβλήτων και καθορίζει τις βασικές απαιτήσεις που αφορούν την τεκμηρίωση της διαδικασίας.

3.2.1.2. Οδηγία 2005/35/EC

Η οδηγία 2005/35/EC [36] σχετικά με τη ρύπανση από πλοία και τη θέσπιση κυρώσεων για παραβάσεις της περιβαλλοντικής νομοθεσίας για πλοία λειτουργεί ως

συμπληρωματική της 2000/59/EC και καθορίζει τις επιπτώσεις της μη συμμόρφωσης με τη σύμβαση MARPOL. Η οδηγία υιοθετεί τα πρότυπα της σύμβασης MARPOL και προβλέπει ότι τα κράτη μέλη της ΕΕ υποχρεούνται να αντιμετωπίζουν αποτελεσματικά κάθε παραβίαση των εν λόγω προτύπων, είτε στα παράκτια ύδατα της επικράτειας τους, είτε στην ανοικτή θάλασσα. Παράλληλα, κατευθύνει τα κράτη μέλη της ΕΕ να εφαρμόσουν αποτελεσματικές, αναλογικές και αποτρεπτικές κυρώσεις για παραβιάσεις των διατάξεων της σύμβασης MARPOL. Ουσιαστικά, η συγκεκριμένη οδηγία αποτελεί ένα πρόσθετο αντικίνητρο για τους φορείς του ναυτιλιακού κλάδου να μολύνουν τις θάλασσες. Η οδηγία 2005/35/EC απαιτεί επίσης την ανάπτυξη ενός συστήματος πληροφοριών για την εξασφάλιση της αποτελεσματικής εφαρμογής της, ενώ ταυτόχρονα καθορίζει τις κοινές πρακτικές και τις βασικές αρχές για την παρακολούθηση και τον έγκαιρο εντοπισμό των πλοίων που εκτελούν παράνομες απορρίψεις απορριμμάτων και υπολειμμάτων.

3.2.2. Οδηγίες που αφορούν τη ρύπανση του αέρα από πλοία

Η υιοθέτηση της σύμβασης MARPOL και των κανονισμών του παραρτήματος VI, οδήγησε στην διατύπωση αντίστοιχων κανονιστικών διατάξεων από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Μέχρι στιγμής, από το δίκαιο της Ε.Ε. ρυθμίζονται μόνο οι εκπομπές θείου από τη δραστηριότητα των πλοίων στην επικράτεια των κρατών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Συγκεκριμένα, οι περιορισμοί για τη μέγιστη περιεκτικότητα σε θείο των καυσίμων των πλοίων καθορίστηκαν αρχικά με την οδηγία 1999/32/EC, η οποία στη συνέχεια τροποποιήθηκε και αντικαταστάθηκε με την οδηγία 2012/33/EC.

3.2.2.1. Οδηγία 2012/33/EC

Η οδηγία 2012/33/EC [11] εφαρμόζει τις απαιτήσεις της σύμβασης MARPOL για τα ναυτιλιακά καύσιμα μέγιστης περιεκτικότητας σε θείο για κάθε πλοίο που ταξιδεύει στα παράκτια ύδατα ενός κράτους μέλους της ΕΕ ή εκτελεί τακτικά δρομολόγια προς και από οποιοδήποτε λιμένα της ΕΕ στις περιοχές SECA (Sulphur Emission Control Areas), στις οποίες προς το παρόν περιλαμβάνονται μόνο η Βαλτική Θάλασσα και η Βόρεια Θάλασσα. Παράλληλα, η οδηγία επιβάλλει υποχρεώσεις στα κράτη μέλη για την επαλήθευση και την εξασφάλιση ότι τα καύσιμα πλοίων που πωλούνται στην ΕΕ πληρούν τις προδιαγραφές που έχουν τεθεί.

Συγκεκριμένα, με την οδηγία 2012/33/EC, θεσπίζεται όριο περιεκτικότητας σε θείο 1,00% κατά μάζα έως τις 31 Δεκεμβρίου 2014 και 0,10% κατά μάζα από την 1η Ιανουαρίου 2015. για καύσιμα που χρησιμοποιούνται από όλα τα πλοία στη Βαλτική Θάλασσα, τη Βόρεια Θάλασσα και τη θάλασσα της Μάγχης. Επιπλέον, τα κράτη μέλη της Ε.Ε. θα πρέπει να διασφαλίσουν ότι στην επικράτεια τους χρησιμοποιείται βαρύ μαζούτ με μέγιστη περιεκτικότητα σε θείο 1,00% κατά μάζα.

Παράλληλα, τα κράτη μέλη καλούνται να εξασφαλίσουν ότι δεν χρησιμοποιούνται στην επικράτειά τους καύσιμα πλοίων περιεκτικότητας σε θείο άνω του 3,50 % κατά μάζα, εκτός από τα καύσιμα που προορίζονται για τον εφοδιασμό πλοίων τα οποία χρησιμοποιούν μεθόδους μείωσης των εκπομπών ρύπων. Παράλληλα, τα κράτη μέλη πρέπει να εξασφαλίσουν ότι δεν χρησιμοποιείται στην επικράτειά τους πετρέλαιο εσωτερικής καύσης περιεκτικότητας σε θείο άνω του 0,10% κατά μάζα.

Η οδηγία υποχρεώνει τα κράτη μέλη να λαμβάνουν όλα τα αναγκαία μέτρα για να εξασφαλίσουν ότι στην επικράτεια τους δεν χρησιμοποιούνται καύσιμα πλοίων με κατά μάζα περιεκτικότητα σε θείο άνω του 3,50 % από την 18η Ιουνίου 2014 και άνω του 0,50 % από την 1η Ιανουαρίου 2020.

Τα ίδια όρια περιεκτικότητας σε θείο ισχύουν και για τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται από τα επιβατηγά πλοία που εκτελούν δρομολόγια σε τακτικές γραμμές μεταξύ των λιμένων της Ε.Ε. Με την οδηγία, εισάγεται όριο περιεκτικότητας των καυσίμων πλοίων σε θείο 0,1% για τα καύσιμα πλοίων που διατίθενται στην αγορά των κρατών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, τα οποία υποχρεούνται να εξασφαλίσουν πως στα σκάφη που είναι ελλιμενισμένα σε λιμένες της Ένωσης δεν χρησιμοποιούνται καύσιμα πλοίων περιεκτικότητας σε θείο άνω του 0,10% κατά μάζα. Τα όρια αυτά, ισχύουν για οποιαδήποτε χρήση του καυσίμου στις λειτουργίες των πλοίων, συμπεριλαμβανομένων των βοηθητικών και των κύριων κινητήρων.

Από τις παραπάνω διατάξεις εξαιρούνται τα πλοία που παραμένουν λιγότερο από δύο ώρες ελλιμενισμένα σύμφωνα με τα δημοσιευμένα δρομολόγια τους, τα υβριδικά πλοία, που είναι σχεδιασμένα για πλεύση σε θάλασσες και ποταμούς, όταν βρίσκονται στη θάλασσα και για τα πλοία που απενεργοποιούν τους κύριους και βοηθητικούς κινητήρες τους όταν είναι αγκυροβολημένα στα λιμάνια και για τις απαραίτητες λειτουργίες τους καταναλώνουν ηλεκτρισμό που παρέχεται στα πλοία από το ηλεκτρικό δίκτυο του λιμένα.

3.2.3. Οδηγίες που αφορούν άλλα θέματα σχετικά με τις ναυτιλιακές δραστηριότητες

Εκτός των προαναφερόμενων, έχουν τεθεί σε ισχύ πολλές ακόμα οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, που επηρεάζουν έμμεσα ή άμεσα τις ναυτιλιακές δραστηριότητες.

Οι διατάξεις της οδηγίας 782/2003/EC απαγορεύουν τη χρήση χρωμάτων που περιέχουν οργανοκασσιτερικές ενώσεις ή τριβουτυλοκασσίτερο (TBT), ενσωματώνοντας στο κοινοτικό δίκαιο τις διατάξεις της Σύμβασης του IMO του 2001 για τον έλεγχο των αντιρρυπαντικών συστημάτων στα πλοία. Οι διατάξεις που αφορούν τον περιορισμό των οργανοκασσιτερικών ενώσεων συμπληρώνονται με την οδηγία 76/769/EEC, όπως αυτή τροποποιήθηκε, η οποία απαγορεύει την εμπορία και τη χρήση οργανοκασσιτερικών ενώσεων στην επικράτεια των κρατών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Οι κανονιστικές διατάξεις της οδηγίας 1013/2006/EC που αφορά τις μεταφορές αποβλήτων απαγορεύει την εξαγωγή επικίνδυνων αποβλήτων στις αναπτυσσόμενες χώρες. Τα πλοία που προορίζονται για ανακύκλωση μπορούν, υπό ορισμένες προϋποθέσεις, να εμπίπτουν στο πεδίο εφαρμογής των εν λόγω διατάξεων.

Όσον αφορά τα συστήματα διαχείρισης του ερματικού ύδατος, σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία της Ευρωπαϊκής Ένωσης, οι δραστικές ουσίες που χρησιμοποιούνται στις τεχνολογίες επεξεργασίας των εν λόγω συστημάτων υπόκεινται στη διαδικασία αξιολόγησης της οδηγίας 98/8/EC της 16ης Φεβρουαρίου 1998, σχετικά με τη διάθεση στην αγορά βιοκτόνων προϊόντων και τη χρήση τους [34].

4. Ευφυείς πράκτορες και πολυπρακτορικά συστήματα

Οι πράκτορες αποκτούν όλο και μεγαλύτερη σημασία και εφαρμογή στην τεχνητή νοημοσύνη και στο ευρύτερο πεδίο της επιστήμης των υπολογιστών, αλλά και αξιοποιούνται στην επίλυση πρακτικών προβλημάτων και προβλημάτων μηχανικής. Παράλληλα, οι πράκτορες και τα συστήματα πολλαπλών πρακτόρων αποτελούν ένα σχετικά νέο ερευνητικό πεδίο, που αναπτύσσεται μόνο τις τελευταίες δεκαετίες. Ως εκ τούτου, δεν υπάρχει ακόμη ένα ορισμός κοινά αποδεκτός για την έννοια του πράκτορα και κατ' επέκταση και για την έννοια των πολυπρακτορικών συστημάτων [37].

4.1. Ορισμός πράκτορα και πολυπρακτορικού συστήματος

4.1.1. Ορισμός της έννοιας του πράκτορα

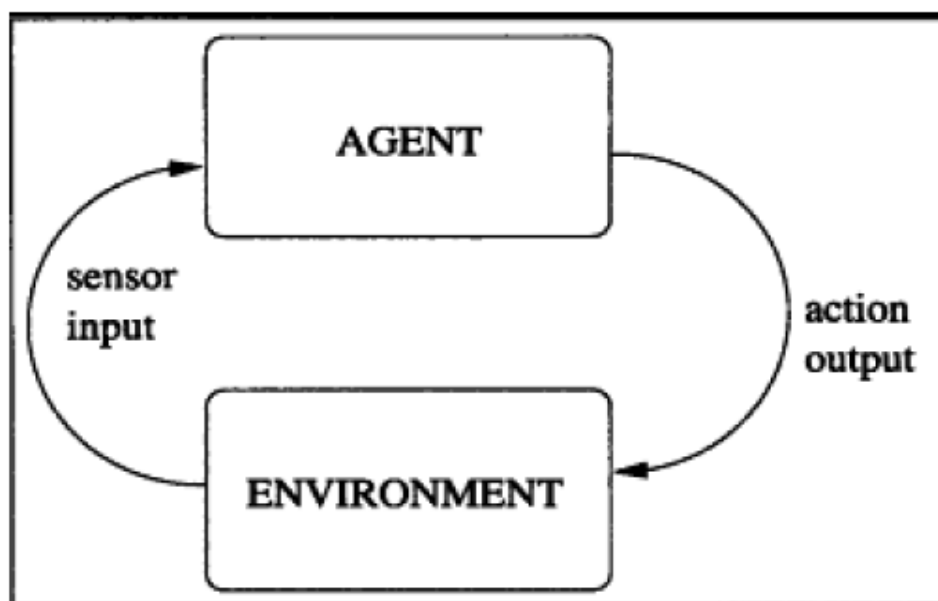
Στην βιβλιογραφία δεν υπάρχει αυστηρός ορισμός για το τι είναι ένας πράκτορας. Αντίθετα, προσφέρεται ένα πλήθος διαφορετικών ορισμών, που κυμαίνονται από απλούς και γενικούς ορισμούς έως ιδιαίτερα σύνθετους και απαιτητικούς [38-43].

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, υιοθετείται ο ορισμός των Wooldridge και Jennings [44], οι οποίοι ορίζουν την έννοια του πράκτορα ως μία φυσική ή εικονική οντότητα, που βρίσκεται σε κάποιο περιβάλλον και δρα αυτόνομα μέσα στο περιβάλλον του, έτσι ώστε να εκπληρώσει τους σκοπούς για τους οποίους έχει σχεδιαστεί.

Για παράδειγμα, σε ένα ενεργειακό σύστημα, μία φυσική οντότητα που θα μπορούσε να θεωρηθεί ως πράκτορας είναι οποιοσδήποτε ελεγκτής που ελέγχει άμεσα ένα συγκεκριμένο στοιχείο του συστήματος ισχύος ή ένα μέρος αυτού. Αντίθετα, μία εικονική οντότητα που θα μπορούσε να θεωρηθεί ως πράκτορας είναι ένα λογισμικό που λαμβάνει εισροές από το περιβάλλον του και παράγει αποτελέσματα που ενεργούν στο περιβάλλον αυτό. Συχνά σε πραγματικές εφαρμογές, ένας πράκτορας είναι συνδυασμός φυσικής και εικονικής οντότητας [44].

Ανεξάρτητα με τον ορισμό της έννοιας, κάθε πράκτορας έχει τρία βασικά χαρακτηριστικά [45]:

- Αυτονομία (autonomy): Οι πράκτορες ενεργούν αυτόνομα χωρίς άμεση παρέμβαση από χρήστες ή άλλους πράκτορες, με πλήρη έλεγχο των πράξεων τους και της κατάστασής τους.
- Κοινωνικότητα (social ability): Οι πράκτορες αλληλεπιδρούν με τους χρήστες και με άλλους πράκτορες μέσω μίας κοινά κατανοητής γλώσσας για την επίτευξη των στόχων τους. Έτσι επιτυγχάνεται επικοινωνία μεταξύ των πρακτόρων για την επίτευξη των ανεξάρτητων στόχων του καθενός ξεχωριστά, καθώς και ενός κοινού στόχου μέσω της μεταξύ τους συνεργασίας.
- Ορθολογικότητα (rationality): Η ιδιότητα αυτή αφορά την υπόθεση ότι ένας πράκτορας θα κάνει πάντα το σωστό, δηλαδή θα δρα καταλλήλως με σκοπό την εκπλήρωση των στόχων του και όχι με τρόπο ο οποίος αποτρέπει την επίτευξή τους.



Εικόνα 4.1 Πράκτορας και αλληλεπίδραση με το περιβάλλον του
 Πηγή: Weiss, G. (1999). *Multi-agent systems: A modern approach to distributed artificial intelligence*. Cambridge, MIT Press.

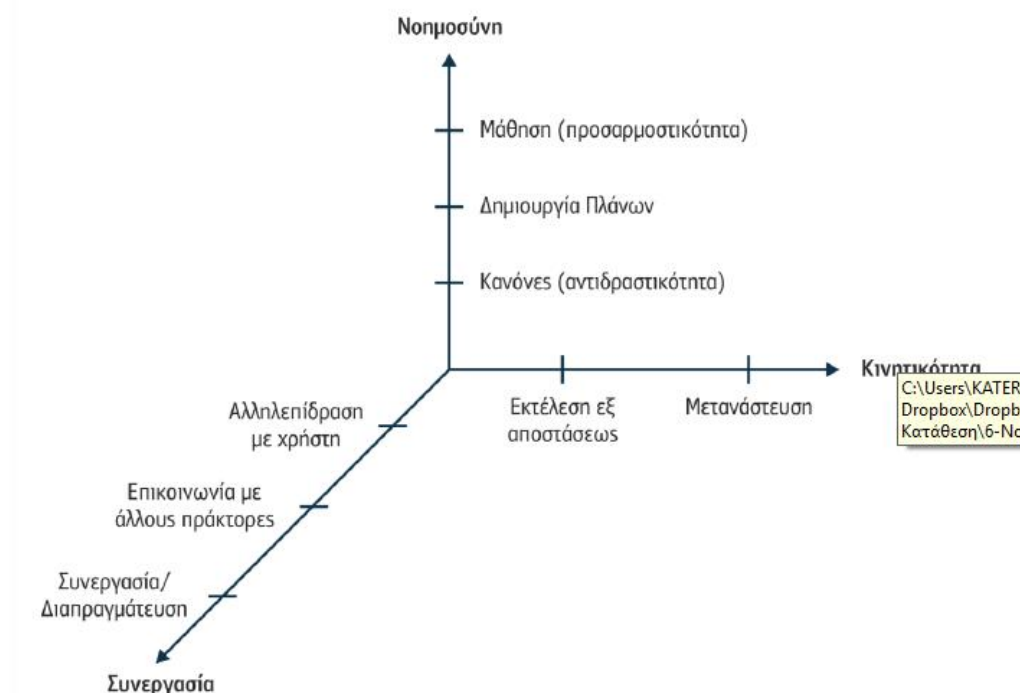
4.1.2. Ορισμός ευφυούς πράκτορα

Οι ευφυείς πράκτορες διαθέτουν τα τρία βασικά χαρακτηριστικά που αναφέρονται στην προηγούμενη ενότητα, ενώ παράλληλα διαθέτουν κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά που αυξάνουν τον βαθμό νοημοσύνης τους. Τέτοια χαρακτηριστικά είναι [45]:

- **Αντιδραστικότητα (reactiveness):** Η συγκεκριμένη ιδιότητα αφορά τον τρόπο με τον οποίο οι πράκτορες αντιλαμβάνονται το περιβάλλον τους και προσαρμόζονται σε τυχόν αλλαγές του.
- **Προνοητικότητα (pro-activeness):** Το χαρακτηριστικό αυτό αφορά την ιδιότητα των πρακτόρων να αναλαμβάνουν πρωτοβουλίες. Οι ευφυείς πράκτορες δεν ανταποκρίνονται απλώς στις αλλαγές του περιβάλλοντός τους, αλλά είναι ικανοί να συμπεριφερθούν κατάλληλα σε αυτές τις αλλαγές ορίζοντας επιμέρους στόχους.
- **Γνώση (knowledge):** Η ιδιότητα αυτή αναφέρεται στην ικανότητα των πρακτόρων να συγκεντρώνουν γνώση σχετική με το περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται και τον τρόπο που αυτό λειτουργεί. Η γνώση αυτή συγκεντρώνεται και αναπαρίσταται κατάλληλα, έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί στη διαδικασία λήψης αποφάσεων.
- **Πεποιθήσεις (beliefs):** Αποτελούν την άποψη του πράκτορα για το περιβάλλον του μία δεδομένη χρονική στιγμή, η οποία ενδέχεται να είναι σωστή ή και εσφαλμένη.
- **Επιθυμίες (desires):** Το χαρακτηριστικό αυτό αναφέρεται στην κρίση του πράκτορα για τις μελλοντικές καταστάσεις του περιβάλλοντός μέσα στο οποίο δρα, όπως, για παράδειγμα, αν μία μελλοντική κατάσταση είναι επιθυμητή ή όχι. Όμως, μία επιθυμία του πράκτορα μπορεί να είναι εφικτή ή και να συγκρούεται με κάποια άλλη.

- Προθέσεις (intentions): Οι προθέσεις είναι υποσύνολο των στόχων, τους οποίους ο πράκτορας προσπαθεί να επιτύχει τη δεδομένη χρονική στιγμή. Δεδομένου ότι δεν είναι δυνατή η ταυτόχρονη επίτευξη όλων των στόχων, επιλέγεται ένα υποσύνολό τους, βάσει ορισμένων κριτηρίων ιεράρχησης.
- Υποχρεώσεις (obligations): Το χαρακτηριστικό αυτό αφορά την υποχρέωση του πράκτορα να ακολουθεί ένα σύνολο κανόνων και να δρα στο γενικότερο πλαίσιο του περιβάλλοντός του, προκειμένου να επιτύχει τους σκοπούς της σχεδίασής του.
- Προσαρμοστικότητα (adaptivity): Η ιδιότητα αυτή αφορά ουσιαστικά την ικανότητα μάθησης του πράκτορα και αναφέρεται στην ικανότητά του να προσαρμόζεται στο περιβάλλον.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.2, τα χαρακτηριστικά των ευφυών πρακτόρων μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις άξονες που αφορούν τις γενικότερες ιδιότητες της κινητικότητας, της συνεργασίας και της νοημοσύνης, αντίστοιχα. Η έννοια της συνεργασίας αναφέρεται στα χαρακτηριστικά εκείνα που αφορούν γενικά τη συνεργασία και αλληλεπίδραση των πρακτόρων με τις γύρω τους φυσικές ή εικονικές οντότητες, όπως είναι το περιβάλλον τους, ο χρήστης ή άλλοι πράκτορες στα πλαίσια ενός πολυπρακτορικού συστήματος. Η έννοια της κινητικότητας αφορά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τη μετακίνηση του πράκτορα προκειμένου να δράσει ή την ικανότητα του για εξ'αποστάσεως δράση. Η έννοια της νοημοσύνης αναφέρεται στα χαρακτηριστικά εκείνα που καθορίζουν τον βαθμό ευφυΐας του πράκτορα και την ικανότητα του να δρα έξυπνα.



Εικόνα 4.2 Άξονες ομαδοποίησης χαρακτηριστικών πρακτόρων

Πηγή: Γεωργιάδη Κ. (2015). Τεχνητή Νοημοσύνη – Μία εισαγωγική προσέγγιση. ΣΕΑΒ. (Ηλεκτρονικό Σύγγραμμα)
 Διαθέσιμο: <https://repository.kallipos.gr/pdfviewer/web/viewer.html?file=/bitstream/11419/3381/1/%CE%A4%CE%B5%CF%87%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%AE%20%CE%9D%CE%BF%CE%B7%CE%BC%CE%BF%CF%83%CF%8D%CE%BD%CE%B7.pdf>

4.1.3. Ορισμός πολυπρακτορικών συστημάτων

Ένα πολυπρακτορικό σύστημα (multi-agent system - MAS) ορίζεται ως ένα σύνολο από πράκτορες ή ευφυείς πράκτορες που δρουν μαζί, προκειμένου να επιλύσουν ένα πρόβλημα και να επιτύχουν έναν κοινό σκοπό. Σε ένα πολυπρακτορικό σύστημα δεν υπάρχει ο γενικός στόχος του συστήματος, απλά οι τοπικοί στόχοι κάθε ξεχωριστού πράκτορα. Ο στόχος της σχεδίασης του συστήματος μπορεί να υλοποιηθεί μόνο με τη σχεδίαση πολλών ευφύων πρακτόρων με τοπικούς στόχους που αντιστοιχούν στα τμήματα αυτής της πρόθεσης. Ανάλογα με τη σχεδίαση του συστήματος και τη φύση του προβλήματος, οι πράκτορες σε ένα σύστημα πολλαπλών πρακτόρων μπορεί να έχουν ή να μην έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνούν άμεσα μεταξύ τους [37].

Η προσέγγιση επίλυσης προβλημάτων με πολυπρακτορικά συστήματα αποτελεί μία τεχνική κατανεμημένης επίλυσης του προβλήματος. Οι κατανεμημένοι υπολογισμοί είναι μερικές φορές πιο κατανοητοί και ευκολότεροι στην ανάπτυξη, ειδικά όταν η φύση του προβλήματος που επιλύεται είναι κατανεμημένη. Υπάρχουν επίσης πολλές περιπτώσεις, όπου μία διαφορετική προσέγγιση είναι ουσιαστικά αδύνατη, καθώς τα διαφορετικά συστήματα, τα δεδομένα και οι πληροφορίες ανήκουν σε ανεξάρτητους μεταξύ τους οργανισμούς που επιθυμούν να διατηρήσουν τις πληροφορίες τους ιδιωτικές και ασφαλείς για λόγους ανταγωνισμού [46].

Τα πολυπρακτορικά συστήματα χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που η πολυπλοκότητα και το μέγεθος του προβλήματος είναι μεγάλα και δεν μπορούν να επιλυθούν από έναν πράκτορα. Σε πολλές περιπτώσεις τα απαιτούμενα δεδομένα είναι αναγκαστικά κατανεμημένα και ανήκουν σε πληροφοριακά συστήματα που είναι μεγάλα και σύνθετα από άποψη γεωγραφικής κατανομής, αριθμού επιμέρους συστημάτων, όγκου εννοιών και ποσότητας δεδομένων για κάθε έννοια, καθώς και εύρους κάλυψης διαφορετικών τμημάτων. Παράλληλα, ο χαρακτήρας αυτών των συστημάτων είναι δυναμικός και το περιεχόμενό τους αλλάζει τόσο γρήγορα ώστε είναι δύσκολο για ένα χρήστη ή ένα κεντρικό πρόγραμμα να λάβει σωστά δεδομένα ή για μία επιχείρηση να ανανεώνει έγκαιρα τις διαθέσιμες πληροφορίες [46].

4.2. Χαρακτηριστικά πολυπρακτορικών συστημάτων

Τα συστήματα πολλαπλών πρακτόρων διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τα χαρακτηριστικά των πρακτόρων που τα αποτελούν, τις μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις, καθώς και το περιβάλλον μέσα στο οποίο δρουν. Όμως, όλα τα πολυπρακτορικά συστήματα έχουν κάποια κοινά βασικά χαρακτηριστικά.

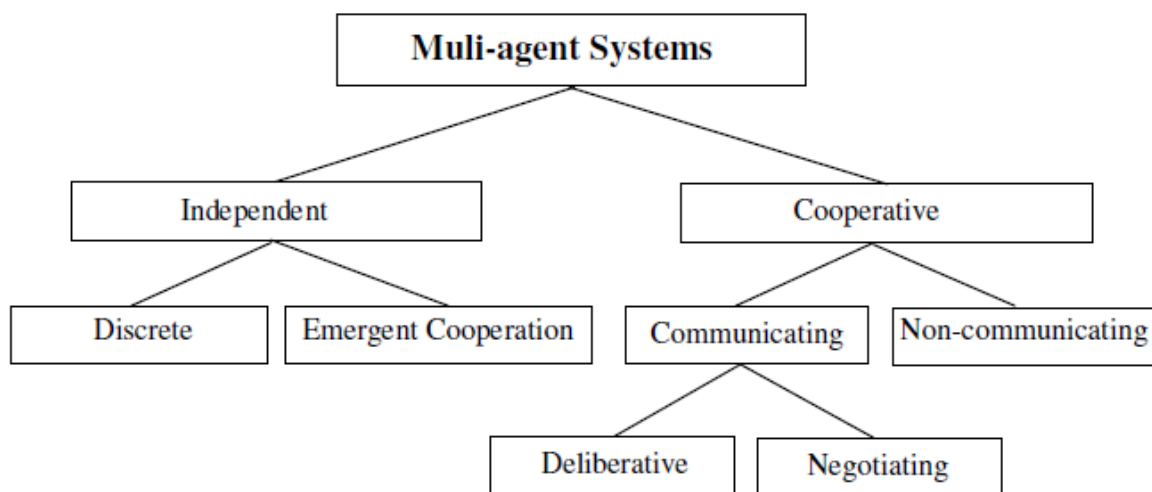
Τα βασικά χαρακτηριστικά των πολυπρακτορικών συστημάτων αφορούν την πληροφόρηση των πρακτόρων, τα δεδομένα, τον έλεγχο του συστήματος και τους υπολογισμούς. Πιο συγκεκριμένα σε ένα πολυπρακτορικό σύστημα [47]:

- Κάθε πράκτορας έχει ελλιπή πληροφόρηση για την επίλυση προβλημάτων και περιορισμένες δυνατότητες δράσης. Οι πράκτορες μπορούν να επιτύχουν

κεντρικούς στόχους μέσω του ανταγωνισμού, της συνεργασίας ή άλλων αλληλεπιδράσεων.

- Ο έλεγχος του συστήματος δεν γίνεται κεντρικά, αλλά έχει κατανομημένο χαρακτήρα. Οι μεμονωμένοι πράκτορες μπορούν να συνεργαστούν με άλλους πράκτορες στο σύστημα για να επιτύχουν μεμονωμένους στόχους ή τον στόχο της σχεδίασης.
- Τα δεδομένα είναι μη-προσανατολισμένα και το περιβάλλον αποκεντρωμένο. Κάθε πράκτορας μπορεί να επιφέρει αλλαγές στο περιβάλλον του.
- Οι υπολογισμοί για την επίλυση του προβλήματος γίνονται με ασύγχρονο τρόπο και οι πράκτορες μπορούν να εκτελέσουν τις υποχρεώσεις τους ανεξάρτητα χωρίς να χρειάζεται να περιμένουν ένα κεντρικό σήμα ελέγχου.

Από τον ίδιο τον ορισμό της έννοιας του πολυπρακτορικού συστήματος προκύπτει ότι οι πράκτορες σε ένα σύστημα πολλαπλών πρακτόρων (ΣΠΠ) δρουν από κοινού ή μαζί, το οποίο συνεπάγεται έναν βαθμό συνεργασίας μεταξύ των μεμονωμένων πρακτόρων. Περισσότερα για τη συνεργασία των πρακτόρων σε ένα ΣΠΠ αναφέρονται αναλυτικά στις επόμενες ενότητες αυτού του κεφαλαίου. Με βάση, όμως, το είδος και την ένταση της συνεργασίας μεταξύ των πρακτόρων σε ένα πολυπρακτορικό σύστημα μπορούμε να κάνουμε μία κατηγοριοποίηση των πολυπρακτορικών συστημάτων. Μία τέτοια κατηγοριοποίηση φαίνεται στην Εικόνα 4.3.



Εικόνα 4.3 Κατηγοριοποίηση πολυπρακτορικών συστημάτων με βάση το χαρακτήρα της συνεργασίας μεταξύ των πρακτόρων

Πηγή: Glavic M. (2006). *Agents and Multi-Agent Systems: A Short Introduction for Power Engineers*. University of Liege. (Technical Report)

4.3. Αλληλεπίδραση ευφύων πρακτόρων στα πολυπρακτορικά συστήματα

Οι πράκτορες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μέσω του συντονισμού, της συνεργασίας και των διαπραγματεύσεων [48]. Στο πλαίσιο μίας κοινωνίας πρακτόρων απαιτείται ο συντονισμός (coordination) τους, προκειμένου να εμποδίζεται η άσχετη με το στόχο δραστηριότητα και η αποφυγή καταστάσεων αδιεξόδου και ενεργούς αναμονής. Ο συντονισμός σε πολυπρακτορικά περιβάλλοντα μέσα στα οποία οι πράκτορες δεν έχουν αντικρουόμενους στόχους εκφράζεται ως συνεργασία (cooperation), ενώ στην αντίθετη περίπτωση ορίζεται ως διαπραγμάτευση (negotiation) [46]. Ο σαφής ορισμός και η ανάλυση αυτών των τριών εννοιών ακολουθεί σε αυτήν την ενότητα.

4.3.1. Συντονισμός πρακτόρων σε πολυπρακτορικά συστήματα

Οι πράκτορες σε ένα πολυπρακτορικό σύστημα επικοινωνούν προκειμένου να επιτύχουν καλύτερα τους στόχους τους ή τους στόχους της κοινωνίας πρακτόρων μέσα στην οποία υπάρχουν. Οι πράκτορες μπορεί να έχουν ρητή γνώση των στόχων ή να μην έχουν απόλυτη γνώση των στόχων, ανάλογα με τη σχεδιάσή τους. Ο συντονισμός μπορεί να υπάρχει ακόμη και σε καταστάσεις όπου οι πράκτορες δεν γνωρίζουν άμεσα ο ένας τον άλλον και όμως συντονίζουν έμμεσα τις δραστηριότητες τους.

Ο συντονισμός μέσω της επικοινωνίας μπορεί να επιτρέψει στους πράκτορες να συντονίσουν τις ενέργειες και τη συμπεριφορά τους και να διαχειριστούν τις αλληλεξαρτήσεις των δραστηριοτήτων τους, οδηγώντας σε πιο συνεκτικά συστήματα. Ο συντονισμός είναι ιδιότητα ενός συστήματος πρακτόρων που εκτελούν κάποια δραστηριότητα σε κοινό περιβάλλον και ουσιαστικά είναι ο βαθμός στον οποίο αποφεύγουν τις άσχετες με τον στόχο δράσεις, μειώνοντας τη χρήση των πόρων του συστήματος, αποφεύγοντας την ενεργό αναμονή και τις καταστάσεις αδιεξόδου και διατηρώντας τις ισχύουσες συνθήκες ασφαλείας του συστήματος [46].

Για τη σχεδίαση συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων αξιοποιούνται συχνά ερευνητικά συμπεράσματα σχετικά με το συντονισμό στους διάφορους κλάδους των κοινωνικών επιστημών, από την οργανωσιακή θεωρία, τη θεωρία παιγνίων και το συντονισμό στα βιολογικά συστήματα. Ανάλογα με τον τύπο του MAS, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές διαδικασίες και μηχανισμοί συντονισμού. Συγκεκριμένα ο συντονισμός μπορεί να βασίζεται σε συγκεντρωτική ή κατακεντρωμένη λογική [49].

4.3.1.1. Συντονισμός πρακτόρων σε πολυπρακτορικά συστήματα με συγκεντρωτική αρχιτεκτονική

Σε μία συγκεντρωτική αρχιτεκτονική MAS υπάρχει συνήθως ένας κεντρικός πράκτορας, ο οποίος είναι υπεύθυνος για τις λειτουργίες που σχετίζονται με τη διαδικασία ελέγχου του συστήματος και τις εντολές που απορρέουν από αυτήν. Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική σχεδίασης χρησιμοποιείται γενικά όταν υπάρχει ένα πολύπλοκο πρόβλημα το οποίο μπορεί να χωριστεί σε μικρότερα υπό-προβλήματα. Ο συντονισμός σε αυτό το είδος αρχιτεκτονικής ελέγχου περιλαμβάνει τρεις διαφορετικές φάσεις: την διαίρεση του γενικού προβλήματος σε δευτερεύοντα υπό-προβλήματα, την επίλυση των επιμέρους προβλημάτων και στη συνέχεια τον συνδυασμό των αποτελεσμάτων των υπό-προβλημάτων για την επίλυση του αρχικού, κεντρικού προβλήματος.

Στην πρώτη φάση, της διαίρεσης του προβλήματος σε υπό-προβλήματα, ο κεντρικός πράκτορας αναλύει το πρόβλημα και το χωρίζει σε μικρότερα υπό-προβλήματα. Πολύ συχνά, η διαίρεση ακολουθεί μία ιεραρχία, όπου τα δευτερεύοντα υπό-προβλήματα μπορούν να υποδιαιεθούν περαιτέρω σε μικρότερα ανεξάρτητα υπό-προβλήματα και η διαδικασία συνεχίζεται μέχρις ότου τα δευτερεύοντα προβλήματα να έχουν αναλυθεί σε κατάλληλα επιμέρους προβλήματα, που μπορούν να επιλυθούν από μεμονωμένους πράκτορες. Τα διαφορετικά επίπεδα διαίρεσης αντιπροσωπεύουν διαφορετικά επίπεδα αφαίρεσης του προβλήματος. Ο κεντρικός πράκτορας είναι υπεύθυνος για τη διαίρεση του προβλήματος και την ανάθεση επίλυσης των επιμέρους προβλημάτων σε άλλους πράκτορες. Κατά τη δεύτερη φάση επιλύονται τα επιμέρους προβλήματα. Δεδομένου ότι τα δευτερεύοντα προβλήματα αποτελούν μέρη ενός μεγαλύτερου προβλήματος, μπορεί να υπάρχουν διάφορες σχέσεις αλληλεξάρτησης μεταξύ των υπό-προβλημάτων που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Ο κεντρικός πράκτορας αποκτά ρόλο συντονιστή, σε αυτή την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των πρακτόρων. Στην τρίτη φάση, οι λύσεις των υπό-προβλημάτων συνδυάζονται από τον κεντρικό πράκτορα, έτσι ώστε να προκύψει η λύση του αρχικού, κεντρικού προβλήματος. Οι μερικές λύσεις ενδέχεται να απαιτούν συνδυασμό σε διαφορετικά επίπεδα αφαίρεσης. Όπως προκύπτει και από τα παραπάνω, ο συντονισμός σε πολυπρακτορικά συστήματα με συγκεντρωτική αρχιτεκτονική είναι ουσιαστικά μία διαδικασία μεταφοράς και ανάθεσης της διαδικασίας λήψης αποφάσεων στα υψηλότερα επίπεδα ιεραρχίας του συστήματος [49].

4.3.1.2. Συντονισμός πρακτόρων σε πολυπρακτορικά συστήματα με κατανεμημένη αρχιτεκτονική

Μία διαφορετική λογική σχεδίασης πολυπρακτορικών συστημάτων που χρησιμοποιείται αρκετά συχνά σε πολλές περιπτώσεις είναι η κατανεμημένη αρχιτεκτονική. Εδώ δεν υπάρχει κανένας κεντρικός πράκτορας και επομένως οι πράκτορες πρέπει να συντονίζουν τις δραστηριότητές τους με ανεξάρτητο και

κατανεμημένο τρόπο. Οι αποφάσεις που αφορούν τον έλεγχο του συστήματος κατανέμονται σε ολόκληρο των πληθυσμό της κοινωνίας των πρακτόρων. Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν καθορισμένοι πράκτορες, που παίζουν το ρόλο του κεντρικού πράκτορα, οι πράκτορες σε αυτό τον τύπο συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων πρέπει να επεξεργάζονται με έναν αποκεντρωμένο και κατανεμημένο τρόπο όλα τα ζητήματα που σχετίζονται με την επίλυση του προβλήματος, προσδιορίζοντας και αναλύοντας το πρόβλημα, χωρίζοντάς το σε δευτερεύοντα υπό-προβλήματα, προγραμματίζοντας την επίλυση των επιμέρους προβλημάτων και συνδυάζοντας τις επιμέρους λύσεις, προκειμένου να προσδιοριστεί η λύση του αρχικού προβλήματος.

Ο συντονισμός σε αυτή την περίπτωση απαιτεί περισσότερη και ποικίλη επικοινωνία σε σχέση με αυτήν που απαιτείται στην περίπτωση μίας συγκεντρωτικής λογικής.

Το πρωτόκολλο Net Contract (CNET) είναι ένα πρωτόκολλο υψηλού επιπέδου που επιτρέπει τον συντονισμό των πρακτόρων σε ένα MAS με κατανεμημένη αρχιτεκτονική. Το πρωτόκολλο CNET χρησιμοποιεί την ακόλουθη ακολουθία δραστηριοτήτων: (α) εντοπίζει το πρόβλημα από έναν πράκτορα και το διαιρεί σε δευτερεύοντα προβλήματα, (β) ο πράκτορας έναρξης ανακοινώνει το έργο και ζητά από τους υπόλοιπους πράκτορες του πληθυσμού να υποβάλουν προσφορά για αυτό, (γ) οι μεμονωμένοι πράκτορες επεξεργάζονται την ανακοίνωση εργασιών και αποφασίζουν αν είναι επιλέξιμοι για το έργο και εάν επιθυμούν να υποβάλουν προσφορά για μία εργασία, (δ) οι προσφορές συγκεντρώνονται και επεξεργάζονται από τον πράκτορα που ανακοίνωσε το έργο, (ε) τελικά οι εργασίες απονέμονται συνήθως στον υποψήφιο με τη χαμηλότερη προσφορά. Ο υπερθεματιστής προχωρεί στην επίλυση του προβλήματος που του έχει ανατεθεί, το οποίο όμως μπορεί να συνεπάγεται τη δημιουργία νέων επιμέρους εργασιών.

Η κατανεμημένη λογική συντονισμού είναι καλύτερη σε σχέση με τη συγκεντρωτική, όταν είτε δεν είναι γνωστό από πριν το πώς το πρόβλημα μπορεί να χωριστεί σε δευτερεύοντα προβλήματα και πιθανώς κανένας πράκτορας δεν έχει την απαραίτητη γνώση και τεχνογνωσία να ενεργήσει ως κεντρικός πράκτορας ή όταν το περιβάλλον και η φύση του προβλήματος που πρέπει να επιλυθεί είναι κατανεμημένη [49].

4.3.1.3. Σύγκρισή συγκεντρωτικής και κατανεμημένης αρχιτεκτονικής σχεδίασης πολυπρακτορικών συστημάτων

Τα πολυπρακτορικά συστήματα με συγκεντρωτική αρχιτεκτονική ελέγχου έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι πιο αποτελεσματικά στη διαχείριση πολλών πρακτόρων που εργάζονται από κοινού για την εκπλήρωση ενός στόχου. Επιπλέον, σε αυτόν τον τύπο σχεδίασης απαιτείται λιγότερη επικοινωνία, λιγότερος χρόνος για τον υπολογισμό των λύσεων και μικρότερο υπολογιστικό κόστος. Ένα προφανές μειονέκτημα είναι η ποιότητα της λύσης των διαφόρων δευτερευόντων προβλημάτων. Εάν ο κεντρικός πράκτορας δεν έχει μία σαφή εικόνα των επιμέρους εργασιών που απαιτούνται για την επίλυση του προβλήματος, η συγκεντρωτική σχεδίαση μπορεί να μην παράγει καλά αποτελέσματα. Το δεύτερο μειονέκτημα της συγκεντρωτικής αρχιτεκτονικής είναι ότι πολλοί πόροι θα μπορούσαν να διοχετευθούν για την επίλυση ενός προβλήματος το οποίο τελικά μπορεί να αναλυθεί λανθασμένα από τον κεντρικό

πράκτορα. Αντίθετα, η κατανεμημένη αρχιτεκτονική συντονισμού έχει το πλεονέκτημα ότι οι μεμονωμένοι πράκτορες τους συστήματος έχουν περισσότερη ελευθερία και ευελιξία στην επιλογή της δικής τους στρατηγικής για την επίλυση ενός προβλήματος που τους ανατίθεται. Ωστόσο, συστήματα πολλαπλών πρακτόρων, όπου ο συντονισμός γίνεται με κατανεμημένο τρόπο, απαιτούν περισσότερη επικοινωνία μεταξύ των πρακτόρων του συστήματος [49].

