



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΡΥΘΜΙΣΗΣ
ΧΗΜΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ (Α.Σ.Ρ.Χ.Δ.Ε)

**Βελτιστοποίηση της προμήθειας Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου
από τις αγορές των μακροπρόθεσμων συμβολαίων και άμεσης
παράδοσης**

Διπλωματική Εργασία
της Σωτηρίας Μπουρδούβαλη
Α.Ε.Μ.:5343

Επιβλέπων: Μιχαήλ Γεωργιάδης, Καθηγητής

Θεσσαλονίκη,
Νοέμβριος 2023

(Η σελίδα αυτή αφέθηκε σκοπίμως κενή)

Περίληψη

Το υγροποιημένο φυσικό αέριο (ΥΦΑ) γίνεται όλο και περισσότερο ένα ορυκτό καύσιμο επιλογής, ιδίως στις αναπτυσσόμενες οικονομίες. Η εμπορία του ΥΦΑ διέπεται παραδοσιακά από μακροπρόθεσμες συμβάσεις (LTCs). Ωστόσο, πρόσφατα, η εμπορία φορτίων ΥΦΑ από την αγορά άμεσης παράδοσης (spot market) γίνεται όλο και πιο δημοφιλής, λόγω της ευελιξίας που προσφέρει στον αγοραστή. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται ολιγάριθμες προσεγγίσεις για τη λήψη αποφάσεων προμήθειας υγροποιημένου φυσικού αερίου, τόσο από φορτία της αγοράς άμεσης παράδοσης, όσο και από την αγορά των μακροχρόνιων συμβάσεων. Συνεπώς, κρίνεται απαραίτητη η εξέταση του συνδυασμού των δύο αγορών, με σκοπό την βελτιστοποίηση του κόστους προμήθειας. Στην παρούσα εργασία, μελετάται η τακτική απόφαση προμήθειας ΥΦΑ, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η διαφορά της τιμής του, μεταξύ της αγοράς άμεσης παράδοσης και της αγοράς των μακροπρόθεσμων συμβάσεων, η ζήτηση στους τερματικούς σταθμούς επαναεριοποίησης και οι περιορισμοί από τις μακροχρόνιες συμβάσεις. Αρχικά, αναπτύσσεται ένα μοντέλο μεικτού ακέραιου προγραμματισμού (MILP), με όλους τους απαραίτητους περιορισμούς. Στη συνέχεια, το προτεινόμενο μοντέλο εφαρμόζεται για ένα βιβλιογραφικό παράδειγμα και ύστερα στον ελλαδικό χώρο για τον ήδη υπάρχοντα τερματικό σταθμό της Ρεβυθούσας και τον υπό κατασκευή τερματικό σταθμό της Αλεξανδρούπολης. Η επίλυση του διεκπεραιώνεται με την εισαγωγή του στο περιβάλλον βελτιστοποίησης GAMS και την χρήση του επιλυτή ILOG CPLEX. Ειδικότερα, στην πρώτη μελέτη περίπτωσης, η λύση οδηγεί στην άφιξη 15 φορτίων ΥΦΑ από την αγορά άμεσης παράδοσης και 12 φορτίων ΥΦΑ από την μακροχρόνια σύμβαση. Στην περίπτωση της Ελλάδας ναυλώνονται 5 φορτία από την αγορά άμεσης παράδοσης και 6 φορτία από την μακροχρόνια σύμβαση. Επιπρόσθετα, πραγματοποιούνται για τις δύο μελέτες περίπτωσης λεπτομερείς παραμετρικές αναλύσεις. Στην πρώτη μελέτη περίπτωσης διεξάγεται μία παραμετρική ανάλυση 27 σεναρίων στην οποία για τρεις βασικές βαθμίδες ζήτησης διακρίνονται συνδυαστικές υποπεριπτώσεις σχετικές με την τιμή ΥΦΑ στην άμεση αγορά και τον υποχρεωτικό προμηθευόμενο όγκο της σύμβασης. Από τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης συμπεραίνεται ότι, τα όρια του όγκου της σύμβασης και η αύξηση της τιμής ΥΦΑ στην αγορά άμεσης παράδοσης επηρεάζουν καθοριστικά το κόστος. Αντίστοιχα, πραγματοποιείται μία παραμετρική ανάλυση 9 σεναρίων για την περίπτωση της Ελλάδας, με άξονα την δυναμικότητα των δύο σταθμών και την ρευστότητα των τιμών ΥΦΑ στην αγορά άμεσης παράδοσης. Εντέλει, δεδομένης της μελλοντικής αύξησης της ζήτησης στον σταθμό της Αλεξανδρούπολης, λόγω της τροφοδότησης και άλλων γειτονικών χωρών με ΥΦΑ (π.χ. Βουλγαρία) μελετάται η επέκταση της δυναμικότητας του σταθμού της Αλεξανδρούπολης.

Abstract

Liquefied natural gas (LNG) is increasingly becoming a fossil fuel of choice, particularly in developing economies. LNG trading has traditionally been governed by long-term contracts (LTCs). However, recently, trading LNG cargos on the spot market has become increasingly popular because of the flexibility it offers the buyer. Limited approaches to LNG supply decision-making are reported in the literature, both from shippers in the spot market and from the long-term contract market. It is therefore considered necessary to examine the combination of the two markets in order to optimize the cost of supply. In this thesis, the tactical decision to supply LNG is studied, considering factors such as the price difference between the spot market and long-term contracts, the demand at regasification terminals, and the constraints of long-term contracts. First, a mixed integer programming (MILP) model is developed with all the necessary constraints. Then, the proposed model is applied for a bibliographical example, and then in Greece for the already existing terminal of Revithousa and the terminal of Alexandroupolis, which is under construction. Its solution is performed by importing it into the GAMS optimization environment and using the ILOG CPLEX solver. In the first case study, the solution leads to the arrival of 15 LNG shipments from the spot market and 12 cargos from the long-term contract. In the case of Greece, 5 shipments are chartered from the spot market and 6 shipments from the long-term contract. In addition, detailed parametric analyses are performed for the two case studies. In the first case study, a parametric analysis of 27 scenarios is performed in which, for three basic levels of demand, combined sub-cases relating to the price of LNG on the spot market and the mandatory supply volume of the contract are distinguished. From the results of the parametric analysis, it is concluded that the limits of the volume of the contract and the increase in the price of LNG in the spot market significantly influence the cost. Accordingly, a parametric analysis of nine scenarios is being performed for the case of Greece, focusing on the capacity of the two terminals and the volatility of LNG prices in the spot market. Finally, given the future increase in demand at the Alexandroupolis terminal, due to the supply of other neighboring countries with LNG (e. g. Bulgaria), the expansion of the capacity of the Alexandroupolis station is studied.

Ευχαριστίες

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, κύριο Γεωργιάδη Μιχαήλ, ο οποίος μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα από τα πιο ενδιαφέροντα και απαιτητικά αντικείμενα της σχολής. Ακόμη, τον ευχαριστώ για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, την καθοδήγησή του αλλά και την υποστήριξή του στις προκλήσεις που κλήθηκα να αντιμετωπίσω κατά την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο Διδάκτορα Χρήστο Δημητριάδη για την ευχάριστη και ορθή συνεργασία, καθώς και για την καθοδήγηση του. Σαφώς, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον κύριο Βασίλη Γρούμπο μέλος του διοικητικού συμβουλίου του ΔΕΠΑ, ο οποίος αφιέρωσε χρόνο παρά τις ανειλημμένες υποχρεώσεις του, ώστε να με βοηθήσει με την συλλογή πληροφοριών, απαραίτητων για την διεκπεραίωση της διπλωματικής.

Ένα τεράστιο ευχαριστώ οφείλω στην οικογένεια μου για την αδιάκοπη στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια αλλά και την παρότρυνσή τους να κυνηγώ και να εκπληρώνω τα όνειρά μου.

Τέλος, αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας μου αποτελούν οι φίλοι μου τους οποίους ευχαριστώ θερμά για την αδιάλειπτη στήριξη τους αλλά και για τις ανεξίτηλες αναμνήσεις που δημιουργήσαμε μαζί.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή.....	1
1.1	Ιστορική αναδρομή	1
1.2	Το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο	2
1.3	Η εξόρυξη του φυσικού αερίου	3
1.4	Η υγροποίηση του φυσικού αερίου.....	4
1.5	Η αποθήκευση του φυσικού αερίου.....	5
1.6	Μεταφορά ΥΦΑ.....	6
1.7	Εκφόρτωση ΥΦΑ.....	7
1.8	Επαναεριοποίηση ΥΦΑ.....	8
1.9	Τα πλεονεκτήματα του ΥΦΑ.....	9
1.10	Το μέλλον του ΥΦΑ.....	10
1.11	Η τιμολόγηση του ΥΦΑ	11
1.12	Μακροπρόθεσμες συμβάσεις ΥΦΑ-Αγορά άμεσης παράδοσης	12
1.13	Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	14
1.14	Επίπεδα σχεδιασμού ΥΦΑ	16
1.15	Ο τερματικός σταθμός της Ρεβυθούσας.....	18
1.16	Ο τερματικός σταθμός της Αλεξανδρούπολης	21
2	Μαθηματικό μοντέλο.....	25
2.1	Θεωρητική περιγραφή μαθηματικού μοντέλου	25
2.2	Ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου	26
2.2.1	Ονοματολογία.....	26
2.2.2	Μαθηματική διατύπωση μοντέλου	28
3	Μελέτες περίπτωσης.....	34
3.1	Μελέτη περίπτωσης Α.....	34
3.2	Μελέτη περίπτωσης της Ελλάδας.....	37
4	Ανάλυση αποτελεσμάτων	39
4.1	Ανάλυση αποτελεσμάτων.....	40
4.2	Παραμετρική ανάλυση προβλήματος Α.....	51
4.3	Αποτελέσματα περίπτωσης της Ελλάδας	62
4.4	Παραμετρική ανάλυση για την περίπτωση της Ελλάδας.....	69
5	Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω μελέτη	74
5.1	Συμπεράσματα	74

5.2 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη.....	77
Βιβλιογραφία.....	78
Παράρτημα.....	82
Παράρτημα Α.....	82
Παράρτημα Β.....	89
Παράρτημα Γ.....	97

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1.1: Ασιατική και ευρωπαϊκή ζήτηση 2016-2021	1
Σχήμα 1.2: Η διαδικασία υγροποίησης του φυσικού αερίου.....	4
Σχήμα 1.3: Απλοποιημένη διατομή μιας απλής δεξαμενής αποθήκευσης ΥΦΑ.....	5
Σχήμα 1.4: Δεξαμενή πλοίου με μεμβράνη	6
Σχήμα 1.5: Εγκατάσταση παραλαβής ΥΦΑ	7
Σχήμα 1.6: Η εφοδιαστική αλυσίδα του ΥΦΑ	8
Σχήμα 1.7: Επίπεδα σχεδιασμού.....	16
Σχήμα 1.8: Τερματικός σταθμός ΥΦΑ στην Ρεβυθούσα	18
Σχήμα 1.9: Τερματικός σταθμός ΥΦΑ στην Αλεξανδρούπολη	21
Σχήμα 1.10: Χωροθέτηση του σταθμού της Αλεξανδρούπολης.....	21
Σχήμα 1.11: Η πλωτή μονάδα παραλαβής, αποθήκευσης και αεριοποίησης ΥΦΑ	22
Σχήμα 1.12: Ο χερσαίος αγωγός.....	23
Σχήμα 2.1: Ικανοποίηση της ζήτησης με συνδυασμό των δύο αγορών	25
Σχήμα 2.2: Σχηματική αναπαράσταση ισοζυγίου μάζας.....	30
Σχήμα 2.3: Σχηματική αναπαράσταση χρονικού περιορισμού	31
Σχήμα 3.1: Αναπαράσταση χρονικού ορίζοντα.....	34
Σχήμα 4.1: Χρονοδιάγραμμα των πλοίων της μακροχρόνιας σύμβασης.....	40
Σχήμα 4.2: Χρονοδιάγραμμα των πλοίων της αγοράς άμεσης παράδοσης.....	41
Σχήμα 4.3: Αριθμός αδιχθέντων πλοίων από κάθε αγορά σε έκαστο τερματικό σταθμό.....	42
Σχήμα 4.4: Προφίλ ζήτησης ανά τερματικό σταθμό σε κάθε χρονικό διάστημα.....	43
Σχήμα 4.5: Ποσοστά όγκου ΥΦΑ πλοίων της μακροχρόνιας σύμβασης.....	44
Σχήμα 4.6: Αποθηκευμένη ποσότητα ΥΦΑ στον τερματικό σταθμό 1 κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα.....	44
Σχήμα 4.7: Αποθηκευμένη ποσότητα ΥΦΑ στον τερματικό σταθμό 2 κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα.....	45
Σχήμα 4.8: Αποθηκευμένη ποσότητα ΥΦΑ στον τερματικό σταθμό 3 κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα.....	46

Σχήμα 4.9: Ποσοστά όγκων ΥΦΑ από τις δύο αγορές	47
Σχήμα 4.10: Καταμερισμός του συνολικού κόστους στον τερματικό σταθμό 1.....	48
Σχήμα 4.11: Καταμερισμός του συνολικού κόστους στον Τερματικό σταθμό 2	49
Σχήμα 4.12: Καταμερισμός του συνολικού κόστους στον Τερματικό σταθμό 3	50
Σχήμα 4.13 : Καταμερισμός του συνολικού κόστους για όλους τους τερματικούς σταθμούς	51
Σχήμα 4.14: Υποπεριπτώσεις σεναρίων χαμηλής ζήτησης	52
Σχήμα 4.15: Αριθμός αφιχθέντων πλοίων ανά σενάριο χαμηλής ζήτησης.....	54
Σχήμα 4.16: Όγκοι ΥΦΑ ανά σενάριο χαμηλής ζήτησης.....	54
Σχήμα 4.17: Συνολικό κόστος, κόστος ναύλωσης και κόστος ΥΦΑ συναρτήσει σεναρίων χαμηλής ζήτησης.....	55
Σχήμα 4.18: Αριθμός αφιχθέντων πλοίων ανά σενάριο μέσης ζήτησης	57
Σχήμα 4.19: Όγκοι ΥΦΑ ανά σενάριο μέσης ζήτησης	57
Σχήμα 4.20: Συνολικό κόστος, κόστος ναύλωσης και κόστος ΥΦΑ συναρτήσει σεναρίων μέσης ζήτησης.....	58
Σχήμα 4.21: Αριθμός αφιχθέντων πλοίων ανά σενάριο υψηλής ζήτησης	60
Σχήμα 4.22: Όγκοι ΥΦΑ ανά σενάριο υψηλής ζήτησης	60
Σχήμα 4.23: Συνολικό κόστος, κόστος ναύλωσης και κόστος ΥΦΑ συναρτήσει σεναρίων υψηλής ζήτησης.....	60
Σχήμα 4.24: Συνολικά κόστη όλων των σεναρίων ζήτησης	61
Σχήμα 4.25: Χρονοδιάγραμμα πλοίων από την μακροχρόνια σύμβαση (Ελλάδα).....	62
Σχήμα 4.26: Χρονοδιάγραμμα πλοίων άμεσης παράδοσης (Ελλάδα)	63
Σχήμα 4.27: Αριθμός αφιχθέντων πλοίων στους 2 τερματικούς σταθμούς.....	64
Σχήμα 4.28: Αποθηκευμένη ποσότητα ΥΦΑ σε κάθε χρονικό διάστημα στους 2 τερματικούς σταθμούς	65
Σχήμα 4.29: Ποσοστά όγκων ΥΦΑ LTC πλοίων Ελλάδας	65
Σχήμα 4.30: Ποσοστά όγκων ΥΦΑ από τις δύο αγορές	66
Σχήμα 4.31: Καταμερισμός του συνολικού κόστους στον Τερματικό σταθμό της Ρεβυθούσας	67
Σχήμα 4.32: Καταμερισμός του συνολικού κόστους στον Τερματικό σταθμό της Αλεξανδρούπολης ...	68
Σχήμα 4.33: Ποσοστό συνεισφοράς των τερματικών σταθμών στο συνολικό κόστος	69
Σχήμα 4.34: Υποπεριπτώσεις για ίσες δυναμικότητες των σταθμών.....	70
Σχήμα 4.35: Συνολικό κόστος ανά περίπτωση δυναμικότητας	70
Σχήμα 4.36: Καταμερισμός συνολικού κόστους στους 2 τερματικούς σταθμούς	72
Σχήμα 4.37: Αριθμός αφιχθέντων πλοίων στους δύο τερματικούς σταθμούς για πολύ υψηλή ζήτηση..	72

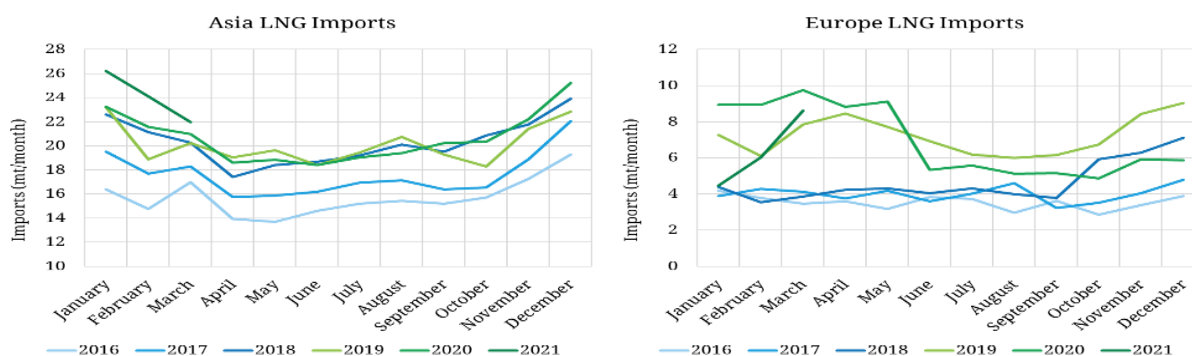
Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1: Περιεκτικότητα καυσαερίων στα διάφορα καύσιμα (Μητσόπουλος, 2023).	9
Πίνακας 3.1: Δεδομένα μελέτης περίπτωσης Α.....	36
Πίνακας 3.2: Δεδομένα μελέτης περίπτωσης της Ελλάδας.....	38
Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα μελέτης περίπτωσης Α για τον τερματικό σταθμό 1	47
Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα μελέτης περίπτωσης Α για τον τερματικό σταθμό 2	49
Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα μελέτης περίπτωσης Α για τον τερματικό σταθμό 3	50
Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα σεναρίων με χαμηλή ζήτηση	53
Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα σεναρίων με μέση ζήτηση	56
Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα σεναρίων με υψηλή ζήτηση.....	59
Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα προβλήματος Β για τον σταθμό της Ρεβυθούσας.....	67
Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα τερματικού σταθμού Αλεξανδρούπολης	68
Πίνακας Α.1: Δεδομένα Μελέτης Περίπτωσης Α.....	82
Πίνακας Α.2: Ζήτηση ΥΦΑ ανά χρονικό διάστημα και σταθμό	86
Πίνακας Β.1: Τιμή ΥΦΑ της αγοράς άμεσης παράδοσης στα 27 σενάρια	89
Πίνακας Β.2: Τιμές ελάχιστου και μέγιστου προμηθευόμενου όγκου ανά σενάριο	92
Πίνακας Β.3: Αποτελέσματα σεναρίων 1-2-3	93
Πίνακας Β.4: Αποτελέσματα σεναρίων 4-5-6	93
Πίνακας Β.5: Αποτελέσματα σεναρίων 7-8-9	93
Πίνακας Β.6: Αποτελέσματα σεναρίων 10-11-12	94
Πίνακας Β.7: Αποτελέσματα σεναρίων 13-14-15	94
Πίνακας Β.8: Αποτελέσματα σεναρίων 16-17-18	95
Πίνακας Β.9: Αποτελέσματα σεναρίων 19-20-21	95
Πίνακας Β.10: Αποτελέσματα σεναρίων 22-23-24.....	96
Πίνακας Β.11: Αποτελέσματα σεναρίων 25-26-27.....	96
Πίνακας Γ.1: Δεδομένα της μελέτης περίπτωσης της Ελλάδας.....	97
Πίνακας Γ.2: Ζήτηση ΥΦΑ (m ³) ανα χρονικό διάστημα στους 2 τερματικούς σταθμούς	99
Πίνακας Γ.3: Αποτελέσματα σεναρίων 1-2-3 ($S_{\max, \text{Αλεξ.}} < S_{\max, \text{Ρεβ.}}$)	101
Πίνακας Γ.4: Αποτελέσματα σεναρίων 4-5-6 ($S_{\max, \text{Αλεξ.}} = S_{\max, \text{Ρεβ.}}$)	101
Πίνακας Γ.5: Αποτελέσματα σεναρίων 7-8-9 ($S_{\max, \text{Αλεξ.}} = 2 \cdot S_{\max, \text{Ρεβ.}}$)	102
Πίνακας Γ.6: Αποτελέσματα σεναρίου 10 (τετραπλασιασμός ζήτησης).....	103