4.3.2. Συνεργασία πρακτόρων σε πολυπρακτορικά συστήματα

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή αυτής της ενότητας, ως συνεργασία ορίζεται ο συντονισμός των πρακτόρων σε πολυπρακτορικά συστήματα στα οποία οι μεμονωμένοι πράκτορες δεν έχουν αντικρουόμενους στόχους.

Η συνεργασία των μεμονωμένων πρακτόρων σε ένα σύστημα πολλαπλών πρακτόρων πρέπει να αποσκοπεί στην εκπλήρωση τεσσάρων βασικών στόχων:

- Στην αύξηση του ρυθμού ολοκλήρωσης των εργασιών μέσω του παραλληλισμού εκτέλεσης των επιμέρους εργασιών.
- Στην αύξηση του συνόλου ή του εύρους των εργασιών που μπορούν να εκτελεστούν μέσω της κατάλληλης κατανομής των πόρων
- Στην αύξηση της πιθανότητας να ολοκληρωθούν οι εργασίες μέσω της διπλής εκτέλεσής τους.
- Στην μείωση της αλληλεπίδρασης και αλληλεξάρτησης των εργασιών που εκτελούν οι μεμονωμένοι πράκτορες.

Ένας τύπος πρακτόρων, που χρησιμοποιείται συχνά και επιτυγχάνει τους παραπάνω στόχους είναι οι συνεργατικοί κατανεμημένοι λυτές προβλημάτων (cooperative distributed problem-solving - CDPS). Αυτοί οι πράκτορες λύνουν προβλήματα τα οποία ξεπερνούν τις δυνατότητες ενός μεμονωμένου ευφυούς πράκτορα. Στην περίπτωση αυτή, το πρόβλημα χωρίζεται σε υποπροβλήματα, των οποίων η σύνθεση των λύσεων δίνει τη λύση του αρχικού προβλήματος.

Ένας από τους σκοπούς της συνεργασίας μεταξύ πρακτόρων σε μία κοινωνία ευφών πρακτόρων είναι και η αποφυγή συγκρούσεων μεταξύ πρακτόρων οι οποίοι εκτελούν τα επιμέρους καθήκοντα τους. Για αυτή την αποφυγή συγκρούσεων έχει προταθεί μία στρατηγική συνεργασίας σύμφωνα με την οποία, στην περίπτωση που οι πράκτορες αντιληφθούν μία πιθανή σύγκρουση συμφερόντων πρέπει να επιλέξουν κάποιον πράκτορα, ικανότερο από τους άλλους για να δημιουργήσει ένα κοινό σχέδιο δράσης, που θα ακολουθηθεί από όλους. Για να ληφθεί η απόφαση από την ομάδα ευφών πρακτόρων, ποιος είναι ο ικανότερος για να αναλάβει αυτόν τον ρόλο, λαμβάνονται υπόψιν συγκεκριμένα κριτήρια όπως η επάρκεια πληροφόρησης, η γνώση, και οι περιορισμοί που έχει ο κάθε πράκτορας όσον αφορά τη δράση του, ανάλογα με την εφαρμογή.

Ένα ακόμη ζήτημα που σχετίζεται με την συνεργασία πρακτόρων σε συστήματα πολλαπλών πρακτόρων, είναι ο βαθμός στον οποίο είναι συνεργάσιμοι οι πράκτορες, οι οποίοι μπορεί να είναι από πλήρως συνεργάσιμοι μέχρι ανταγωνιστικοί. Οι πλήρως

συνεργάσιμοι πράκτορες εκτελούν τις εργασίες τους συνήθως με μεγάλο επικοινωνιακό κόστος και με καθυστέρηση καθώς είναι πάντα διαθέσιμοι να αλλάξουν τους στόχους τους και να τους προσαρμόσουν, έτσι ώστε να ικανοποιήσουν τις ανάγκες άλλων πρακτόρων λειτουργώντας με συμπαγή τρόπο και συντονιζόμενοι μεταξύ τους στα πλαίσια του συστήματος. Οι ανταγωνιστικοί πράκτορες από την άλλη μπορεί να μην είναι καθόλου συνεργάσιμοι αν δεν τους συμφέρει, ακόμα και να μπλοκάρουν ο ένας τους στόχους του άλλου, στην περίπτωση που οι στόχοι του ενός πράκτορα είναι αντικρουόμενοι με τους στόχους κάποιου άλλου πράκτορα.

Η θεωρία της δημιουργίας ομάδων σε κοινωνίες πρακτόρων άπτεται του ζητήματος της συνεργασίας πρακτόρων σε ΣΠΠ. Σύμφωνα με αυτή την θεωρία μία ομάδα χαρακτηρίζεται από μία κοινή πρόθεση (joint intention). Η κοινή πρόθεση αυτή γίνεται πράξη όταν υπάρχει μία κοινή δέσμευση (joint commitment) από όλα τα μέλη της ομάδας για την ανάληψη κοινής δράσης. Η κοινή δέσμευση αυτή ορίζεται ως ένας κοινός επίμονος στόχος (joint persistent goal). Για να γίνει κάποιος κοινωνός μίας κοινής δέσμευσης πρέπει να ενστερνιστεί τις κοινές πεποιθήσεις (beliefs) και δεσμεύσεις (commitments) της ομάδας [50].

4.3.3. Διαπραγματεύσεις πρακτόρων σε πολυπρακτορικά συστήματα

Βασική πηγή για την υποενότητα αυτή αποτέλεσε η δημοσίευση των Jennings et al. [51], που αφορά τη θεωρία σχετικά με τα μοντέλα και τις τεχνικές διαπραγμάτευσης μεταξύ πρακτόρων σε πολυπρακτορικά συστήματα. Σε συστήματα που αποτελούνται από πολλαπλούς αυτόνομους πράκτορες, η διαπραγμάτευση αποτελεί βασική μορφή αλληλεπίδρασης. Η διαπραγμάτευση ορίζεται σαν μία μέθοδος συντονισμού και επίλυσης συγκρούσεων μεταξύ των μεμονωμένων πρακτόρων σε μία κοινωνία πρακτόρων [48].

Η διαπραγμάτευση επιτρέπει στις ομάδες πρακτόρων να καταλήξουν σε αμοιβαία συμφωνία σχετικά με κάποιο στόχο, δράση, ή σχέδιο. Ειδικά επειδή οι πράκτορες είναι αυτόνομοι και στην περίπτωση που δεν είναι συνεργάσιμοι, όπου οι πράκτορες προσπαθούν να επηρεάσουν τους άλλους για να τους πείσουν να ενεργήσουν με συγκεκριμένο τρόπο, η διαπραγμάτευση είναι κρίσιμη για την διαχείριση των αλληλεξαρτήσεων και των συγκρούσεων συμφερόντων μεταξύ των πρακτόρων [51].

Πιο συγκεκριμένα, η διαπραγμάτευση μεταξύ των πρακτόρων είναι αναγκαία σε ένα πολυπρακτορικό σύστημα, που έχει κάποιο από τα εξής χαρακτηριστικά [50]:

- Στο σύστημα υπάρχει κάποιας μορφής σύγκρουση συμφερόντων μεταξύ των πρακτόρων που πρέπει να επιλυθεί με κατανεμημένο τρόπο.
- Η συμμετοχή στο σύστημα πολλαπλών πρακτόρων, εγωκεντρικών πρακτόρων οι οποίοι έχουν πεπερασμένη λογική και τοπική ή ελλιπή πληροφόρηση.

Η διαπραγμάτευση μεταξύ πρακτόρων απαιτεί να οριστούν σαφώς τρία βασικά ζητήματα [51]:

- Τα πρωτόκολλα διαπραγμάτευσης. Τα πρωτόκολλα διαπραγμάτευσης αποτελούν το σύνολο κανόνων που διέπουν την αλληλεπίδραση μεταξύ των πρακτόρων. Σε αυτά περιλαμβάνονται, οι επιτρεπόμενοι τύποι συμμετεχόντων στη διαδικασία της διαπραγμάτευσης (π.χ. οι διαπραγματευτές και άλλα σχετικά τρίτα μέρη με τη διαδικασία), τα στάδια της διαπραγμάτευσης (π.χ. διατύπωση προσφορών, αποδοχή προσφορών, κλείσιμο διαπραγματεύσεων), τα γεγονότα που προκαλούν μεταβολές στην κατάσταση της διαδικασίας (π.χ. όχι άλλοι πλειοδότες, αποδοχή προσφοράς) και οι έγκυρες ενέργειες των συμμετεχόντων σε συγκεκριμένα στάδια της διαδικασίας (π.χ. τι μπορεί να σταλεί σε ποιον, από ποιον και πότε).
- Τα αντικείμενα διαπραγμάτευσης. Τα αντικείμενα διαπραγμάτευσης ορίζονται ως το σύνολο των ζητημάτων πάνω στα οποία πρέπει να επιτευχθεί συμφωνία μεταξύ των πρακτόρων. Αυτά μπορεί να αφορούν μεμονωμένα θέματα, όπως η τιμή ή πιο σύνθετα θέματα σχετιζόμενα με την τιμή, την ποιότητα, τα χρονοδιαγράμματα κ.λπ. Επιπλέον, σχετικές με τα αντικείμενα διαπραγμάτευσης είναι και οι επιτρεπόμενες λειτουργίες σε αυτά τα αντικείμενα. Στην απλούστερη περίπτωση, η δομή και το περιεχόμενο της συμφωνίας είναι σταθερές και η διαπραγμάτευση ισοδυναμεί με αποδοχή ή απόρριψη της προσφοράς. Σε επόμενο επίπεδο, ωστόσο, προσφέρεται η ευελιξία για αλλαγή των αξιών των ζητημάτων στα αντικείμενα της διαπραγμάτευσης μέσω αντιπροτάσεων, αλλάζοντας τη δομή του αντικειμένου διαπραγμάτευσης (π.χ. προσθέτοντας εγγυήσεις) και ούτω καθεξής.
- Τα μοντέλα συλλογιστικής των πρακτόρων. Τα μοντέλα συλλογιστικής αποτελούν ουσιαστικά τα μοντέλα λήψης αποφάσεων των πρακτόρων, με βάση τα οποία οι συμμετέχοντες στη διαπραγμάτευση προσπαθούν να επιτύχουν τους στόχους τους. Η πολυπλοκότητα του μοντέλου καθορίζεται από το χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο, τη φύση του αντικειμένου διαπραγμάτευσης και το εύρος των λειτουργιών που μπορούν να εκτελεστούν σε αυτό.

Οι ελάχιστες δυνατότητες διαπραγμάτευσης μεταξύ πρακτόρων είναι:

- (i) να προτείνεται ένα μέρος του χώρου της συμφωνίας ως αποδεκτό και
- (ii) να δίνεται η απάντηση σε μία τέτοια πρόταση, υποδεικνύοντας εάν είναι αποδεκτή.

Με άλλα λόγια, η ελάχιστη απαίτηση ενός πράκτορα διαπραγμάτευσης είναι η ικανότητα να κάνει προτάσεις και να απαντάει σε προτάσεις. Εδώ θεωρούμε μία πρόταση να είναι μία λύση στο πρόβλημα της διαπραγμάτευσης. Είτε μία μόνο ολοκληρωμένη προτεινόμενη λύση, μία μερική λύση, ή μία ομάδα πλήρων ή μερικών λύσεων. Σε γενικές γραμμές, προτάσεις μπορούν να γίνουν είτε ανεξάρτητα από τις προτάσεις άλλων πρακτόρων είτε βάσει του ιστορικού των διαπραγματεύσεων [51].

Η διαδικασία της διαπραγμάτευσης μπορεί να γίνεται με πολύ διαφορετικές μορφές, όπως οι δημοπρασίες, τα πρωτόκολλα, οι συμβάσεις και η επιχειρηματολογία.

4.3.3.1. Μοντέλα διαπραγμάτευσης πρακτόρων με τη μορφή δημοπρασίας

Αναμφισβήτητο το πιο απλό είδος διαπραγμάτευσης που μπορούμε να φανταστούμε είναι μία ολλανδική δημοπρασία. Ένας πράκτορας στο πολυπρακτορικό σύστημα κατά τη διαδικασία της διαπραγμάτευσης παίζει το ρόλο του εκπλειστηριαστή και ανακοινώνει τις τιμές (αντικείμενα διαπραγμάτευσης με ένα μόνο χαρακτηριστικό). Όταν δεν υπάρχει σήμα αποδοχής από τα άλλα μέρη στη δημοπρασία (άλλοι πράκτορες κατά τη διαπραγμάτευση), ο εκπλειστηριαστής κάνει μία νέα προσφορά που πιστεύει ότι θα είναι πιο αποδεκτή (μειώνοντας την τιμή). Εδώ, λόγω της σύμβασης (πρωτοκόλλου) βάσει της οποίας λειτουργεί ο πλειστηριασμός, η έλλειψη ανταπόκρισης είναι επαρκής ανάδραση για τον εκπλειστηριαστή προκειμένου να συμπεράνει την έλλειψη αποδοχής. Ωστόσο, σε μία πιο περίπλοκη δομή διαπραγμάτευσης από αυτή τη μάλλον ξεχωριστή περίπτωση, η ελάχιστη προδιαγραφή για τους άλλους πράκτορες είναι ότι είναι σε θέση να δηλώσουν δυσaráσκεια με προτάσεις που θεωρούν μη αποδεκτές.

Εάν οι πράκτορες που συμμετέχουν στη διαδικασία μπορούν μόνο να αποδεχθούν ή να απορρίψουν προτάσεις άλλων, τότε η διαπραγμάτευση (και ιδιαίτερα όταν τα αντικείμενα της διαπραγμάτευσης είναι σύνθετα και πολυδιάστατα) μπορεί να είναι πολύ χρονοβόρα και αναποτελεσματική, δεδομένου ότι ο πράκτορας που παίζει τον ρόλο του εκπλειστηριαστή δεν έχει πληροφόρηση σχετικά με το γιατί η πρόταση δεν είναι αποδεκτή, με το αν οι πράκτορες είναι κοντά σε μία συμφωνία, αλλά ούτε σε ποια κατεύθυνση του χώρου της συμφωνίας θα πρέπει να κινηθούν οι προτάσεις του στη συνέχεια. Ως εκ τούτου, ο εκπλειστηριαστής ουσιαστικά επιλέγει και προτείνει σημεία στο χώρο της συμφωνίας βάσει της αντίληψής του για τις προτιμήσεις των άλλων πρακτόρων και ελπίζοντας ότι τελικά θα προτείνει κάτι αποδεκτό [51].

Για να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας διαπραγμάτευσης, οι υπόλοιποι πράκτορες που συμμετέχουν στη διαπραγμάτευση θα πρέπει να είναι σε θέση να παρέχουν πιο χρήσιμη ανατροφοδότηση σχετικά με τις προτάσεις που λαμβάνουν. Οι απαντήσεις του πράκτορα που λαμβάνει την προσφορά μπορεί να είναι [50]:

- η διατύπωση μίας κριτικής (critique) για την προσφορά, που αφορά σχόλια σχετικά με τα τμήματα της πρότασης που ο πράκτορας αποδέχεται ή απορρίπτει ή/και
- η διατύπωση μίας νέας προσφοράς-αντιπρότασης (counter-proposal), που αποτελεί μία εναλλακτική πρόταση από τον πράκτορα-αποδέκτη της αρχικής πρότασης του εκπλειστηριαστή ως απάντηση σε αυτήν.

Από την ανατροφοδότηση αυτή, ο πράκτορας που παίζει το ρόλο του εκπλειστηριαστή πρέπει να είναι σε θέση να παράγει μία νέα πρόταση που είναι πιθανότερο να οδηγήσει σε συμφωνία (αν το επιλέξει).

4.3.3.2. Μοντέλα διαπραγμάτευσης πρακτόρων βασισμένα στη θεωρία παιγνίων

Η θεωρία παιγνίων είναι ένας κλάδος της οικονομίας που μελετά τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ μερών ενός συστήματος με ιδιοτελή συμπεριφορά. Όπως υποδηλώνει το όνομά της, οι βασικές έννοιες της θεωρίας παιγνίων προέκυψαν από τη μελέτη παιγνίων όπως το σκάκι. Ωστόσο, έγινε γρήγορα σαφές ότι οι τεχνικές και τα αποτελέσματα της θεωρίας των παιγνίων μπορούν να εφαρμοστούν σε όλες τις αλληλεπιδράσεις που συμβαίνουν μεταξύ των ατόμων που παρουσιάζουν ιδιοτελή συμπεριφορά. Η θεωρία παιγνίων είναι συναφής με τη μελέτη των αυτοματοποιημένων διαπραγματεύσεων, διότι μπορεί να θεωρηθεί πως οι συμμετέχοντες σε τέτοιες διαπραγματεύσεις προσπαθούν να επιτύχουν τους προσωπικούς σκοπούς τους.

Στις προσεγγίσεις με βάση τη θεωρία παιγνίων, οι πράκτορες κινούνται με βάση την απάντηση στην ερώτηση:

Ποια είναι η καλύτερη - πιο ορθολογική - κίνηση που μπορεί να κάνει ένας πράκτορας;

Στις περισσότερες διαδικασίες διαπραγμάτευσης όπου συμμετέχουν πολλοί πράκτορες, το συνολικό αποτέλεσμα θα εξαρτηθεί από τις επιλογές που έχουν γίνει από όλους τους πράκτορες που συμμετέχουν σε αυτή. Αυτό σημαίνει ότι για να μπορεί ένας πράκτορας να κάνει τις επιλογές εκείνες που βελτιστοποιούν το προσωπικό του αποτέλεσμα, πρέπει να δρα στρατηγικά. Δηλαδή, πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις αποφάσεις που μπορεί να πάρουν οι άλλοι πράκτορες και να βασιστεί στην θεώρηση ότι και οι άλλοι πράκτορες θα ενεργήσουν έτσι ώστε να βελτιστοποιήσουν το δικό τους αποτέλεσμα. Κατά τη διαπραγμάτευση, αυτό σημαίνει, για παράδειγμα, ότι πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι προσωπικές εκτιμήσεις των μεμονωμένων πρακτόρων για τα θέματα της διαπραγμάτευσης και ζητήματα όπως οι προθεσμίες τους για την επίτευξη συμφωνίας. Η θεωρία παιγνίων μας δίνει έναν τρόπο να μοντελοποιήσουμε και να αναλύσουμε τέτοια ζητήματα [51].

Σε μία διαδικασία διαπραγμάτευσης μεταξύ πρακτόρων στα πλαίσια ενός πολυπρακτορικού συστήματος, τεχνικές από τη θεωρία παιγνίων μπορούν να εφαρμοστούν σε δύο βασικά προβλήματα [51]:

1. Στον σχεδιασμό ενός κατάλληλου πρωτοκόλλου που θα διέπει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συμμετεχόντων στις διαπραγματεύσεις. Το πρωτόκολλο ορίζει τους κανόνες αλληλεπίδρασης μεταξύ των πρακτόρων. Τυπικά, ένα πρωτόκολλο είναι ένα σύνολο κανόνων που περιορίζουν τις προτάσεις που μπορούν να κάνουν οι συμμετέχοντες στις διαπραγματεύσεις. Είναι δυνατόν να σχεδιάσουμε πρωτόκολλα έτσι ώστε κάθε συγκεκριμένο ιστορικό διαπραγμάτευσης να έχει ορισμένες επιθυμητές ιδιότητες.
2. Στον σχεδιασμό μίας συγκεκριμένης στρατηγικής απόφασης, που αποτελεί το σύνολο των μοντέλων λήψης αποφάσεων που μπορούν να χρησιμοποιήσουν οι μεμονωμένοι πράκτορες κατά τη διαπραγμάτευση - ένας πράκτορας θα επιδιώξει να χρησιμοποιήσει μία στρατηγική που μεγιστοποιεί το ατομικό του αποτέλεσμα. Μία βασική δυσκολία εδώ είναι ότι, συνήθως, οι στρατηγικές που λειτουργούν καλύτερα

στη θεωρία τείνουν να είναι υπολογιστικά ανυπόστατες και επομένως δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν από πράκτορες στην πράξη.

Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν ορισμένα προβλήματα που σχετίζονται με τη χρήση της θεωρίας των παιγνίων όταν εφαρμόζεται στην αυτοματοποιημένη διαπραγμάτευση [51]:

- Η θεωρία των παιγνίων υποθέτει ότι είναι δυνατό να καθοριστούν οι προτιμήσεις ενός πράκτορα σε σχέση με τα πιθανά αποτελέσματα. Οι άνθρωποι, ωστόσο, θεωρούν εξαιρετικά δύσκολο να ορίσουν με συνέπεια τις προτιμήσεις τους έναντι των αποτελεσμάτων. Σε γενικές γραμμές, οι ανθρώπινες προτιμήσεις δεν μπορούν να οριστούν εύκολα, πόσο μάλλον με αριθμητικές εφαρμογές. Σε σενάρια όπου οι προτιμήσεις είναι προφανείς, οι τεχνικές θεωρίας παιγνίων μπορεί να λειτουργούν καλά. Με πιο σύνθετες προτιμήσεις, είναι πολύ πιο δύσκολο να χρησιμοποιηθούν.

- Η θεωρία απέτυχε να δημιουργήσει ένα γενικό μοντέλο που θα διέπει την ορθολογική επιλογή σε αλληλεξαρτώμενες καταστάσεις. Αντίθετα, έχει δημιουργηθεί μία σειρά εξειδικευμένων μοντέλων που εφαρμόζονται σε συγκεκριμένους τύπους αλληλεξαρτώμενων αποφάσεων.

- Τα μοντέλα της θεωρίας των παιγνίων συχνά υποθέτουν τέλεια υπολογιστική ορθολογικότητα, που σημαίνει ότι δεν απαιτείται υπολογισμός για την εξεύρεση αμοιβαία αποδεκτών λύσεων μέσα σε ένα εφικτό εύρος αποτελεσμάτων. Επιπλέον, ο χώρος των πιθανών προσφορών συχνά θεωρείται ότι είναι πλήρως γνωστός από τους πράκτορες, όπως και οι πιθανές τιμές έκβασης. Αυτή η προϋπόθεση σπάνια εκπληρώνεται στις περισσότερες πραγματικές εφαρμογές. Οι πράκτορες γνωρίζουν συνήθως το δικό τους χώρο πληροφοριών, αλλά δεν γνωρίζουν αυτό του αντιπάλου τους. Επομένως, η έννοια του τέλειου ορθολογισμού, αν και χρήσιμη στο σχεδιασμό, την πρόβλεψη και την απόδειξη ιδιοτήτων ενός συστήματος, δεν είναι καθόλου χρήσιμη στην πράξη

Παρά τα όποια μειονεκτήματα, όμως, η θεωρία παιγνίων είναι εξαιρετικά χρήσιμη ως εργαλείο μοντελοποίησης της αυτοματοποιημένης διαπραγμάτευσης. Ιδιαίτερα, σε περιπτώσεις όπου είναι δυνατόν να χαρακτηριστούν οι προτιμήσεις και οι πιθανές στρατηγικές των συμμετεχόντων στις διαπραγματεύσεις, τότε η θεωρία παιγνίων έχει πολλά να προσφέρει.

4.3.3.3. Μοντέλα διαπραγμάτευσης πρακτόρων βασισμένα σε ευρετικές μεθόδους

Οι ευρετικές μέθοδοι λαμβάνουν υπόψιν ότι υπάρχει ένα κόστος που σχετίζεται με τον υπολογισμό βέλτιστων λύσεων και τη διαδικασία λήψης αποφάσεων για αυτό και επιδιώκουν την αναζήτηση λύσεων στον χώρο διαπραγμάτευσης με μη εξαντλητικό τρόπο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να αποσκοπούν στην εξεύρεση καλών και όχι βέλτιστων λύσεων. Οι ίδιες οι μέθοδοι μπορεί να είναι είτε υπολογιστικές προσεγγίσεις των τεχνικών της θεωρίας παιγνίων είτε μπορεί να είναι υπολογιστικές υλοποιήσεις άλλων μοντέλων διαπραγμάτευσης.

Τα βασικά πλεονεκτήματα της ευρετικής προσέγγισης είναι τα εξής [51]:

- τα μοντέλα βασίζονται σε ρεαλιστικές υποθέσεις. Ως εκ τούτου, παρέχουν μία βάση πιο κατάλληλη για αυτοματοποίηση και μπορούν επομένως να χρησιμοποιηθούν σε μία ευρύτερη ποικιλία εφαρμογών.

- οι σχεδιαστές πρακτόρων, οι οποίοι δεν έχουν καλή γνώση της θεωρίας παιγνίων, μπορούν να τις χρησιμοποιήσουν ως εναλλακτική λύση και να σχεδιάσουν αρχιτεκτονικές διαπραγμάτευσης πρακτόρων με λιγότερους περιορισμούς.

Η βασική επιδίωξη αυτών των μοντέλων είναι να μοντελοποιηθεί η διαδικασία λήψης αποφάσεων του πράκτορα με ευρετικό τρόπο κατά τη διάρκεια των διαπραγματεύσεων. Στα ευρετικά μοντέλα, ο χώρος των πιθανών συμφωνιών αντιπροσωπεύεται ποσοτικά από συμβάσεις με διαφορετικές τιμές για κάθε έκδοση. Κάθε πράκτορας υπολογίζει τότε αυτά τα σημεία στο χώρο των πιθανών αποτελεσμάτων σύμφωνα με ένα σύνολο προσωπικών προτιμήσεων, που αντιπροσωπεύονται από μία συνάρτηση χρησιμότητας. Οι προτάσεις και οι αντιπροτάσεις των πρακτόρων αποτελούν μεμονωμένα σημεία πάνω σε αυτό το πεδίο πιθανών αποτελεσμάτων. Η διαδικασία αναζήτησης τερματίζεται είτε όταν έχει ξεπεραστεί ο χρόνος επίτευξης συμφωνίας είτε όταν έχει επιτευχθεί μία αμοιβαία αποδεκτή λύση, που αποτελεί σημείο τομής των συνόλων αποδεκτών αποτελεσμάτων των μεμονωμένων πρακτόρων [51].

Ενώ οι ευρετικές μέθοδοι ξεπερνούν πράγματι μερικές από τις αδυναμίες των μοντέλων της θεωρίας παιγνίων, έχουν επίσης αρκετά συγκριτικά μειονεκτήματα:

- τα μοντέλα συχνά επιλέγουν αποτελέσματα (προσφορές) που είναι υπό-βέλτιστα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι υιοθετούν μία κατά προσέγγιση έννοια ορθολογισμού και στο γεγονός ότι η αναζήτηση δεν γίνεται εξαντλητικά στο χώρο των πιθανών αποτελεσμάτων.

- τα μοντέλα χρειάζονται εκτενή αξιολόγηση, μέσω προσομοιώσεων και εμπειρικής ανάλυσης, καθώς πολλές φορές είναι αδύνατο να προβλεφθεί με ακρίβεια πώς το σύστημα και οι πράκτορες που το αποτελούν θα συμπεριφέρονται σε διαφορετικές περιπτώσεις.

4.3.3.4. Μοντέλα διαπραγμάτευσης πρακτόρων βασισμένα σε επιχειρήματα

Όλες οι προσεγγίσεις που αναφέρονται στις προηγούμενες παραγράφους αυτής της υποενότητας αφορούν την ανταλλαγή προτάσεων μεταξύ των πρακτόρων κατά τη διάρκεια της διαπραγμάτευσης. Αν και αυτό μπορεί να γίνει με πολύ εξελιγμένο τρόπο, οι διάφορες προσεγγίσεις έχουν τρεις κύριους περιορισμούς [51]:

- Οι ίδιες οι προτάσεις γενικά υποδηλώνουν συγκεκριμένα σημεία στο χώρο των συμφωνιών διαπραγμάτευσης.

- Η μόνη ανάδραση που μπορεί να γίνει σε μία πρόταση είναι μία αντιπρόταση, η οποία είναι ένα άλλο σημείο στο χώρο των πιθανών συμφωνιών, ένα σήμα αποδοχής ή ένα σήμα απόσυρσης της πρότασης.

- Είναι δύσκολο να μεταβληθεί το σύνολο των ζητημάτων που βρίσκονται υπό διαπραγμάτευση κατά τη διάρκειά της.

Στην άρση των παραπάνω περιορισμών, στοχεύει η διαπραγμάτευση βάσει επιχειρημάτων. Η βασική ιδέα πίσω από την προσέγγιση που βασίζεται στην επιχειρηματολογία είναι να επιτρέπεται η ανταλλαγή μεταξύ των μεμονωμένων πρακτόρων πρόσθετων πληροφοριών και όχι μόνο προτάσεων. Οι πληροφορίες αυτές μπορούν να έχουν διάφορες μορφές, οι οποίες όμως είναι όλες επιχειρήματα που εξηγούν ρητά τη άποψη του πράκτορα που διατυπώνει το εν λόγω επιχείρημα.

Σε αυτή την προσέγγιση, εκτός από την απόρριψη μίας πρότασης, ένας πράκτορας μπορεί να διατυπώσει μία κριτική για την πρόταση, εξηγώντας γιατί αυτή η πρόταση είναι μη αποδεκτή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον χαρακτηρισμό μίας ολόκληρης περιοχής του χώρου διαπραγμάτευσης ως μη άξιου διερεύνησης από τον άλλο πράκτορα. Ομοίως, ένας πράκτορας μπορεί να συνοδεύσει μία πρόταση με ένα επιχείρημα που αναφέρει γιατί ο άλλος πράκτορας πρέπει να το δεχτεί. Αυτό το τελευταίο είδος επιχειρήματος καθιστά δυνατή την αλλαγή της περιοχής αποδοχής του άλλου πράκτορα, μέσω της μεταβολής των προτιμήσεων του και παρέχει επίσης ένα μέσο για την αλλαγή του ίδιου του χώρου διαπραγμάτευσης. Αυτό το είδος επιχειρηματολογίας δεν πρέπει να συνδέεται άμεσα με τις προτάσεις. Για παράδειγμα, στην ανθρώπινη επιχειρηματολογία, είναι δυνατό να διατυπωθούν απειλές ή να προσφερθούν ανταμοιβές. Ακόμη και αυτό το είδος επιχειρημάτων μπορεί να συμπεριληφθεί σε αυτή την προσέγγιση. Παράλληλα, όπως και στην ανθρώπινη επιχειρηματολογία, οι πράκτορες μπορεί να μην είναι ειλικρινείς στα επιχειρήματα που παράγουν. Έτσι, κατά την αξιολόγηση ενός επιχειρήματος, ο πράκτορας-λήπτης του μηνύματος πρέπει να αξιολογήσει το επιχείρημα με βάση το δικό του σύστημα αξιών και, στη συνέχεια, να το τροποποιήσει βασιζόμενος στη δική του αντίληψη για τον βαθμό αξιοπιστίας του επιχειρήματος, προκειμένου να αποφασίσει πώς θα ανταποκριθεί σε αυτό [51].

Η διαπραγμάτευση βασισμένη σε επιχειρήματα συμβάλει στην ανάπτυξη πρακτόρων με μεγάλη ευελιξία κατά τη μεταξύ τους διαπραγμάτευση. Οι πράκτορες αυτοί έχουν την ικανότητα να επιτυγχάνουν συμφωνίες που πράκτορες, που διαπραγματεύονται με βάση διαφορετικές προσεγγίσεις από την προσέγγιση βασισμένη σε επιχειρήματα, δεν μπορούν. Ωστόσο, το βασικό πρόβλημα σε αυτές τις προσεγγίσεις είναι ότι απαιτούν την κατανάλωση σημαντικών πόρων κατά τη διαδικασία των διαπραγματεύσεων, ιδιαίτερα στα στάδια της ανάπτυξης και αξιολόγησης των επιχειρημάτων. Συνεπώς, πιθανόν οι πράκτορες που μπορούν να υποστηρίξουν τις απόψεις τους με επιχειρήματα κατά τη διαπραγμάτευση θα αντιπροσωπεύουν μία μικρή, αλλά σημαντική κατηγορία αυτοματοποιημένων διαπραγματευτών [51].

4.3.4. Επικοινωνία πρακτόρων σε πολυπρακτορικά συστήματα

Η επικοινωνία είναι απαραίτητη προκειμένου οι πράκτορες στα πλαίσια ενός συστήματος πολλαπλών πρακτόρων να ανταλλάξουν πληροφορίες με σκοπό να συντονίσουν τη δράση τους. Δύο είδη επικοινωνίας κυριαρχούν μεταξύ των

πρακτόρων και αυτά είναι η κατευθείαν ανταλλαγή μηνυμάτων και η χρησιμοποίηση ενός κοινού σημείου συγκέντρωσης δεδομένων (μοντέλο μαυροπίνακα).

Η επικοινωνία μεταξύ των πρακτόρων μπορεί να είναι σύγχρονη ή ασύγχρονη. Κατά τη σύγχρονη επικοινωνία, ο πράκτορας που θέτει μία ερώτηση είναι απαραίτητο να διακόψει τη λειτουργία του, μέχρι να πάρει μία απάντηση, ενώ, κατά την ασύγχρονη, η απάντηση μπορεί να έλθει οποιαδήποτε στιγμή μετά το χρόνο υποβολής της ερώτησης, χωρίς η λειτουργία του πράκτορα να διακόπτεται [45].

Επιπρόσθετα, ένα σημαντικό ζήτημα που αφορά την επικοινωνία των πρακτόρων σε μία κοινωνία πρακτόρων είναι ο βαθμός επικοινωνίας (cardinality). Αυτός ορίζεται ως ο αριθμός των αποστολών και των παραληπτών κατά την ανταλλαγή πληροφορίας. Ο βαθμός επικοινωνίας μπορεί να είναι [45]:

- 1 προς 1,
- 1 προς N,
- N προς N.

4.3.4.1. Μοντέλο επικοινωνίας μαυροπίνακα

Στο μοντέλο όπου γίνεται χρήση ενός κοινού σημείου συγκέντρωσης δεδομένων, του μαυροπίνακα. Ο μαυροπίνακας είναι ένας τύπος κοινής μνήμης όπου όλοι οι πράκτορες μπορούν να γράψουν κάτι ή να τον διαβάσουν. Η επικοινωνία μεταξύ των πρακτόρων στο μοντέλο μαυροπίνακα γίνεται όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.4. Συνήθως, ο μαυροπίνακας χωρίζεται σε περιοχές και οι μεμονωμένοι πράκτορες αποκτούν προνόμια που σχετίζονται με τη δυνατότητα να διαβάζουν συγκεκριμένες περιοχές της κοινής μνήμης. Έτσι, κάποιοι πράκτορες μπορούν να διαβάσουν και να μεταβάλουν το περιεχόμενο σε περισσότερες περιοχές της κοινής μνήμης από κάποιους άλλους [50].



Εικόνα 4.4 Μοντέλο επικοινωνίας μαυροπίνακα

Πηγή: Γεωργιάδη Κ. (2015). Τεχνητή Νοημοσύνη – Μία εισαγωγική προσέγγιση. ΣΕΑΒ. (Ηλεκτρονικό Σύγγραμμα)

Η κεντρική μονάδα ελέγχου (κοινή μνήμη) χωρίζεται σε τρία επιμέρους τμήματα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.5 [45]:

- στις πηγές γνώσης (knowledge sources), οι οποίες είναι ανεξάρτητα δομικά στοιχεία τα οποία εμπεριέχουν τη γνώση που είναι απαραίτητη για την επίλυση ενός προβλήματος,
- στο στοιχείο ελέγχου (control component), που κάνει κριτική στις πηγές γνώσης και είναι υπεύθυνο για τη διαδικασία λήψης αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο, καθώς και για την πορεία επίλυσης του προβλήματος και το διαμοιρασμό των πόρων του συστήματος στους μεμονωμένους πράκτορες που το αποτελούν,
- στον μαυροπίνακα (blackboard), που είναι μία καθολική βάση δεδομένων αποτελούμενη από δεδομένα εισόδου, μερικές λύσεις και άλλα δεδομένα τα οποία αξιοποιούνται από τους πράκτορες κατά την επίλυση του προβλήματος.

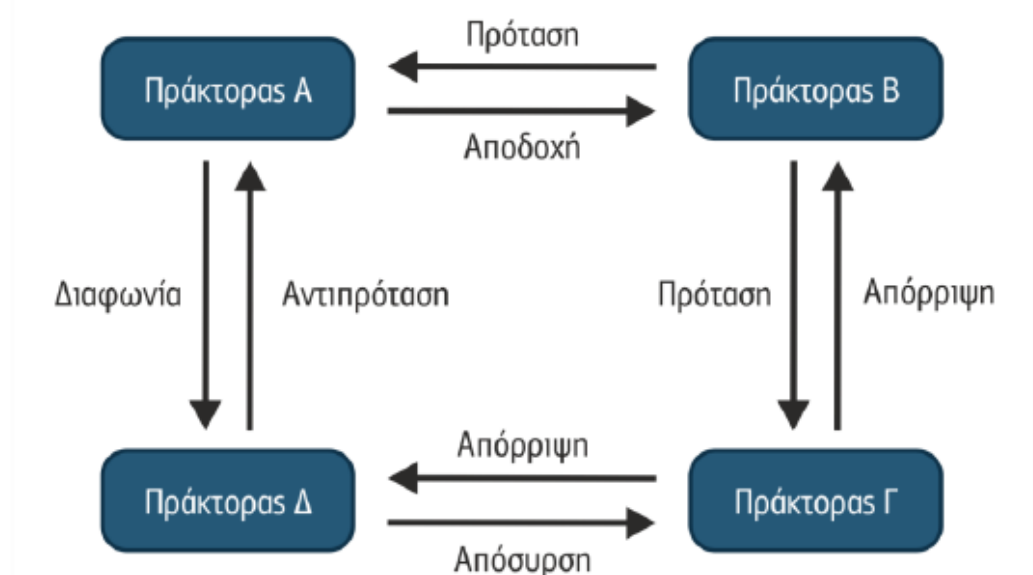


Εικόνα 4.5 Αρχιτεκτονική κεντρικής μονάδας ελέγχου στο μοντέλο επικοινωνίας μαυροπίνακα
Πηγή: Γεωργιάδη Κ. (2015). Τεχνητή Νοημοσύνη – Μία εισαγωγική προσέγγιση. ΣΕΑΒ. (Ηλεκτρονικό Σύγγραμμα

4.3.4.2. Μοντέλο επικοινωνίας μέσω ανταλλαγής μηνυμάτων

Ο πιο διαδεδομένος τρόπος επικοινωνίας στα σύγχρονα συστήματα πολλαπλών πρακτόρων είναι η ανταλλαγή μηνυμάτων. Στο μοντέλο ανταλλαγής μηνυμάτων οι πράκτορες συνεργάζονται για την επίλυση ενός προβλήματος μέσω μηνυμάτων τα οποία αποστέλλουν ο ένας στον άλλο βάσει συγκεκριμένων γλωσσών υψηλού επιπέδου. Σε αντίθεση με το μοντέλο μαυροπίνακα, αυτή η αρχιτεκτονική διασύνδεσης των πρακτόρων, δεν εμπεριέχει κάποια κεντρική μονάδα για τον έλεγχο της πορείας επίλυσης των προβλημάτων που δημιουργούνται από ασυμφωνίες μεταξύ των μεμονωμένων πρακτόρων και από ανάγκες διαμοιρασμού των περιορισμένων

πόρων του πολυπρακτορικού συστήματος. Τα ζητήματα αυτά πρέπει να αναλύονται και να αντιμετωπίζονται κατάλληλα κατά τον σχεδιασμό του συστήματος ή μέσω ανταλλαγής μηνυμάτων και διαπραγματεύσεων μεταξύ των μεμονωμένων πρακτόρων [45]. Μία σχετικά απλή μορφή του μοντέλου επικοινωνίας μέσω ανταλλαγής μηνυμάτων παρουσιάζεται στην εικόνα 4.6.



Εικόνα 4.6 Μοντέλο επικοινωνίας πρακτόρων μέσω ανταλλαγής μηνυμάτων

Πηγή: Γεωργιάδη Κ. (2015). Τεχνητή Νοημοσύνη – Μία εισαγωγική προσέγγιση. ΣΕΑΒ. (Ηλεκτρονικό Σύγγραμμα)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αυτό που χρειάζεται στην περίπτωση της επικοινωνίας μέσω ανταλλαγής μηνυμάτων είναι η διαμόρφωση ενός πρωτοκόλλου - γλώσσας σύνταξης και μεταφοράς του μηνύματος όπως και ο προσδιορισμός των διαφορετικών τύπων μηνυμάτων. Παράλληλα, έχει προταθεί η ανταλλαγή των σχεδίων δράσης των πρακτόρων μέσω των μηνυμάτων για τον καλύτερο συντονισμό τους. Στην περίπτωση αυτή, όμως, η μεταφορά σχεδίων δράσης των πρακτόρων μέσω μηνυμάτων έχει κάποια σημαντικά μειονεκτήματα. Τα μειονεκτήματα αυτά υπάρχουν επειδή σε αυτή την περίπτωση ανταλλάσσονται μεγάλα μηνύματα, κάνοντας χρονοβόρα την μετάδοσή τους και αυξάνοντας τις ανάγκες σε διαύλους επικοινωνίας. Ακόμα, σε ένα δυναμικό περιβάλλον όταν το σχέδιο φτάσει στον άλλο πράκτορα μπορεί πια να μην εκφράζει τις προθέσεις του αποστολέα. Επιπλέον, ειδικά στην περίπτωση των αυτόνομων πρακτόρων αλλά και σε κάθε άλλη περίπτωση εκτός της αρχιτεκτονικής κατανομής εργασιών master-slave, είναι αμφίβολο το αν οι αποδέκτες ενός σχεδίου δράσης θα το υιοθετήσουν [50].

4.3.4.3. Επίπεδα πρωτόκολλων επικοινωνίας

Τα πρωτόκολλα επικοινωνίας καθορίζονται συνήθως σε διάφορα επίπεδα [46]:

- Το χαμηλότερο επίπεδο του πρωτοκόλλου καθορίζει τη μέθοδο διασύνδεσης.

- Το μεσαίο επίπεδο καθορίζει τη μορφή ή τη σύνταξη των πληροφοριών που μεταφέρονται.
- Το ανώτερο επίπεδο καθορίζει τη σημασία ή τη σημασιολογία των πληροφοριών. Η σημασιολογία αναφέρεται όχι μόνο στην ουσία του μηνύματος, αλλά και στον τύπο του μηνύματος.

Ένα πρωτόκολλο καθορίζεται από μία δομή δεδομένων με τα ακόλουθα πεδία [46]:

1. Αποστολέας
2. Δέκτης
3. Γλώσσα στο πρωτόκολλο
4. Λειτουργίες κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης
5. Ενέργειες που πρέπει να αναληφθούν από τον δέκτη ή τους δέκτες.

4.3.4.4. Γλώσσες επικοινωνίας πρακτόρων

Μία γλώσσα επικοινωνίας πρακτόρων αποτελεί ένα πρότυπο και όπως κάθε άλλο πρότυπο πρέπει να έχει δύο βασικές ιδιότητες [44]:

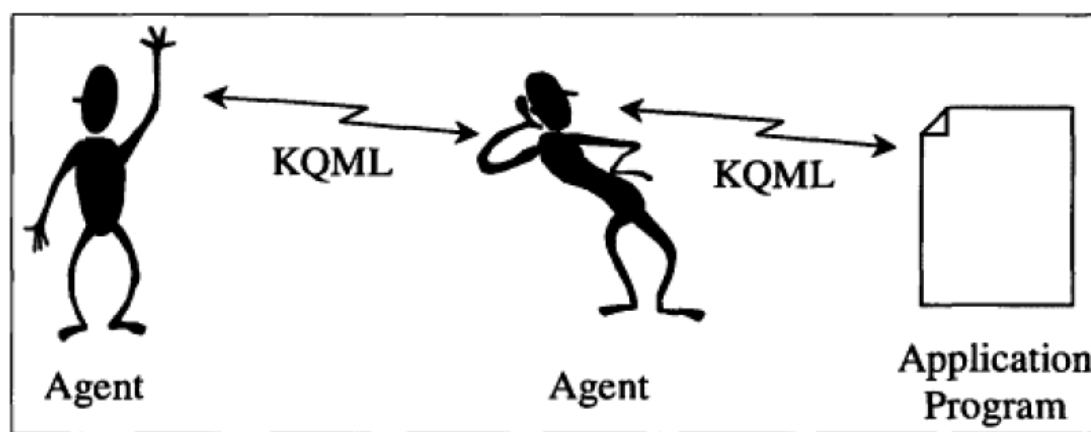
- Συνέπεια, δηλαδή οι ίδιες λέξεις ή εκφράσεις πρέπει να έχουν το ίδιο νόημα για όλα τα προγράμματα και
- Συμβατότητα, δηλαδή όλα τα προγράμματα πρέπει να χρησιμοποιούν τις ίδιες λέξεις ή εκφράσεις για να λένε τα ίδια πράγματα

Όσον αφορά τη σχεδίαση των γλωσσών επικοινωνίας υπάρχουν δύο δημοφιλείς προσεγγίσεις:

- Η διαδικαστική προσέγγιση που βασίζεται στην ιδέα ότι η επικοινωνία μπορεί να διαμορφωθεί καλύτερα ως ανταλλαγή διαδικαστικών οδηγιών. Οι γλώσσες αυτές επιτρέπουν τη μετάδοση όχι μόνο μεμονωμένων εντολών αλλά και ολόκληρων προγραμμάτων. Παράλληλα, είναι σχετικά απλές, ισχυρές και άμεσα και αποτελεσματικά εκτελέσιμες. Από την άλλη πλευρά, σε καθαρά διαδικαστικές γλώσσες υπάρχουν κάποια μειονεκτήματα. Πρώτον, ορισμένες φορές οι διαδικασίες απαιτούν πληροφορίες σχετικά με τον παραλήπτη που ενδέχεται να μην είναι διαθέσιμες στον αποστολέα. Δεύτερον, οι διαδικασίες είναι μονοκατευθυντικές, ενώ για τους πράκτορες, οι πληροφορίες συνήθως πρέπει να είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν και προς τις δύο κατευθύνσεις.
- Η δηλωτική προσέγγιση στο σχεδιασμό γλωσσών επικοινωνίας βασίζεται στην ιδέα ότι η επικοινωνία μπορεί να διαμορφωθεί καλύτερα ως ανταλλαγή δηλώσεων, όπως οι ορισμοί και οι παραδοχές. Μία δηλωτική γλώσσα πρέπει να είναι επαρκώς εκφραστική για να μεταδίδει πληροφορίες ποικίλου τύπου. Ταυτόχρονα, η γλώσσα πρέπει να είναι αρκετά συμπαγής, έτσι ώστε να διασφαλίζει ότι η επικοινωνία είναι δυνατή χωρίς υπερβολική ανάπτυξη σε σχέση με τις εξειδικευμένες γλώσσες.

Στα συστήματα που εμπεριέχουν επικοινωνία μεταξύ πρακτόρων, οι δηλωτικές γλώσσες ταιριάζουν περισσότερο με τις ανάγκες επικοινωνίας στα συστήματα αυτά, ενώ δεν έχει εκλείψει και η χρήση διαδικαστικών προσεγγίσεων.

Οι κυριότερες γλώσσες επικοινωνίας πρακτόρων είναι η KQML και η FIPA ACL. Η KQML (Knowledge Query and Manipulation Language) είναι ένα πρωτόκολλο για την ανταλλαγή πληροφοριών και γνώσης μεταξύ πρακτόρων, αλλά και μεταξύ πρακτόρων με προγράμματα, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.7. Η ιδιαιτερότητα της KQML είναι ότι όλες οι πληροφορίες για την κατανόηση του περιεχομένου του μηνύματος περιλαμβάνονται στην ίδια την επικοινωνία. Είναι ενδιαφέρον ότι το περιεχόμενο ενός μηνύματος σε KQML μπορεί να ενσωματωθεί σε ένα άλλο μήνυμα σε γλώσσα KQML. Για παράδειγμα, σε μία περίπτωση όπου ο Πράκτορας Α δεν μπορεί να επικοινωνήσει απευθείας με τον Πράκτορα Β, αλλά μπορεί να επικοινωνήσει με τον Πράκτορα Γ, τότε ο Πράκτορας Α μπορεί να ζητήσει από τον Πράκτορα Γ να προωθήσει ένα μήνυμα στον Πράκτορα Β [46].



Εικόνα 4.7 Η KQML είναι ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας τόσο μεταξύ πρακτόρων, όσο και μεταξύ πρακτόρων με προγράμματα

Πηγή: Weiss, G. (1999). *Multi-agent systems: A modern approach to distributed artificial intelligence*. Cambridge, MIT Press.

Η FIPA ACL δημιουργήθηκε από τον Οργανισμό για Ευφυείς Φυσικούς Πράκτορες (Foundation for Intelligent Physical Agents - FIPA) και βασίστηκε στην προσπάθεια για διασύνδεση των διαφορετικών συστημάτων πρακτόρων που αναπτύσσονται στη βιομηχανία. Η FIPA ACL μοιάζει αρκετά στην KQML, αλλά έχει μία σημαντική διαφορά. Τα τελεστικά μηνύματα και η σημασιολογία της είναι αυστηρώς ορισμένα. Η σημασιολογία της FIPA ACL εκφράζεται με τη χρήση της γλώσσας S/SL (Syntax/Semantic Language), που είναι μία υψηλού επιπέδου γλώσσα προδιαγραφών για σημασιολογικούς αναλυτές, γεννήτριες κώδικα και για μεταγλωττιστές και η οποία περιλαμβάνει, μεταξύ άλλων, τις πεποιθήσεις, τις επιθυμίες και τις πράξεις των πρακτόρων. Με βάση τη λογική αυτή, κάθε μήνυμα ACL αντιστοιχεί σε ένα ορθολογικό αποτέλεσμα ή, αλλιώς, στο τι αποβλέπει ο αποστολέας του μηνύματος. Σε γενικές γραμμές η FIPA ACL δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα πολλαπλών πρακτόρων στα οποία δρουν πράκτορες με αλληλοσυγκρουόμενα συμφέροντα. Στις περιπτώσεις εκείνες, όμως, κατά τις οποίες έχει διασφαλιστεί ότι

δεν ισχύει κάτι τέτοιο, δεν παρουσιάζονται σημαντικά προβλήματα στην χρησιμοποίησή της [45].

5. Περιγραφή προτεινόμενου μοντέλου

Στην παρούσα εργασία προτείνεται ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας σε πραγματικό χρόνο για μεγάλους λιμένες, το οποίο αξιοποιεί την τεχνολογία των συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων. Η προτεινόμενη μέθοδος βασίζεται στη λογική της μεθόδου που περιγράφεται στην [1] με την προσθήκη δυνατοτήτων διαχείρισης χειρσίων συστημάτων παροχής ενέργειας σε ελλιμενισμένα πλοία. Στο προτεινόμενο μοντέλο, η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος ισχύος του λιμένα προσαρμόζεται κατάλληλα ώστε να ικανοποιεί ένα προκαθορισμένο σημείο αναφοράς που ορίζεται από τον διαχειριστή του συστήματος του λιμένα, ενώ ταυτόχρονα ελαχιστοποιείται το συνολικό ενεργειακό κόστος λειτουργίας των πλοίων που είναι συνδεδεμένα στις εγκαταστάσεις παροχής ηλεκτρικής ενέργειας για πλοία του λιμένα και περιορίζονται οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG) που παράγονται από τη λειτουργία των πλοίων.

Η βασική ιδέα του μοντέλου είναι ότι τα εμπορευματοκιβώτια ελεγχόμενης θερμοκρασίας (reefers) που βρίσκονται στο λιμάνι θεωρούνται και αξιοποιούνται ως ευέλικτα φορτία καθώς παρουσιάζουν πολύ χαμηλό ρυθμό μεταβολής της εσωτερικής τους θερμοκρασίας με το χρόνο, η οποία συνήθως μπορεί να μεταβληθεί μέσα σε ένα αρκετά μεγάλο εύρος επιτρεπτών θερμοκρασιών. Τα reefers ελέγχονται από απλούς, ομογενείς, μη επικοινωνιακούς πράκτορες. Ο έλεγχος των πρακτόρων έχει ανατεθεί σε έναν πράκτορα τοποθετημένο στην κορυφή της ιεραρχίας του προτεινόμενου πολυπρακτορικού συστήματος, ο οποίος λειτουργεί ως το μοναδικό κέντρο ελέγχου του συστήματος. Η δομή και η αλγοριθμική λογική αυτού του μοντέλου αναλύεται διεξοδικά σε αυτή την ενότητα.

Η αξιοποίηση έξυπνων τεχνολογιών, όπως τα συστήματα πολλαπλών πρακτόρων δικαιολογείται από την πολυπλοκότητα και τις αυξημένες απαιτήσεις των μελλοντικών ενεργειακών συστημάτων των μεγάλων λιμένων, καθώς και την κατανομημένη φύση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας των λιμένων. Το προτεινόμενο έξυπνο μοντέλο διαχείρισης ενέργειας σε πραγματικό χρόνο στοχεύει στην αποτελεσματική αντιμετώπιση των παραπάνω αναφερόμενων προκλήσεων. Παράλληλα, η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να χαρακτηριστεί ως καινοτόμος, καθώς η έρευνα που αφορά την εφαρμογή μοντέλων βασισμένων σε συστήματα πολλαπλών πρακτόρων για τη διαχείριση ενέργειας σε μεγάλα λιμάνια βρίσκεται ακόμα στην αρχή [1,2,3,37,52].

5.1. Δομή του προτεινόμενου πολυπρακτορικού συστήματος

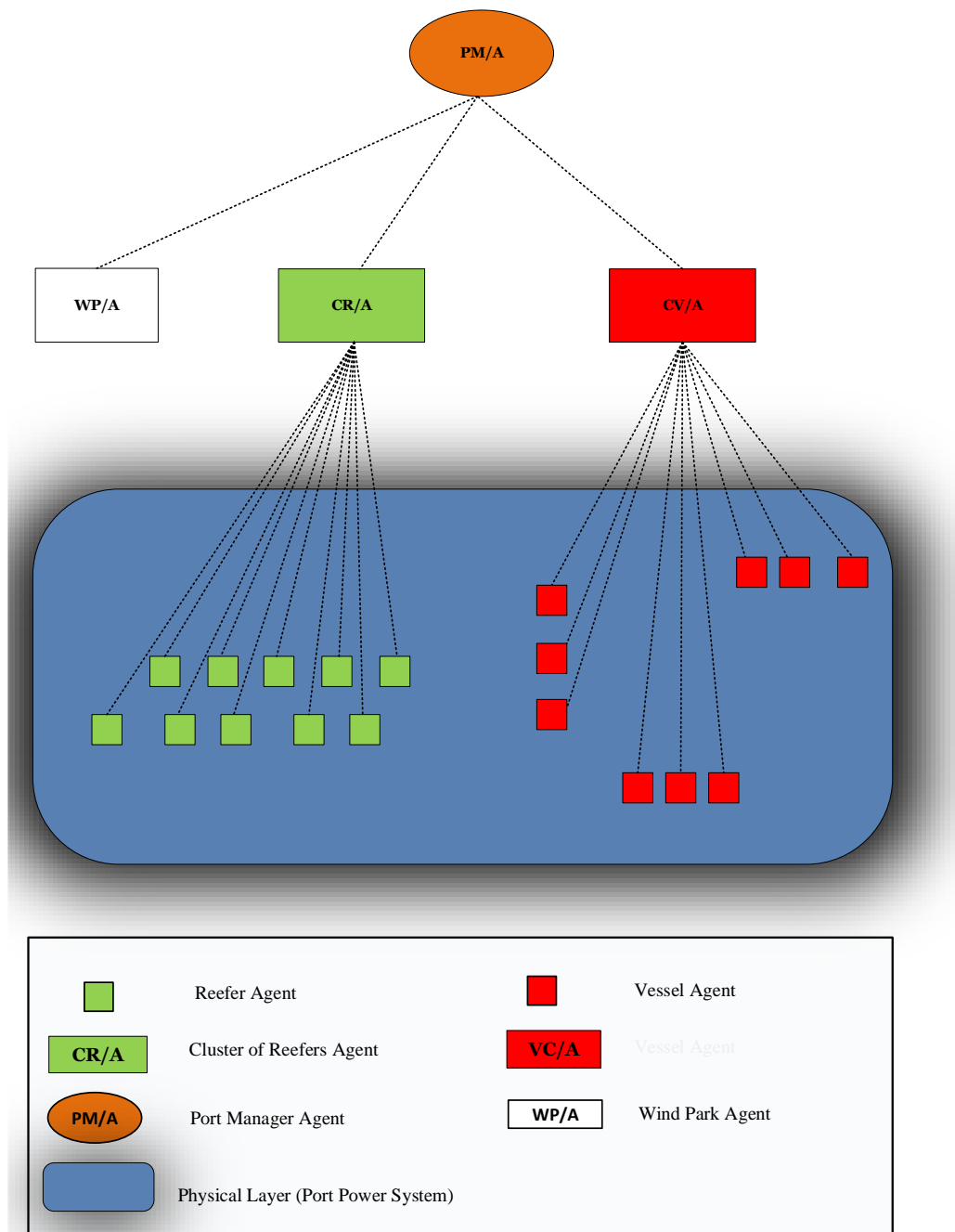
Το προτεινόμενο πολυπρακτορικό σύστημα, που φαίνεται στην Εικόνα 5.1, σχεδιάστηκε και χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της διαδικασίας ελέγχου του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας ενός μεγάλου λιμανιού. Οι κύριες πηγές κατανάλωσης ενέργειας του λιμένα που εξετάζεται - όπως αναλύθηκαν και στην ενότητα 2.1 της παρούσας εργασίας - είναι τα εμπορευματοκιβώτια ελεγχόμενης θερμοκρασίας, οι γερανοί, το σύστημα τροφοδοσίας ηλεκτρικής ενέργειας των πλοίων μέσω του

δικτύου του λιμένα και άλλες επιχειρησιακές διαδικασίες απαραίτητες για τη λειτουργία του λιμένα. Στο μοντέλο γίνεται η θεώρηση ότι η ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος του λιμένα παρέχεται από ανεμογεννήτριες που ανήκουν στο λιμενικό οργανισμό, που είναι υπεύθυνος και για τη διαχείριση και λειτουργία τους και από το τοπικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας με το οποίο συνδέεται το δίκτυο του λιμένα. Η προτεινόμενη μέθοδος επικεντρώνεται στην διαχείριση σε πραγματικό χρόνο των ευέλικτων φορτίων των λιμένων προκειμένου να απορροφηθούν οι πιθανές αποκλίσεις της πραγματικής παραγωγής αιολικής ενέργειας και της πραγματικής ζήτησης ισχύος των πλοίων από τις τιμές της πρόβλεψής τους. Τα φορτία με σημαντική ευελιξία είναι τα reefers και τα πλοία που βρίσκονται αγκυροβολημένα στο λιμάνι και συνδέονται με το δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας του λιμένα. Ωστόσο, δεδομένου ότι ένας από τους κύριους στόχους της μεθόδου είναι η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στα όρια του λιμένα που παράγονται από τα πλοία, δίνεται προτεραιότητα στην παροχή ενέργειας παραγόμενης από ΑΠΕ στα συνδεδεμένα στο δίκτυο του λιμένα πλοία προκειμένου να μειωθεί η χρήση των βοηθητικών μηχανών τους κατά τη διάρκεια της παραμονής τους στο λιμάνι, οι οποίες για λόγους οικονομίας λειτουργούν με βαρύ μαζούτ (Heavy Fuel Oil - HFO) [24].

Τα συστήματα πολλαπλών πρακτόρων είναι πολύ αποτελεσματικά στην επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων, όπου οι προσεγγίσεις επίλυσης με κεντρικούς ελεγκτές και οι κλασσικές τεχνικές βελτιστοποίησης θα απαιτούσαν τη δέσμευση σημαντικών πόρων του συστήματος και θα οδηγούσαν σε μεγάλη υπολογιστική πολυπλοκότητα και απαιτούμενους χρόνους υπολογισμού.

Στην προτεινόμενη δομή, ένας μεμονωμένος πράκτορας έχει ανατεθεί σε κάθε reefer και σε κάθε πλοίο που φιλοξενείται στο λιμάνι. Στην προτεινόμενη προσέγγιση, οι πράκτορες διαχειρίζονται και ελέγχονται από έναν μόνο πράκτορα, που παίζει το ρόλο του κέντρου ελέγχου του δικτύου του λιμένα. Στη δομή αυτή, έχει επιλεχθεί μία αρχιτεκτονική κατανομής εργασιών master-slave. Κάθε πράκτορας επικοινωνεί μόνο με έναν άλλο πράκτορα τοποθετημένο στο επόμενο υψηλότερο επίπεδο ιεραρχίας στο πολυπρακτορικό σύστημα, διαβιβάζοντας τα δεδομένα που είναι απαραίτητα στο πράκτορα ελέγχου του λιμένα για τον προσδιορισμό των απαιτούμενων ενεργειών εκ μέρους του, κατά το επόμενο χρονικό διάστημα.

Στην προσέγγιση αυτή, υπάρχουν δύο διαφορετικές κατηγορίες πρακτόρων, συγκεκριμένα, οι τοπικοί-μεμονωμένοι πράκτορες και οι πράκτορες ομάδων. Οι τοπικοί πράκτορες έχουν ανατεθεί στα μεμονωμένα στοιχεία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας του λιμένα και οι πράκτορες ομάδων είναι υπεύθυνοι για τη συγκέντρωση των απαντήσεων των μεμονωμένων πρακτόρων ίδιου τύπου, την επεξεργασία και αποστολή τους σε κατάλληλη μορφή στον κεντρικό πράκτορα ελέγχου, καθώς και για την αποστολή των εντολών προσαρμογής από τον κεντρικό πράκτορα διαχείρισης του λιμένα στους μεμονωμένους πράκτορες. Η αναλυτική λειτουργία κάθε διαφορετικού τύπου πράκτορα που συμμετέχει στο προτεινόμενο πολυπρακτορικό σύστημα περιγράφεται παρακάτω.



Εικόνα 5.1 Δομή του πολυπρακτορικού συστήματος της προτεινόμενης μεθόδου ελέγχου ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος του λιμένα

1. Ο πράκτορας εμπορευματοκιβωτίου ελεγχόμενης θερμοκρασίας (Reefer Agent - R/A) είναι υπεύθυνος για τον προσδιορισμό της τιμής ευελιξίας για να αλλάξει την κατάσταση λειτουργίας του εμπορευματοκιβωτίου που ελέγχει. Ουσιαστικά, η αλλαγή στην κατάσταση λειτουργίας μεταφράζεται σε αλλαγή της ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος του reefer. Αρχικά, ο R/A υπολογίζει την τιμή της εσωτερικής θερμοκρασίας του reefer κατά το επόμενο χρονικό διάστημα αν μεταβληθεί η κατάσταση λειτουργίας του. Στη συνέχεια, βασιζόμενος στην εκτίμηση αυτή, την μέτρηση για την εσωτερική του θερμοκρασία τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή και το θερμοκρασιακό εύρος στο οποίο

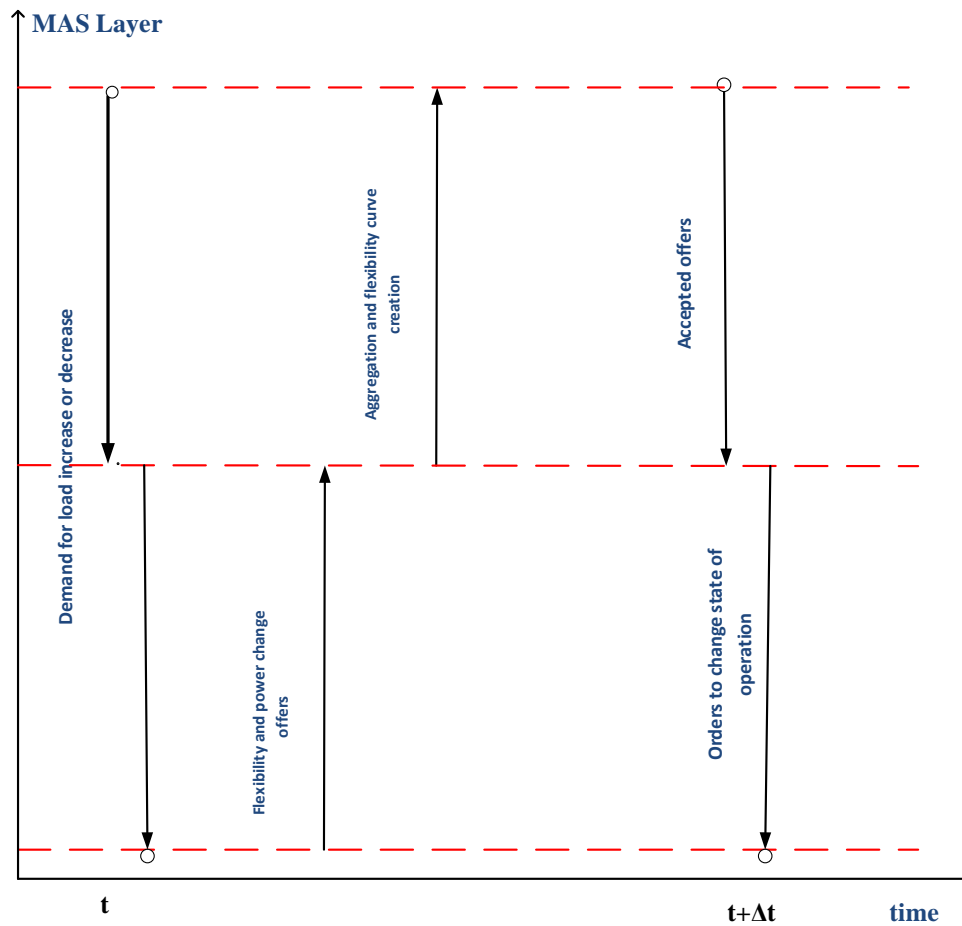
περιορίζεται η επιτρεπτή θερμοκρασία του, υπολογίζει την τιμή της ευελιξίας του reefer. Η υπολογιζόμενη τιμή της ευελιξίας και η αντίστοιχη μεταβολή της ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος στέλνονται ως είσοδος από τους μεμονωμένους R/A στον RC/A, όπου σχηματίζονται οι καμπύλες ευελιξίας-μεταβολής ζήτησης ενέργειας, όπως περιγράφεται παρακάτω. Επιπλέον, οι μεμονωμένοι πράκτορες των reefers λαμβάνουν εντολές σχετικά με την μεταβολή της κατάστασης λειτουργίας τους από τον PM/A μέσω του RC/A και προσαρμόζονται σε αυτές ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας του λιμένα.

2. *Ο πράκτορας πλοίου (Vessel Agent - V/A)* είναι υπεύθυνος για τον υπολογισμό της ισχύος που πρέπει να παράγεται από τις βοηθητικές γεννήτριες του σκάφους, καθώς και της ηλεκτρικής ισχύος που πρέπει να καταναλώνεται για τις ενεργειακές ανάγκες του σκάφους από το ηλεκτρικό δίκτυο του λιμένα. Αυτές οι τιμές προκύπτουν από την ελαχιστοποίηση του συνολικού ενεργειακού κόστους των πλοίων που είναι συνδεδεμένα στις εγκαταστάσεις τροφοδοσίας του λιμένα υπό περιορισμούς που αφορούν τα τεχνικά και λειτουργικά όρια του συστήματος και τα όρια εκπομπών αερίων θερμοκηπίου σε κάθε χρονικό διάστημα ελέγχου. Στη συνέχεια, η τιμή ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος του πλοίου από το τοπικό δίκτυο του λιμένα αποστέλλεται από κάθε πράκτορα πλοίου στον VC/A.
3. *Ο πράκτορας της ομάδας πρακτόρων εμπορευματοκιβωτίων (Reefers' Cluster Agent - RC/A)* είναι ο πράκτορας που τοποθετείται ιεραρχικά μεταξύ των μεμονωμένων πρακτόρων που έχουν ανατεθεί σε κάθε reefer και τον PM/A. Ο RC/A είναι υπεύθυνος για τη συγκέντρωση των επιμέρους αποκρίσεων των μεμονωμένων πρακτόρων των reefers, που αφορούν τις τιμές της ευελιξίας και της μεταβολής ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος, την ταξινόμηση αυτών των δεδομένων και τον διαχωρισμό τους, με βάση το πρόσημο των τιμών της δυνατότητας μεταβολής της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, προκειμένου, τελικά, να δημιουργηθούν δύο καμπύλες ευελιξίας-μεταβολής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, μία με θετικές τιμές της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και μία με αρνητικές. Όπως αναφέρθηκε, οι καμπύλες αυτές αποτελούν την έξοδο του RC/A προς τον PM/A. Ο πράκτορας της ομάδας πρακτόρων εμπορευματοκιβωτίων λαμβάνει επίσης τις εντολές σχετικά με την προσαρμογή της κατάστασης λειτουργίας των μεμονωμένων πρακτόρων των reefers κατά το επόμενο χρονικό διάστημα από τον PM/A και στέλνει τις εντολές αυτές στους τοπικούς πράκτορες που αντιστοιχούν σε κάθε reefer.
4. *Ο πράκτορας της ομάδας πρακτόρων των πλοίων (Vessels' Cluster Agent - VC/A)* είναι ένας πράκτορας ιεραρχικά τοποθετημένος πάνω από τους μεμονωμένους πράκτορες που αντιστοιχούν σε κάθε πλοίο και στο ίδιο επίπεδο με τον RC/A. Ο πράκτορας της ομάδας πρακτόρων των πλοίων είναι υπεύθυνος για τη συγκέντρωση των αποκρίσεων από τους τοπικούς πράκτορες των πλοίων σχετικά με την ηλεκτρική ισχύ που καταναλώνεται

από τα σκάφη που βρίσκονται αγκυροβολημένα στον λιμένα και τροφοδοτούνται με ενέργεια από το ηλεκτρικό δίκτυο του λιμένα. Στη συνέχεια, ο VC/A υπολογίζει τη συνολική ισχύ που καταναλώνεται από τα πλοία που συνδέονται με τις εγκαταστάσεις τροφοδοσίας ηλεκτρικού ρεύματος του λιμένα μέσω του συστήματος SPS κατά το επόμενο χρονικό διάστημα. Η τιμή της συνολικής καταναλισκόμενης ισχύος από τα πλοία μέσω του SPS αποτελεί και την απόκριση του VC/A και είσοδο στον PM/A. Ο PM/A αξιοποιεί τις πληροφορίες αυτές προκειμένου να καθορίσει τις απαιτούμενες ενέργειες και αλλαγές στο σύστημα, έτσι ώστε να αποσβεστεί η διαφορά της πραγματικής παραγωγής αιολικής ενέργειας και της ζήτησης των συνδεδεμένων πλοίων από την προκαθορισμένη τιμή τους, τηρώντας παράλληλα τον ενεργειακό προγραμματισμό του λιμένα.

5. *Ο πράκτορας του αιολικού πάρκου του λιμένα (Wind Park Agent - WP/A) είναι υπεύθυνος για την πρόβλεψη της παραγωγής αιολικής ενέργειας και για την καταγραφή της πραγματικής παραγωγής αιολικής ενέργειας. Στη συνέχεια, ο WP/A στέλνει αυτές τις πληροφορίες στον PM/A, προκειμένου να καθοριστούν οι απαραίτητες αλλαγές στο δίκτυο του λιμένα για να καλυφθούν οι ανάγκες του λιμένα.*
6. *Ο κεντρικός πράκτορας ελέγχου και διαχείρισης του συστήματος ενέργειας του λιμένα (Port Manager Agent - PM/A) τοποθετείται στο ανώτερο επίπεδο ιεραρχίας και λειτουργεί ως το κέντρο ελέγχου του προτεινόμενου πολυπρακτορικού συστήματος. Ο PM/A λαμβάνει ως είσοδο την καμπύλη ευελιξίας-ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας από τον πράκτορα της ομάδας πρακτόρων εμπορευματοκιβωτίων (Reefers' Cluster Agent - RC/A) καθώς και τις τιμές της πραγματικής και της προβλεπόμενης παραγωγής αιολικής ενέργειας για το επόμενο χρονικό διάστημα από τον πράκτορα του πάρκου αιολικής ενέργειας του λιμένα (Wind Park Agent - WP/A). Ο κεντρικός πράκτορας ελέγχου συγκεντρώνει αυτές τις πληροφορίες και βασιζόμενος σε αυτές υπολογίζει μία οριακή τιμή ευελιξίας χρησιμοποιώντας τις καμπύλες ευελιξίας-ζήτησης ενέργειας των reefers. Στη συνέχεια, ο PM/A στέλνει μέσω του RC/A κατάλληλες εντολές σε κάθε reefer με τιμή ευελιξίας μεγαλύτερη της οριακής τιμής, να αλλάξει την κατάσταση λειτουργίας του, προκειμένου να αποσβεστούν οι αποκλίσεις της πραγματικής παραγωγής αιολικής ενέργειας και της πραγματικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας από τα αγκυροβολημένα πλοία από τις αντίστοιχες προβλεπόμενες τιμές τους.*

Στο προτεινόμενο σύστημα πολλαπλών πρακτόρων, οι πράκτορες δεν μπορούν να επικοινωνούν με άλλους πράκτορες που βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο ιεραρχίας, αλλά μπορούν να επικοινωνούν μόνο με τους πράκτορες που τοποθετούνται στο ακριβώς επόμενο υψηλότερο ή χαμηλότερο επίπεδο ιεραρχίας, ενώ ο πράκτορας του αιολικού πάρκου επικοινωνεί απευθείας με τον κεντρικό πράκτορα ελέγχου. Μία σχηματική απεικόνιση της επικοινωνίας των πρακτόρων στα διάφορα επίπεδα ιεραρχίας ως προς τον χρόνο φαίνεται στην Εικόνα 5.2.



Εικόνα 5.2 Η επικοινωνία των διαφόρων πρακτόρων στα διαφορετικά επίπεδα ιεραρχίας ως προς τον χρόνο στην προτεινόμενη δομή πολυπρακτορικού συστήματος

5.2. Μαθηματική διατύπωση του προβλήματος

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται αναλυτικά η μαθητική μοντελοποίηση του προτεινόμενου συστήματος διαχείρισης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας ενός μεγάλου λιμένα σε πραγματικό χρόνο και οι εξισώσεις των μοντέλων που χρησιμοποιούνται από κάθε πράκτορα.

5.2.1. Πράκτορας εμπορευματοκιβωτίου ελεγχόμενης θερμοκρασίας (R/A)

Το μοντέλο που περιγράφεται σε αυτή την παράγραφο χρησιμοποιείται από τους πράκτορες εμπορευματοκιβωτίου ελεγχόμενης θερμοκρασίας για να εκτιμηθεί η μεταβολή της εσωτερικής τους θερμοκρασίας, με βάση την κατάσταση λειτουργίας τους και τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Για την διατύπωση των εξισώσεων υπολογισμού της αύξησης της θερμοκρασίας του φορτίου μέσα στο reefer, γίνεται η υπόθεση ότι ολόκληρο το φορτίο αυξάνει τη θερμοκρασία του με τον ίδιο ρυθμό χωρίς να παρουσιάζονται τοπικές διαφορές θερμοκρασίας [18].

Σύμφωνα με το [18], όταν διακόπτεται η λειτουργία του i-οστού reefer για ένα χρονικό διάστημα, η αύξηση ΔT της εσωτερικής θερμοκρασίας του εμπορευματοκιβωτίου υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\Delta T(i, t) = \Delta T_{amb} \cdot (1 - e^{-\frac{A \cdot k}{m \cdot c_p} \cdot t}) \quad (1)$$

Όπου t είναι το χρονικό διάστημα που το reefer δεν ψύχεται σε s, $\Delta T(i, t)$ είναι η μέση αύξηση της εσωτερικής θερμοκρασίας του i-οστού reefer μετά από χρόνο t σε °C, ΔT_{amb} είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της εσωτερικής θερμοκρασίας του reefer και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος σε °C, A είναι η επιφάνεια του εμπορευματοκιβωτίου σε m^2 , k είναι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας του reefer σε $W/m^2 \cdot K$, m είναι η μάζα του φορτίου του reefer σε kg και c_p είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα του προϊόντος που είναι αποθηκευμένο στο reefer σε $J/kg \cdot K$.

Όταν το i-οστό reefer ψύχεται για χρονικό διάστημα t , η μείωση ΔT της εσωτερικής θερμοκρασίας του εμπορευματοκιβωτίου υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση [18]:

$$\Delta T(i, t) = \frac{P(i) \cdot t}{m \cdot c_p} \quad (2)$$

Όπου t είναι η διάρκεια της περιόδου ψύξης του εμπορευματοκιβωτίου σε s, $\Delta T(i, t)$ είναι η μέση μείωση της εσωτερικής θερμοκρασίας του i-οστού reefer μετά από χρόνο t σε °C, $P(i)$ η ενέργεια που παρέχεται από το i-οστό reefer στο περιεχόμενο του προκειμένου να το ψύξει σε kW, A είναι η επιφάνεια του εμπορευματοκιβωτίου σε m^2 , m είναι η μάζα του φορτίου του reefer σε kg και c_p είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα του προϊόντος που είναι αποθηκευμένο στο reefer σε $J/kg \cdot K$.

Τα μοντέλα θερμοκρασίας που παρατίθενται παρακάτω χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της θερμοκρασιακής μεταβολής του i-οστού reefer κατά το επόμενο χρονικό διάστημα:

$$T(i, t + \Delta t) = T(i, t) - \Delta T(i, t), \text{ όταν το i-οστό reefer ψύχεται για διάστημα } t \quad (3)$$

$$T(i, t + \Delta t) = T(i, t) + \Delta T(i, t), \text{ όταν το i-οστό reefer δεν λειτουργεί για χρόνο } t \quad (4)$$

Όπου, $T(i, t)$ είναι η μέτρηση της θερμοκρασίας του i-οστού reefer στο χρόνο t σε °C, Δt είναι το χρονικό διάστημα σε s και $T(i, t + \Delta t)$ είναι η εκτίμηση της εσωτερικής θερμοκρασίας του i-οστού reefer στον χρόνο $t + \Delta t$.

Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα των θερμοκρασιακών μοντέλων χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της τιμής της ευελιξίας κάθε reefer να αλλάξει την κατάσταση λειτουργίας του και την ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας το επόμενο χρονικό διάστημα. Η ευελιξία του εμπορευματοκιβωτίου υπολογίζεται με βάση της εκτίμηση της εσωτερικής του θερμοκρασίας στον χρόνο $t + \Delta t$, καθώς και τη μέγιστη και ελάχιστη επιτρεπτή θερμοκρασία αποθήκευσης του περιεχομένου του.

Συγκεκριμένα, η ευελιξία του i-οστού reefer να αλλάξει την κατάσταση λειτουργίας του υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$flexibility(i, t) = \begin{cases} \frac{T_{max}(i) - T(i, t + \Delta t)}{T_{max}(i) - T_{min}(i)} & , \text{ if } StO(i, t) = 1 \\ \frac{T(i, t + \Delta t) - T_{min}(i)}{T_{max}(i) - T_{min}(i)} & , \text{ if } StO(i, t) = 0 \\ 0 & , \text{ if } (t - t_{on}(i)) < t_{on_min} \text{ or } (t - t_{off}(i)) < t_{off_min} \end{cases} \quad (5)$$

Όπου, $T_{min}(i)$ η ελάχιστη επιτρεπτή θερμοκρασία αποθήκευσης του περιεχομένου του i-οστού reefer σε °C, $T_{max}(i)$ η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία αποθήκευσης του περιεχομένου του i-οστού reefer σε °C, $t_{on}(i)$ είναι το χρονικό διάστημα κατά το οποίο το i-οστό reefer βρίσκεται συνεχώς σε λειτουργία σε s, $t_{off}(i)$ είναι το χρονικό διάστημα κατά το οποίο το i-οστό reefer βρίσκεται συνεχώς εκτός λειτουργίας σε s, t_{on_min} είναι το ελάχιστο χρονικό διάστημα κατά το οποίο το i-οστό reefer πρέπει να βρίσκεται συνεχώς σε λειτουργία πριν αλλάξει κατάσταση λειτουργίας για τεχνικούς λόγους σε s, t_{off_min} είναι το ελάχιστο χρονικό διάστημα κατά το οποίο το i-οστό reefer πρέπει να βρίσκεται συνεχώς εκτός λειτουργίας πριν αλλάξει κατάσταση λειτουργίας για τεχνικούς λόγους σε s και $StO(i, t)$ είναι η κατάσταση λειτουργίας του i-οστού reefer στον χρόνο t και η οποία ορίζεται ως ακολούθως:

$$StO(i, t) = \begin{cases} 1, & \text{αν το } i - \text{οστό reefer βρίσκεται σε λειτουργία τον χρόνο } t \\ 0, & \text{αν το } i - \text{οστό reefer βρίσκεται εκτός λειτουργίας τον χρόνο } t \end{cases} \quad (6)$$

Η ευελιξία ενός reefer να αλλάξει την κατάσταση λειτουργίας του και η αντίστοιχη μεταβολή στην ζήτησή του για το επόμενο χρονικό διάστημα αποτελεί την προσφορά κάθε R/A στον RC/A. Η μεταβολή στην ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος του i-οστού reefer κατά το επόμενο χρονικό διάστημα ορίζεται ως εξής:

$$\Delta P_r(i, t + \Delta t) = \begin{cases} P_r(i, t), & \text{if } StO(i, t) = 0 \\ -P_r(i, t), & \text{if } StO(i, t) = 1 \end{cases} \quad (7)$$

Όπου $P_r(i, t)$ είναι η ηλεκτρική ισχύς που καταναλώνεται από το i-οστό reefer τον χρόνο t.