1 Εισαγωγή

1.1 Ιστορική αναδρομή

Η αρχή του υγροποιημένου φυσικού αερίου (ΥΦΑ) εντοπίζεται το 1917, με την έναρξη της λειτουργίας της πρώτης μονάδας αποθήκευσης στην Δυτική Βιρτζίνια. Ακολούθως, το 1941 πραγματοποιείται η δημιουργία της πρώτης εμπορικής μονάδας στο Cleveland του Ohio. Τον χειμώνα του 1959, το Methane Pioneer γίνεται το πρώτο δεξαμενόπλοιο που μεταφέρει ως εμπόρευμα υγροποιημένο φυσικό αέριο από το Lake Charles της Λουϊζιάνα στο Canvey Island του Ηνωμένου Βασιλείου. Αυτή ήταν η αρχή για την μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ΥΦΑ μέσω θαλάσσης (Rathnayaka, Khan & Amyotte, 2012). Από τότε το ΥΦΑ έχει εξελιχθεί σε ένα παγκόσμιο εμπόρευμα και περίπου το 1/3 του φυσικού αερίου σε παγκόσμια κλίμακα διακινείται με υγροποιημένη μορφή. Ως επακόλουθο της συγκεκριμένης τάσης είναι η κατασκευή τερματικών σταθμών αποθήκευσης σε αρκετές χώρες. Ειδικότερα, όμως, τα τελευταία χρόνια διαπιστώνεται μια στροφή προς την κατασκευή μικρής κλίμακας τερματικών σταθμών αποθήκευσης (Small Scale Liquefied Natural Gas, SSLNG), αφού σταδιακά πληθαίνουν οι εγκαταστάσεις παγκοσμίως. Μέχρι σήμερα, η αποθηκευτική ικανότητα αυτών των σταθμών συνολικά υπολογίζεται περίπου στους 20 εκατομμύρια τόνους ανά έτος (Millions Tones Per Year, MTPA), ενώ των υπόλοιπων συμβατικών τερματικών υπολογίζεται στους 300 εκατομμύρια τόνους ανά έτος. Η αγορά των μικρής κλίμακας τερματικών σταθμών αποθήκευσης αναπτύσσεται ταχέως και χρησιμοποιείται κυρίως για τον τομέα των μεταφορών αλλά και για την εξυπηρέτηση καταναλωτών απομακρυσμένων περιοχών καθώς και εκείνων που βρίσκονται εκτός του κυρίου δικτύου (Dong et al., 2017). Στο **Σχήμα 1.1** αποτυπώνεται η μεγάλη αύξηση που υπάρχει στην αγορά του ΥΦΑ στην Ευρώπη και την Ασία κατά τα έτη 2016-2021.



Σχήμα 1.1: Ασιατική και ευρωπαϊκή ζήτηση 2016-2021 (Duncan, 2021)

1.2 Το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο

Αναλύοντας τα χαρακτηριστικά του ΥΦΑ, πρόκειται για φυσικό αέριο, το οποίο ψύχεται στους -260°F (-162.2°C) σε κανονική πίεση και συμπυκνώνεται σε υγρό. Κατά την υγροποίηση αφαιρούνται από το φυσικό αέριο οι ποσότητες του αιθανίου (C_2H_6), του προπανίου (C_3H_8), του οξυγόνου (O_2), του αζώτου (N_2), του υδρογόνου (H_2), του νερού (H_2O), του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), των ενώσεων του θείου και πιθανών άλλων προσμείξεων, ώστε το υγροποιημένο πλέον φυσικό αέριο να είναι σχεδόν 100% μεθάνιο (Διβόλης, 2017).

Οι μέθοδοι, που χρησιμοποιούνται για την υγροποίηση, είναι η κυκλική μέθοδος διαστολής και η κυκλική μέθοδος μηχανικής ψύξης. Στη διεργασία της διαστολής μέρος του αερίου αποσυμπιέζεται από την υψηλή πίεση σε χαμηλότερη πίεση. Αυτό προκαλεί πτώση της θερμοκρασίας του αερίου. Διαμέσου εναλλακτών θερμότητας το ψυχρό αέριο ψύχει το εισερχόμενο ρεύμα αερίου, το οποίο στη συνέχεια με τον ίδιο τρόπο ψύχει το νέο ρεύμα αερίου μέχρις ότου επιτευχθεί η θερμοκρασία υγροποίησης του μεθανίου, οπότε και παράγεται το ΥΦΑ. Η διεργασία, όμως, που χρησιμοποιείται πιο συχνά για την παραγωγή ΥΦΑ είναι αυτή της μηχανικής ψύξης, όπου χρησιμοποιούνται τρία διαφορετικά ρεύματα υγρών ψυκτικών: προπάνιο, αιθάνιο και μεθάνιο. Η θερμότητα, που απαιτείται για την εξάτμιση αυτών των υγρών, προσδίδεται από το φυσικό αέριο, το οποίο υγροποιείται με τον τρόπο αυτό. Τα ψυκτικά, στη συνέχεια, συμπιέζονται, ψύχονται και ανακυκλώνονται σαν υγρά (Διβόλης, 2017).

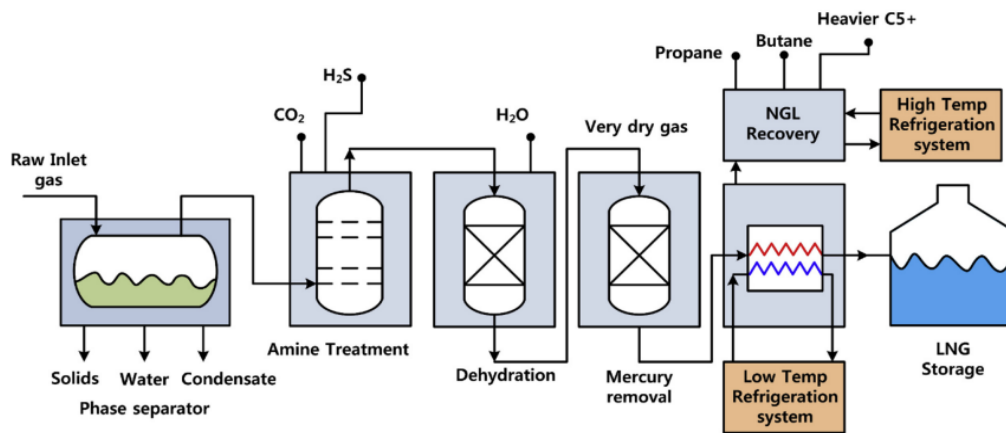
Το 1 m^3 υγροποιημένου φυσικού αερίου αντιστοιχεί σε 600 m^3 φυσικού αερίου. Επομένως, καθίσταται δυνατή και πιο οικονομική η μεταφορά του μεταξύ των ηπείρων με ειδικά σχεδιασμένα ωκεάνια πλοία. Το ΥΦΑ δεν είναι εύφλεκτο ή εκρηκτικό και ο ατμός του (μεθάνιο) είναι άχρωμος, άοσμος και μη τοξικός. Ο κρύος ατμός καθίσταται εύφλεκτος, στην περίπτωση που εμφανίζει μια συγκέντρωση σε αέρα από 5% έως 15%. Λιγότερος αέρας δεν περιέχει αρκετό οξυγόνο για να στηρίξει τη φλόγα, ενώ περισσότερος το καθιστά αραιό για ανάφλεξη. Σε κανονικές συνθήκες δεν μπορεί να εκραγεί. Τέλος, όταν οι ατμοί του θερμανθούν -160°F (-106.7°C), γίνονται ελαφρύτεροι από τον αέρα (Διβόλης, 2017).