5.2.2. Πράκτορας πλοίου (V/A)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, από κάθε πράκτορα πλοίου επιλύεται ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης του συνολικού ενεργειακού κόστους των πλοίων για τον υπολογισμό της βέλτιστης λειτουργίας των βοηθητικών μηχανών του πλοίου και της κατανάλωσης ηλεκτρικής ισχύος από τα πλοία, παρεχόμενης από το δίκτυο του λιμένα. Η βελτιστοποίηση γίνεται υπό περιορισμούς εκπομπής ρύπων από την λειτουργία των γεννητριών του πλοίου. Οι εξισώσεις και τα μοντέλα που αφορούν αυτό το πρόβλημα ελαχιστοποίησης παρατίθενται σε αυτή την παράγραφο.

Το συνολικό ενεργειακό κόστος για την τροφοδοσία των πλοίων που βρίσκονται αγκυροβολημένα στο λιμάνι, που σχετίζεται τόσο με την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας, όσο και με το κόστος καυσίμου ελαχιστοποιείται. Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος είναι το άθροισμα του ενεργειακού κόστους όλων των πλοίων που βρίσκονται αγκυροβολημένα στο λιμάνι τον χρόνο t:

$$C_{vs}(t) = \sum_i^{NV} C_v(i, t) \quad (8)$$

Όπου NV είναι ο αριθμός των πλοίων που είναι αγκυροβολημένα στο λιμάνι και $C_v(i,t)$ σε € είναι το συνολικό ενεργειακό κόστος του i-οστού πλοίου κατά τον χρόνο t και υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$C_v(i,t) = P_l(i,t) \cdot E_c(t) \cdot \Delta t + FC(i,t) \quad (9)$$

Όπου $P_l(i,t)$ σε MW είναι η ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο του λιμένα που καταναλώνεται από το i-οστό πλοίο τον χρόνο t, $E_c(t)$ σε €/MWh είναι η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος τον χρόνο t, Δt είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο εξεταζόμενων χρονικών στιγμών σε s και $FC(i,t)$ σε € είναι το κόστος καυσίμου του i-οστού πλοίου τον χρόνο t, το οποίο προκύπτει από την ακόλουθη συνάρτηση:

$$FC(i,t) = a(i) \cdot P_g(i,t)^2 + b(i) \cdot P_g(i,t) + c(i) \quad (10)$$

Όπου $P_g(i,t)$ σε MW είναι η ποσότητα ενέργειας που καταναλώνεται από το i-οστό πλοίο τον χρόνο t και παράγεται από τις βοηθητικές μηχανές του πλοίου και $a(i)$ σε €/MW², $b(i)$ σε €/MW και $c(i)$ σε € είναι σταθεροί συντελεστές της συνάρτησης κόστους καυσίμου του i-οστού πλοίου.

Ωστόσο, το άθροισμα της ενέργειας που καταναλώνεται από το i-οστό πλοίο και μεταφέρεται από το ηλεκτρικό δίκτυο του λιμένα με αυτή που παράγεται από τις βοηθητικές μηχανές του πλοίου θα πρέπει να είναι ίσο με την ενέργεια $L(i,t)$ που είναι η απαραίτητη ενέργεια για τις δραστηριότητες και τη λειτουργία του πλοίου όταν αυτό βρίσκεται αγκυροβολημένο στον λιμένα σε MW:

$$P_l(i,t) + P_g(i,t) = L(i,t) \quad (11)$$

Επιπλέον, ένα σύνολο τεχνικών περιορισμών του συστήματος θα πρέπει να ικανοποιούνται:

$$P_{gmin}(i) < P_g(i,t) < P_{gmax}(i) \quad (12)$$

$$P_{lmin}(i) < P_l(i,t) < P_{lmax}(i) \quad (13)$$

όπου $P_{gmin}(i)$ και $P_{gmax}(i)$ είναι τα λειτουργικά όρια της γεννήτριας του i-οστού πλοίου και $P_{lmin}(i)$ και $P_{lmax}(i)$ είναι η ελάχιστη και μέγιστη ικανότητα μεταφοράς της γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας του λιμένα, αντίστοιχα.

Οι παρακάτω περιορισμοί εξασφαλίζουν τον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στα όρια του λιμένα από τα πλοία:

$$Em(i,t) < e_l(i) \quad (14)$$

$$\sum_i^{NV} Em(i,t) < E_l \quad (15)$$

Όπου E_l είναι το όριο των συνολικών εκπομπών αερίων ρύπων στα όρια του λιμένα, $e_l(i)$ είναι το όριο εκπομπών αερίων ρύπων του i-οστού πλοίου και $Em(i,t)$ είναι η εκτίμηση των αερίων ρύπων που εκπέμπονται από το i-οστό πλοίο τον χρόνο t και υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$Em(i,t) = a_m(i) \cdot P_g(i,t)^2 + b_m(i) \cdot P_g(i,t) + c_m(i) \quad (16)$$

Όπου $a_m(i)$ σε ton/MW^2 , $b_m(i)$ σε ton/MW και $c_m(i)$ σε ton είναι σταθεροί συντελεστές της συνάρτησης παραγόμενων αερίων ρύπων του i -οστού πλοίου.

5.2.3. Πράκτορας της ομάδας πρακτόρων πλοίων (VC/A)

Ο πράκτορας της ομάδας πρακτόρων πλοίων συγκεντρώνει τις απαντήσεις από τους μεμονωμένους πράκτορες πλοίων σχετικά με την ηλεκτρική ενέργεια που θα καταναλωθεί από τα πλοία από το ηλεκτρικό δίκτυο του λιμένα. Στη συνέχεια, ο VC/A υπολογίζει τη συνολική ενέργεια που θα καταναλωθεί από τα πλοία που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο τροφοδοσίας ηλεκτρικής ενέργειας του λιμένα στο επόμενο χρονικό διάστημα, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$P_v(t + \Delta t) = \sum_i^{NV} P_l(i, t) \quad (17)$$

Οι πληροφορίες αυτές παρέχονται στον PM/A, προκειμένου να αποφασίσει τις απαραίτητες ενέργειες για την απόσβεση των αποκλίσεων της πραγματικής παραγωγής αιολικής ενέργειας και της πραγματικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας από τα αγκυροβολημένα πλοία από τις αντίστοιχες τιμές της πρόβλεψής τους.

5.2.4. Κεντρικός πράκτορας διαχείρισης του λιμένα (PM/A)

Ο κεντρικός πράκτορας διαχείρισης του συστήματος του λιμένα δέχεται ως είσοδο την καμπύλη ευελιξίας-μεταβολής της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας των reefer από τον RC/A και με βάση αυτή προσδιορίζει την οριακή τιμή της ευελιξίας. Η οριακή αυτή τιμή καθορίζεται, έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι ενεργειακές ανάγκες του λιμένα με κατάλληλη μεταβολή της κατάστασης λειτουργίας των reefers με τιμή ευελιξίας μεγαλύτερη της οριακής.

Το σημείο ρύθμισης του λιμένα θα είναι η διαφορά της προγραμματισμένης κατανάλωσης ενέργειας από τα εμπορευματοκιβώτια και τα πλοία που βρίσκονται στον λιμένα στον χρόνο t με την πρόβλεψη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του αιολικού πάρκου και υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$\Delta P_{port}(t) = P_{reefers/sche}(t) + P_{vessels/sche}(t) - P_{fwind}(t) \quad (18)$$

Όπου $P_{reefers/sche}(t)$ και $P_{vessels/sche}(t)$ είναι η προγραμματισμένη κατανάλωση ενέργειας από τα εμπορευματοκιβώτια και τα πλοία που βρίσκονται στον λιμένα, αντίστοιχα, ενώ $P_{fwind}(t)$ είναι η πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής. Οι παραπάνω ποσότητες υπολογίζονται κατά τη διαδικασία πρόβλεψης ζήτησης της επόμενης ημέρας.

Στην προτεινόμενη μέθοδο ελέγχου, η συνολική ενέργεια που απαιτείται να καταναλωθεί από τα reefers για την επίτευξη του στόχου που περιγράφεται παραπάνω υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\Delta P_{set}(t + \Delta t) = \Delta P_{port}(t + \Delta t) - P_v(t + \Delta t) - P_{reef}(t) + P_{wind}(t + \Delta t) \quad (19)$$

Όπου $P_{wind}(t+\Delta t)$ είναι η πραγματική παραγωγή ενέργειας από το αιολικό πάρκο και $P_{reef}(t)$ είναι η συνολική ενέργεια που καταναλώνεται από τα reefers που βρίσκονται σε λειτουργία τον χρόνο t και υπολογίζεται ως εξής:

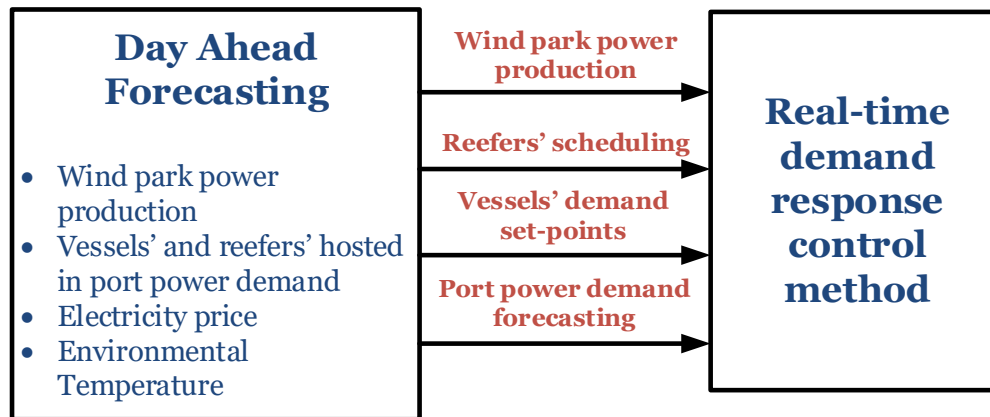
$$P_{reef}(t) = \sum_i^{NR} StO(i, t) \cdot p_r(i) \quad (20)$$

Όπου $p_r(i)$ είναι η ισχύς που καταναλώνεται από το i -οστό reefer, όταν αυτό βρίσκεται σε λειτουργία.

Οι εξισώσεις που παρατίθενται σε αυτήν την ενότητα χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση του αλγορίθμου που περιγράφεται αναλυτικά στην επόμενη ενότητα.

5.3. Αλγόριθμος επίλυσης του προτεινόμενου μοντέλου

Στην προτεινόμενη μέθοδο ελέγχου της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας ενός λιμένα σε πραγματικό χρόνο, διάφορα μεγέθη που χρησιμοποιούνται στον αλγόριθμο της μεθόδου προκύπτουν από τη διαδικασία πρόβλεψης για την επόμενη ημέρα (Day Ahead Scheduling – DAS), όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.3. Ανάλυση του βέλτιστου ενεργειακού προγραμματισμού ενός μεγάλου πλήρως εξηλεκτρισμένου λιμένα γίνεται στην [2]. Συγκεκριμένα, ο κεντρικός πράκτορας ελέγχου του λιμένα λαμβάνει την πρόβλεψη της παραγωγής ισχύος του αιολικού πάρκου, που εκτιμάται κατά την διαδικασία πρόβλεψης για την επόμενη ημέρα και την πραγματική τιμή της παραγωγής ισχύος από το αιολικό πάρκο από τον WP/A και στη συνέχεια, η τιμή ρύθμισης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας του λιμένα υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (18), λαμβάνοντας υπόψιν τις πληροφορίες που παρέχονται από τον WP/A και την προγραμματισμένη από την πρόβλεψη της επόμενης ημέρας κατανάλωση ενέργειας από τα εμπορευματοκιβώτια και τα πλοία που βρίσκονται στο λιμάνι. Όσον αφορά την προγραμματισμένη κατανάλωση των reefers θεωρείται πως λειτουργούν συνεχώς στο 20% της ονομαστικής τους ισχύος. Η προγραμματισμένη κατανάλωση ενέργειας από τα πλοία προκύπτει επιλύοντας ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης αντίστοιχο με αυτό που επιλύεται από κάθε V/A και περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο, θεωρώντας ως φορτίο αναφοράς των πλοίων, τις τιμές για το φορτίο των πλοίων που προκύπτουν από την πρόβλεψη για την επόμενη ημέρα.



Εικόνα 5.3 Συνδυασμός της μεθόδου ελέγχου ζήτησης ισχύος σε πραγματικό χρόνο με τη διαδικασία πρόβλεψης για την επόμενη ημέρα

Στη συνέχεια, από κάθε V/A επιλύεται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, προκειμένου να προσδιοριστεί η βέλτιστη τιμή της ενέργειας που θα καταναλωθεί από τα πλοία μέσω του συστήματος τροφοδοσίας των πλοίων από το ηλεκτρικό δίκτυο του λιμένα και εκείνης που θα παραχθεί από τη λειτουργία των βοηθητικών μηχανών του πλοίου. Ως φορτίο αναφοράς των πλοίων χρησιμοποιούνται οι τιμές του πραγματικού φορτίου των πλοίων. Το συνολικό ενεργειακό κόστος κάθε πλοίου, όπως αυτό ορίζεται από τις σχέσεις (8), (9) και (10) ελαχιστοποιείται υπό περιορισμούς που αφορούν τα τεχνικά όρια των συστημάτων και τις εκπομπές ρύπων των πλοίων, όπως αυτοί περιγράφονται στις σχέσεις (11) – (15). Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης παρέχονται ως είσοδο στον VC/A, όπου η συνολική ενέργεια που θα καταναλωθεί από τα πλοία μέσω του συστήματος τροφοδοσίας πλοίων του λιμένα υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση (17).

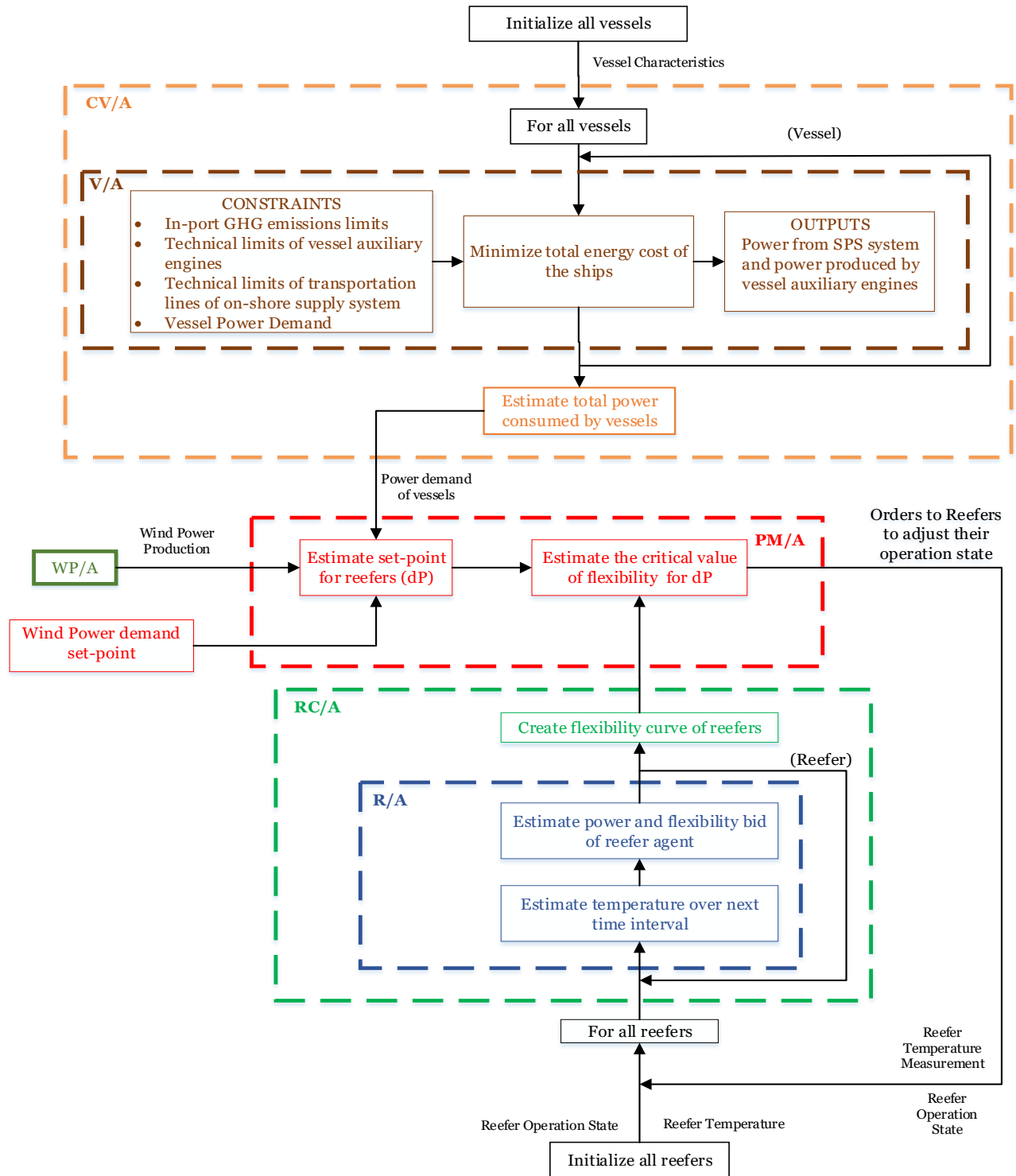
Η συνολική ενέργεια που θα καταναλωθεί από τα reefers, καθώς και η συνολική ισχύς που καταναλώνουν τα πλοία από το δίκτυο του λιμένα στέλνονται από τον RC/A και τον VC/A, αντίστοιχα, στον PM/A. Ο κεντρικός πράκτορας υπολογίζει τη συνολική ενέργεια που πρέπει να καταναλωθεί από τα reefers προκειμένου να επιτευχθεί η απόσβεση της διαφοράς μεταξύ πραγματικής παραγωγής αιολικής ενέργειας και της πρόβλεψης της παραγωγής αιολικής ενέργειας, καθώς και μεταξύ της πραγματικής ζήτησης ενέργειας των πλοίων και της τιμής πρόβλεψής της, σύμφωνα με τη σχέση (19). Η προκύπτουσα μεταβολή στο φορτίο αποστέλλεται σε κάθε R/A μέσω του RC/A.

Κάθε πράκτορας εμπορευματοκιβωτίου στέλνει στον RC/A την τιμή της ευελιξίας του να αλλάξει κατάσταση λειτουργίας και την επακόλουθη μεταβολή της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας από τη αλλαγή αυτή. Αρχικά, κάθε R/A υπολογίζει την

μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του περιεχομένου του reefer που ελέγχει στο επόμενο χρονικό διάστημα σύμφωνα με τη σχέση (1), αν το reefer βρίσκεται εκτός λειτουργίας και με τη σχέση (2) αν το reefer λειτουργεί. Έπειτα, η τιμή της θερμοκρασίας του προϊόντος που είναι αποθηκευμένο στο reefer το επόμενο χρονικό διάστημα υπολογίζεται σύμφωνα με τις εξισώσεις (3) και (4), όταν το reefer βρίσκεται εκτός λειτουργίας ή ψύχει το προϊόν, αντίστοιχα. Στη συνέχεια, η τιμή της ευελιξίας του reefer υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (5) και η αντίστοιχη μεταβολή στην ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας του προκύπτει από την εξίσωση (6). Ο RC/A λαμβάνει τις αποκρίσεις όλων των reefers, τις συγκεντρώνει, τις διαχωρίζει και τις ταξινομεί. Στη συνέχεια, δημιουργεί τις καμπύλες ευελιξίας-μεταβολής της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, με θετικές και αρνητικές τιμές μεταβολής της ζήτησης, αντίστοιχα. Στη συνέχεια, η καμπύλη ευελιξίας αποστέλλεται στον PM/A.

Ο PM/A χρησιμοποιεί την καμπύλη ευελιξίας-μεταβολής της ζήτησης των reefers για τον προσδιορισμό της οριακής τιμής της ευελιξίας, που αποτελεί την αντίστοιχη τιμή της ευελιξίας για την τιμή της ζήτησης ενέργειας που υπολογίζεται στην εξίσωση (19). Τα reefers με ευελιξία μεγαλύτερη της οριακής τιμής, θα πρέπει να αλλάξουν την κατάσταση λειτουργίας τους. Ο PM/A αποστέλλει τις εντολές που σχετίζονται με την αλλαγή της κατάστασης λειτουργίας των reefers στον RC/A, ο οποίος στη συνέχεια τις προωθεί στους μεμονωμένους R/As. Κάθε πράκτορας εμπορευματοκιβωτίου εκτελεί τις κατάλληλες ενέργειες προκειμένου να προσαρμοστεί στις εντολές του διαχειριστή και τελικά να επιτευχθεί ο στόχος της απόσβεσης των διαφορών μεταξύ της πρόβλεψης ζήτησης και παραγωγής και των πραγματικών τιμών τους.

Η υλοποίηση του συστήματος πολλαπλών πρακτόρων που περιγράφεται στην ενότητα 5.1 και των μοντέλων που αναλύονται στην ενότητα 5.2, καθώς και του αλγορίθμου που περιγράφεται στην παρούσα ενότητα προσομοιώθηκαν με την χρήση γλώσσας προγραμματισμού Matlab και ειδικών συναρτήσεων των βιβλιοθηκών της Matlab. Η διαδικασία προσομοίωσης της προτεινόμενης μεθόδου ελέγχου σε πραγματικό χρόνο φαίνεται σε ένα αναλυτικό διάγραμμα ροής στην Εικόνα 5.4.



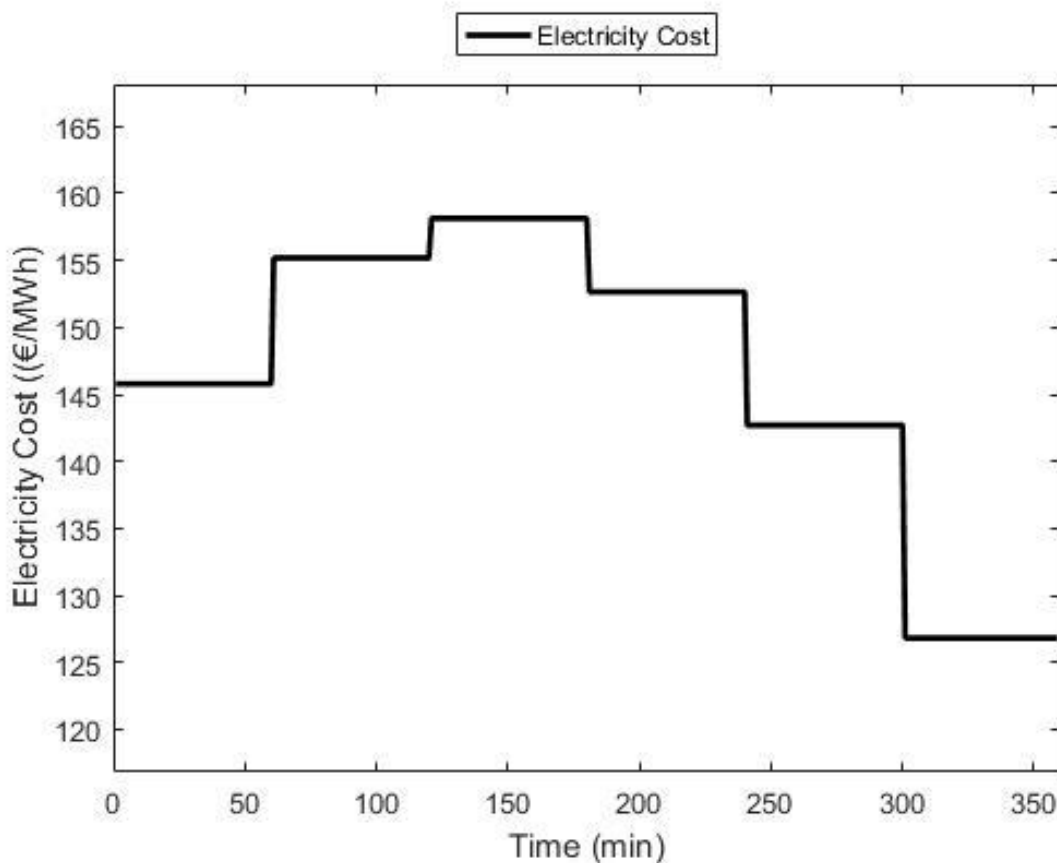
Εικόνα 5.4 Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου υλοποίησης της προτεινόμενης μεθόδου ελέγχου με πολυπρακτορικά συστήματα.

6. Εφαρμογή προτεινόμενης μεθόδου ελέγχου ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλου λιμένα σε πραγματικό χρόνο σε μελέτη περίπτωσης

Η προτεινόμενη μέθοδος ελέγχου της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλου λιμένα σε πραγματικό χρόνο εφαρμόστηκε σε μία ρεαλιστική μελέτη περίπτωσης ενός μεγάλου εμπορικού λιμένα με δυναμικότητα φιλοξενίας 5500 reefers και εγκαταστάσεις τροφοδοσίας ηλεκτρικής ενέργειας από το λιμενικό δίκτυο για 10 πλοία. Παράλληλα, το λιμάνι κατέχει και διαχειρίζεται ένα αιολικό πάρκο, του οποίου η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται για να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες του λιμένα ή διοχετεύεται προς πώληση στο τοπικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Η λειτουργία και ο έλεγχος της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας του δικτύου του λιμένα με την προτεινόμενη μέθοδο ελέγχου σε πραγματικό χρόνο προσομοιώθηκαν για διάστημα 6 ωρών.

Στη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης θεωρήθηκε πως η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος μεταβάλλεται κάθε μία ώρα. Συγκεκριμένα, οι τιμές του ηλεκτρικού ρεύματος που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη περίπτωσης φαίνονται στον Πίνακα 2 και στην Εικόνα 6.1.



Εικόνα 6.1 Εξέλιξη της τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης

Πίνακας 2 Τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος

Χρόνος της προσομοίωσης	1hr	2hr	3hr	4hr	5hr	6hr
Τιμή ηλεκτρικού ρεύματος (€/MWh)	145,8	155,2	158,2	152,7	142,7	126,8

Επιπλέον, όσον αφορά τα εμπορευματοκιβώτια ελεγχόμενης θερμοκρασίας, στην μελέτη περίπτωσης θεωρούνται δύο κατηγορίες reefers. Συγκεκριμένα, τα reefers που φιλοξενούνται στο λιμάνι μπορούν να έχουν μήκος 20ft ή and 40ft. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται συνοπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά των reefers.

Πίνακας 3 Χαρακτηριστικά των reefers που χρησιμοποιούνται στη μελέτη περίπτωσης

Μήκος των reefers (ft)	Εξωτερική επιφάνεια των reefers (m^2)	Εύρος της μάζας των reefers (kg)	Συντελεστής μετάδοσης θερμότητας ($W/m^2 \cdot K$)
20	60.0223	18000-21000	0.4
40	114.1638	22000-26000	0.4

Παράλληλα, θεωρούνται είκοσι διαφορετικά είδη προϊόντων που μπορούν να αποθηκευτούν στα εμπορευματοκιβώτια ελεγχόμενης θερμοκρασίας με διαφορετικό εύρος επιτρεπόμενων θερμοκρασιών μεταφοράς και αποθήκευσης και διαφορετικές θερμικές ιδιότητες. Οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά για κάθε διαφορετικό προϊόν καταγράφονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4 Θερμικές ιδιότητες και θερμοκρασίες μεταφοράς και αποθήκευσης των προϊόντων που χρησιμοποιούνται στην μελέτη περίπτωσης

Προϊόν	Ελάχιστη Θερμοκρασία Μεταφοράς (°C)	Μέγιστη Θερμοκρασία Μεταφοράς (°C)	Σημείο Ψύξης (°C)	Ειδική θερμοχωρητικότητα πάνω από το σημείο ψύξης (J/kg·K)	Ειδική θερμοχωρητικότητα πάνω από το σημείο ψύξης (J/kg·K)
Σπαράγγια	0.5	1.5	-0.6	4.03	1.79
Μπρόκολα	0.0	2.0	-0.6	4.01	1.82
Λαχανάκια Βρυξελλών	-3.0	-1.0	-0.8	3.90	1.91
Λάχανα	0.0	2.0	-0.9	4.02	1.85
Καρότα	0.0	2.0	-1.4	3.92	2.00
Αγγούρια	6.0	10.0	-0.5	4.09	1.71
Μελιτζάνες	8.0	10.0	-0.8	4.02	1.83
Κρεμμύδια	-1.0	1.0	-0.9	3.95	1.87
Πατάτες	4.0	6.0	-0.6	3.67	1.93
Σπανάκι	-1.0	0.0	-0.3	4.02	1.75
Ντομάτες	-1.0	7.0	-0.6	4.02	1.77
Αβοκάντο	1.0	9.0	-0.3	3.67	1.98
Πορτοκάλια	2	10	-0.8	1.96	3.81
Λεμόνια	10.0	12.0	-1.4	3.94	2.02
Πεπόνια	11.0	13.0	-1.1	3.99	1.87
Βακαλάος	-30.0	-17.0	-2.2	3.78	2.14
Μοσχαρίσιο Κρέας	-23.0	-20.0	-2.2	3.24	2.31
Χοιρινό Κρέας	-18.0	-15.0	-2.2	3.59	2.20
Ευρωπαϊκά Σταφύλια	-1.0	1.0	-2.1	3.70	2.16
Μήλα	-1.0	2.0	-1.1	3.81	1.98

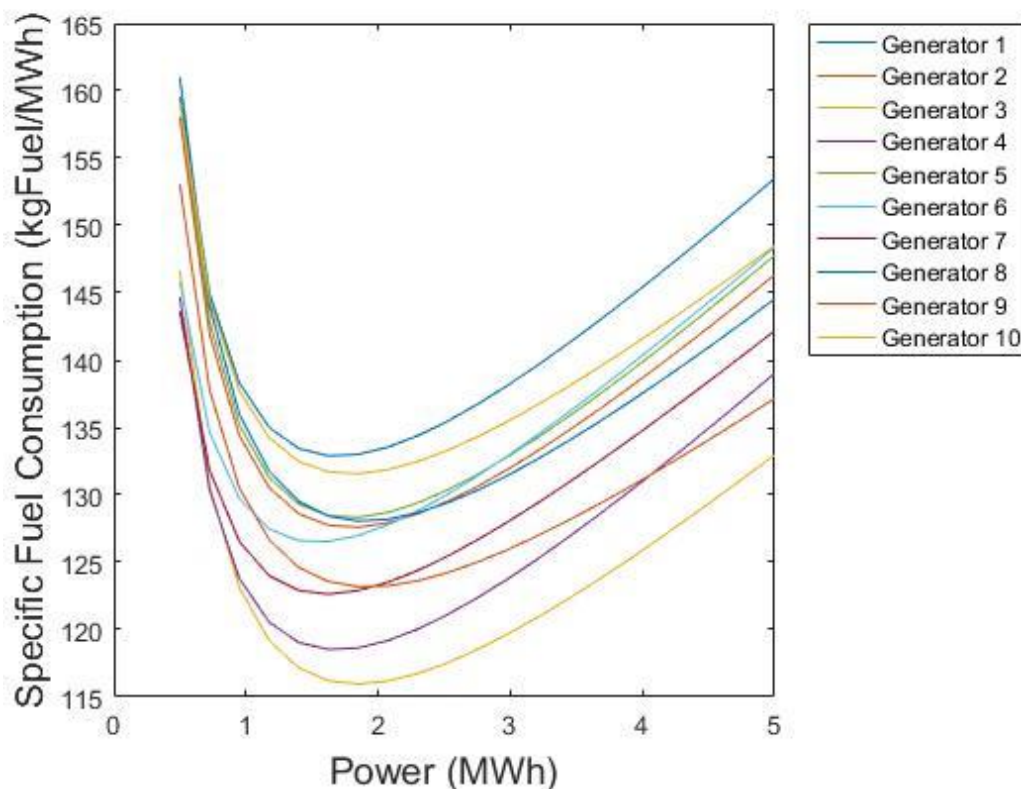
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στο λιμάνι υπάρχουν εγκαταστάσεις τροφοδοσίας ηλεκτρικής ενέργειας για 10 πλοία. Στην προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές χρονοσειρές ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε πλοίο, που αντιπροσωπεύουν διαφορετικούς τύπους πλοίων. Στην Εικόνα 6.2, φαίνονται οι καμπύλες ειδικού κόστους καυσίμου για τις βοηθητικές μηχανές των πλοίων που φιλοξενούνται σε αυτές τις θέσεις, ενώ στους Πίνακες 5 και 6, φαίνονται αναλυτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά και οι συναρτήσεις κόστους καυσίμου και οι συναρτήσεις εκπομπών ρύπων για κάθε μηχανή, αντίστοιχα. Τέλος, θεωρήθηκε πως οι εγκαταστάσεις σύνδεσης και τροφοδοσίας ενέργειας πλοίων από το ηλεκτρικό δίκτυο του λιμένα παρέχουν την δυνατότητα αμφίδρομης μεταφοράς ισχύος μέγιστης ονομαστικής τιμής 5MW.

Πίνακας 5. Τεχνικά χαρακτηριστικά και συναρτήσεις κόστους καυσίμου για κάθε βοηθητική μηχανή των πλοίων

	Μέγιστη Ονομαστική Ισχύς	Ελάχιστη ισχύς λειτουργίας	Συνάρτηση λειτουργίας κόστους
Βοηθητική μηχανή 1	5	0.5	$26.9 + 101.1P + 9.41P^2$
Βοηθητική μηχανή 2	5	0.5	$29.3 + 94.9P + 9.11P^2$
Βοηθητική μηχανή 3	5	0.5	$28.9 + 84.55P + 8.53P^2$
Βοηθητική μηχανή 4	5	0.5	$26.5 + 87.1P + 9.33P^2$
Βοηθητική μηχανή 5	5	0.5	$29.9 + 94.8P + 9.41P^2$
Βοηθητική μηχανή 6	5	0.5	$21.3 + 98.6P + 9.1P^2$
Βοηθητική μηχανή 7	5	0.5	$22.1 + 95.2P + 8.51P^2$
Βοηθητική μηχανή 8	5	0.5	$30.5 + 95.8P + 8.53P^2$
Βοηθητική μηχανή 9	5	0.5	$27.3 + 94.75P + 7.4P^2$
Βοηθητική μηχανή 10	5	0.5	$26.5 + 102P + 8.2P^2$

Πίνακας 6. Συναρτήσεις εκπομπών αερίων ρύπων των βοηθητικών μηχανών των πλοίων

Συνάρτηση εκπομπών αερίων ρύπων	
Βοηθητική μηχανή 1	$86 + 323.43P + 30.11P^2$
Βοηθητική μηχανή 2	$93.74 + 303.7P + 29.2P^2$
Βοηθητική μηχανή 3	$92.6 + 270.6P + 27.3P^2$
Βοηθητική μηχανή 4	$84.7 + 278.64P + 29.9P^2$
Βοηθητική μηχανή 5	$95.8 + 303.21P + 30.11P^2$
Βοηθητική μηχανή 6	$68.21 + 315.65P + 29.1P^2$
Βοηθητική μηχανή 7	$70.6 + 304.8P + 27.22P^2$
Βοηθητική μηχανή 8	$97.4 + 306.63P + 27.3P^2$
Βοηθητική μηχανή 9	$87.4 + 303.21P + 23.65P^2$
Βοηθητική μηχανή 10	$84.7 + 326.54P + 26.3P^2$

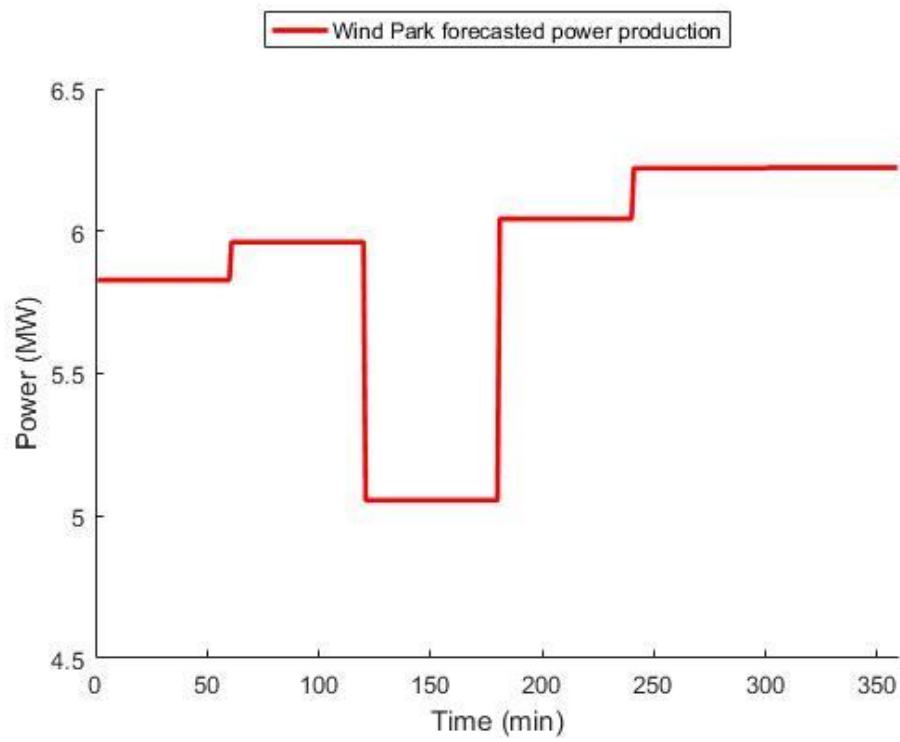


Εικόνα 6.2 Καμπύλες ειδικού κόστους καυσίμου για τις βοηθητικές μηχανές των πλοίων που θεωρήθηκαν στην παρούσα μελέτη περίπτωσης

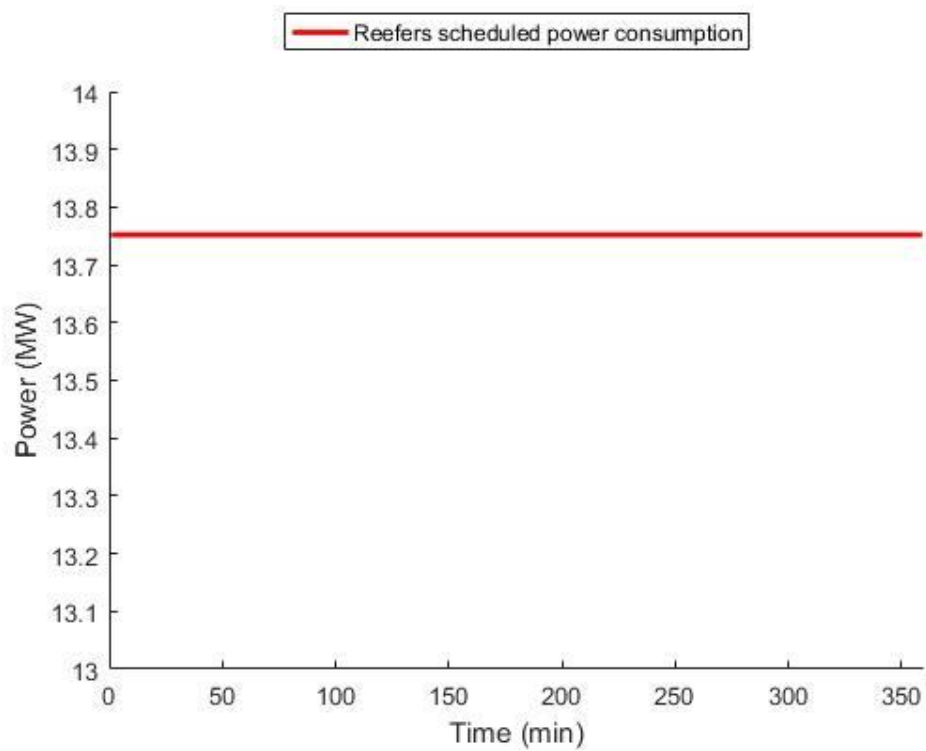
Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τ προσομοίωσης για δύο διαφορετικά σενάρια. Στο πρώτο σενάριο ουσιαστικά γίνεται προγραμματισμός και έλεγχος της ζήτησης ισχύος των διεργασιών του λιμένα χωρίς να λαμβάνονται υπόψιν οι περιορισμοί που αφορούν τις εκπομπές αερίων ρύπων από τα πλοία στα όρια του λιμένα. Στο δεύτερο σενάριο ενεργοποιούνται οι περιορισμοί που αφορούν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τα πλοία και ο έλεγχος της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας του λιμένα γίνεται με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να λειτουργεί με βέλτιστο και αποδοτικό τρόπο ικανοποιώντας το σύνολο των περιβαλλοντικών, οικονομικών, λειτουργικών και τεχνικών περιορισμών που διέπουν την λειτουργία του.