1.3 Η εξόρυξη του φυσικού αερίου

Το πρώτο βήμα της διαδικασίας της παραγωγής είναι η εξόρυξη φυσικού αερίου και αφορά την άντληση του από το εσωτερικό της γης. Το φυσικό αέριο μπορεί να εμφανιστεί α) σε υπόγεια φρεάτια, β) σε συμπυκνωμένες δεξαμενές και γ) σε μεγάλες πετρελαιοφόρες περιοχές. Τις περισσότερες φορές το αέριο βρίσκεται κοντά σε κοιτάσματα πετρελαίου και παράγεται ταυτόχρονα με τη διαδικασία άντλησης πετρελαίου. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι που μπορούν να ανιχνεύσουν κοιτάσματα φυσικού αερίου και στη ξηρά και στη θάλασσα και σχετίζονται με τη δημιουργία σεισμικών κοιτασμάτων με διάφορους τρόπους όπως από κρουστικά, από εκρήξεις ή με τη βοήθεια σόναρ. Ένας άλλος τρόπος ανίχνευσης είναι με τη χρήση ηλεκτρομαγνητικών παλμών. Κατά την διαδικασία των γεωτρήσεων που γίνονται για την ανίχνευση και την εξόρυξη από το βυθό της θάλασσας χρησιμοποιούνται πλατφόρμες που είναι κατάλληλα διαμορφωμένες και είναι είτε υπέργειες είτε υπόγειες (Δεληγεωρόγλου, 2017).

Η δραστηριότητα εξερεύνησης και παραγωγής ποικίλει ανάλογα με την τοποθεσία που μπορούν να βρεθούν τα κοιτάσματα αερίου. Η διαδικασία αυτή έχει γεωλογικό ρίσκο καθώς υπάρχει πιθανότητα τα κοιτάσματα αερίου σε μία περιοχή ενδιαφέροντος είτε να μην υπάρχουν, είτε να υπάρχουν σε ποσότητες όπου οι γεωλογικές συνθήκες δεν είναι ευνοϊκές για την επιτυχή και οικονομικά βιώσιμη εξόρυξη του. Οι υψηλές τιμές φυσικού αερίου βέβαια ενθαρρύνουν τις γεωτρήσεις αλλά αυξάνουν και την ποσότητα φυσικού αερίου που μπορεί να εξορυχθεί. Στη βάση της εξόρυξης, μία ομάδα από ειδικούς γεωλόγους και γεωφυσικούς που έχει εντοπίσει εμπορικά βιώσιμες ποσότητες φυσικού αερίου διενεργεί γεώτρηση και το επόμενο βήμα είναι η εξαγωγή του από το έδαφος και η επεξεργασία του. Το φυσικό αέριο που εξάγεται από το έδαφος περιέχει και πετρέλαιο το οποίο είναι άωφο και στέλνεται για καύση. Η τελική ποσότητα είναι ικανή για χρησιμοποίησή του ως ΥΦΑ. Είναι σημαντικό το γεγονός ότι το ακατέργαστο φυσικό αέριο πρέπει να καθαριστεί πριν καταναλωθεί. Το φυσικό αέριο περιλαμβάνει μία ποικιλία από άλλες ενώσεις και αέρια όπως αιθάνιο, προπάνιο, βουτάνιο, πεντάνιο, υδρόθειο, διοξείδιο του άνθρακα, ήλιο και άζωτο καθώς και πετρέλαιο και νερό το οποίο πρέπει να αφαιρεθεί κατά τη διάρκεια της παραγωγής πριν από την υγροποίηση (Ευαγγελακοπούλου, 2012).

1.4 Η υγροποίηση του φυσικού αερίου



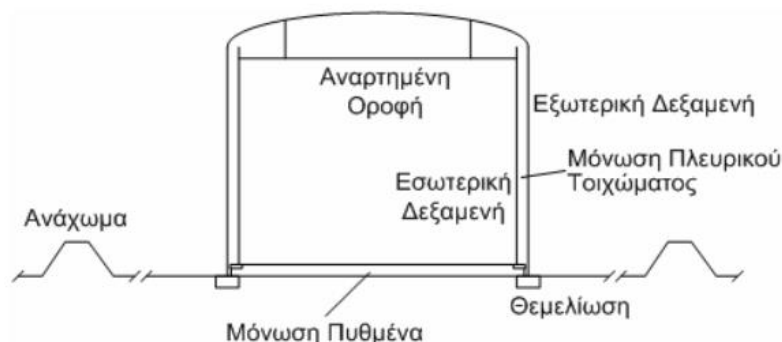
Σχήμα 1.2: Η διαδικασία υγροποίησης του φυσικού αερίου (Khan, Karimi & Wood, 2017)

Το φυσικό αέριο παραδίδεται μέσω αγωγών από το πεδίο εξόρυξης του στην μονάδα υγροποίησης που βρίσκεται πλησίον της ακτογραμμής και διαθέτει εξειδικευμένες λιμενικές εγκαταστάσεις. Με την έννοια της υγροποίησης περιγράφεται η διαδικασία της ψύξης του φυσικού αερίου στους -260°F (-162°C) και της μετατροπής του σε υγρή μορφή. Επομένως το επόμενο στάδιο μετά την εξόρυξη είναι η υγροποίησή του κατά την οποία το φυσικό αέριο υφίσταται διάφορες επεξεργασίες (Λέκκας, 2018). Αρχικά γίνεται ο καθαρισμός του φυσικού αερίου με σκοπό να αφαιρεθεί το διοξείδιο του άνθρακα επειδή στερεοποιούμενο μπορεί να προκαλέσει ζημιά στις εγκαταστάσεις της υγροποίησης. Αφαιρείται επίσης το υδρόθειο κι άλλες ενώσεις θείου. Στη συνέχεια, γίνεται αφυδάτωση όπου απομακρύνεται το νερό από το αέριο, ώστε να προληφθεί ο σχηματισμός ένυδρων αλάτων μεθανίου που εμποδίζουν τη λειτουργία των κρυογονικών εναλλακτών θερμότητας. Επίσης απομακρύνονται τα ίχνη του υδράργυρου καθώς είναι τοξικά και διαβρωτικά για τα κράματα (Δεληγεωρόγλου, 2017). Έπειτα ακολουθεί η πρόψυξη και το φυσικό αέριο ψύχεται σε θερμοκρασία -300°C . Η απομόνωση βαρύτερων υδρογονανθράκων όπως το προπάνιο και το βουτάνιο επιτυγχάνεται μέσω σειράς αποστακτηρών σε στήλες καθαρισμού. Οι υδρογονάνθρακες αυτοί πωλούνται ως πρώτη ύλη στην πετροχημική βιομηχανία ή ως καύσιμα. Στο τέλος ακολουθεί η υγροποίηση, όπου το αέριο συμπιέζεται, ψύχεται υπό σταθερή πίεση και στη συνέχεια εκτονώνεται. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται δύο ή τρεις φορές σε ειδικές ψυκτικές στήλες από τις οποίες εξέρχεται το αέριο σε υγρή μορφή (ΥΦΑ) σε θερμοκρασία -162°C υπό κανονική ατμοσφαιρική πίεση. Περίπου το 12% από το σύνολο του αερίου που παραδίδεται χρησιμοποιείται από τις μονάδες υγροποίησης και κυρίως για την λειτουργία των αντλιών θερμότητας. Επομένως, η διαδικασία υγροποίησης απαιτεί σημαντική ποσότητα ενέργειας. Οι βασικότερες διαδικασίες ρευστοποίησης που επιτρέπουν να ελαττωθεί η θερμοκρασία του

μεθανίου περίπου στον -162°C είναι α) η καθαρή διαδικασία ψύξης η οποία χρησιμοποιείται από το 1970 και β) η διαδικασία ψύξης με προστάδιο την πτώση θερμοκρασίας (Δεληγεωρόγλου, 2017).

1.5 Η αποθήκευση του φυσικού αερίου

Το υγροποιημένο φυσικό αέριο αποθηκεύεται σε κρυογονικές δεξαμενές σχεδιασμένες να αντέχουν σε θερμοκρασίες -160°C . Οι δεξαμενές διαφέρουν ανάλογα με το μέγεθος του τερματικού σταθμού. Σε μικρούς τερματικούς σταθμούς χρησιμοποιούνται συνήθως δεξαμενές χωρητικότητας 500 έως 1000 m^3 , οι οποίες συνήθως έχουν κυλινδρική ή σφαιρική μορφή και το μέγεθος τους τις καθιστά εύκολα διαχειρίσιμες και μπορούν να τοποθετηθούν είτε οριζόντια είτε κάθετα σε συστοιχία (Wartsila.com, n.d.). Συνήθως, οι συγκεκριμένες δεξαμενές έχουν μια κρυογονική επιφάνεια από ατσάλι στο εσωτερικό και μια κρυογονική ή μη κρυογονική επιφάνεια από ατσάλι στο εξωτερικό τους. Ένα επιπλέον θετικό σε σχέση με το μέγεθος τους είναι ότι λόγω μικρότερης επιφάνειας υπάρχει μικρότερη εισροή θερμότητας, οπότε αποφεύγεται σε πολύ μεγάλο βαθμό η εξάτμιση του φυσικού αερίου.

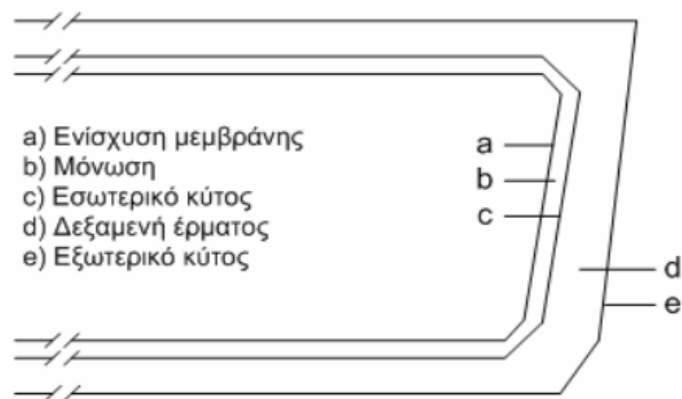


Σχήμα 1.3: Απλοποιημένη διατομή μιας απλής δεξαμενής αποθήκευσης ΥΦΑ (Wartsila.com, n.d.)

Σε μεγαλύτερους τερματικούς σταθμούς αποθήκευσης οι δεξαμενές μπορούν να φτάσουν μέχρι και χωρητικότητα 100,000 m^3 . Οι δεξαμενές είναι κατασκευασμένες με οπλισμένο σκυρόδεμα για την αποφυγή εξάτμισης του φυσικού αερίου. Παρά την υψηλή ποιότητα μόνωσης, όμως, ένα πολύ μικρό ποσό θερμότητας διεισδύει προκαλώντας μικρή εξάτμιση. Σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας του σταθμού το αέριο συλλέγεται και με διεργασία μέσω συμπιεστών τροφοδοτείται εκ νέου στο υπάρχον αποθηκευμένο υγροποιημένο καύσιμο. Κατά την περίοδο συντήρησης του σταθμού το αέριο που δεν μπορεί να ανακτηθεί καίγεται, διότι είναι προτιμότερο να καεί το μεθάνιο παρά να διαφύγει στο περιβάλλον, αφού αποτελεί έναν από τους παράγοντες κλιματικής αλλαγής (Wartsila.com, n.d.).

1.6 Μεταφορά ΥΦΑ

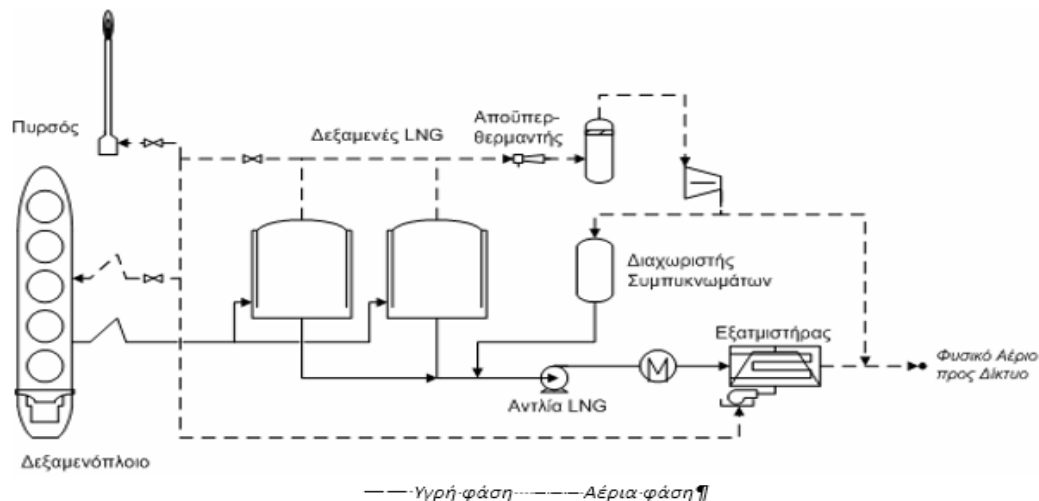
Στην εν λόγω περίπτωση, ειδικά σχεδιασμένα σκάφη χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά ποσοτήτων ΥΦΑ στους τερματικούς σταθμούς διαφόρων λιμανιών. Τα πλοία που μεταφέρουν ΥΦΑ σε μεγάλες αποστάσεις κατασκευάζονται από εξειδικευμένα υλικά και εξοπλίζονται με ανάλογα συστήματα, με σκοπό να αποθηκεύσουν ακίνδυνα τις ποσότητες ΥΦΑ στις δεξαμενές τους διατηρώντας το σε θερμοκρασίες που φτάνουν τους -260°F (-160°C). Το μέγεθος αυτών των πλοίων πολλές φορές ξεπερνά τα 250 μέτρα. Όλα τα σκάφη τα οποία μεταφέρουν ΥΦΑ κατασκευάζονται με διπλές επιστρώσεις (επιφάνειες) όσον αφορά τα τοιχώματα των δεξαμενών (Κακαρούνας & Μπραγκατζή, 2005). Αυτή η μέθοδος κατασκευής, αφενός αυξάνει την ακεραιότητα του συστήματος αφετέρου παρέχει την απαραίτητη μόνωση για το ΥΦΑ, καθώς επίσης και την απαιτούμενη προστασία για τις δεξαμενές φορτίου σε περίπτωση ατυχήματος. Τρία βασικά σχέδια δεξαμενών σκαφών μεταφοράς ΥΦΑ έχουν αναπτυχθεί, τα οποία σχετίζονται με τη συγκράτηση και τη μεταφορά του ΥΦΑ και τα οποία είναι πρισματικά σε (i) ελεύθερη στάση, (ii) σφαιρικά και με (iii) μεμβράνη. Το μεγαλύτερο μέρος του στόλου χρησιμοποιεί σφαιρικού τύπου δεξαμενές, ενώ το υπόλοιπο χρησιμοποιεί δεξαμενές με μεμβράνη. Υπάρχει και ένας μικρός αριθμός πλοίων τα οποία απαρτίζονται από διαφορετικού τύπου δεξαμενές (Saeid Mokhatab, 2014).



Σχήμα 1.4: Δεξαμενή πλοίου με μεμβράνη (Saeid Mokhatab, 2014)

Οι εγκαταστάσεις παραλαβής ΥΦΑ κατασκευάζονται για να παραλάβουν τις ποσότητες ΥΦΑ, που αποστέλλονται από τις εγκαταστάσεις υγροποίησης φυσικού αερίου. Περιλαμβάνουν τις απαραίτητες λιμενικές εγκαταστάσεις, σωληνώσεις μεταφοράς, αποθήκες ΥΦΑ, και όλον τον απαραίτητο εξοπλισμό για την εξάτμιση και συμπίεση του φυσικού αερίου, πριν αυτό αποσταλεί προς τον κεντρικό αγωγό φυσικού αερίου, ή τους τελικούς καταναλωτές (μονάδες βασικού φορτίου). Μια τυπική εγκατάσταση παραλαβής ΥΦΑ φαίνεται στο **Σχήμα 1.5**. Οι

γραμμές μεταφοράς ΥΦΑ διατηρούνται σε χαμηλή θερμοκρασία με ανακυκλοφορία ποσότητας ΥΦΑ από τις δεξαμενές αποθήκευσης. Επομένως, απάγεται η θερμότητα που εισέρχεται από το περιβάλλον στις γραμμές μεταφοράς. Η αέρια φάση που εξατμίζεται μέσα στη δεξαμενή βρίσκεται σε ισορροπία με την υγρή φάση (Saeid Mokhatab, 2014).



Σχήμα 1.5: Εγκατάσταση παραλαβής ΥΦΑ (Saeid Mokhatab, 2014)

Η περίσσεια οδηγείται μέσω του αποϋπερθερμαντή στο συμπιεστή, όπου συμπιέζεται και οδηγείται στον αγωγό διασύνδεσης με τον κεντρικό αγωγό ή τους καταναλωτές. Η εξάτμιση του ΥΦΑ πραγματοποιείται σε εναλλάκτες θερμότητας που λειτουργούν με θαλασσινό νερό ως θερμαντικό μέσο, καθώς και σε εξατμιστήρες, όπου καίγεται μέρος της αέριας φάσης από τις δεξαμενές αποθήκευσης, και από την παραγόμενη θερμότητα θερμαίνεται το ενδιάμεσο ρευστό που χρησιμοποιείται τελικά για την εξάτμιση. Οι εναλλάκτες θερμότητας με θαλασσινό νερό έχουν πολύ χαμηλό κόστος λειτουργίας, αλλά υψηλό κόστος εγκατάστασης και έχουν σχετικά περιορισμένη δυναμικότητα σε σχέση με τους κλασσικούς εξατμιστήρες (Saeid Mokhatab, 2014).

1.7 Εκφόρτωση ΥΦΑ

Όταν φτάσει το πλοίο στον προορισμό του γίνεται η εκφόρτωση του υγροποιημένου φυσικού αερίου στις ειδικές εγκαταστάσεις υποδοχής του τερματικού σταθμού και η αποθήκευση του στις κρυογονικές δεξαμενές αποθήκευσης ΥΦΑ, οι οποίες διατηρούν το υγρό σε χαμηλή θερμοκρασία και ελαχιστοποιούν το πόσο της εξάτμισης (Δεληγεωρόγλου, 2017). Η εργασία της εκφόρτωσης του Υ.Φ.Α γίνεται με ειδικά σχεδιασμένους βραχίονες ώστε να μεταφέρουν το φορτίο με ασφάλεια από το πλοίο προς τις δεξαμενές. Όταν το πλοίο είναι αγκυροβολημένο τότε οι βραχίονες έγκυρης φόρτωσης σταδιακά ψύχονται στους -162°C πριν από την έναρξη

της εκφόρτωσης του. Οι βραχίονες εκφόρτωσης είναι σε θέση να αντέξουν την διαστολή και συστολή που προκύπτει από αλλαγές στην θερμοκρασία (Μιχαλοπούλου, 2016).