6.1. Αποτελέσματα προσομοίωσης για σενάριο λειτουργίας χωρίς όρια εκπομπών αερίων ρύπων

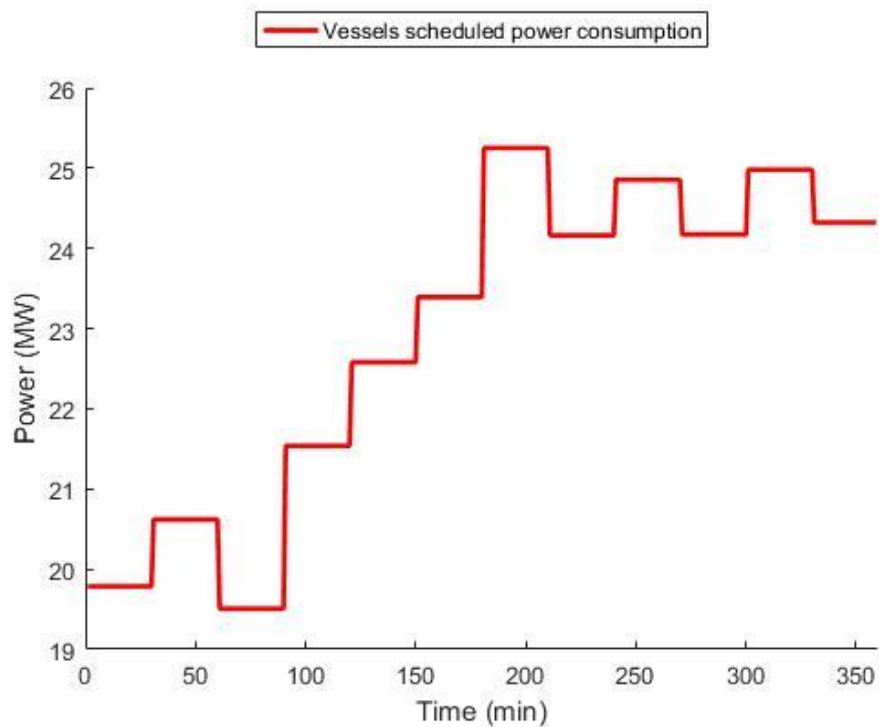
Στο πρώτο σενάριο προσομοιώνεται η λειτουργία του συστήματος του λιμένα, χωρίς να ενεργοποιούνται περιορισμοί που αφορούν τις εκπομπές αερίων ρύπων από τα πλοία που φιλοξενούνται σε αυτό. Ο έλεγχος της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται σε πραγματικό χρόνο, με τη μέθοδο που περιγράφεται αναλυτικά στις προηγούμενες ενότητες. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται αναλυτικά στις εικόνες 6.3 – 6.17.



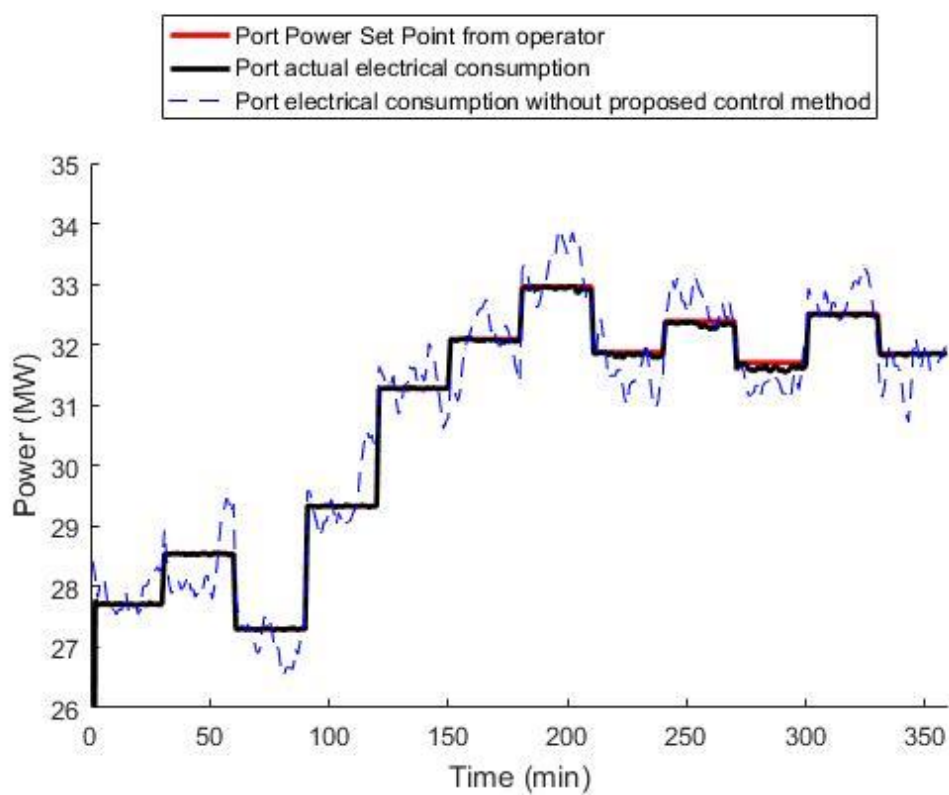
Εικόνα 6.4 Πρόβλεψη παραγωγής ισχύος από το αιολικό πάρκο (Σενάριο λειτουργίας 1)



Εικόνα 6.3 Πρόβλεψη κατανάλωσης ισχύος από τα reefers (Σενάριο λειτουργίας 1)

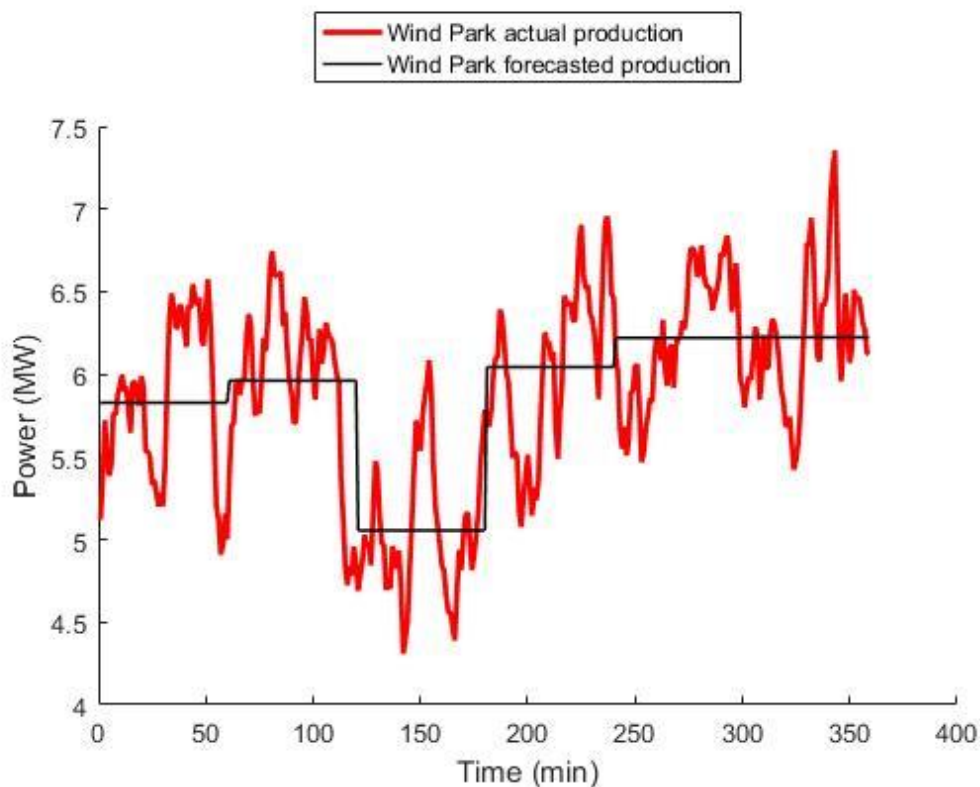


Εικόνα 6.5 Πρόβλεψη κατανάλωσης ισχύος από τα ελλιμενισμένα πλοία μέσω του SPS (Σενάριο λειτουργίας 1)



Εικόνα 6.6 Επιθυμητή κατανάλωση ενέργειας του λιμένα και συνολική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας με την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου ελέγχου και χωρίς αυτήν (Σενάριο λειτουργίας 1)

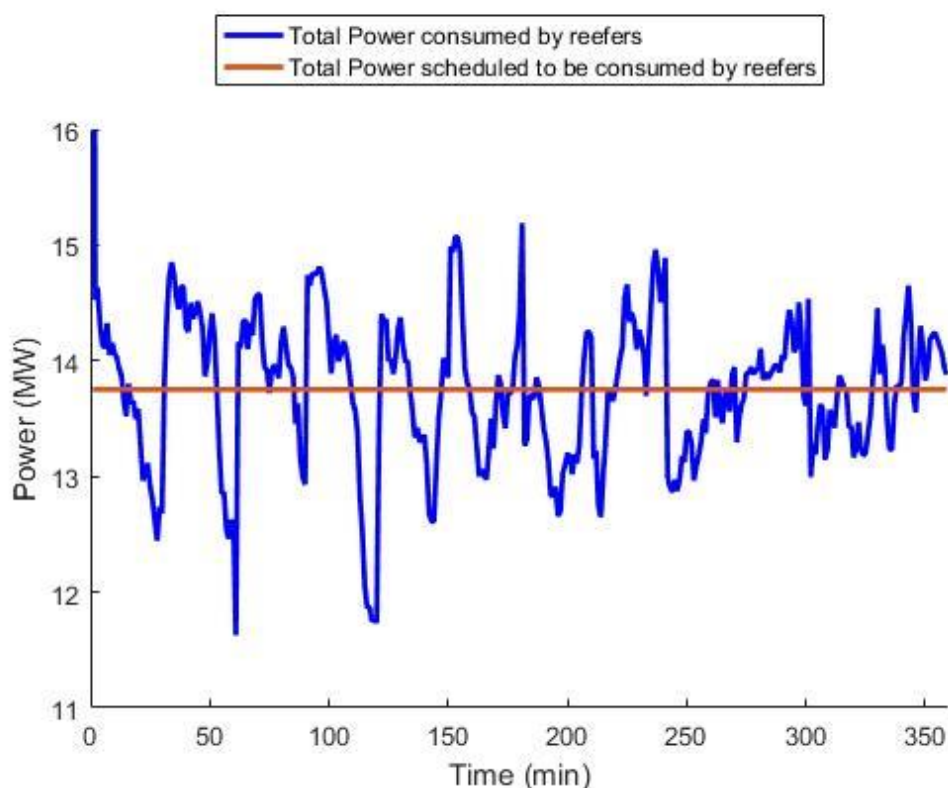
Στην Εικόνα 6.6 φαίνεται η επιθυμητή κατανάλωση ενέργειας, που προσδιορίζεται από τον κεντρικό πράκτορα ελέγχου του λιμένα, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ο στόχος της απόσβεσης των διαφορών μεταξύ της πρόβλεψης ζήτησης και παραγωγής και των πραγματικών τιμών τους. Η καμπύλη του διαγράμματος 6.6, προκύπτει από το άθροισμα των τριών καμπυλών στα διαγράμματα 6.3 – 6.5. Παράλληλα, φαίνεται η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος του λιμένα με την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου ελέγχου της ζήτησης σε πραγματικό χρόνο και χωρίς αυτήν. Από το διάγραμμα προκύπτει πως με την προτεινόμενη μέθοδο επιτυγχάνεται η ρύθμιση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας του λιμένα στην επιθυμητή τιμή, αφού οι δύο καμπύλες ταυτίζονται στο μεγαλύτερο μέρος της προσομοίωσης, ενώ και όταν δεν ταυτίζονται απόλυτα βρίσκονται πολύ κοντά. Ωστόσο, φαίνονται οι σημαντικές διαφορές ανάμεσα στην επιθυμητή συνολική ζήτηση ενέργειας του λιμένα σε σχέση με την τιμή της ζήτησης χωρίς την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου, που προκύπτουν από τη διαφορά της προβλεπόμενης αιολικής παραγωγής από την πραγματική παραγωγή και δευτερευόντως από την απόκλιση της πραγματικής ζήτησης των ελλιμενισμένων πλοίων από την τιμή της πρόβλεψης της .



Εικόνα 6.7 Πρόβλεψη παραγωγής ενέργειας από το αιολικό πάρκο και πραγματική τιμή αιολικής παραγωγής (Σενάριο λειτουργίας 1)

Στην Εικόνα 6.7 φαίνεται η καμπύλη της πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής και η καμπύλη της πραγματικής παραγωγής του αιολικού πάρκου. Η προτεινόμενη μέθοδος προσπαθεί, μεταξύ άλλων, να αποσβέσει τις αποκλίσεις μεταξύ της πρόβλεψης αιολικής παραγωγής και της πραγματικής τιμής της. Η τιμή της πρόβλεψης της παραγωγής του αιολικού πάρκου είναι σταθερή ανά ώρα, ενώ παρατηρείται πως αντίθετα η πραγματική παραγωγή του αιολικού πάρκου παρουσιάζει σημαντικές και

απότομες διακυμάνσεις. Συνεπώς, ο έλεγχος της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας του λιμένα είναι σημαντικός για την αποδοτική λειτουργία του συστήματος ισχύος του λιμένα.



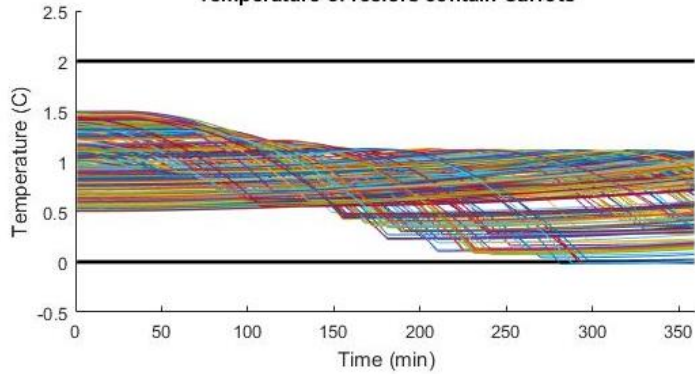
Εικόνα 6.8 Ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος από τα reefers με την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου ελέγχου και προγραμματισμένη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας από τα reefers (Σενάριο λειτουργίας 1)

Στην εικόνα 6.8 φαίνεται η συνολική κατανάλωση ενέργειας από τα reefers κατά το διάστημα της προσομοίωσης, καθώς και η προγραμματισμένη κατανάλωση ενέργειας από τα εμπορευματοκιβώτια που ορίζεται στο 20% της ονομαστικής του τιμής. Η καμπύλη της κατανάλωσης των reefers κινείται γύρω από την τιμή της πρόβλεψης κατανάλωσης ενέργειας από τα reefers και ρυθμίζεται σε πραγματικό χρόνο, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η ρύθμιση της ζήτησης ισχύος του λιμένα σε ένα προκαθορισμένο σημείο. Παράλληλα, από τη μορφή της καμπύλης προκύπτει πως τα reefers είναι που απορροφούν τις αποκλίσεις στην παραγωγή και κατανάλωση ισχύος, μεταβάλλοντας την κατάσταση λειτουργίας τους, ενώ τα πλοία λειτουργούν σχετικά αυτόνομα όσον αφορά την ευελιξία κατανάλωσης επιπλέον ενέργειας. Συνεπώς, η σημαντική ευελιξία που παρουσιάζουν τα εμπορευματοκιβώτια ελεγχόμενης θερμοκρασίας, λόγω του εύρους θερμοκρασιών στα οποία μπορούν να κινηθούν επηρεάζει τη μορφή της καμπύλης κατανάλωσης ενέργειας των reefers, που έχει μορφή παρόμοια με τη διαφορά της πραγματικής παραγωγής του αιολικού πάρκου από την τιμή της πρόβλεψης της.

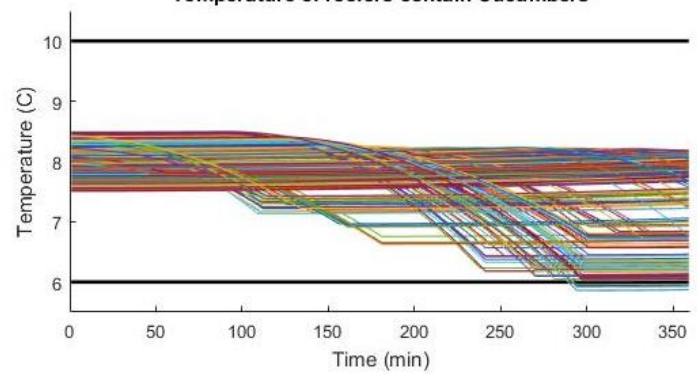
Στις εικόνες 6.9 – 6.13 φαίνεται η εξέλιξη των εσωτερικών θερμοκρασιών για κάθε διαφορετικό τύπο προϊόντος που αποθηκεύεται στα reefers κατά τη διάρκεια της

προσομοίωσης, καθώς και τα θερμοκρασιακά όρια μεταφοράς και αποθήκευσης των προϊόντων.

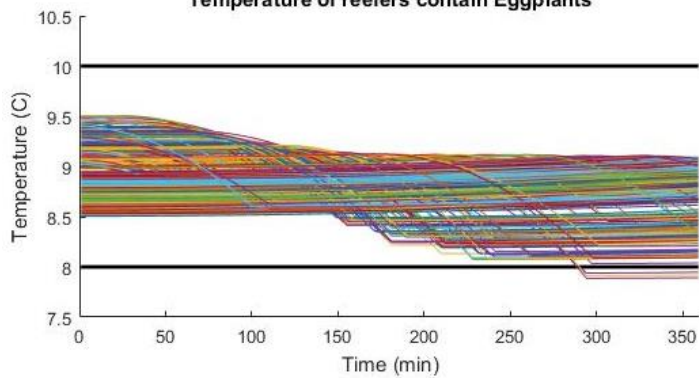
Temperature of reefers contain Carrots



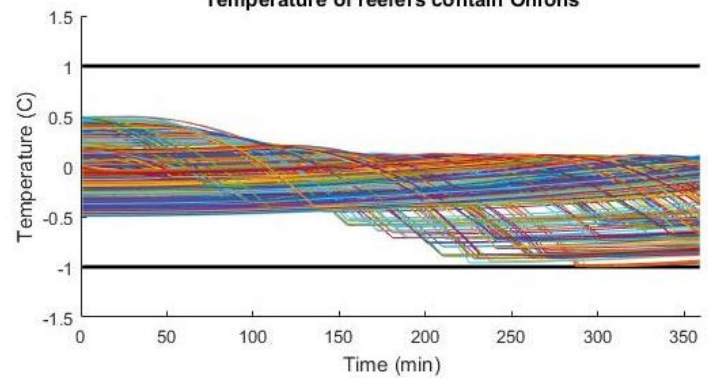
Temperature of reefers contain Cucumbers



Temperature of reefers contain Eggplants

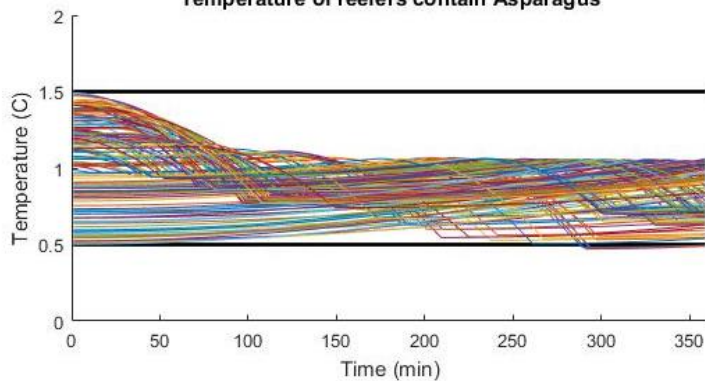


Temperature of reefers contain Onions

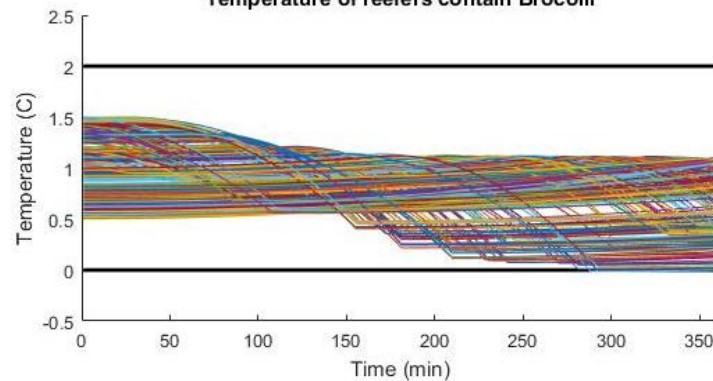


Εικόνα 6.10 Εξέλιξη των εσωτερικών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και θερμοκρασιακά όρια αποθήκευσης για τα reefers που περιέχουν καρότα, αγγούρια, μελιτζάνες και κρεμμύδια (Σενάριο λειτουργίας 1)

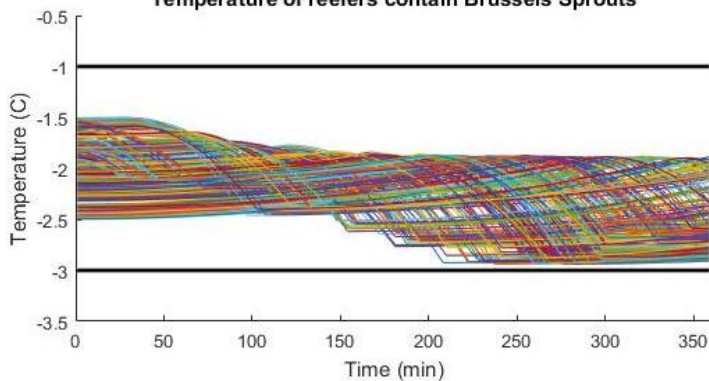
Temperature of reefers contain Asparagus



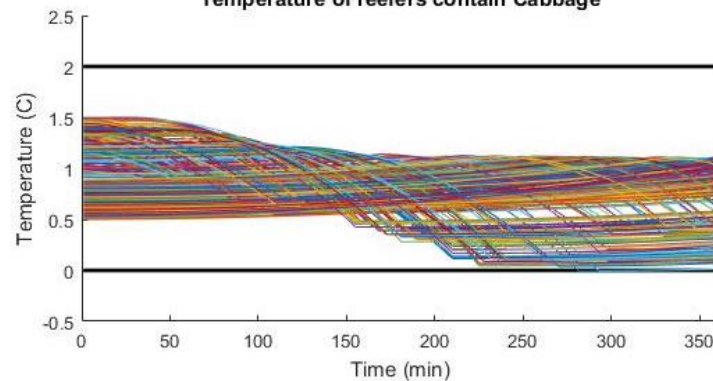
Temperature of reefers contain Broccoli



Temperature of reefers contain Brussels Sprouts

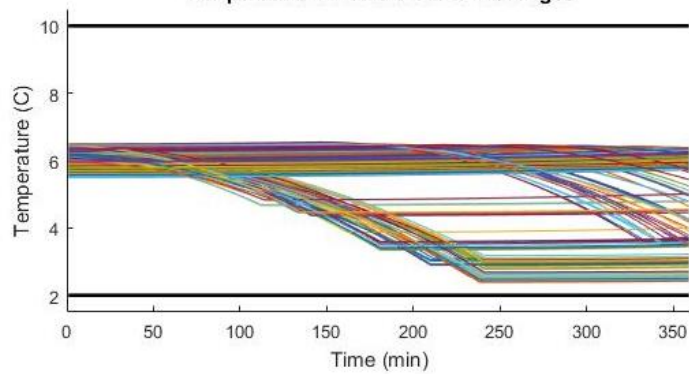


Temperature of reefers contain Cabbage

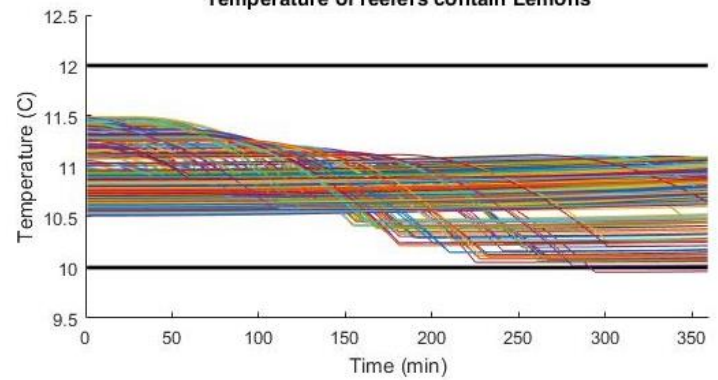


Εικόνα 6.9 Εξέλιξη των εσωτερικών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και θερμοκρασιακά όρια αποθήκευσης για τα reefers που περιέχουν σπαράγγια, μπρόκολα, λαχανάκια Βρυξελλών και λάχανα. (Σενάριο λειτουργίας 1)

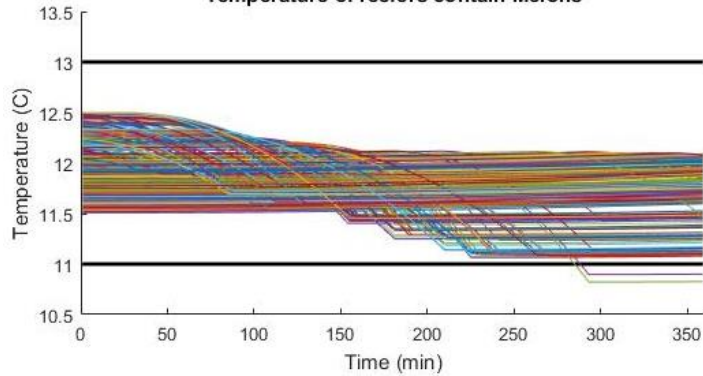
Temperature of reefers contain Oranges



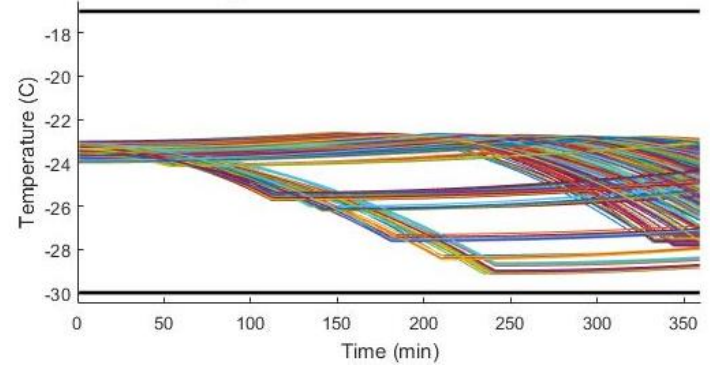
Temperature of reefers contain Lemons



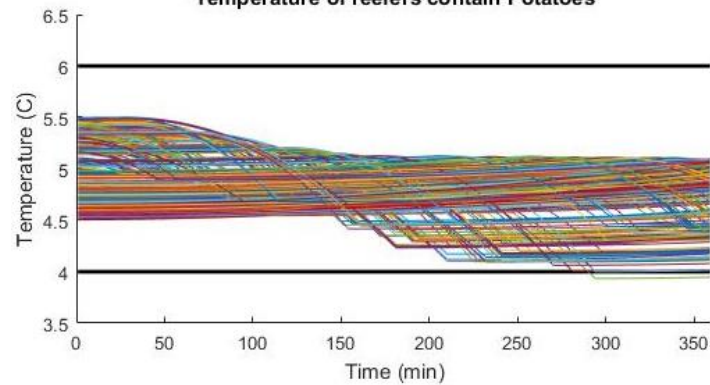
Temperature of reefers contain Melons



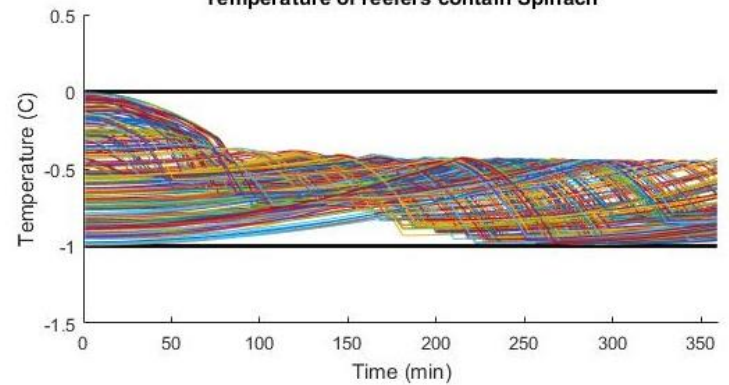
Temperature of reefers contain Cod Fish



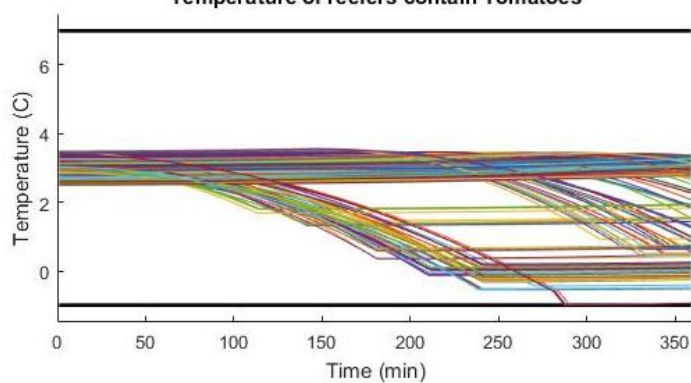
Temperature of reefers contain Potatoes



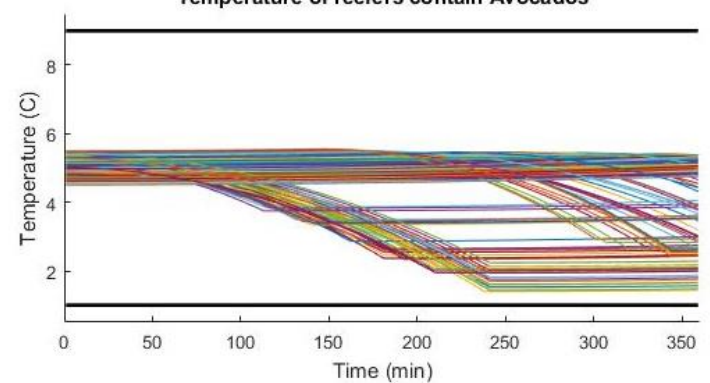
Temperature of reefers contain Spinach



Temperature of reefers contain Tomatoes

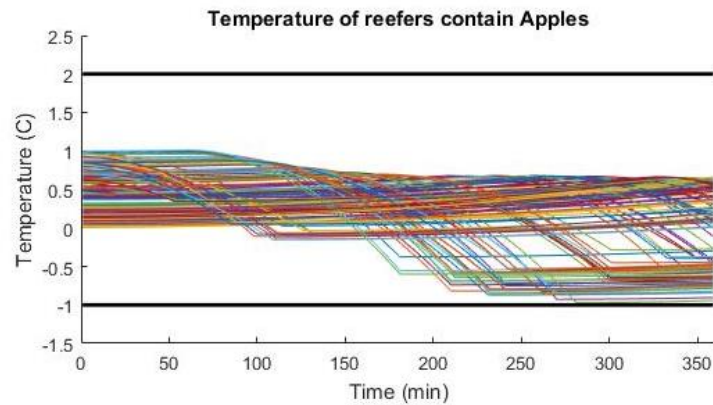
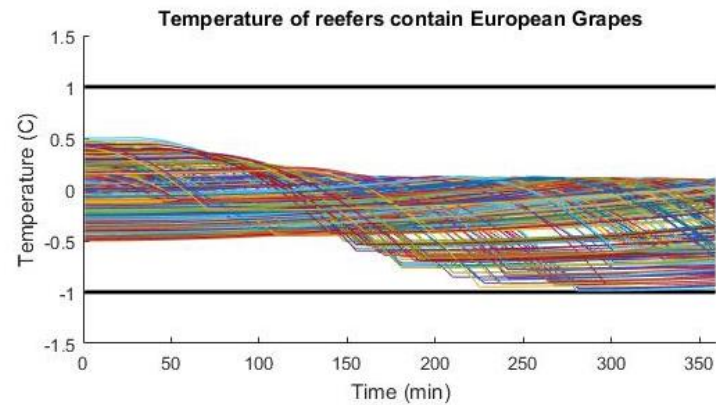
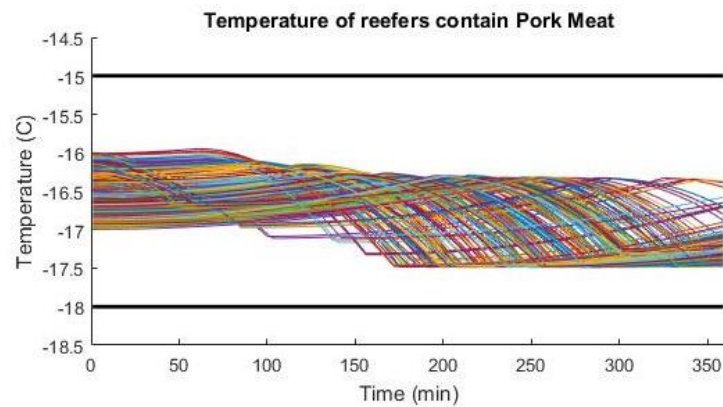
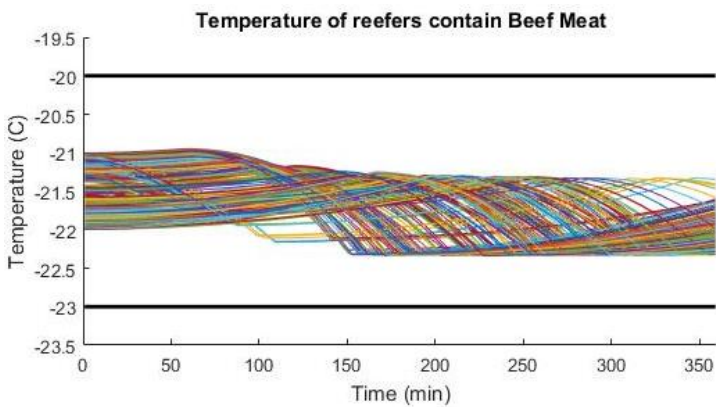


Temperature of reefers contain Avocados



Εικόνα 6.12 Εξέλιξη των εσωτερικών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και θερμοκρασιακά όρια αποθήκευσης για τα reefers που περιέχουν πορτοκάλια, λεμόνια, πεπόνια και βακαλάο (Σενάριο λειτουργίας 1)

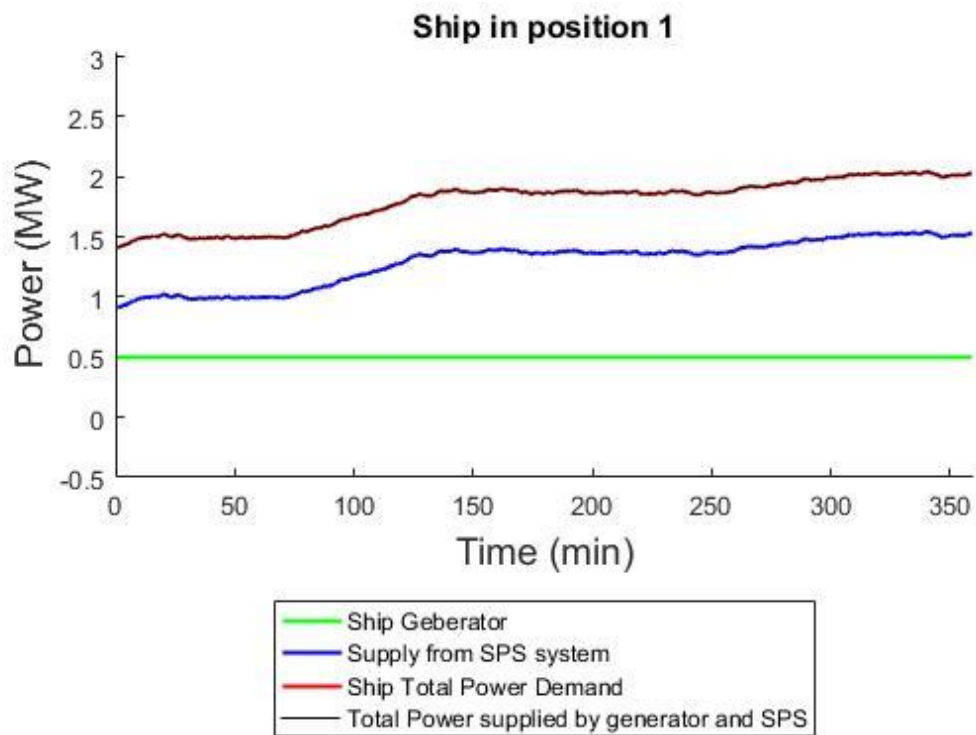
Εικόνα 6.11 Εξέλιξη των εσωτερικών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και θερμοκρασιακά όρια αποθήκευσης για τα reefers που περιέχουν πατάτες, σπανάκι, ντομάτες και αβοκάντο (Σενάριο λειτουργίας 1)



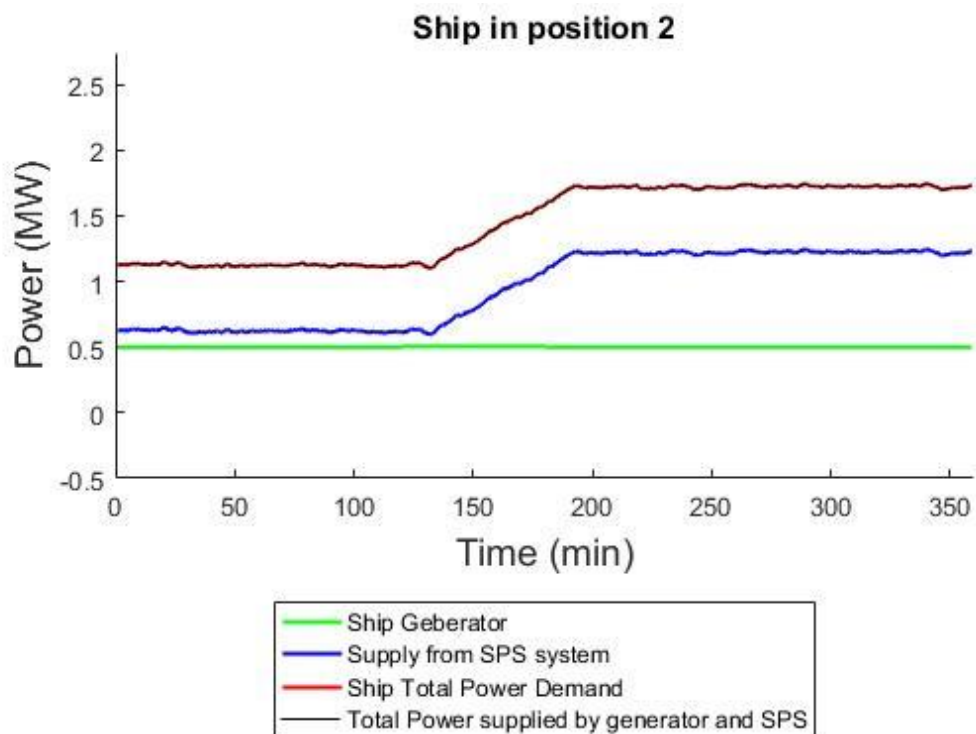
Εικόνα 6.13 Εξέλιξη των εσωτερικών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και θερμοκρασιακά όρια αποθήκευσης για τα reefers που περιέχουν μοσχαρίσιο κρέας, χοιρινό κρέας, σταφύλια ευρωπαϊκού τύπου και μήλα (Σενάριο λειτουργίας 1)

Από τις παραπάνω εικόνες φαίνεται πως κατά τη λειτουργία του συστήματος ισχύος του λιμένα με την προτεινόμενη μέθοδο ελέγχου, οι εσωτερικές θερμοκρασίες των reefers παραμένουν εντός των καθορισμένων ορίων αποθήκευσης των προϊόντων. Σε κάποιες λίγες - συγκριτικά με το πλήθος των εμπορευματοκιβωτίων ελεγχόμενης θερμοκρασίας που ρυθμίζονται – περιπτώσεις, όταν η θερμοκρασία των reefers βγαίνει οριακά από τα καθορισμένα όρια, εκείνα αλλάζουν κατάσταση λειτουργίας και οι θερμοκρασίες κινούνται προς τα θερμοκρασιακά όρια των προϊόντων.

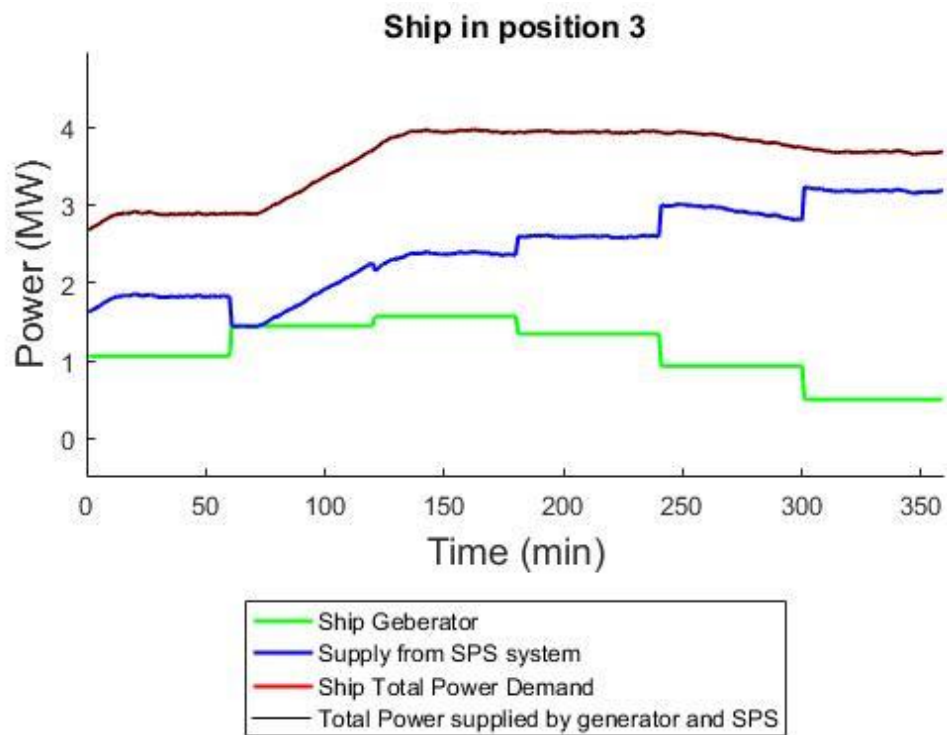
Στις εικόνες 6.14 – 6.23 φαίνονται η ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος για κάθε πλοίο, η συνολική ενέργεια που καταναλώνεται από το πλοίο, το τμήμα εκείνο της ενέργειας που διοχετεύεται από το σύστημα cold ironing του λιμένα, καθώς και το τμήμα της ενέργειας που παράγεται από τις βοηθητικές μηχανές του πλοίου. Όπως φαίνεται και στα διαγράμματα η ζήτηση ισχύος των πλοίων καλύπτεται πλήρως από το συνδυασμό των δύο εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Συγκεκριμένα, παρατηρείται πως οι βοηθητικές μηχανές παράγουν μεγαλύτερη ποσότητα ηλεκτρικής ισχύος όταν η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος είναι υψηλότερη. Επιπλέον, η παραγωγή ενέργειας με κατανάλωση καυσίμου από τις βοηθητικές μηχανές των πλοίων αυξάνεται περαιτέρω όταν η ζήτηση ισχύος από τα πλοία αυξάνεται και δεν μπορεί να καλυφθεί από το σύστημα τροφοδοσίας πλοίων του λιμένα, καθώς οι γραμμές μεταφοράς ισχύος του λιμένα λειτουργούν στο τεχνικό μέγιστο τους. Η συμπεριφορά του συστήματος, όπως περιγράφεται και φαίνεται στα διαγράμματα είναι η αναμενόμενη και εξασφαλίζει την οικονομικά και τεχνικά αποδοτική λειτουργία του συστήματος χωρίς όμως να λαμβάνονται υπόψιν οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί.



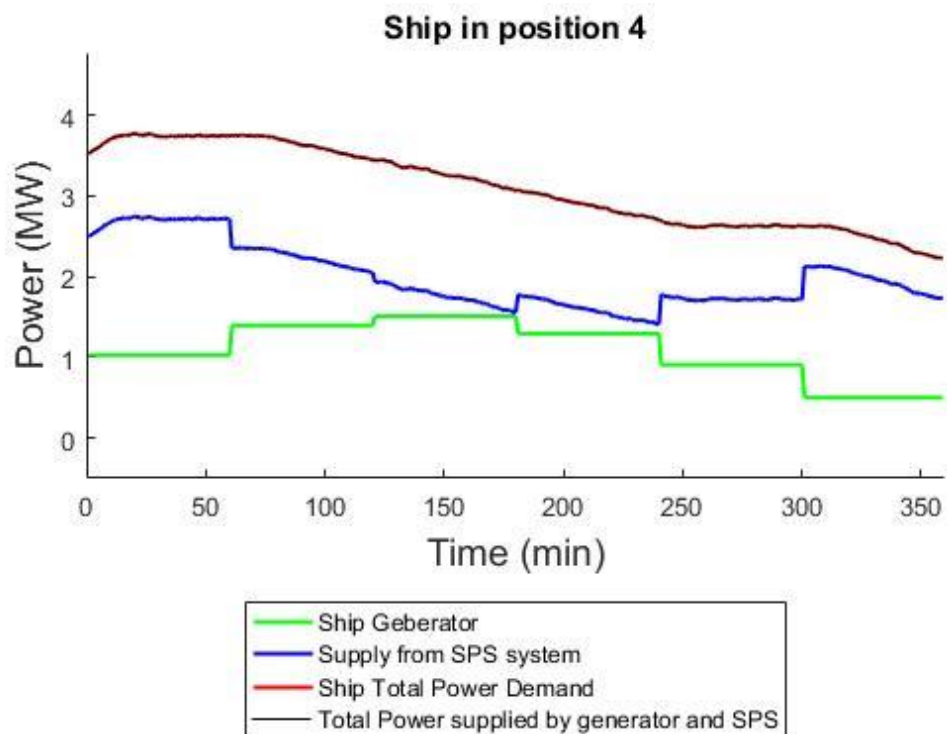
Εικόνα 6.14 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 1 (Σενάριο λειτουργίας 1)



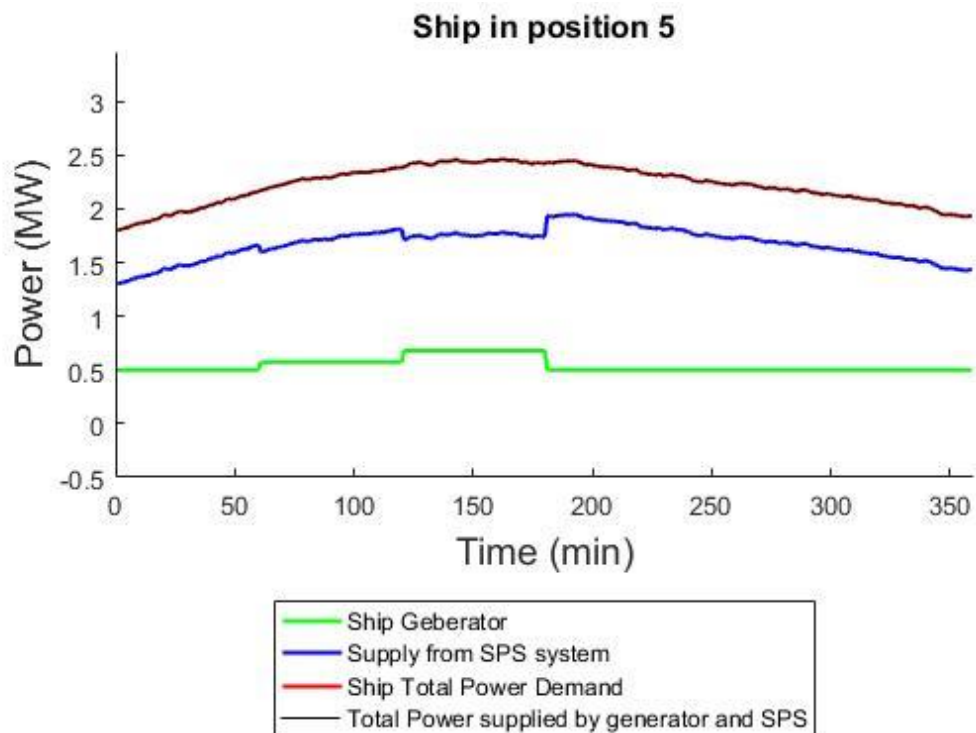
Εικόνα 6.15 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 2 (Σενάριο λειτουργίας 1)



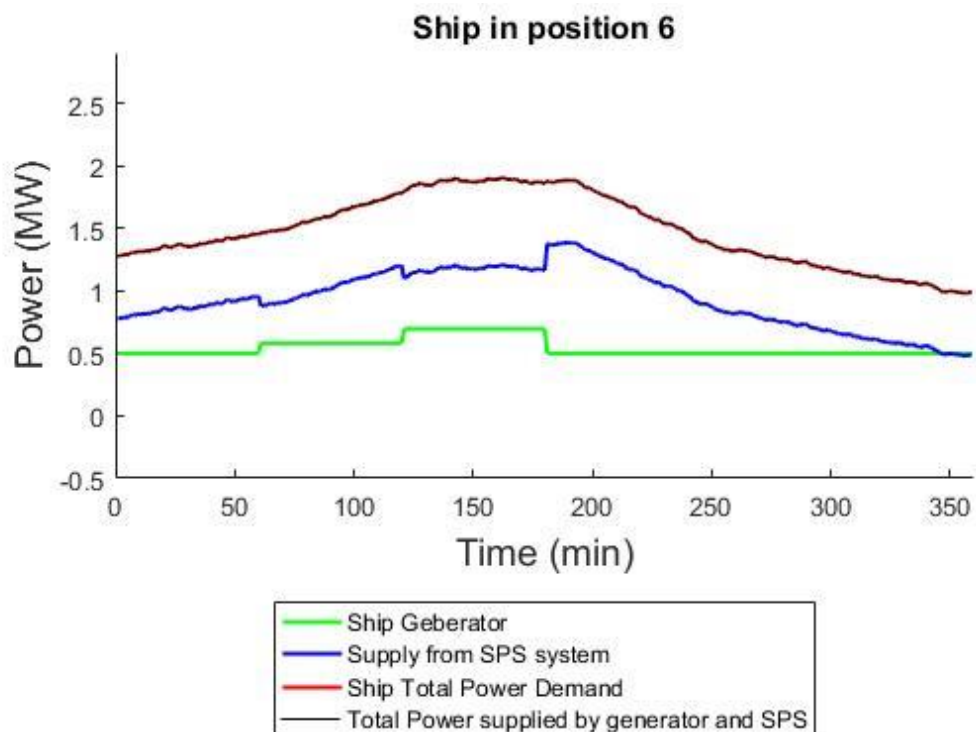
Εικόνα 6.16 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 3 (Σενάριο λειτουργίας 1)



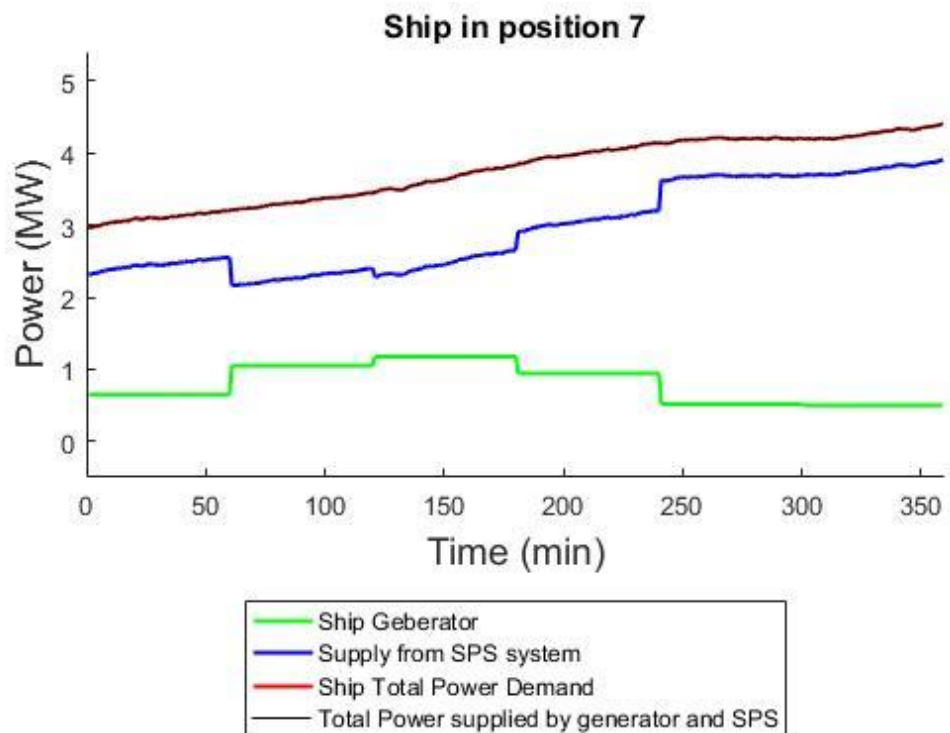
Εικόνα 6.17 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 4 (Σενάριο λειτουργίας 1)



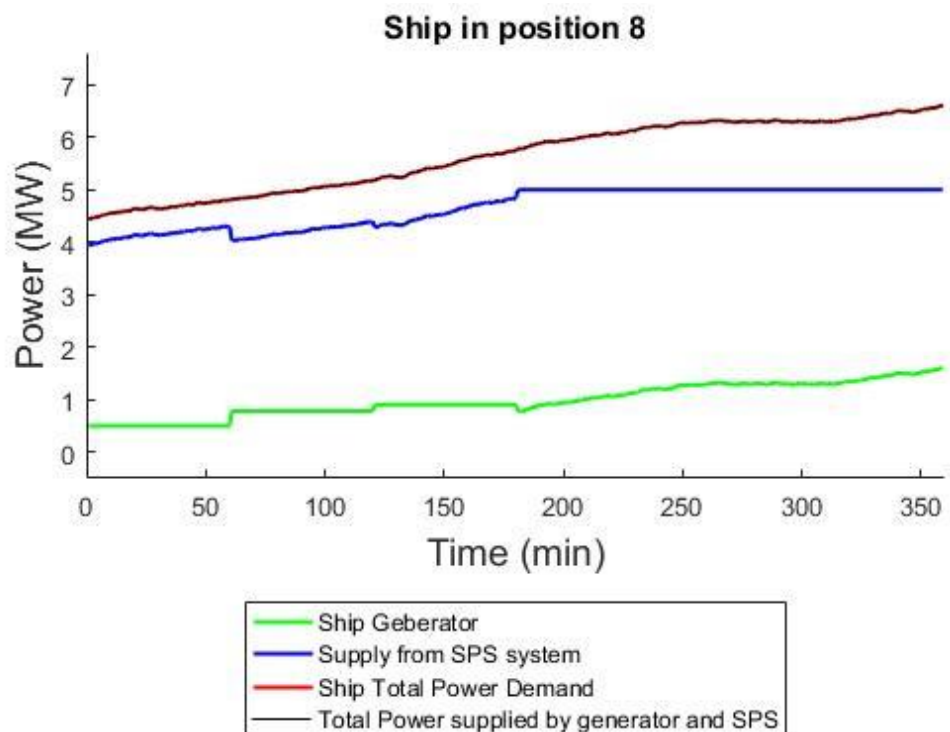
Εικόνα 6.18 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 5 (Σενάριο λειτουργίας Ι)



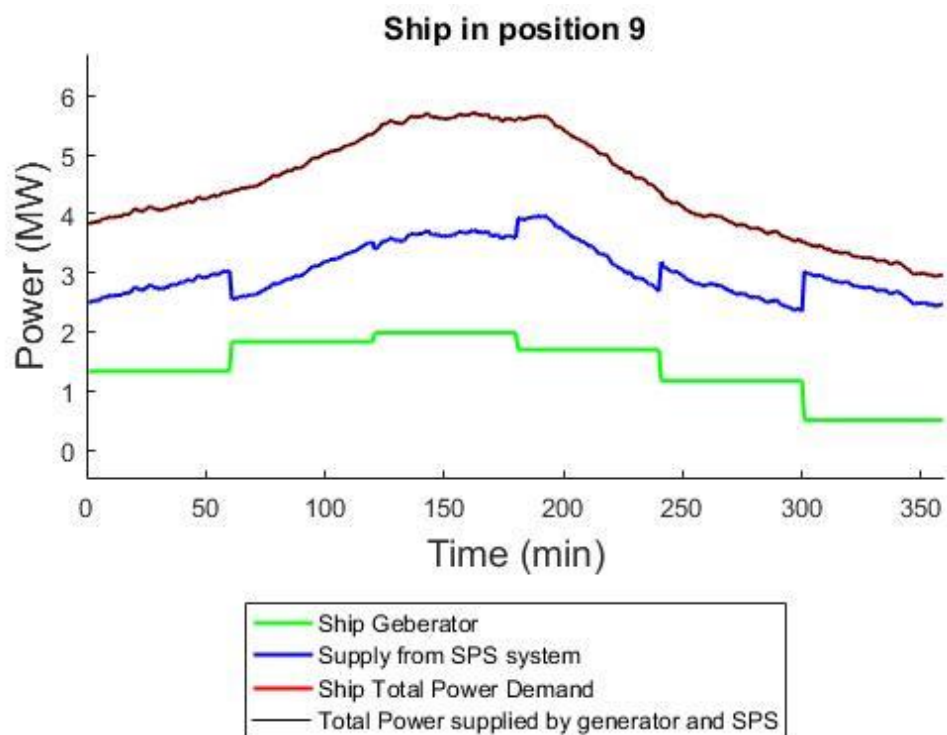
Εικόνα 6.19 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 6 (Σενάριο λειτουργίας Ι)



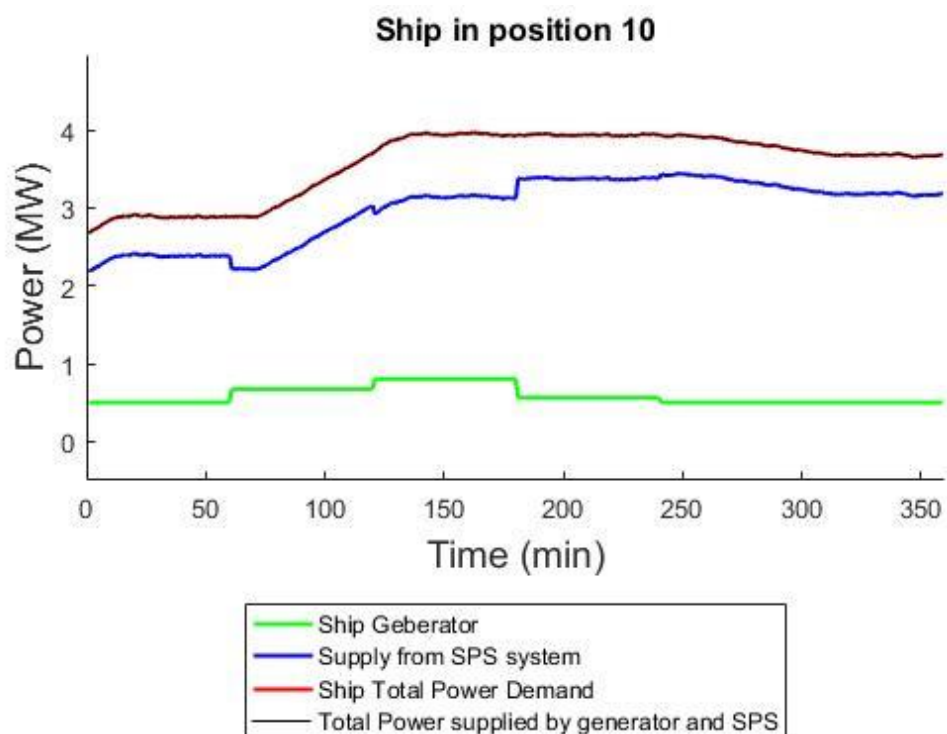
Εικόνα 6.20 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλειμενισμού 7 (Σενάριο λειτουργίας Ι)



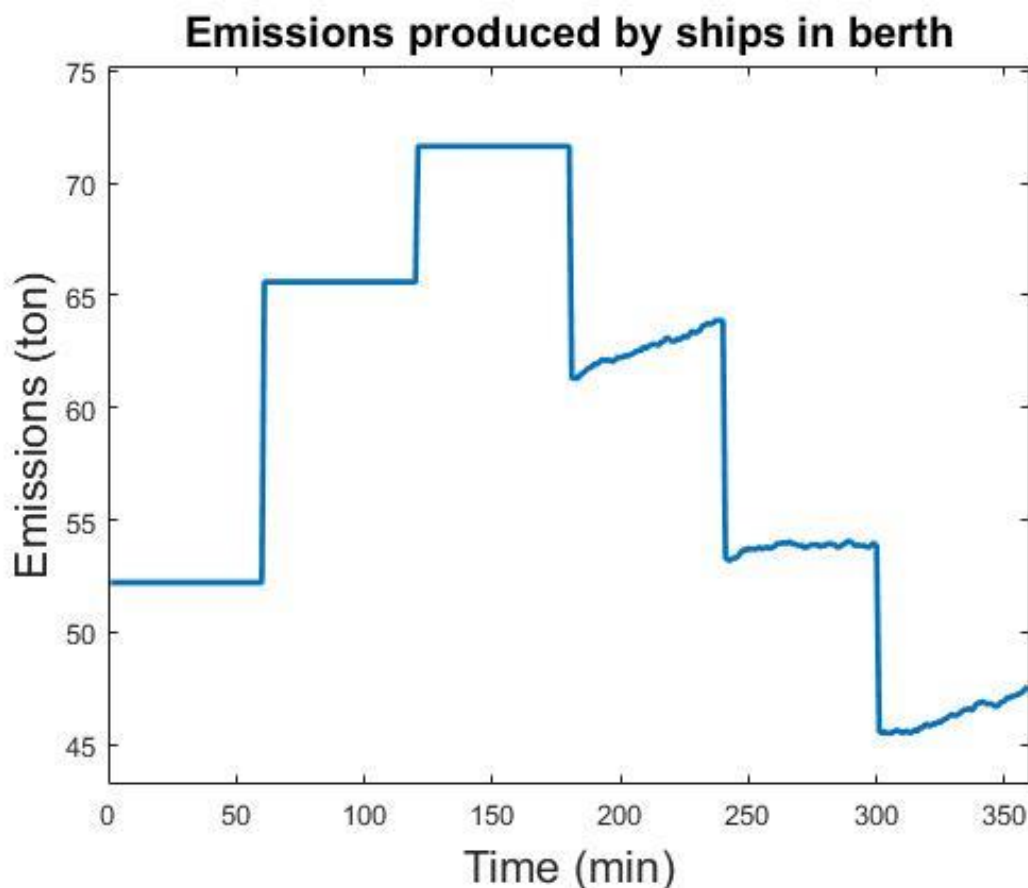
Εικόνα 6.21 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλειμενισμού 8 (Σενάριο λειτουργίας Ι)



Εικόνα 6.22 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 9 (Σενάριο λειτουργίας 1)



Εικόνα 6.23 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 10 (Σενάριο λειτουργίας 1)

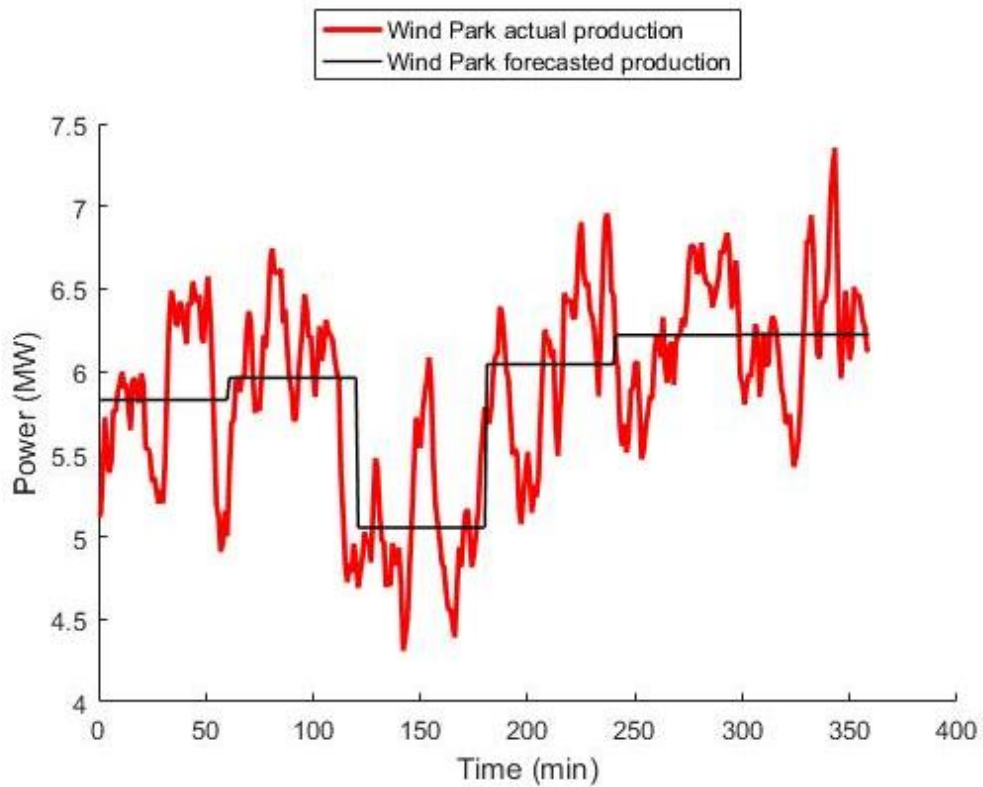


Εικόνα 6.24 Εξέλιξη των συνολικά παραγόμενων ρύπων από τα ελλιμενισμένα πλοία κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης (Σενάριο λειτουργίας 1)

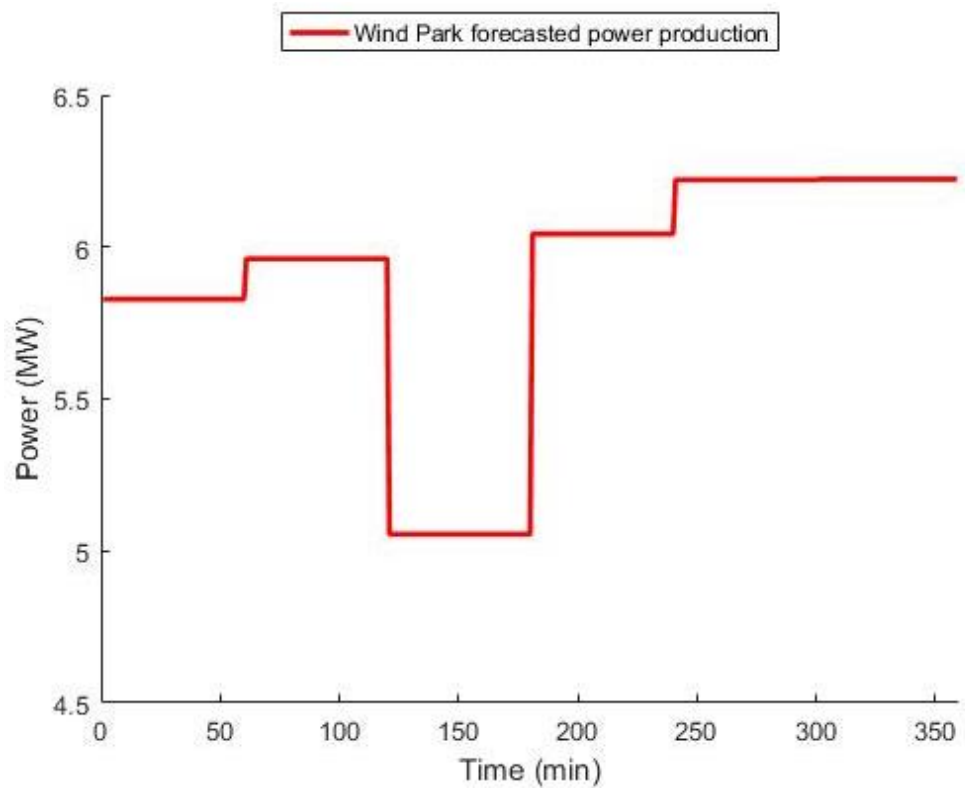
Στην εικόνα 6.24 φαίνεται η καμπύλη των συνολικών ρύπων που εκπέμπονται από τη λειτουργία των βοηθητικών μηχανών των πλοίων, που βρίσκονται ελλιμενισμένα στις εγκαταστάσεις του λιμένα. Η μέγιστη τιμή των εκπεμπόμενων ρύπων από τα πλοία χωρίς την ενεργοποίηση των αντίστοιχων περιορισμών είναι 71.64 τόνοι. Όπως αναμενόταν, παρατηρείται πως οι εκπομπές ρύπων φτάνουν τη μέγιστη τιμή τους όταν και η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος έχει τη μέγιστη τιμή του, καθώς τότε παράγουν μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας οι βοηθητικές μηχανές των πλοίων.

6.2. Αποτελέσματα προσομοίωσης για σενάριο λειτουργίας με όρια εκπομπών αερίων ρύπων

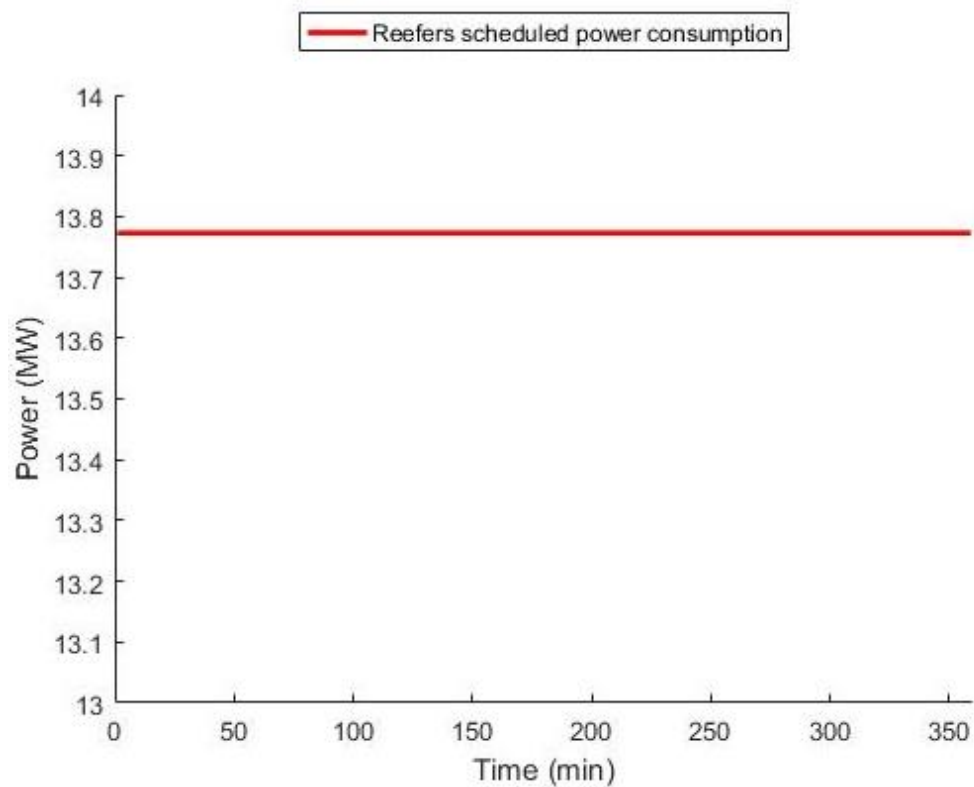
Στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης γίνεται προσπάθεια περιορισμού της μέγιστης τιμής των εκπεμπόμενων ρύπων κατά 30% σε σχέση με το σενάριο λειτουργία χωρίς όρια ρύπων, δηλαδή με μέγιστη τιμή 50.15 τόνους. Προκειμένου να είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ των δύο σεναρίων, χρησιμοποιείται η ίδια χρονοσειρά για την πραγματική παραγωγή του αιολικού πάρκου, καθώς και την πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής, που η τιμή της είναι σταθερή ανά ώρα, όπως φαίνεται στην εικόνα 6.26. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται αναλυτικά στις εικόνες 6.26 – 6.47. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι παρόμοια με το πρώτο σενάριο λειτουργίας.



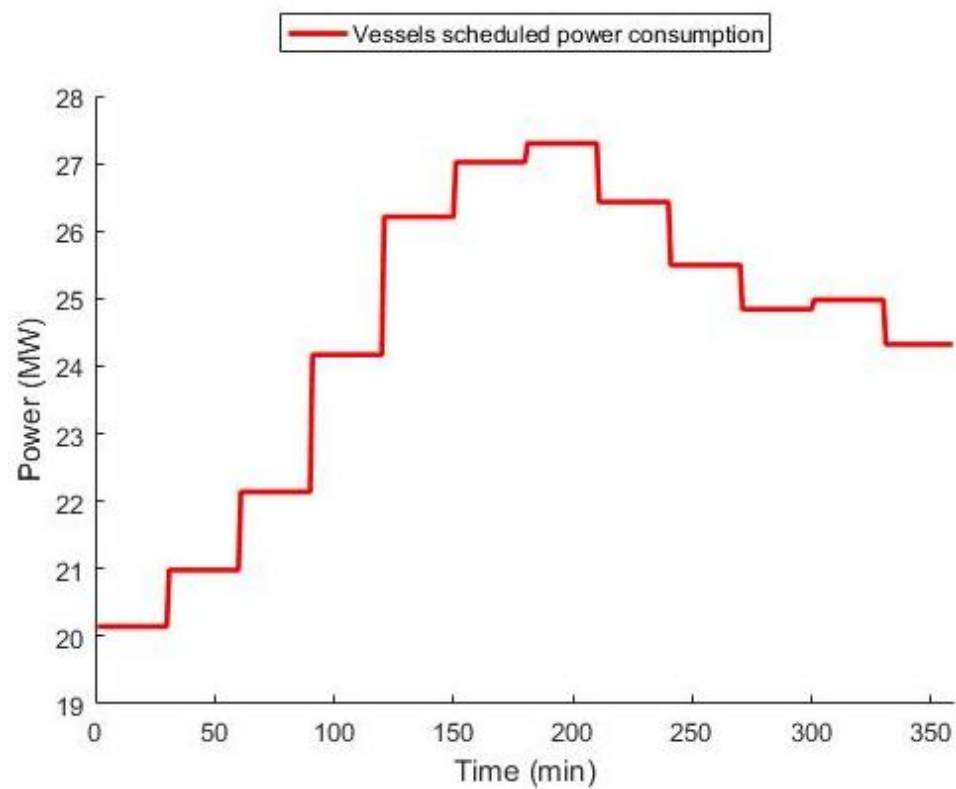
Εικόνα 6.25 Πρόβλεψη παραγωγής ενέργειας από το αιολικό πάρκο και πραγματική τιμή αιολικής παραγωγής (Σενάριο λειτουργίας 2)



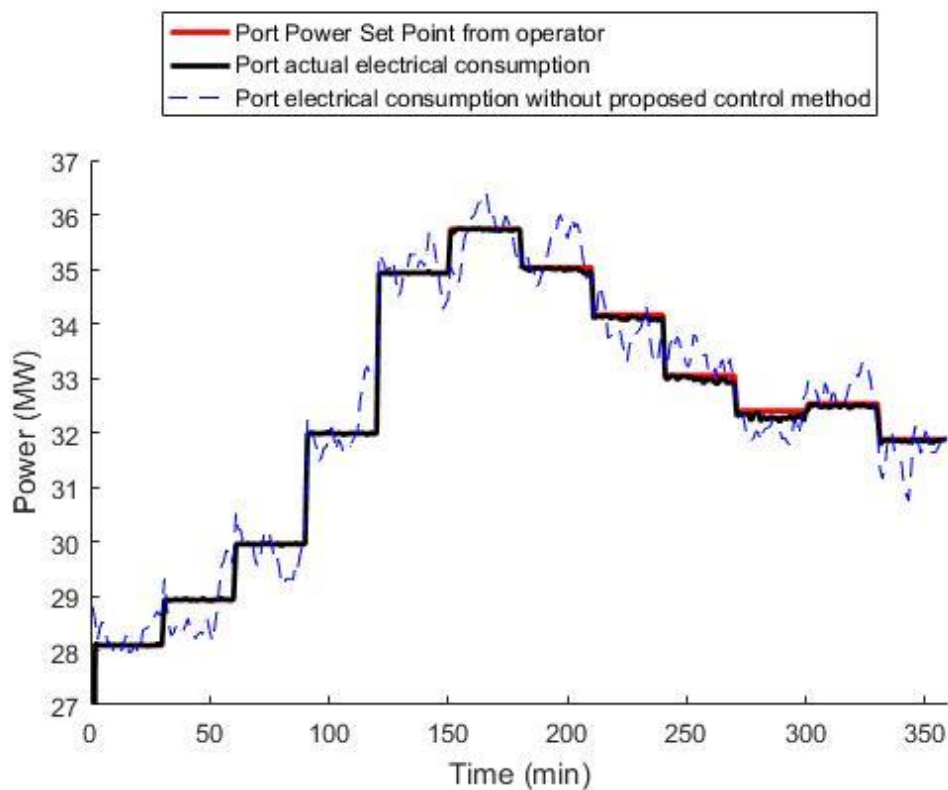
Εικόνα 6.26 Πρόβλεψη παραγωγής ισχύος από το αιολικό πάρκο (Σενάριο λειτουργίας 2)



Εικόνα 6.27 Πρόβλεψη κατανάλωσης ισχύος από τα reefers (Σενάριο λειτουργίας 2)

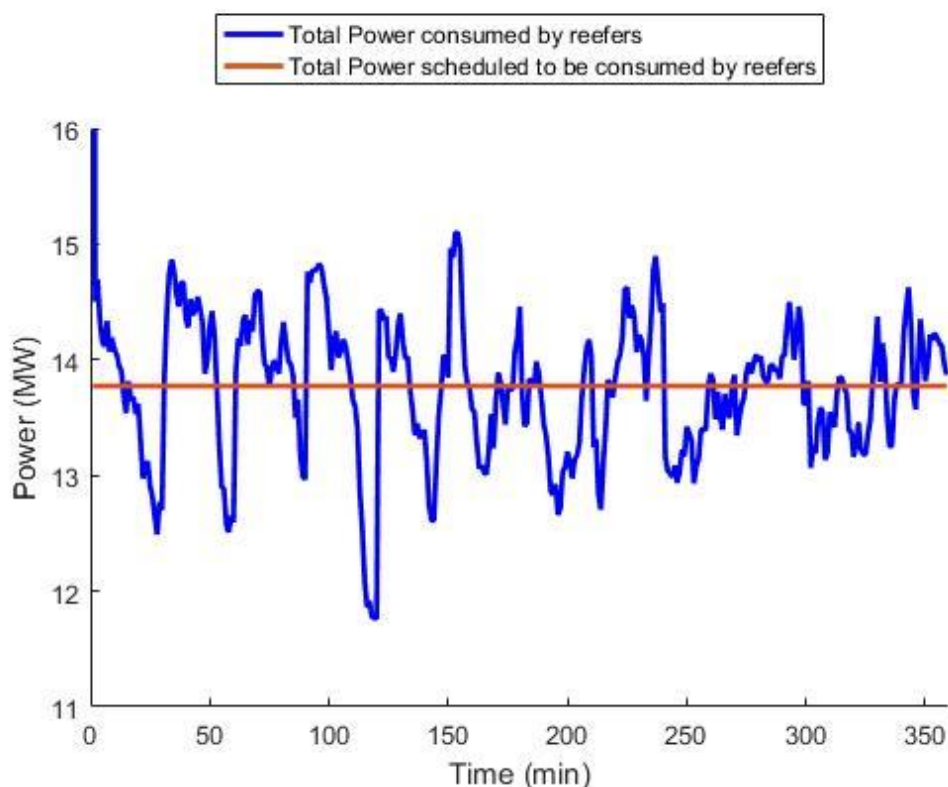


Εικόνα 6.28 Πρόβλεψη κατανάλωσης ισχύος από τα ελλιμενισμένα πλοία μέσω του SPS (Σενάριο λειτουργίας 2)



Εικόνα 6.29 Επιθυμητή κατανάλωση ενέργειας του λιμένα και συνολική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας με την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου ελέγχου και χωρίς αυτήν (Σενάριο λειτουργίας 2)

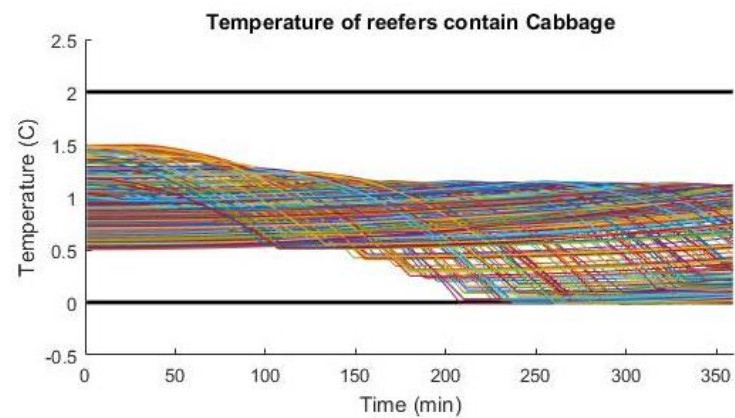
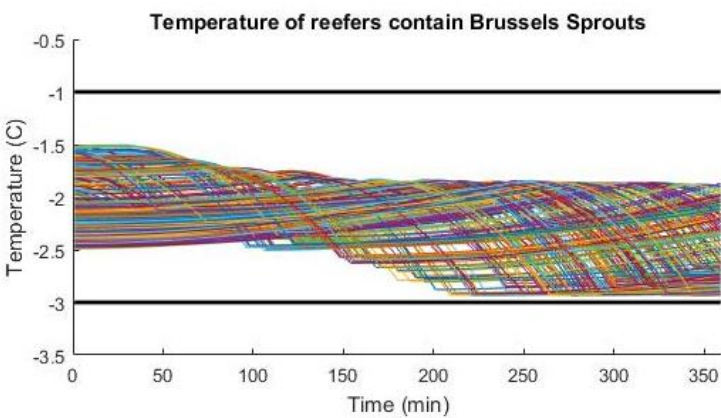
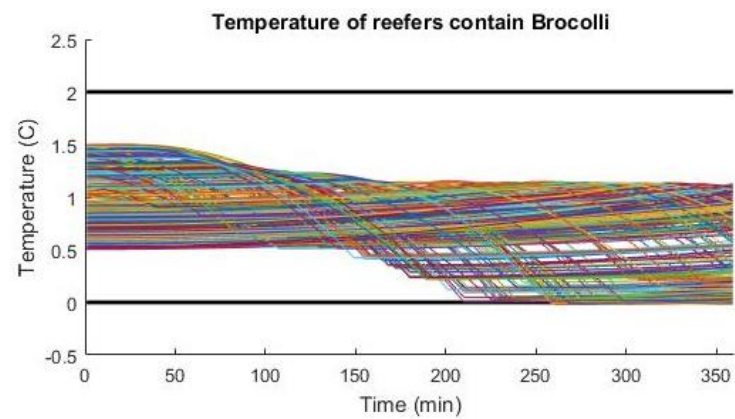
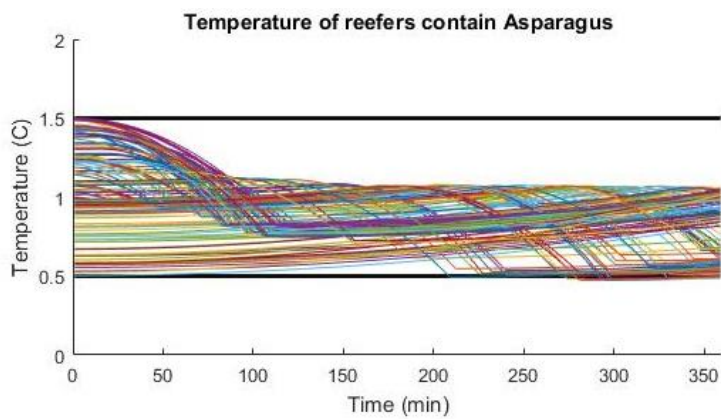
Στην Εικόνα 6.30 φαίνεται η επιθυμητή κατανάλωση ενέργειας, που προσδιορίζεται από τον κεντρικό πράκτορα ελέγχου του λιμένα, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ο στόχος της απόσβεσης των διαφορών, που προκύπτουν από τη διαφορά της προβλεπόμενης αιολικής παραγωγής από την πραγματική παραγωγή και δευτερευόντως από την απόκλιση της πραγματικής ζήτησης των ελλιμενισμένων πλοίων από την τιμή της πρόβλεψής της. Όπως και στο σενάριο λειτουργίας 1, η καμπύλη του διαγράμματος 6.30, προκύπτει από το άθροισμα των τριών καμπυλών στα διαγράμματα 6.27 – 6.29. Παράλληλα, φαίνεται η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος του λιμένα με την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου ελέγχου της ζήτησης σε πραγματικό χρόνο και χωρίς αυτήν. Από το διάγραμμα προκύπτει πως με την προτεινόμενη μέθοδο επιτυγχάνεται η ρύθμιση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας του λιμένα στην επιθυμητή τιμή, αφού οι δύο καμπύλες ταυτίζονται στο μεγαλύτερο μέρος της προσομοίωσης, ενώ και όταν δεν ταυτίζονται απόλυτα βρίσκονται πολύ κοντά. Σε σχέση με το αντίστοιχο διάγραμμα του πρώτου σεναρίου λειτουργίας (εικόνα 6.6), παρατηρείται η αύξηση του συνολικού σημείου ρύθμισης του λιμένα. Η αύξηση αυτή οφείλεται στην ενεργοποίηση των περιορισμών για τις εκπομπές των ρύπων από τα πλοία. Η ενεργοποίηση των περιορισμών ρύπων έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της παραγωγής των βοηθητικών μηχανών των πλοίων και την επακόλουθη αύξηση της παροχής ισχύος προς τα ελλιμενισμένα πλοία από το σύστημα τροφοδοσίας ηλεκτρικής ενέργειας σε πλοία από το δίκτυο του λιμένα. Ως αποτέλεσμα, αυξάνεται το συνολικό σημείο ρύθμισης του λιμένα.