1.8 Επαναεριοποίηση ΥΦΑ

Στο τελικό στάδιο λαμβάνει χώρα η επαναεριοποίηση του ΥΦΑ, στο οποίο αυξάνεται η θερμοκρασία από -162°C σε πάνω από 0°C υπό υψηλή πίεση (μεταξύ 60 έως 100 bar) μέσω της χρήσης εναλλακτών που θερμαίνονται με την απορροή θαλασσινού νερού ή με την καύση ενός μέρους του αερίου (Διβόλης, 2017). Η δεξαμενή αεριοποίησης είναι διπλού τοιχώματος και είναι εξοπλισμένη με βυθιζόμενες αντλίες που μεταφέρουν το ΥΦΑ σε αντλίες υψηλής πίεσης. Το υπό πίεση ΥΦΑ μεταφέρεται στη συνέχεια σε αέρια κατάσταση σε εξατμιστήρες. Πριν αποσταλεί το φυσικό αέριο το οποίο έχει επιστρέψει στην αέρια του κατάσταση στο εθνικό δίκτυο μεταφοράς δέχεται διάφορες επεξεργασίες. Το φυσικό αέριο είναι άοσμο επομένως αποχρωματίζεται τεχνητά με μία μικρή ποσότητα τετραϋδροθειοφαινίου που του προσδίδει χαρακτηριστική οσμή. Αυτό αποτελεί ένα μέτρο ασφαλείας, καθώς οποιαδήποτε διαρροή μπορεί να ανιχνευθεί από την οσμή του. Τέλος, μειώνεται ελαφρώς η πίεση του ώστε να τροφοδοτήσει ένα τοπικό δίκτυο διανομής φυσικού αερίου. Συνεπώς, με την επαναεριοποίηση του ΥΦΑ ολοκληρώνεται η εφοδιαστική αλυσίδα και παρουσιάζεται τελικά στο **Σχήμα 1.6**. Συμπερασματικά, το φυσικό αέριο ανιχνεύεται και γίνεται εξόρυξή του από το υπέδαφος. Στη συνέχεια, οδηγείται στην παραγωγή όπου γίνεται ο καθαρισμός του και ακολουθεί η υγροποίηση. Έπειτα, αποθηκεύεται σε ειδικές δεξαμενές και μεταφέρεται με ωκεάνια πλοία. Τέλος, μετά την εκφόρτωση του στον επιθυμητό σταθμό επαναεριοποιείται και μεταφέρεται μέσω αγωγών προς χρήση στους καταναλωτές.



Σχήμα 1.6: Η εφοδιαστική αλυσίδα του ΥΦΑ (Lee, Park & Moon, 2017)

1.9 Τα πλεονεκτήματα του ΥΦΑ

Γενικά η χρήση του ΥΦΑ έχει κερδίσει το ενδιαφέρον όχι μόνο της Ευρώπης, αλλά και της Ασίας και της Αμερικής. Η περιβαλλοντική ευαισθησία δημιούργησε ευκαιρίες εισχώρησης του φυσικού αερίου ως καύσιμο, παρουσιάζοντας σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα προϊόντα του πετρελαίου. Τα πλεονεκτήματα αυτά γίνονται ακόμα πιο ευδιάκριτα με τη χρήση του ΥΦΑ ως καύσιμο πλοίων σε σχέση με το μαζούτ (HFO) και το Diesel (MDO). Αποδεδειγμένα οι εκπομπές πολλών καυσαερίων μειώνονται σε μεγάλο βαθμό. Χρησιμοποιώντας το ΥΦΑ ως ναυτιλιακό καύσιμο μειώνονται οι εκπομπές σε οξείδιο του θείου (SO_x) κατά 90% ως 95%. Αυτό το επίπεδο μείωσης εντάχθηκε στο πλαίσιο των λεγόμενων Περιοχών Ελέγχου των Εκπομπών (ECA, Emission Control Areas) το 2015. Μια παρόμοια μείωση εφαρμόστηκε στην παγκόσμια ναυτιλία το 2020. Η χαμηλότερη περιεκτικότητα του υγροποιημένου φυσικού αερίου σε άνθρακα σε σύγκριση με παραδοσιακά ναυτιλιακά καύσιμα επιτρέπει μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) από 20% έως 25%. Κάθε ολίσθηση του μεθανίου κατά την πετρέλευση ή τις ανάγκες χρήσης πρέπει να αποφεύγεται για να διατηρηθεί αυτό το πλεονέκτημα (Νικολάου, 2021). Το ΥΦΑ αναμένεται να είναι λιγότερο δαπανηρό από ότι το ναυτιλιακό πετρέλαιο εσωτερικής καύσεως (MGO), που θα πρέπει να χρησιμοποιείται εντός των Περιοχών Ελέγχου των Εκπομπών, αν δεν εφαρμόζονται άλλα τεχνικά μέτρα για τη μείωση των εκπομπών SO_x. Οι σημερινές χαμηλές τιμές του υγροποιημένου φυσικού αερίου στην Ευρώπη και τις ΗΠΑ δείχνουν ότι η διαμόρφωση της τιμής του (χαμηλότερης από αυτήν του HFO) με βάση το ενεργειακό περιεχόμενο είναι εφικτή, ακόμη και αν ληφθεί υπόψη η μικρής κλίμακας διανομή υγροποιημένου φυσικού αερίου (Τσάμας, 2017).

Πίνακας 1.1: Περιεκτικότητες καυσαερίων στα διάφορα καύσιμα (Μητσόπουλος, 2023).

Εκπομπές/Καυσαέρια	HFO (Heavy Fuel Oil)	MDO (Marine Diesel Oil)	LNG (Liquefied NG)
SO _x *	0,049	0,003	Ίχνη
CO ₂	3,114	3,206	2,750
CH ₄	Ίχνη	Ίχνη	0,051
NO _x	0,093	0,087	0,008
PM	0,007	0,001	Ίχνη
*Βασισμένο στη μέση περιεκτικότητα του θείου στο μαζούτ περίπου 2,51%			

Το ανώτατο επιτρεπτό όριο της περιεκτικότητας του θείου σε καύσιμα πλοίων είναι 0.10% και αφορά τις Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών (ECAs) στη Βόρεια Αμερική, τη Βόρεια Θάλασσα και τη Βαλτική στην Ευρώπη. Σε διεθνές επίπεδο το όριο αυτό είναι στα 0.50% από το 2020. Το 2016 ορισμένα στοιχεία του Διεθνούς Οργανισμού Ναυτιλίας έδειξαν ότι η περιεκτικότητα σε θείο των υπολειμματικών πετρελαίων που ελέγχθηκαν την ίδια χρονιά ήταν 2.58%. Με την ισχύ των νέων νόμων και περιορισμών θα προκύψουν σημαντικές αλλαγές στις παραδοσιακές αλυσίδες εφοδιασμού καυσίμων πλοίου, επηρεάζοντας τους προμηθευτές καυσίμων, τους εμπόρους, τους χονδρεμπόρους και τους χρήστες. Τα θετικά του ΥΦΑ είναι σε μικρότερο βαθμό εμφανή σε ό,τι σχετίζεται με τα αέρια του θερμοκηπίου (CO₂ και CH₄), ειδικά στην περίπτωση που συμπεριλαμβάνονται οι εκπομπές πλήρους κύκλου και οι επιπτώσεις της ατελούς καύσης του φυσικού αερίου. Το μεθάνιο είναι ισχυρότερο αέριο του θερμοκηπίου σε σύγκριση με το διοξείδιο του άνθρακα (Μητσόπουλος, 2023).

1.10 Το μέλλον του ΥΦΑ

Το ΥΦΑ χρησιμοποιείται παγκοσμίως και ιδιαίτερα στο διεθνές εμπόριο, όπου μεταφέρεται με μεγάλα ωκεάνια βυτιοφόρα από τους μακρινούς τόπους εξόρυξης του στις αγορές της Ασίας, της Ευρώπης και της Βόρειας Αμερικής. Το μεγαλύτερο μέρος του ΥΦΑ, που κυκλοφορεί στο εμπόριο, χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία με καύσιμα των εγκαταστάσεων ηλεκτρικής παραγωγής ενέργειας (Pfoser et al., 2016).

Η κλιματική αλλαγή και οι αυξανόμενες ανησυχίες για την ενεργειακή ασφάλεια σε συνδυασμό με την αυξημένη ζήτηση της ενέργειας, δημιουργούν την αδήριτη ανάγκη στις παγκόσμιες αγορές για πρόσβαση σε μια καθαρή και αξιόπιστη πηγή (Al-Haidous & Al-Ansari, 2019). Ενώ άλλες βασικές πηγές ενέργειας, όπως το πετρέλαιο και ο άνθρακας, έχουν γίνει λιγότερο ελκυστικές λόγω των αυξημένων τιμών και των περιβαλλοντικών εκτιμήσεων, το φυσικό αέριο έχει αποκτήσει μεγαλύτερη απήχηση για την ικανοποίηση αυτής της ζήτησης. Οι εκτιμήσεις προβλέπουν ότι το φυσικό αέριο θα αποτελεί το 28% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας το 2020, έναντι 23% το 1999 (Andersson, Christiansen & Fagerholt, 2010). Το 2018, η αγορά υδροποιημένου φυσικού αερίου αυξήθηκε κατά 8%, με τις συνολικές παραδόσεις να ανέρχονται σε 342 εκατομμύρια τόνους (MT), ποσότητα υπερτριπλάσια από εκείνη του 2000. Ο συνολικός αριθμός των χωρών εισαγωγής αυξήθηκε σε 42 σε σύγκριση με 18 το 2008. Αυτή η αύξηση της ζήτησης για ΥΦΑ οφείλεται κυρίως στις χώρες της περιοχής Ασίας και Ειρηνικού (Shahruk, Srinivasan & Karimi, 2021).