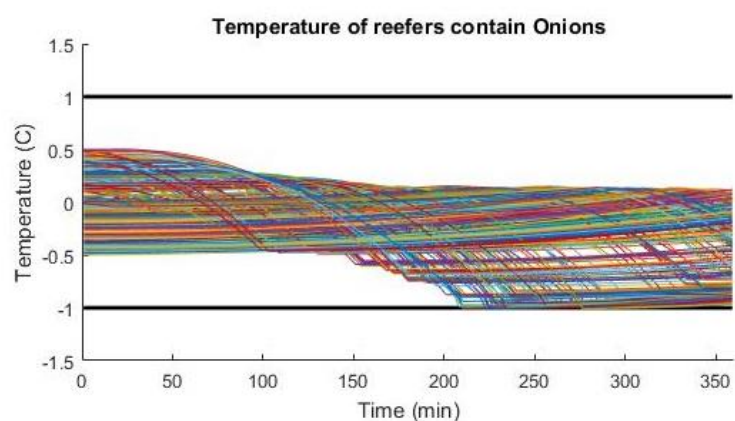
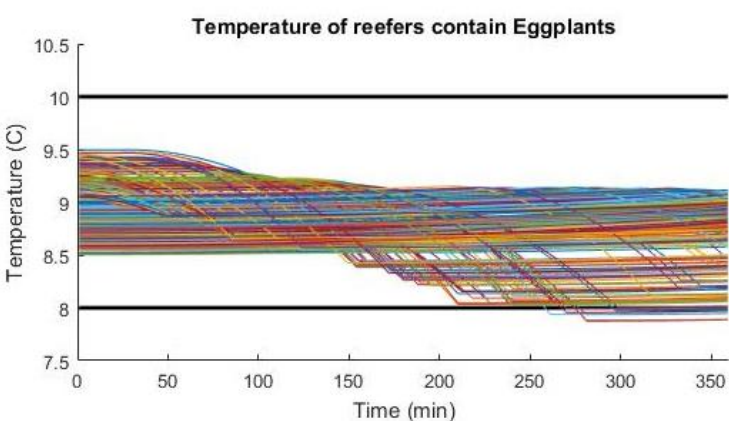
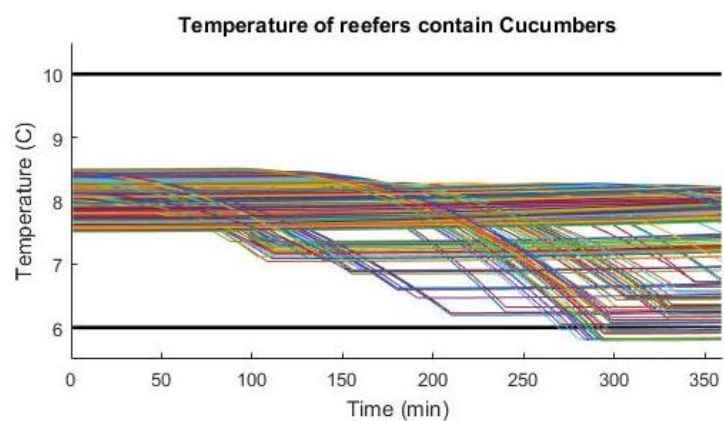
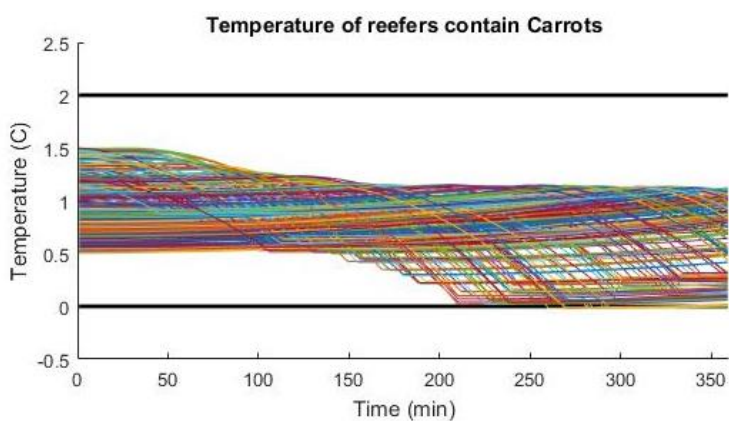
Εικόνα 6.30 Ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος από τα reefers με την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου ελέγχου και προγραμματισμένη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας από τα reefers (Σενάριο λειτουργίας 2)

Στην εικόνα 6.31 φαίνεται η συνολική κατανάλωση ενέργειας από τα reefers κατά το διάστημα της προσομοίωσης, καθώς και η προγραμματισμένη κατανάλωση ενέργειας από τα εμπορευματοκιβώτια που καθορίζεται, όπως και στο σενάριο λειτουργίας χωρίς περιορισμούς ρύπων, στο 20% της ονομαστικής του τιμής. Η καμπύλη της κατανάλωσης των reefers κινείται γύρω από την τιμή της πρόβλεψης κατανάλωσης ενέργειας από τα reefers και ρυθμίζεται σε πραγματικό χρόνο, έτσι ώστε να απορροφούνται οι αποκλίσεις της πραγματικής αιολικής παραγωγής και της πραγματικής ζήτησης ισχύος από την τιμή της πρόβλεψής τους. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι παρόμοια με το πρώτο σενάριο λειτουργίας. Παράλληλα, από τη μορφή της καμπύλης προκύπτει πως τα reefers είναι που απορροφούν αυτές τις αποκλίσεις, μεταβάλλοντας την κατάσταση λειτουργίας τους, ενώ τα πλοία λειτουργούν σχετικά αυτόνομα όσον αφορά την ευελιξία κατανάλωσης επιπλέον ενέργειας

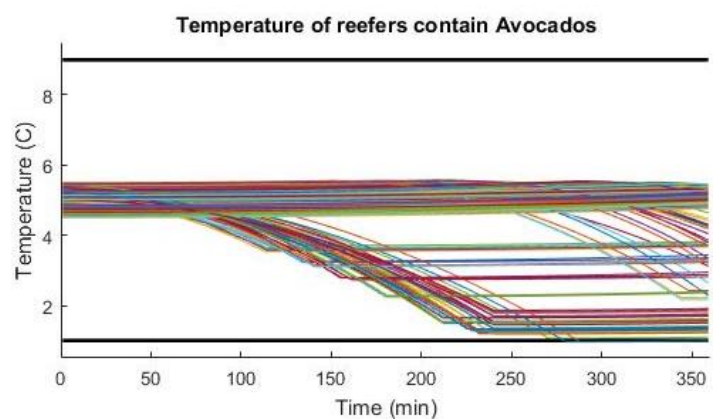
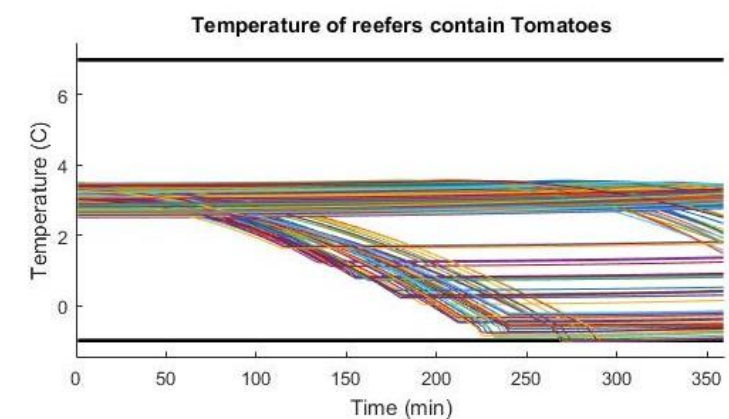
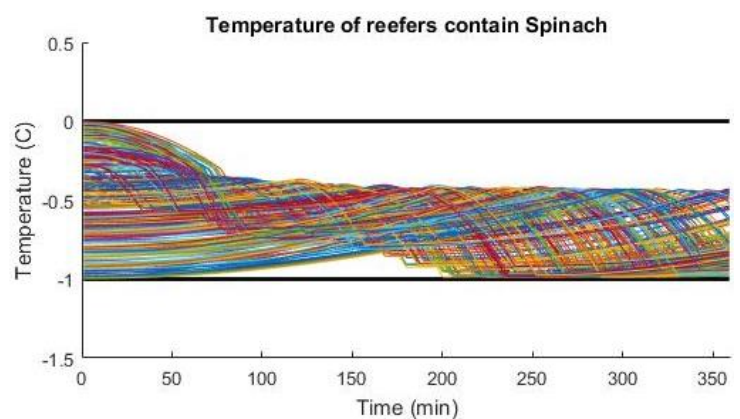
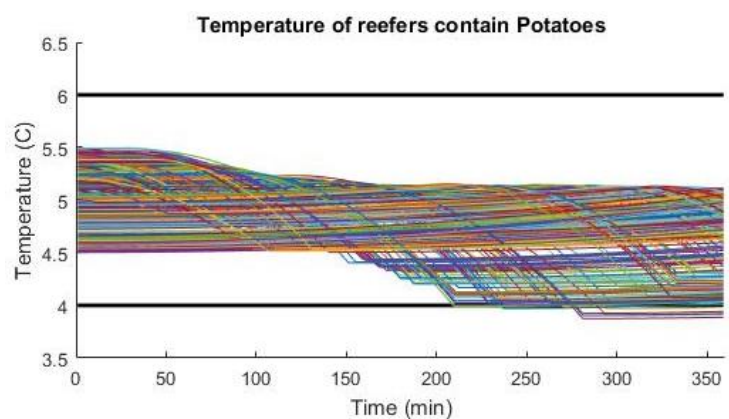
Στις εικόνες 6.32 – 6.36 φαίνεται η εξέλιξη των εσωτερικών θερμοκρασιών για κάθε διαφορετικό τύπο προϊόντος που αποθηκεύεται στα reefers κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, καθώς και τα θερμοκρασιακά όρια μεταφοράς και αποθήκευσης των προϊόντων.



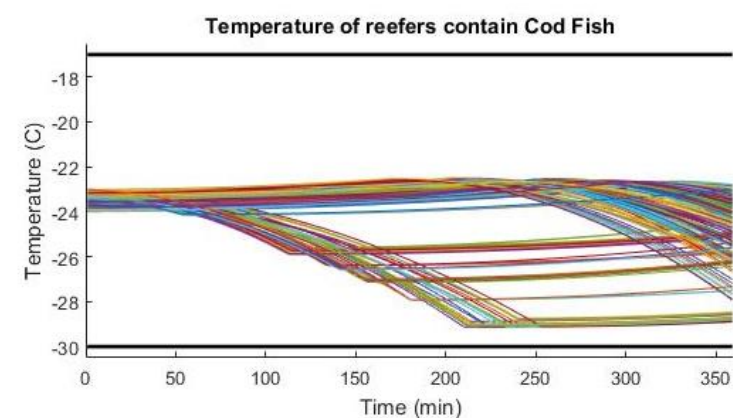
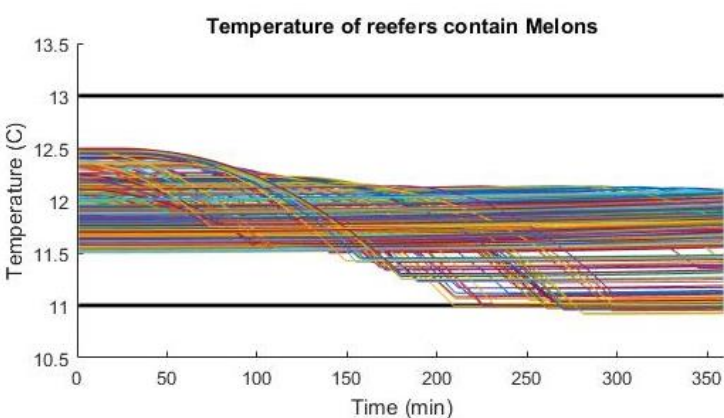
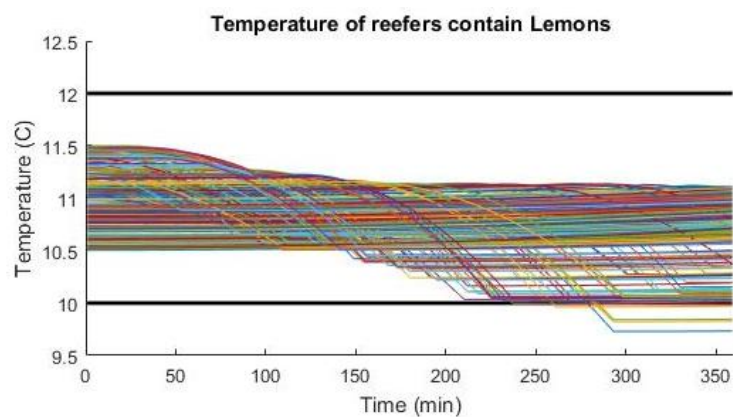
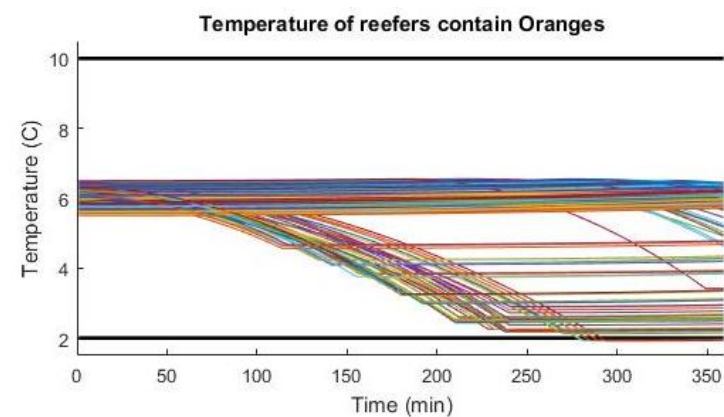
Εικόνα 6.31 Εξέλιξη των εσωτερικών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και θερμοκρασιακά όρια αποθήκευσης για τα reefers που περιέχουν σπαράγγια, μπρόκολα, λαχανάκια Βρυξελλών και λάχανα. (Σενάριο λειτουργίας 2)



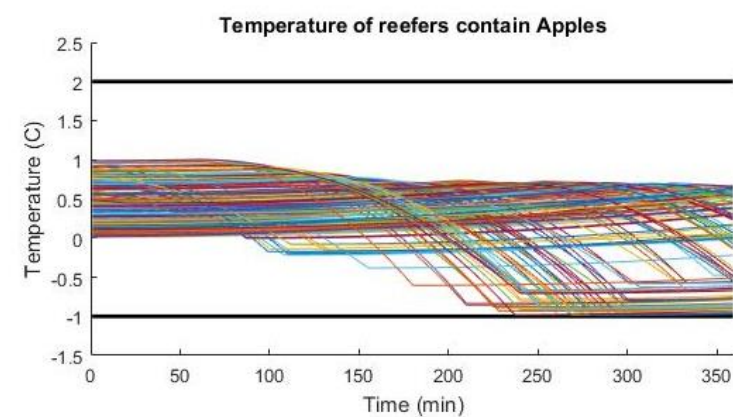
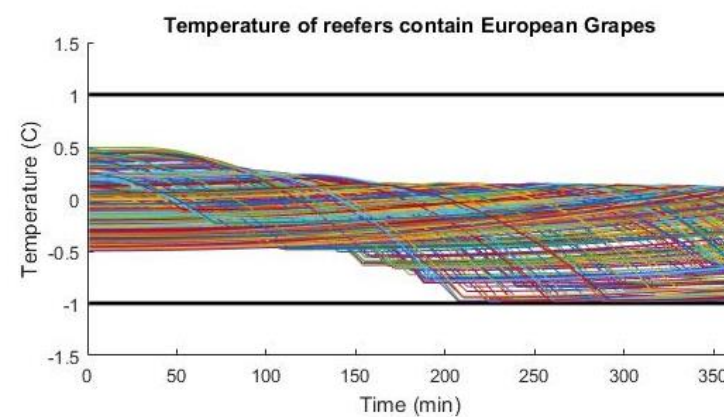
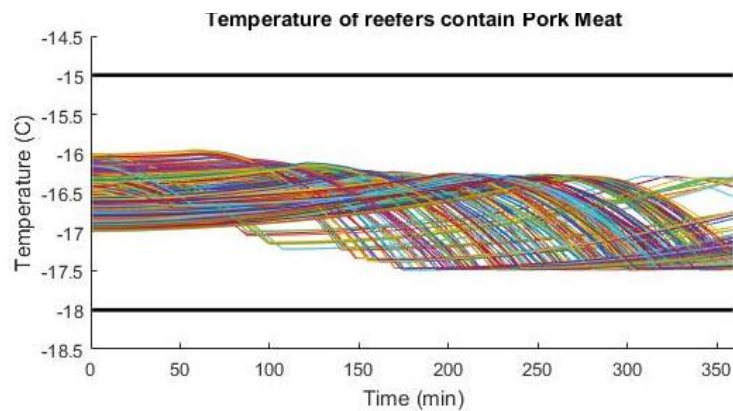
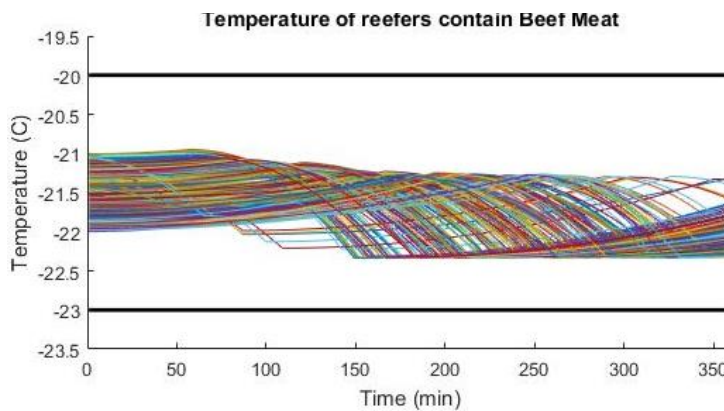
Εικόνα 6.32 Εξέλιξη των εσωτερικών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και θερμοκρασιακά όρια αποθήκευσης για τα reefers που περιέχουν καρότα, αγγούρια, μελιτζάνες και κρεμμύδια (Σενάριο λειτουργίας 2)



Εικόνα 6.33 Εξέλιξη των εσωτερικών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και θερμοκρασιακά όρια αποθήκευσης για τα reefers που περιέχουν πατάτες, σπανάκι, ντομάτες και αβοκάντο (Σενάριο λειτουργίας 2)



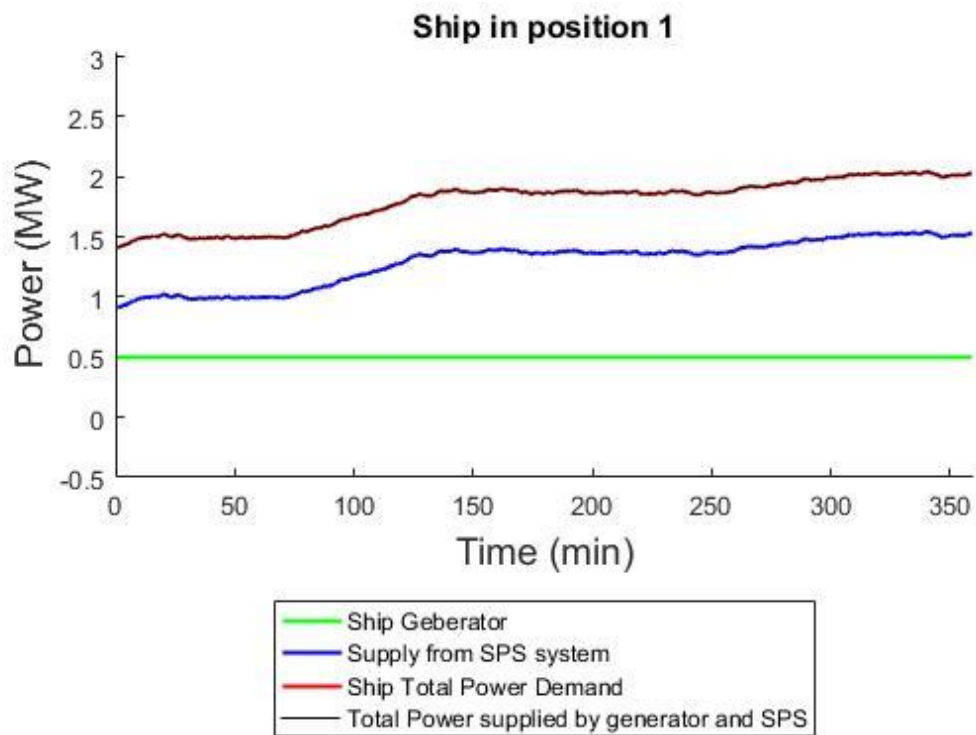
Εικόνα 6.34 Εξέλιξη των εσωτερικών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και θερμοκρασιακά όρια αποθήκευσης για τα reefers που περιέχουν πορτοκάλια, λεμόνια, πεπόνια και βακαλάο (Σενάριο λειτουργίας 2)



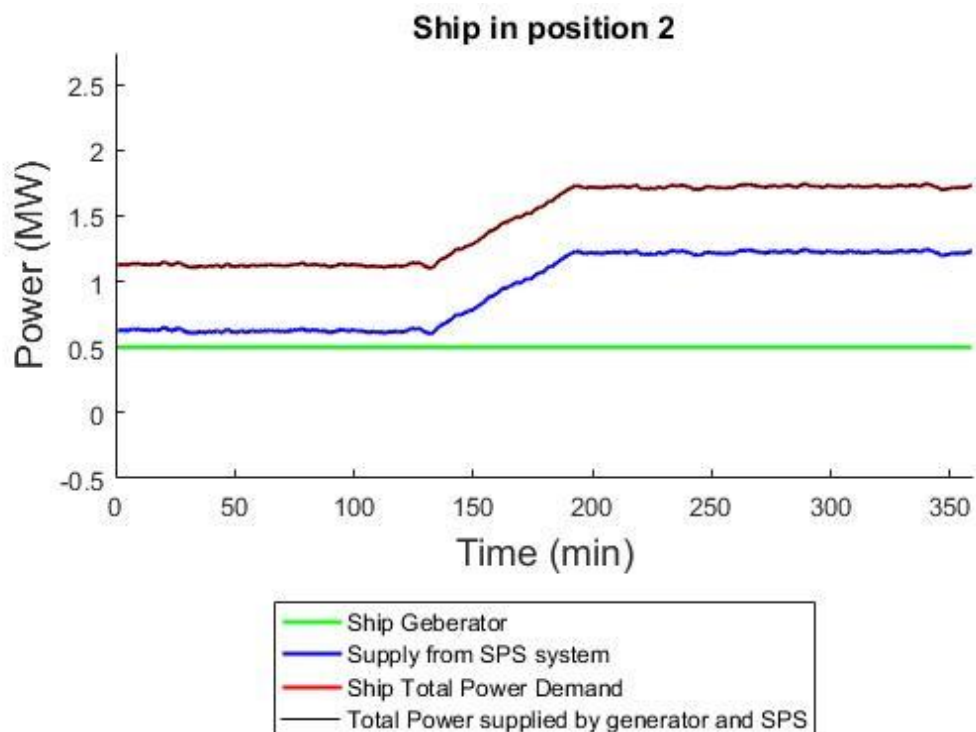
Εικόνα 6.35 Εξέλιξη των εσωτερικών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και θερμοκρασιακά όρια αποθήκευσης για τα reefers που περιέχουν μοσχαρίσιο κρέας, χοιρινό κρέας, σταφύλια ευρωπαϊκού τύπου και μήλα (Σενάριο λειτουργίας 2)

Από τις παραπάνω εικόνες (6.32 – 6.36) φαίνεται πως κατά τη λειτουργία του συστήματος ισχύος του λιμένα με την προτεινόμενη μέθοδο ελέγχου, οι εσωτερικές θερμοκρασίες των reefers παραμένουν εντός των καθορισμένων ορίων αποθήκευσης των προϊόντων. Όπως και στο προηγούμενο σενάριο λειτουργίας, παρατηρείται πως σε κάποιες λίγες - συγκριτικά με το πλήθος των εμπορευματοκιβωτίων ελεγχόμενης θερμοκρασίας που ρυθμίζονται – περιπτώσεις, η θερμοκρασία των reefers βγαίνει οριακά από τα καθορισμένα θερμοκρασιακά όρια αποθήκευσης των προϊόντων. Αλλά και σε αυτές τις περιπτώσεις, εκείνα αλλάζουν κατάσταση λειτουργίας και οι θερμοκρασίες κινούνται προς τα θερμοκρασιακά όρια των προϊόντων.

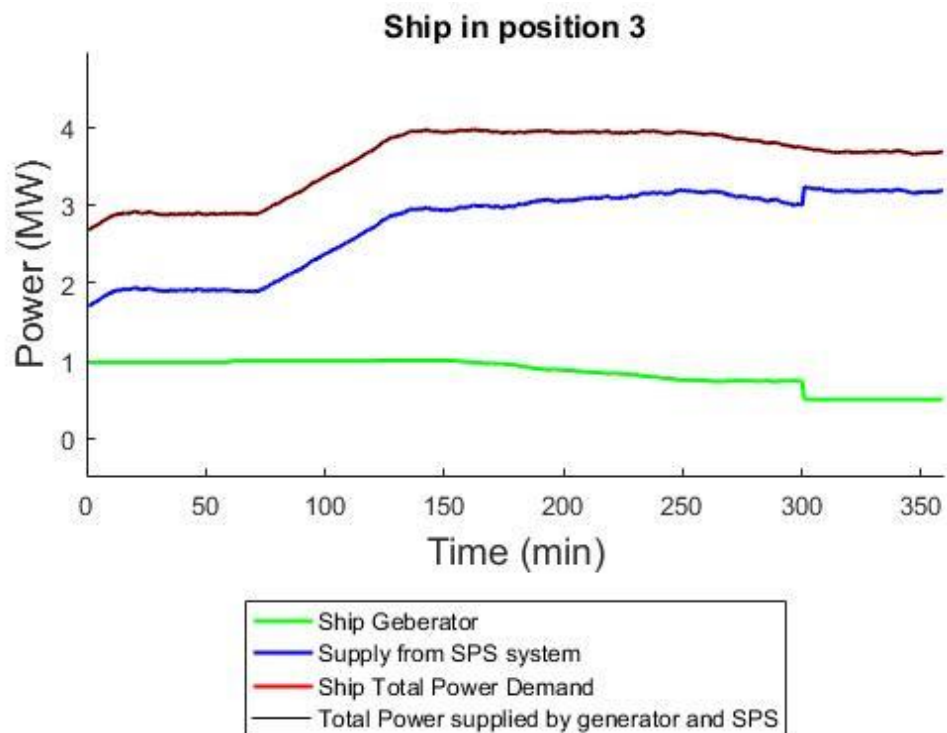
Στις εικόνες 6.37 – 6.46 φαίνονται η ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος για κάθε πλοίο, η συνολική ενέργεια που καταναλώνεται από το πλοίο, το τμήμα εκείνο της ενέργειας που διοχετεύεται από το σύστημα SPS του λιμένα, καθώς και το τμήμα της ενέργειας που παράγεται από τις βοηθητικές μηχανές του πλοίου. Όπως φαίνεται και στα διαγράμματα η ζήτηση ισχύος των πλοίων καλύπτεται πλήρως από το συνδυασμό των δύο εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Συγκεκριμένα, παρατηρείται πως οι βοηθητικές μηχανές παράγουν μεγαλύτερη ποσότητα ηλεκτρικής ισχύος όταν η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος είναι υψηλότερη. Επιπλέον, η παραγωγή ενέργειας με κατανάλωση καυσίμου από τις βοηθητικές μηχανές των πλοίων αυξάνεται περαιτέρω όταν η ζήτηση ισχύος από τα πλοία αυξάνεται και δεν μπορεί να καλυφθεί από το σύστημα τροφοδοσίας πλοίων του λιμένα, καθώς οι γραμμές μεταφοράς ισχύος του λιμένα λειτουργούν στο τεχνικό μέγιστο τους. Η συμπεριφορά του συστήματος, όπως περιγράφεται και φαίνεται στα διαγράμματα είναι η αναμενόμενη και εξασφαλίζει την οικονομικά και τεχνικά αποδοτική λειτουργία του συστήματος ισχύος του λιμένα. Σε σχέση με το πρώτο σενάριο λειτουργίας, η ενεργοποίηση των περιορισμών εκπομπών ρύπων από τα ελλιμενισμένα πλοία έχει ως αποτέλεσμα τη λειτουργία των περισσότερων βοηθητικών μηχανών των πλοίων στο τεχνικό ελάχιστο τους, δηλαδή το σημαντικό περιορισμό της συμμετοχής των βοηθητικών μηχανών των πλοίων στην κάλυψη της ζήτησής τους.



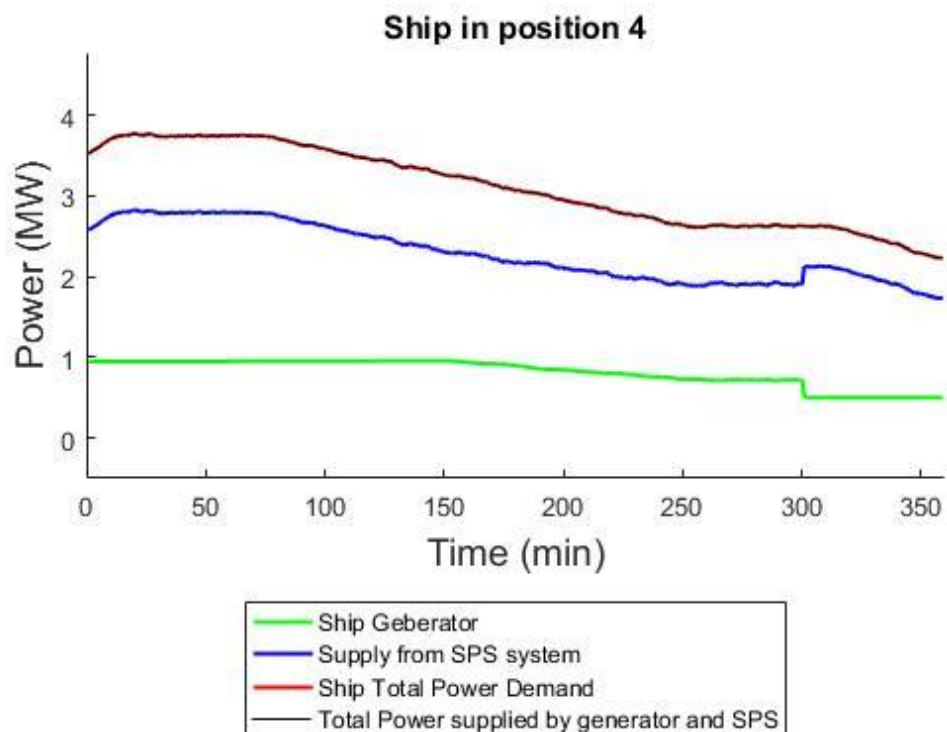
Εικόνα 6.36 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 1 (Σενάριο λειτουργίας 2)



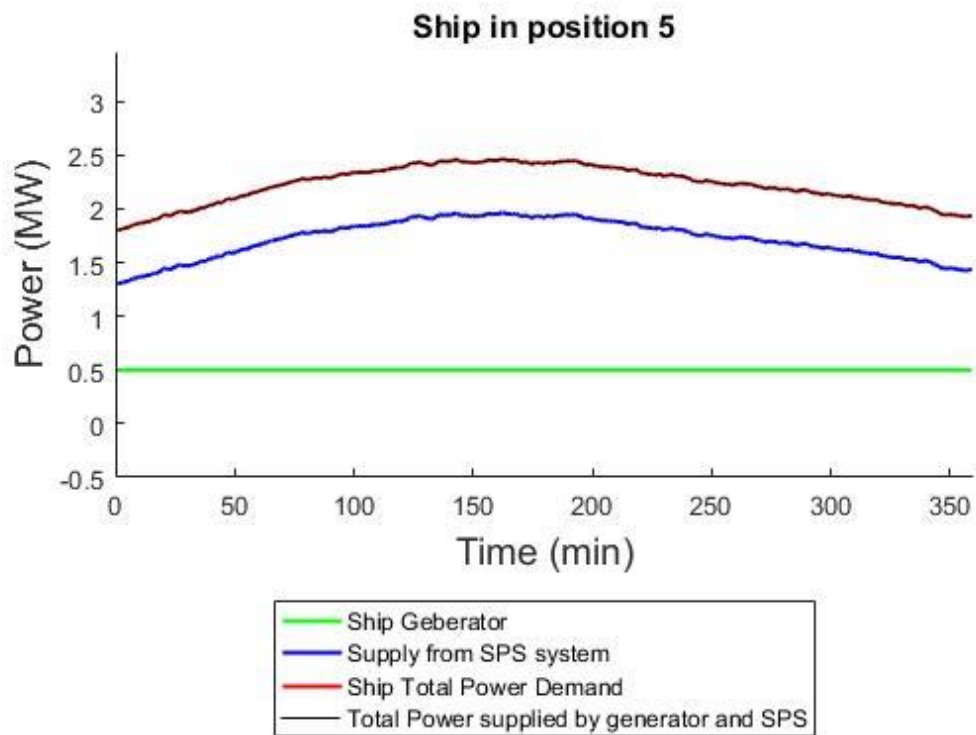
Εικόνα 6.37 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 2 (Σενάριο λειτουργίας 2)



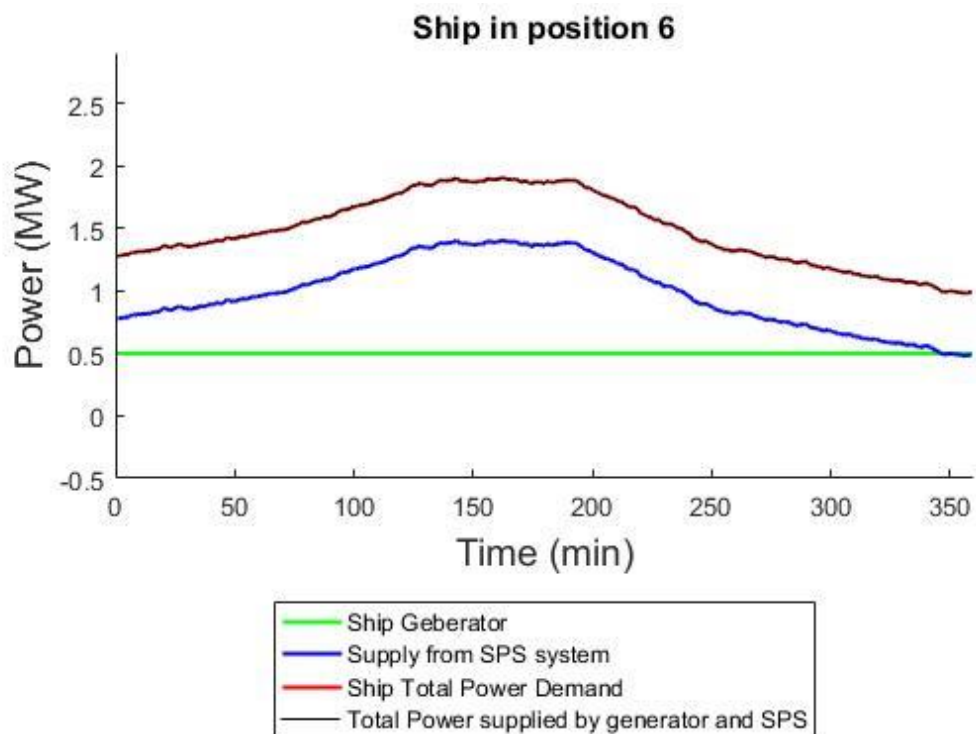
Εικόνα 6.38 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλειμενισμού 3 (Σενάριο λειτουργίας 2)



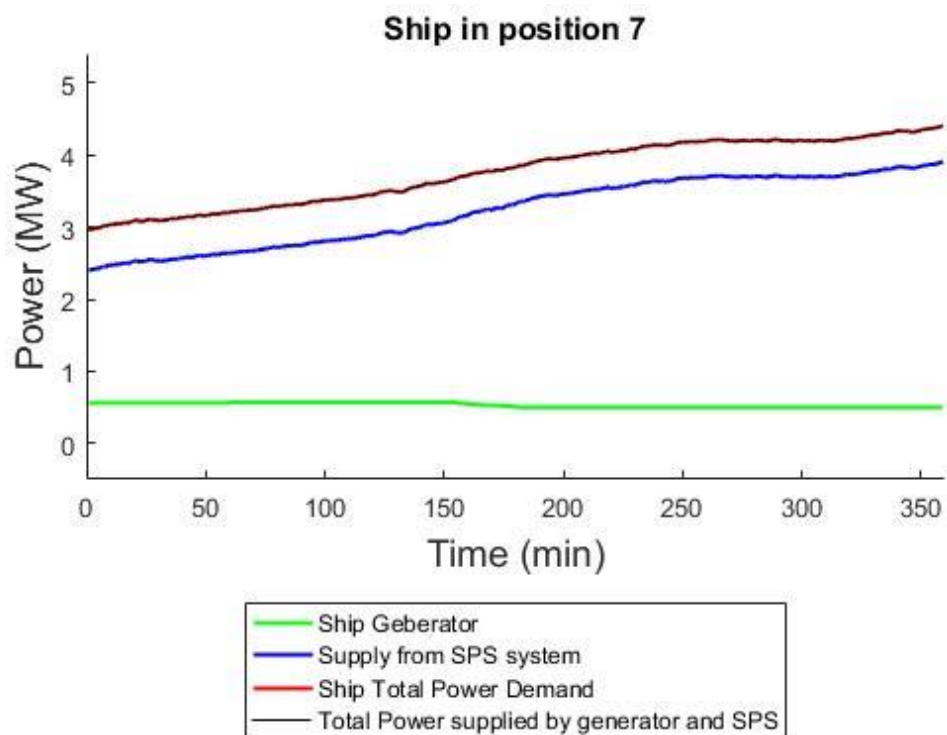
Εικόνα 6.39 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλειμενισμού 4 (Σενάριο λειτουργίας 2)