Ενώ η χωρητικότητα του παγκόσμιου στόλου πλοίων ΥΦΑ ήταν μόνο περίπου 5 εκατομμύρια m^3 το 1980, αυξήθηκε σε περίπου 35 εκατομμύρια m^3 το 2007 και αναμένεται να φθάσει περίπου τα 55 εκατομμύρια m^3 μέχρι το 2010. Η μέση χωρητικότητα των πλοίων έχει επίσης αυξηθεί, από 140,000 m^3 το 2005 σε 180,000 m^3 το 2008. Η κατανάλωση υγροποιημένου φυσικού αερίου θα αυξηθεί με παρόμοιο τρόπο. Αναμένεται ότι το ΥΦΑ θα αντιπροσωπεύει περίπου το 20% της προμήθειας φυσικού αερίου του ΟΟΣΑ (Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης) ήδη από το 2010 και το 14 έως 16% της παγκόσμιας ζήτησης φυσικού αερίου μέχρι το 2015. Παράλληλα, ο αριθμός των πηγών εφοδιασμού και των περιοχών ζήτησης έχει επίσης αυξηθεί, οδηγώντας σε περισσότερο πολύπλοκη δομή της εφοδιαστικής αλυσίδας του ΥΦΑ (Andersson, Christiansen & Fagerholt, 2010).

1.11 Η τιμολόγηση του ΥΦΑ

Υπάρχουν δύο βασικά συστήματα τιμολόγησης που εφαρμόζονται στο διεθνές εμπόριο φυσικού αερίου: το σύστημα που είναι βασισμένο στις τιμές πετρελαίου σύστημα (oil-indexed) και το σύστημα τιμολόγησης που βασίζεται αποκλειστικά στο φυσικό αέριο (gas-on-gas) (Germanischer, 2013). Σύμφωνα με την τιμολόγηση που βασίζεται μόνο στο φυσικό αέριο, η τιμή του καθορίζεται από τις τιμές στην αγορά άμεσης παράδοσης. Σε αυτή την αγορά η συναλλαγή πραγματοποιείται άμεσα, σε διάστημα 2-3 ημερών και η τιμή στην οποία πραγματοποιείται εξαρτάται από την συνολική ζήτηση και προσφορά του φυσικού αερίου. (Διβόλης, 2017). Σύμφωνα με την μέθοδο της τιμαριθμικής αναπροσαρμογής με βάση το πετρέλαιο, η τιμή του φυσικού αερίου προσδιορίζεται από τις τιμές της αγοράς άμεσης παράδοσης του πετρελαίου που αλλάζουν ανάλογα με τη προσφορά και την ζήτηση. Στην Ευρώπη, η τιμαριθμική αναπροσαρμογή με βάση το πετρέλαιο είναι κυρίαρχη όσον αφορά το διεθνές εμπόριο, αλλά η τιμολόγηση με βάση το φυσικό αέριο αυξήθηκε από το 6% που ήταν το 2005 στο 33% το 2010 (Melling, 2010). Σύμφωνα με την τιμαριθμική αναπροσαρμογή με γνώμονα το πετρέλαιο, η ακριβής μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των τιμών του φυσικού αερίου καθορίζεται από συμβόλαιο, οπότε οι μέθοδοι διαφέρουν μεταξύ των συμβολαίων. Σε γενικές γραμμές, η μέθοδος περιλαμβάνει μία τιμή βάσης συν το μέσο όρο των τιμών του πετρελαίου σε ένα καθορισμένο σημείο αναφοράς για την προηγούμενη χρονική περίοδο πολλαπλασιαζόμενη με ένα συντελεστή (Levine, Carpenter & Tharpal, 2014). Ο συντελεστής θέτει ουσιαστικά τη σχέση της τιμής ανά μονάδα ενέργειας του πετρελαίου αναφορικά με το φυσικό αέριο, όταν μια απότομη καμπύλη της μεθόδου τιμολόγησης δείχνει μια σχέση περίπου ένα προς ένα. Ο τύπος μπορεί επίσης να περιλαμβάνει μια συνιστώσα για

την μείωση της τιμής του ΥΦΑ σε υψηλές ή χαμηλές τιμές του πετρελαίου (Διβόλης, 2017). Αυτό το σύστημα τιμολόγησης προσαρμόζει τις τιμές του φυσικού αερίου στη σχέση προσφοράς και ζήτησης του πετρελαίου, οπότε οι τιμές του φυσικού αερίου μπορούν να συνεχίσουν να αυξάνονται, ακόμη και όταν υπάρχει υπερπροσφορά φυσικού αερίου. Αντίθετα, το σύστημα τιμολόγησης που βασίζεται μόνο στο φυσικό αέριο αντικατοπτρίζει γενικά την ισορροπία μεταξύ προσφοράς και ζήτησης του, περιλαμβάνοντας πολλαπλούς προμηθευτές. Καθώς ο λόγος της προσφοράς προς την ζήτηση μειώνεται, οι τιμές του φυσικού αερίου αυξάνονται, κατάσταση η οποία συμφωνεί με την επικρατούσα θεωρία της προσφοράς και της ζήτησης. Δηλαδή, μπορεί τόσο να μετριάσει τη ζήτηση όσο και να δώσει ώθηση σε περισσότερες επενδύσεις στην παραγωγή του φυσικού αερίου. Αύξηση της παραγωγής του φυσικού αερίου στη συνέχεια αυξάνει το λόγο προσφοράς προς την ζήτηση, και οδηγεί στην μείωση των τιμών (Erdős & Ormos, 2012).

1.12 Μακροπρόθεσμες συμβάσεις ΥΦΑ-Αγορά άμεσης παράδοσης

Το εμπόριο ΥΦΑ διέπεται συνήθως από μια συμφωνία πώλησης και αγοράς (SPA) μεταξύ ενός προμηθευτή και ενός αγοραστή για καθορισμένη διάρκεια, στην οποία καθορίζονται οι όροι, οι προϋποθέσεις και οι δεσμεύσεις. Οι παραδοσιακές συμβάσεις ήταν μακροχρόνιες (20 έως 25 έτη) άκαμπτες και το κύριο πλεονέκτημά τους ήταν να παρέχουν ασφάλεια στον αγοραστή. Ωστόσο, σε αντάλλαγμα, σχεδόν όλες οι συμβάσεις είχαν μία ρήτρα υποχρεωτικής αγοράς ανεξαρτήτως παραλαβής (take-or-pay) που μετατόπιζε τον κίνδυνο του πλεονάζοντος όγκου στον αγοραστή. Δηλαδή, αυτές οι ρήτρες υποχρεώνουν τον αγοραστή να πληρώσει για έναν ελάχιστο όγκο ΥΦΑ, ακόμη και αν δεν παραλάβει τον όγκο αυτό. Επιπλέον, οι συμβάσεις αναφέρουν κυρίως παράδοση-εκ-φορτώσεως, με ρήτρες προορισμού που εμπόδιζαν τον αγοραστή να μεταπωλήσει το φορτίο. Ρήτρες όπως αυτές καθιστούσαν τις παραδοσιακές συμβάσεις ΥΦΑ πολύ άκαμπτες, αν και πιο ασφαλείς. Οι Masten και Crocker, επισημαίνουν ότι μια μακροπρόθεσμη σύμβαση προστατεύει τους επενδυτές σε μεγάλες εγκαταστάσεις με περιορισμένες εναλλακτικές χρήσεις από μεταγενέστερη καιροσκοπική συμπεριφορά των εμπορικών τους εταίρων. Οι Canes και Norman παρατηρούν επίσης ότι η προστασία αυτή έχει ως κόστος τις εκ των υστέρων αναποτελεσματικές κατανομές, αλλά οι ρήτρες υποχρεωτικής αγοράς μπορούν να καλύψουν τις τυχαίες διακυμάνσεις της ζήτησης (Shahrukh, Srinivasan & Karimi, 2021).

Τα χαρακτηριστικά τα οποία συνθέτουν μια μακροχρόνια σύμβαση αφορούν κατά κύριο λόγο την σταθερότητα. Συγκεκριμένα, καθορίζουν τις σταθερές ετήσιες ή περιοδικές ποσότητες

ΥΦΑ που πρέπει να παραδοθούν κατά τη διάρκεια της σύμβασης. Αυτό επιτρέπει στους αγοραστές να εξασφαλίσουν μια αξιόπιστη πηγή φυσικού αερίου για τις μακροπρόθεσμες ενεργειακές τους ανάγκες. Επιπρόσθετα, οι μακροχρόνιες συμβάσεις συχνά περιλαμβάνουν σταθερές τιμές ή μηχανισμούς αναπροσαρμογής των τιμών. Οι σταθερές τιμές παρέχουν σταθερότητα και στα δύο μέρη, ενώ οι αναπροσαρμοσμένες τιμές μπορούν να συνδεθούν με διάφορους δείκτες αναφοράς, όπως οι τιμές του πετρελαίου, του φυσικού αερίου ή οι περιφερειακοί κόμβοι τιμολόγησης. Τέλος, ορισμένες συμβάσεις περιλαμβάνουν ρήτρες προορισμού που καθορίζουν πού πρέπει να παραδοθεί το ΥΦΑ. Αυτό μπορεί να περιορίσει την ευελιξία του αγοραστή να μεταπωλεί ή να ανακατευθύνει το ΥΦΑ σε άλλες τοποθεσίες (Shahrukh, Srinivasan & Karimi, 2021).