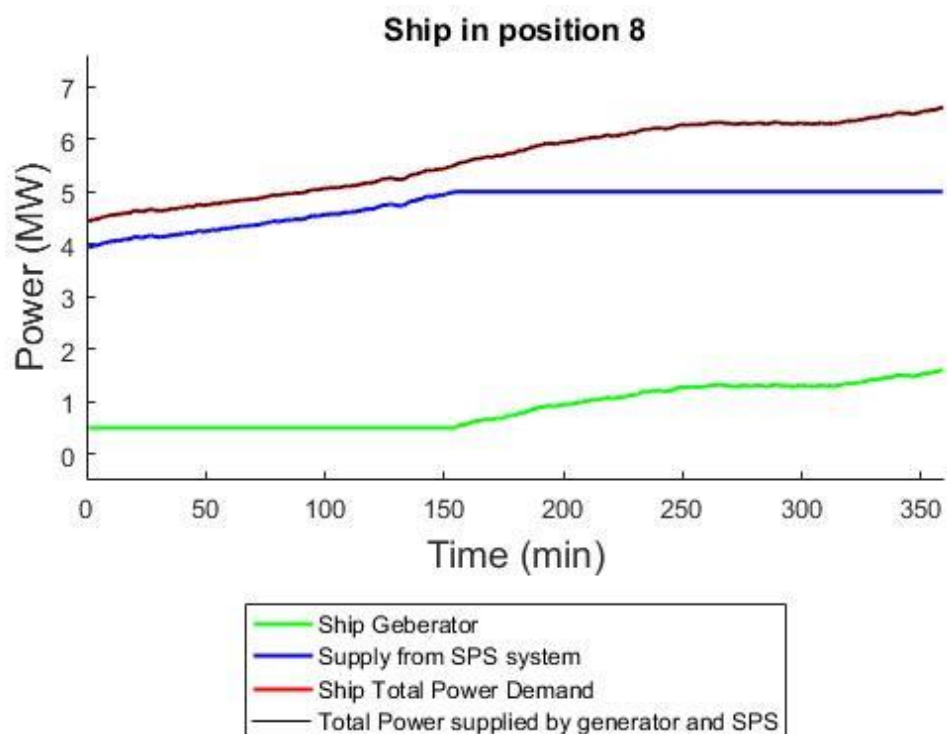
Εικόνα 6.40 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 5 (Σενάριο λειτουργίας 2)



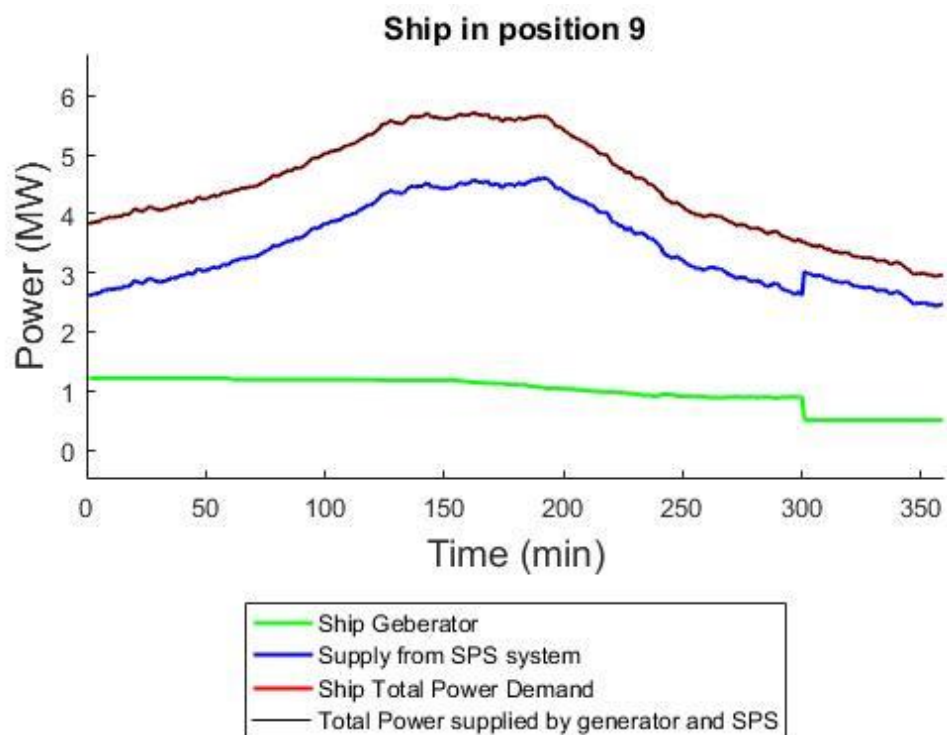
Εικόνα 6.41 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 6 (Σενάριο λειτουργίας 2)



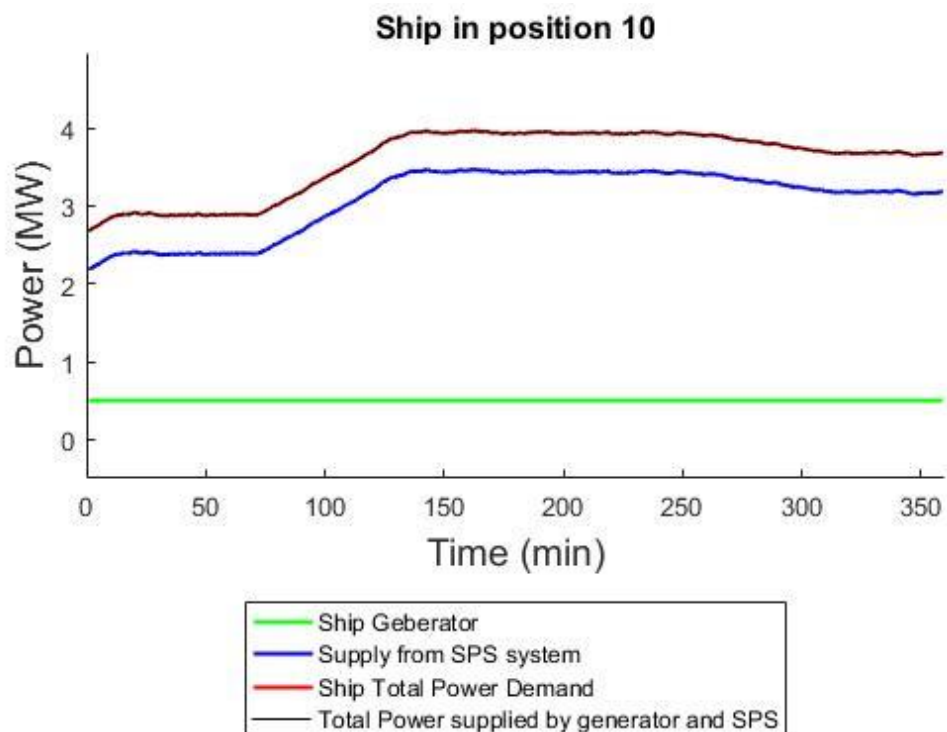
Εικόνα 6.42 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 7 (Σενάριο λειτουργίας 2)



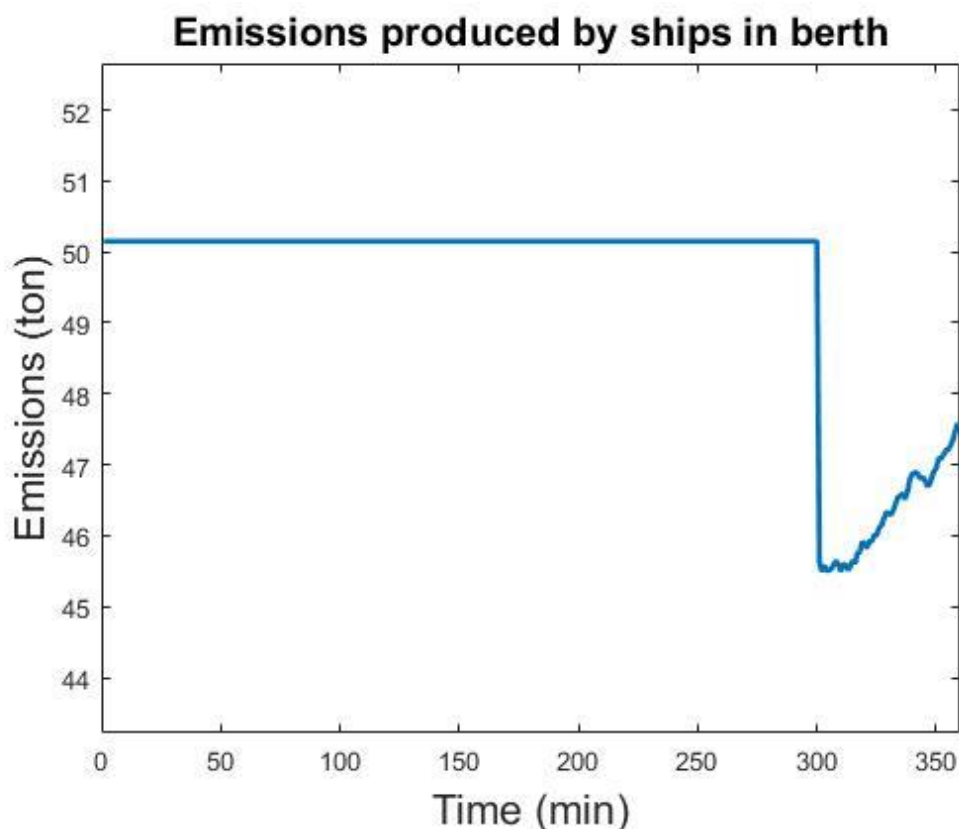
Εικόνα 6.43 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 8 (Σενάριο λειτουργίας 2)



Εικόνα 6.44 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 9 (Σενάριο λειτουργίας 2)



Εικόνα 6.45 Ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας του πλοίου που βρίσκεται στην θέση ελλιμενισμού 10 (Σενάριο λειτουργίας 2)

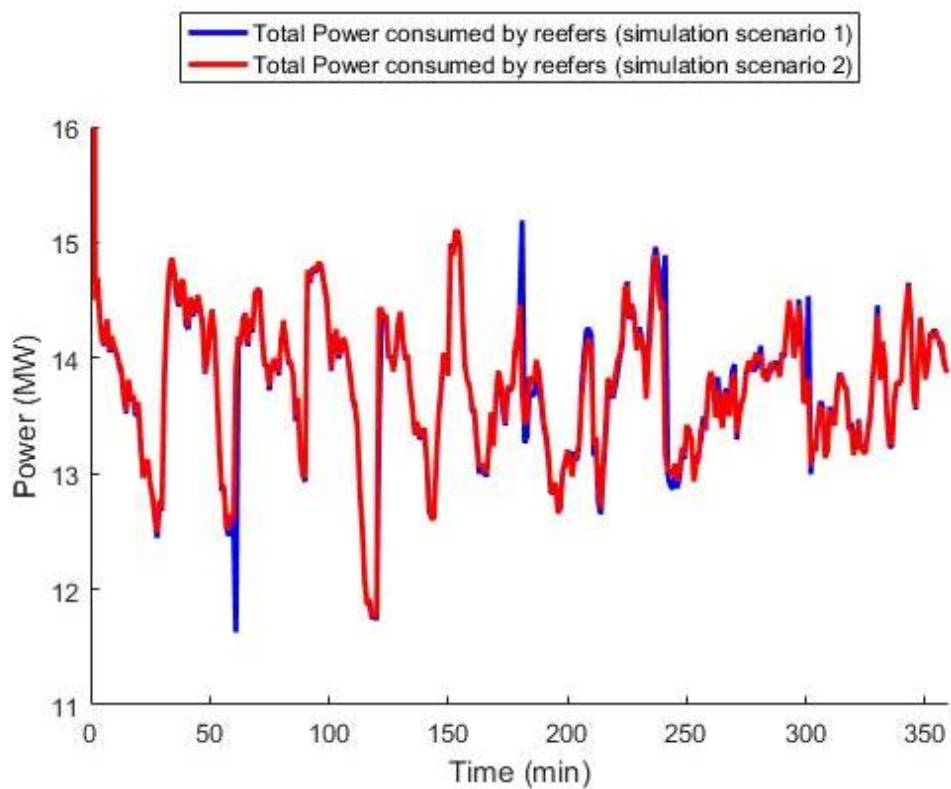


Εικόνα 6.46 Εξέλιξη των συνολικά παραγόμενων ρύπων από τα ελλιμενισμένα πλοία κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης (Σενάριο λειτουργίας 2)

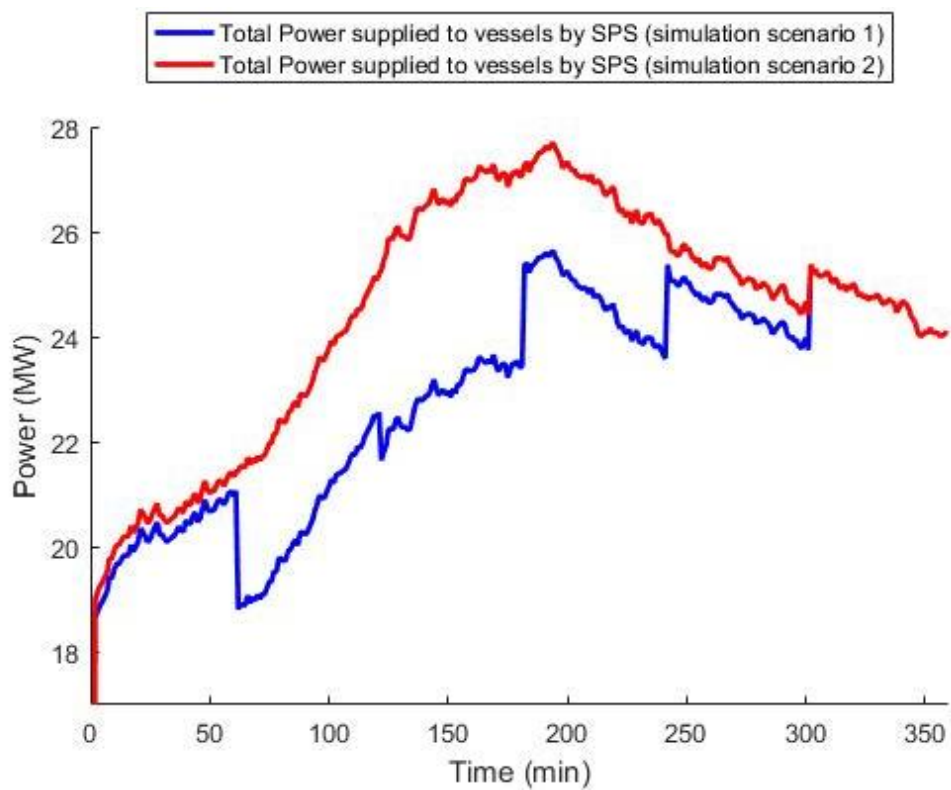
Στην εικόνα 6.47 φαίνεται η καμπύλη των συνολικών ρύπων που εκπέμπονται από τη λειτουργία των βοηθητικών μηχανών των πλοίων, που βρίσκονται ελλιμενισμένα στις εγκαταστάσεις του λιμένα. Η μέγιστη τιμή των εκπεμπόμενων ρύπων από τα πλοία με την ενεργοποίηση των αντίστοιχων περιορισμών είναι 50.15 τόνοι. Συνεπώς, φαίνεται η αποδοτικότητα της προτεινόμενης μεθόδου, καθώς επιτυγχάνεται η μείωση της μέγιστης τιμής των εκπεμπόμενων ρύπων από τα πλοία κατά 30%, καλύπτοντας, όμως, εξολοκλήρου τη ζήτηση ισχύος των πλοίων, αυξάνοντας την τροφοδοσία τους μέσω του SPS.

6.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων των δύο σεναρίων λειτουργίας

Σε αυτή την παράγραφο, παρατίθενται μερικά διαγράμματα (εικόνες 6.48-6.50) για τη σύγκριση σημαντικών μεγεθών σε κάθε σενάριο λειτουργίας.

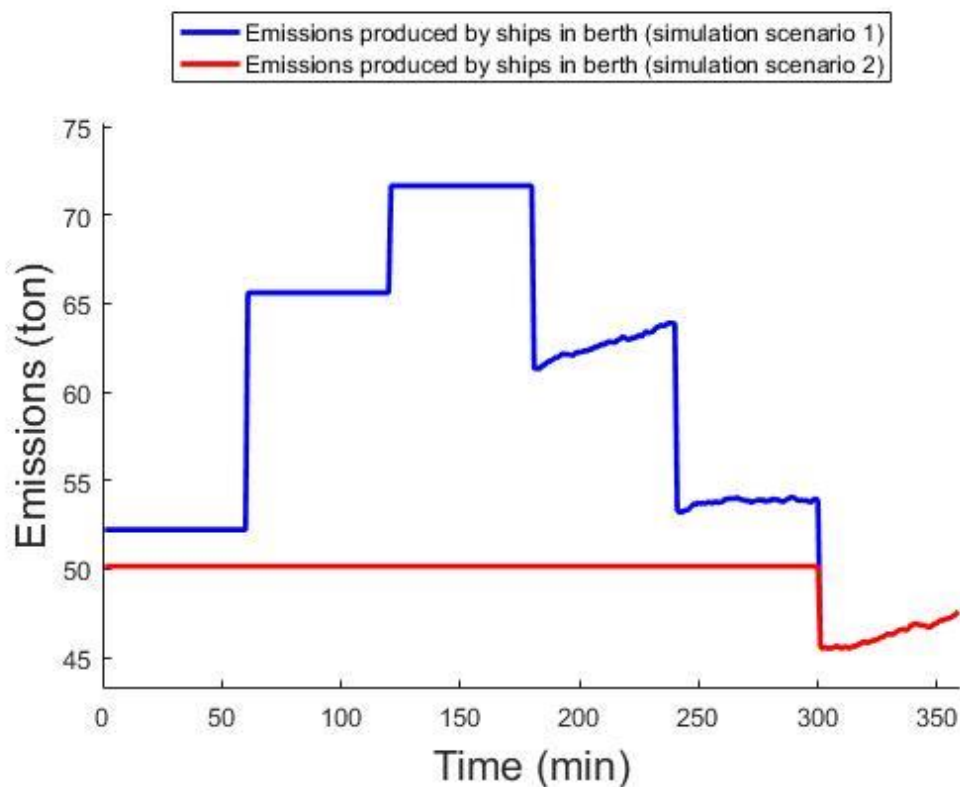


Εικόνα 6.47 Συνολική κατανάλωση ισχύος από τα reefers στα δύο σενάρια λειτουργίας



Εικόνα 6.48 Συνολική κατανάλωση ισχύος από τα ελλιμενισμένα πλοία μέσω του SPS

Από την εικόνα 6.48 προκύπτει πως οι καμπύλες της συνολικής κατανάλωσης ισχύος από τα reefers που φιλοξενούνται στον λιμένα είναι παρόμοιες και ταυτίζονται σε πολλά σημεία. Όσον αφορά την κατανάλωση ισχύος των ελλιμενισμένων πλοίων από το SPS (εικόνα 6.49) παρατηρείται, όπως ήταν αναμενόμενο, σημαντική αύξηση της συνολικής καμπύλης κατανάλωσης ισχύος των πλοίων μέσω του SPS στο δεύτερο σενάριο λειτουργίας σε σχέση με το πρώτο σενάριο. Η αύξηση αυτή προκύπτει ως αποτέλεσμα των επιβαλλόμενων περιορισμών στους συνολικούς ρύπους που παράγονται από τα πλοία. Η πολύ σημαντική μείωση που επιτυγχάνεται στους συνολικούς εκπεμπόμενους ρύπους με την εφαρμογή των περιορισμών στο δεύτερο σενάριο λειτουργίας αποτυπώνεται στα διαγράμματα της εικόνας 6.50.



Εικόνα 6.49 Συνολικοί παραγόμενοι ρύποι από τα ελλιμενισμένα πλοία στα δύο σενάρια λειτουργίας

7. Εφαρμογές της μεθόδου, μελλοντική έρευνα και συμπεράσματα

7.1. Εφαρμογές της μεθόδου

Αρχικά, η μέθοδος μπορεί να αξιοποιηθεί για τη μείωση των γρήγορων και απότομων μεταβολών της κατανάλωσης ή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλα λιμάνια. Ιδιαίτερα, σε εφαρμογές που βασίζονται στην παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ, η προτεινόμενη μέθοδος αποτελεί έναν καινοτόμο τρόπο για την διαχείριση της αβεβαιότητας που υπάρχει στην παραγωγή από ΑΠΕ, αλλά και τη βελτίωση της ποιότητας και της αξιοπιστίας του ευρύτερου ηλεκτρικού δικτύου του λιμένα.

Επιπλέον, η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να αξιοποιηθεί για τη βελτίωση της ακρίβειας της διαδικασίας πρόβλεψης και ημερήσιου προγραμματισμού (Day-Ahead Scheduling).

Τέλος, μία σημαντική εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου ελέγχου είναι η παροχή υποστήριξης σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Για παράδειγμα, ο έλεγχος συχνότητας σε ασταθή συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ή συστήματα με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ αποτελεί μία πολύ σημαντική και χρήσιμη εφαρμογή της μεθόδου. Μία σύντομη περιγραφή της χρήσης μίας παρόμοιας μεθόδου για έλεγχο συχνότητας μπορεί να βρεθεί στο [1].

7.2. Μελλοντική Έρευνα

Η προτεινόμενη μέθοδος ελέγχου ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας για μεγάλα λιμάνια αποτελεί μία καινοτόμο μέθοδο, η οποία όμως μπορεί να εμπλουτιστεί και να επεκταθεί.

Αρχικά, τα περισσότερα μεγέθη που προέρχονται από πρόβλεψη προκύπτουν από απλές τεχνικές πρόβλεψης και ημερήσιου προγραμματισμού (DAS). Η μέθοδος θα μπορούσε να βελτιωθεί με την ανάπτυξη, αξιοποίηση και ενσωμάτωση έξυπνων, αποτελεσματικών και μεγαλύτερης ακρίβειας αλγορίθμων για την πρόβλεψη των μεγεθών και τον ημερήσιο προγραμματισμό.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι γερανοί φορτοεκφόρτωσης καταναλώνουν ένα σημαντικό τμήμα της συνολικής ζήτησης ισχύος ενός τυπικού εμπορικού λιμένα. Στην παρούσα εργασία οι γερανοί που βρίσκονται στις λιμενικές εγκαταστάσεις θεωρούνται ως ανελαστικά φορτία. Η προτεινόμενη μέθοδος θα μπορούσε να βελτιωθεί με την διερεύνηση της δυνατότητας παροχής ευελιξίας από τους γερανούς και την ενσωμάτωση τους στην τεχνική έξυπνης διαχείρισης της ζήτησης ισχύος του λιμένα.

Τέλος, η αποδοτικότητα της μεθόδου θα μπορούσε να αυξηθεί σημαντικά με την ενσωμάτωση στο συνολικό σύστημα διαχείρισης ηλεκτρικής ισχύος εγκαταστάσεων

στάθμευσης και φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Η ευελιξία που μπορούν να παρέχουν τα ηλεκτρικά οχήματα μπορεί να αυξήσει σημαντικά τις δυνατότητες και την αποτελεσματικότητα της μεθόδου.

7.3. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία προτείνεται μία μέθοδος διαχείρισης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλων λιμένων σε πραγματικό χρόνο. Το δίκτυο ενέργειας των μεγάλων λιμένων αποτελείται από ένα πλήθος ευέλικτων και ανελαστικών φορτίων. Η προτεινόμενη μέθοδος εκμεταλλεύεται την ευελιξία που προσφέρουν κάποια από τα φορτία του λιμένα, προκειμένου να αυξήσει την αποτελεσματικότητα και την αποδοτικότητα του λιμένα.

Ένας από τους βασικούς στόχους της μεθόδου είναι ο περιορισμός των εκπεμπόμενων αερίων ρύπων από τα ελλιμενισμένα πλοία. Παράλληλα, επιδιώκεται η απορρόφηση των απότομων μεταβολών της παραγωγής ενέργειας από το αιολικό πάρκο που διαχειρίζεται ο λιμενικός οργανισμός και των διαφορών ανάμεσα στην πρόβλεψη και την πραγματική τιμή της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας των συνδεδεμένων στο δίκτυο του λιμένα πλοίων, με την ταυτόχρονη ικανοποίηση ενός πλήθους περιορισμών που διέπουν τη λειτουργία του συστήματος.

Η προτεινόμενη μέθοδος αναπτύσσεται αξιοποιώντας τεχνολογίες της καταναεμημένης τεχνητής νοημοσύνης και συγκεκριμένα τα πολυπρακτορικά συστήματα. Η επιλογή της υλοποίησης με πολυπρακτορικά συστήματα προκύπτει εξαιτίας της πολυπλοκότητας του συστήματος ισχύος του λιμένα και το αυξημένο υπολογιστικό κόστος που απαιτείται για την διαχείριση της ζήτησης αυτού του συστήματος σε πραγματικό χρόνο.

Η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου εξετάστηκε με λεπτομερείς προσομοιώσεις που αναπτύχθηκαν σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab. Οι προσομοιώσεις έγιναν για μελέτες περίπτωσης μεγάλων λιμένων με χιλιάδες εμπορευματοκιβώτια ελεγχόμενης θερμοκρασίας, πλοία με διαφορετικές καμπύλες ζήτησης ισχύος και με παραγωγή ενέργειας από αιολικό πάρκο με μεγάλες διακυμάνσεις. Από τις προσομοιώσεις προκύπτει πως η μέθοδος επιτυγχάνει την προσαρμογή της συνολικής κατανάλωσης του λιμένα στο επιθυμητό σημείο ρύθμισης.

Η αποδοτικότητα της προτεινόμενης μεθόδου είναι απολύτως ικανοποιητική καθώς απαιτούνται μόνον τρεις γύροι επικοινωνίας μεταξύ των διαφορετικών ιεραρχικών επιπέδων του πολυπρακτορικού συστήματος. Επιπλέον, το απαιτούμενο υπολογιστικό κόστος είναι μικρό σε σχέση με το πλήθος των υπολογισμών που απαιτούνται, ενώ δεν απαιτείται σημαντικός χρόνος και χωρητικότητα για την πραγματοποίησή τους.

Βιβλιογραφία και αναφορές

- [1] Kanellos, F. D. (2017). Real-Time Control Based on Multi-Agent Systems for the Operation of Large Ports as Prosumer Microgrids. *IEEE Access*, 5, 9439-9452. doi:10.1109/access.2017.2706091
- [2] F. D. Kanellos, E. S. M. Volanis and N. Hatziaargyriou, "Power Management Method for Large Ports with Multi-Agent Systems," *IEEE Transactions on Smart Grid*, doi: 10.1109/TSG.2017.2762001
- [3] M.E. Doudounakis & F.D. Kanellos. Active power management in "green" ports. European conference on Shipping, Intermodalism & Ports, ECONSHIP2015, 24-27 June, Chios, GREECE.
- [4] UNCTAD (2015). Review of Maritime Transport, 2015. United Nations Conference on Trade and Development.
- [5] Acciaro M., Ghiara H. & Cusano M. I. (2014). Energy management in seaports: A new role for port authorities. *Energy Policy*, 71, 4-12. doi:10.1016/j.enpol.2014.04.013
- [6] Matulka R., DeShazo R.J., Callahan C. (2013). Moving Towards Resiliency: An Assessment of the Costs and Benefits of Energy Security Investments for the San Pedro Bay Ports. UCLA, Luskin School of Public Affairs.
- [7] European Commission (2010). COMMUNICATION FROM THE COMMISSION EUROPE 2020. A strategy for smart, sustainable and inclusive growth.
Διαθέσιμο: <http://ec.europa.eu/eu2020/pdf/COMPLET%20EN%20BARROSO%20%20%200007%20-%20Europe%202020%20-%20EN%20version.pdf>
- [8] Vellinga Tiedo (2011). Green Ports, Fiction, condition or foregone conclusion?
- [9] Green strategy synthesis report: Towards green growth. (May 2011). OECD.
Διαθέσιμο: www.oecd.org
- [10] IMO (2005). Annex VI, Prevention of Air Pollution from Ships. MARPOL 73/78, International Convention for the Prevention of Pollution from Ships.
- [11] The European Parliament and the Council of the European Union (2012). Directive 2012/33/EC. Official Journal of the European Union.
- [12] T.G. Papoutsoglou (2012). A Cold Ironing Study on Modern Ports, Implementation and Benefits Thriving for Worldwide Ports, Master of Science Thesis, Dept. Naval Archit. & Marine Engin., National Tech. Univ. of Athens, Athens, Greece.
- [13] Shao Chao-Feng, Ju Mei-ting, Yu Jing-lei, HU Cui-Juan, Chu Chun-li (2009). The strategies and proposals for ecological port construction in China in Journal US-China Public Administration, Volume 6, No 7 (Serial No 50).

- [14] Bowerman B., Braverman J., Taylor J., Todosow H., Von Wimmersperg U. (2000). The vision of a smart city. In Proceedings of the 2nd International Life Extension Technology Workshop, Paris, France.
- [15] G. Wilmsmeier et.al. (2014). Energy Consumption and Efficiency: Emerging Challenges from Reefer Trade in South American Container Terminals”, ISU Corp., Issue N. 329, Number 1, 2014.
- [16] Strbac, G. (2008). Demand side management: Benefits and challenges. *Energy Policy*, 36(12), 4419-4426. doi:10.1016/j.enpol.2008.09.030
- [17] The e-harbours journey Point of Arrival: Smart Energy Networks in the North Sea Region (2014). Report for e-harbours project. Διαθέσιμο: <http://eharbours.eu/wp-content/uploads/e-harbours-report-Point-of-Arrival-Final.pdf>
- [18] ISO/IEC 6346:1995 (E) (1995), 3rd Edition, Freight containers — Coding, identification and marking, Geneva, Switzerland.
- [19] German Insurance Association (2016, October). *Container Handbook* [Online]. Διαθέσιμο: https://www.containerhandbuch.de/chb_e/wild/index.html
- [20] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2010). *ASHRAE handbook: Refrigeration*. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
- [21] R. Heij (2015). Opportunities for peak shaving electricity consumption at container terminals, M.S. thesis. Dept. Transp. and Log., Delft Univ., Delft, Netherlands.
- [22] T. K. Tran (2012). Study of Electrical Usage and Demand at the Container Terminal, Ph.D. dissertation. Centre for Intelligent Systems Research, Deakin Univ., Melbourne, Australia.
- [23] ISO/IEC 668:2013(E) (2013). 6th Edition, Series 1 freight containers Classification, dimensions and ratings, Geneva, Switzerland.
- [24] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2006). Thermal Properties of Foods, ch.9 in *ASHRAE Handbook-Refrigeration: SI edition*, Atlanta, GA.
- [25] Sciberras, E. A., Zahawi, B., & Atkinson, D. J. (2017). Reducing shipboard emissions – Assessment of the role of electrical technologies. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 51, 227-239. doi:10.1016/j.trd.2016.10.026
- [24] K. Marquart, T. Haasdijk, G. B. Ferrari, and R. Schmidhalter (2010). Shore-to-ship power, *ABB Review*, no. 4, pp. 56-60.
- [26] Tsekouras, G. J., & Kanellos, F. D. (2016). Ship to shore connection — Reliability analysis of ship power system. *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. doi:10.1109/icelmach.2016.7732944

- [27] Prousalidis, J. M., Tsekouras, G. J., & Kanellos, F. (2011). New challenges emerged from the development of more efficient electric energy generation units. *2011 IEEE Electric Ship Technologies Symposium*. doi:10.1109/ests.2011.5770901
- [28] Khersonsky, Y., Islam, M., & Peterson, K. (2007). Challenges of Connecting Shipboard Marine Systems to Medium Voltage Shoreside Electrical Power. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 43(3), 838-844. doi:10.1109/tia.2007.895810
- [29] P. Ericsson, I. Fazlagic. Shore Side Power Supply. A Feasibility Study and a Technical Solution for an On-shore Electrical Infrastructure to Supply Vessels with Electric Power While at port. Master of Science Thesis, Department of Energy and Environment, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 2008.
- [30] Zis, T., North, R. J., Angeloudis, P., Ochieng, W. Y., & Harrison Bell, M. G. (2014). Evaluation of cold ironing and speed reduction policies to reduce ship emissions near and at ports. *Maritime Economics & Logistics*, 16(4), 371-398. doi:10.1057/mel.2014.6
- [31] Michail, A. (2012). Energy use and climate change; The vision of the European Port Sector. Presented at Mediterranean Sea ports contribution against Climate Change, Final conference, CLIMEPORT Project, Valencia.
- [32] Kabouris, J., & Kanellos, F. D. (2009). Impacts of Large Scale Wind Penetration on Energy Supply Industry. *Energies*, 2(4), 1031-1041. doi:10.3390/en20401031
- [33] <http://www.mfa.gr/exoteriki-politiki/i-ellada-stous-diethneis-organisismous/imo.html>
- [34] EMSA (2010). Preventing Pollution from Ships [leaflet]. Διαθέσιμο: <http://www.emsa.europa.eu/implementation-tasks/environment/item/224-preventing-pollution-from-ships-leaflet.html>
- [35] The European Parliament and the Council of the European Union (2000). Directive 2000/59/EC. Official Journal of the European Union.
- [36] The European Parliament and the Council of the European Union (2012). Directive 2005/35/EC. Official Journal of the European Union.
- [37] McArthur, S. D., Davidson, E. M., Catterson, V. M., Dimeas, A. L., Hatziaargyriou, N. D., Ponci, F., & Funabashi, T. (2007). Multi-Agent Systems for Power Engineering Applications—Part I: Concepts, Approaches, and Technical Challenges. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(4), 1743-1752. doi:10.1109/tpwrs.2007.908471 [37] Brewka, G. (1996).
- [38] Artificial intelligence—a modern approach by Stuart Russell and Peter Norvig, Prentice Hall. Series in Artificial Intelligence, Englewood Cliffs, NJ. *The Knowledge Engineering Review*, 11(01), 78. doi:10.1017/s0269888900007724
- [39] Maes, P. (1995). Artificial life meets entertainment: lifelike autonomous agents. *Communications of the ACM*, 38(11), 108-114. doi:10.1145/219717.219808

- [40] Foner, L. N. (1997). Entertaining agents. *Proceedings of the first international conference on Autonomous agents - AGENTS '97*. doi:10.1145/267658.267684
- [41] Hayes-Roth, B. (1995). An architecture for adaptive intelligent systems. *Artificial Intelligence*, 72(1-2), 329-365. doi:10.1016/0004-3702(94)00004-k
- [42] M. Wooldridge, G. Weiss, Ed., “Intelligent Agents,” in *Multi-agent Systems*. Cambridge, MA: MIT Press, Apr. 1999, pp. 3–51.
- [43] Wooldridge, M., & Jennings, N. R. (1995). Intelligent agents: theory and practice. *The Knowledge Engineering Review*, 10(02), 115. doi:10.1017/s0269888900008122
- [44] Glavic M. (2006). Agents and Multi-Agent Systems: A Short Introduction for Power Engineers. University of Liege. (Technical Report)
- [45] Γεωργούλη Κ. (2015). Τεχνητή Νοημοσύνη – Μία εισαγωγική προσέγγιση. ΣΕΑΒ. (Ηλεκτρονικό Σύγγραμμα) Διαθέσιμο: <https://repository.kallipos.gr/pdfviewer/web/viewer.html?file=/bitstream/11419/3381/1/%CE%A4%CE%B5%CF%87%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%AE%20%CE%9D%CE%BF%CE%B7%CE%BC%CE%BF%CF%83%CF%8D%CE%BD%CE%B7.pdf>
- [46] Weiss, G. (1999). Multi-agent systems: A modern approach to distributed artificial intelligence. Cambridge, MIT Press.
- [47] Kantamneni, A., Brown, L. E., Parker, G., & Weaver, W. W. (2015). Survey of multi-agent systems for microgrid control. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 45, 192-203. doi:10.1016/j.engappai.2015.07.005
- [48] Jennings, N.R., Sycara, K. & Wooldridge, M. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (1998) 1: 7. <https://doi.org/10.1023/A:1010090405266>
- [49] Singh VK, Modanwal N, Basak S (2011) MAS coordination strategies and their application in disaster management domain. In: 2nd International conference on intelligent agent and multi-agent systems (IAMA), pp 14–19. IEEE
- [50] Ματσατσίνης Νικόλαος, Σπανουδάκης Νικόλαος, Σαμαράς Ανδρέας (2005) Εισαγωγή στην Τεχνητή Νοημοσύνη και στα Συστήματα Πολλαπλών Πρακτόρων, Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών
- [51] Jennings, N. R., Faratin, P., Lomuscio, A. R., Parsons, S., Sierra, C. and Wooldridge, M. (2001) Automated Negotiation: Prospects, Methods and Challenges *International Journal of Group Decision and Negotiation*, 10, (2), pp. 199-215.
- [52] Multi-Agent Systems for Power Engineering Applications—Part II: Technologies, Standards, and Tools for Building Multi-agent Systems. (2007). *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(4), 1753-1759. doi:10.1109/tpwrs.2007.908472

Παράρτημα

Παράρτημα Ι: Θερμικές ιδιότητες των τροφίμων

Food Item	Moisture	Protein,	Fat, %	Carbohydrate		Ash, %	Initial	Specific Heat	Specific Heat	Latent
	Content,	%		Total, %	Fiber, %		Freezing	Above	Below	
	%	%		%	%		Point,	Freezing,	Freezing	
	x_{wo}	x_p	x_f	x_c	x_{fb}	x_a	°C	kJ/(kg·K)	kJ/(kg·K)	Heat of Fusion, kJ/kg
Vegetables										
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

Fruits										
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
Currants, 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
Whole Fish										
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
Shellfish										
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

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
Pork										
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
Sausage										
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
Poultry Products										
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
Egg										
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
Lamb										
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
Dairy Products										
Butter	17.94	0.85	81.11	0.06	0.0	0.04	—	2.40	2.65	60
Cheese										
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

Ice Cream										
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
Milk										
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
Nuts, Shelled										
Almonds	4.42	19.95	52.21	20.40	10.90	3.03	—	2.20	—	15
Filberts	5.42	13.04	62.64	15.30	6.10	3.61	—	2.09	—	18
Peanuts, raw	6.5	25.80	49.24	16.14	8.50	2.33	—	2.23	—	22
dry roasted with salt	1.55	23.68	49.66	21.51	8.00	3.60	—	2.08	—	5
Pecans	4.82	7.75	67.64	18.24	7.60	1.56	—	2.17	—	16
Walnuts, English	3.65	14.29	61.87	18.34	4.80	1.86	—	2.09	—	12
Candy										
Fudge, vanilla	10.90	1.10	5.40	82.30	0.0	0.40	—	1.90	—	36
Marshmallows	16.40	1.80	0.20	81.30	0.10	0.30	—	2.02	—	55
Milk chocolate	1.30	6.90	30.70	59.20	3.40	1.50	—	1.83	—	4
Peanut brittle	1.80	7.50	19.10	69.30	2.00	1.50	—	1.77	—	6
Juice and Beverages										
Apple juice, unsweetened	87.93	0.06	0.11	11.68	0.10	0.22	—	3.87	1.78	294
Grapefruit juice, sweetened	87.38	0.58	0.09	11.13	0.10	0.82	—	3.85	1.78	292
Grape juice, unsweetened	84.12	0.56	0.08	14.96	0.10	0.29	—	3.77	1.82	281
Lemon juice	92.46	0.40	0.29	6.48	0.40	0.36	—	3.99	1.73	309
Lime juice, unsweetened	92.52	0.25	0.23	6.69	0.40	0.31	—	3.99	1.73	309
Orange juice	89.01	0.59	0.14	9.85	0.20	0.41	-0.4	3.90	1.76	297
Pineapple juice, unsweetened	85.53	0.32	0.08	13.78	0.20	0.30	—	3.81	1.81	286
Prune juice	81.24	0.61	0.03	17.45	1.00	0.68	—	3.71	1.87	271
Tomato juice	93.90	0.76	0.06	4.23	0.40	1.05	—	4.03	1.71	314
Cranberry-apple juice drink	82.80	0.10	0.0	17.10	0.10	0.0	—	3.73	1.84	277
Cranberry-grape juice drink	85.60	0.20	0.10	14.00	0.10	0.10	—	3.81	1.80	286
Fruit punch drink	88.00	0.0	0.0	11.90	0.10	0.10	—	3.87	1.78	294
Club soda	99.90	0.0	0.0	0.0	0.0	0.10	—	4.17	1.63	334
Cola	89.40	0.0	0.0	10.40	0.0	0.10	—	3.90	1.76	299
Cream soda	86.70	0.0	0.0	13.30	0.0	0.10	—	3.83	1.79	290
Ginger ale	91.20	0.0	0.0	8.70	0.0	0.0	—	3.95	1.73	305
Grape soda	88.80	0.0	0.0	11.20	0.0	0.10	—	3.89	1.77	297
Lemon-lime soda	89.50	0.0	0.0	10.40	0.0	0.10	—	3.90	1.76	299
Orange soda	87.60	0.0	0.0	12.30	0.0	0.10	—	3.86	1.78	293
Root beer	89.30	0.0	0.0	10.60	0.0	0.10	—	3.90	1.76	298
Chocolate milk, 2% fat	83.58	3.21	2.00	10.40	0.50	0.81	—	3.78	1.83	279
Miscellaneous										
Honey	17.10	0.30	0.0	82.40	0.20	0.20	—	2.03	—	57
Maple syrup	32.00	0.00	0.20	67.20	0.0	0.60	—	2.41	—	107
Popcorn, air-popped	4.10	12.00	4.20	77.90	15.10	1.80	—	2.04	—	14
oil-popped	2.80	9.00	28.10	57.20	10.00	2.90	—	1.99	—	9
Yeast, baker's, compressed	69.00	8.40	1.90	18.10	8.10	1.80	—	3.55	2.17	230

*Composition data from USDA (1996). Initial freezing point data from Table 1 in Chapter 30 of the 1993 *ASHRAE Handbook—Fundamentals*. Specific heats calculated from equations in this chapter. Latent heat of fusion obtained by multiplying water content expressed in decimal form by 334 kJ/kg, the heat of fusion of water (Table 1 in Chapter 30 of the 1993 *ASHRAE Handbook—Fundamentals*).