Μια αγορά άμεσης παράδοσης (spot market) είναι ένας χώρος όπου ανταλλάσσονται άμεσα χρηματοπιστωτικά μέσα ή εμπορεύματα. Στην άμεση αγορά, η παράδοση των περιουσιακών στοιχείων γίνεται αμέσως μετά την πληρωμή. Λόγω του γρήγορου χρονοδιαγράμματος των συναλλαγών, η αγορά άμεσης παράδοσης αναφέρεται συχνά ως αγορά μετρητών. Στο πεδίο της σύγχρονης χρηματοδότησης, οι αγορές μετρητών διεξάγουν τις συναλλαγές τους κυρίως εξωρηματιστηριακά. Τα κοινά διαπραγματεύσιμα περιουσιακά στοιχεία περιλαμβάνουν νομίσματα, εμπορεύματα και μετοχές. Μεταξύ των πιο δημοφιλών κατηγοριών περιουσιακών στοιχείων στην άμεση αγορά είναι τα μέταλλα, όπως ο χρυσός και το ασήμι. Ωστόσο, οι μορφές ενέργειας όπως το αργό πετρέλαιο και το φυσικό αέριο συγκεντρώνουν επίσης σημαντική προσοχή. Οι συναλλαγές της αγοράς άμεσης παράδοσης εκτελούνται με παρόμοιο τρόπο όπως σε οποιαδήποτε άλλη χρηματοπιστωτική αγορά. Ουσιαστικά, ένας αγοραστής αποζημιώνει έναν πωλητή σε αντάλλαγμα για ένα περιουσιακό στοιχείο. Όταν ο αγοραστής δεσμεύεται να πληρώσει την τιμή της άμεσης αγοράς, ο πωλητής παράγει το υποκείμενο περιουσιακό στοιχείο. Μόλις ολοκληρωθεί η μεταφορά κεφαλαίων, αρχίζει η φυσική παράδοση για την ολοκλήρωση της συναλλαγής (Shahrukh, Srinivasan & Karimi, 2021).

Όσον αφορά την αγορά του ΥΦΑ τα χαρακτηριστικά που διακατέχουν την αγορά άμεσης παράδοσης είναι ποικίλα. Συγκεκριμένα, οι συναλλαγές αφορούν συνήθως φορτία ΥΦΑ που είναι διαθέσιμα για παράδοση εντός των επόμενων λίγων μηνών, αντί για τους μεγάλους χρόνους παράδοσης που συνδέονται με τις μακροπρόθεσμες συμβάσεις. Επίσης, οι τιμές στην αγορά άμεσης παράδοσης ΥΦΑ μπορούν να είναι πιο ευέλικτες και να ανταποκρίνονται στις συνθήκες της αγοράς σε σύγκριση με τις σταθερές τιμές που συχνά συνδέονται με τις μακροπρόθεσμες συμβάσεις. Οι τιμές μπορεί να αυξομειώνονται με βάση τη δυναμική της προσφοράς και της ζήτησης, τις παγκόσμιες αγορές ενέργειας και άλλους παράγοντες. Δηλαδή,

η αγορά άμεσης παράδοσης προσφέρει μεγαλύτερη ρευστότητα, επιτρέποντας στους αγοραστές και τους πωλητές να ανταποκρίνονται γρήγορα στις μεταβαλλόμενες συνθήκες της αγοράς. Τέλος, η αγορά άμεσης παράδοσης ΥΦΑ είναι παγκόσμια και τα φορτία ΥΦΑ μπορούν να προμηθεύονται από οποιοσδήποτε περιοχές και να παραδίδονται σε διάφορους προορισμούς (Shahrukh, Srinivasan & Karimi, 2021).

1.13 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Στο πλαίσιο του μακροπρόθεσμου στρατηγικού σχεδιασμού, η αγορά ΥΦΑ έχει μελετηθεί σε εθνικό επίπεδο και σε επίπεδο μεμονωμένου αγοραστή. Το πρώτο οφείλεται στο γεγονός ότι το εισαγόμενο ΥΦΑ έχει γίνει σημαντικό μέρος του ενεργειακού μείγματος για αρκετές χώρες. Οι Efe Biresselioglu et al. ανέπτυξαν ένα μοντέλο MILP που καθορίζει το βέλτιστο σύνολο πωλητών από τους οποίους πρέπει να ικανοποιηθεί η ζήτηση ΥΦΑ της Τουρκίας, ελαχιστοποιώντας παράλληλα το συνολικό κόστος εισαγωγής και διατήρησης αποθεμάτων καθώς και τους κινδύνους (Efe Biresselioglu, Hakan Demir & Kandemir, 2012). Οι οικονομικοί, πολιτικοί κίνδυνοι και οι κίνδυνοι για την ασφάλεια εξετάστηκαν σε αυτό το έργο. Ομοίως, οι Shaikh et al. μοντελοποίησαν το σύστημα εισαγωγής ΥΦΑ για την Κίνα. Ανέπτυξαν ένα μαθηματικό μοντέλο που ελαχιστοποιεί το κόστος εισαγωγής, την απόσταση μεταφοράς και τις εγχώριες πολιτικές αστάθειες που σχετίζονται με κάθε πωλητή (Shaikh et al., 2017). Οι Kim et al ανέπτυξαν για την Κορέα ένα μοντέλο δύο σταδίων: i) μοντέλο βελτιστοποίησης μέσης διακύμανσης ακολουθούμενο από το ii) γραμμικό μοντέλο προγραμματισμού (Kim, 2018). Αρχικά, εφαρμόστηκε ένα μοντέλο βελτιστοποίησης μέσης διακύμανσης για τον προσδιορισμό της βέλτιστης αναλογίας πλοίων από την αγορά των μακροχρόνιων συμβάσεων και την αγορά άμεσης παράδοσης. Αυτό ακολουθήθηκε από ένα μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού για τον προσδιορισμό του βέλτιστου συνόλου των μακροχρόνιων συμβάσεων. Από την άποψη ενός μεμονωμένου αγοραστή ΥΦΑ, η επιλογή των μακροπρόθεσμων συμβάσεων έχει τρία στάδια: επανεπιλογή, προεπιλογή και τελική αξιολόγηση (Plebankiewicz & Kubek, 2016). Για τις συμβάσεις αγοράς ΥΦΑ, οι Khalilpour και Karimi ανέπτυξαν ένα μοντέλο βελτιστοποίησης πολλαπλών περιόδων για την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος αγοράς και μεταφοράς, ώστε το σύνολο των επιλεγμένων συμβάσεων να ανταποκρίνεται στη ζήτηση του αγοραστή σε κάθε περίοδο. Οι μακροπρόθεσμες συμβάσεις μοντελοποιήθηκαν με διατυπώσεις τιμών, ευελιξία, διάρκεια, ποιότητα, ποσότητα, δέσμευση, έκπτωση και άλλους όρους και προϋποθέσεις. Επιπλέον, οι Khalilpour και Karimi μελέτησαν τις αβεβαιότητες της ζήτησης (Rajab Khalilpour & Karimi,

2012). Η υπάρχουσα βιβλιογραφία σχετικά με την αλυσίδα εφοδιασμού ΥΦΑ επικεντρώθηκε κυρίως σε αποφάσεις τακτικής. Ιστορικά, το μεγαλύτερο μέρος της ζήτησης ικανοποιείται από την αγορά των μακροχρόνιων συμβάσεων. Ως εκ τούτου, η πιο σημαντική τακτική απόφαση που έλαβε οποιοσδήποτε πωλητής ΥΦΑ ήταν η ανάπτυξη ετήσιων προγραμμάτων παράδοσης (ADP). Το ετήσιο πρόγραμμα παράδοσης προετοιμάζεται πριν από την έναρξη κάθε συμβατικού έτους και καθορίζει το πλήρες χρονοδιάγραμμα των παραδόσεων ΥΦΑ για 12-18 μήνες, συμπεριλαμβανομένων των λιμένων φόρτωσης και εκφόρτωσης, καθώς και των ημερομηνιών αναχώρησης και άφιξης για κάθε φορτίο. Επιδίωξη του ετήσιου προγράμματος είναι η εξυπηρέτηση της αγοράς των μακροπρόθεσμων συμβολαίων με το ελάχιστο κόστος, διασφαλίζοντας παράλληλα ότι πληρούνται οι όροι απογραφής και οι συμβατικές απαιτήσεις (Bittante, 2015).

Ο στόχος του ετήσιου προγράμματος είναι η ελαχιστοποίηση των κοστών μεταφοράς και ποινής μείον τα έσοδα από το ΥΦΑ που πωλείται στην αγορά άμεσης παράδοσης και το απόθεμα στις δεξαμενές στο τέλος του ορίζοντα σχεδιασμού. Η πρώτη γνωστή προσπάθεια για την ανάπτυξη ενός ετήσιου προγράμματος έγινε από τους Rakke et al., οι οποίοι πρότειναν κυλιόμενες ευρετικές μεθόδους βασισμένες στον ορίζοντα (Rolling Heuristic Horizon, RHH) (Rakke et al., 2011). Ο ορίζοντας σχεδιασμού χωρίστηκε σε μικρότερες χρονικές περιόδους και με την ευρετική μέθοδο λύθηκαν επανειλημμένα υπό-προβλήματα κατά τη διάρκεια αυτών των περιόδων. Η υπολογιστική μελέτη τους έδειξε ότι η ευρετική μέθοδος παρήγαγε λύσεις υψηλής ποιότητας για προβλήματα του πραγματικού κόσμου σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα. Αργότερα, οι Andersson et al. διατύπωσαν το ετήσιο πρόγραμμα ως πρόβλημα μικτών ακεραίων (MIP) και το έλυσαν χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο διακλάδωσης και κοπής για την ικανοποίηση της αγοράς των μακροχρόνιων συμβάσεων LTC με ελάχιστο κόστος, μεγιστοποιώντας παράλληλα τα έσοδα για πωλήσεις μέσω της αγοράς άμεσης παράδοσης (Andersson et al., 2015). Οι Stålhane et al. χρησιμοποίησαν ευρετικά κατασκευής και βελτίωσης (CIH) για το ίδιο πρόβλημα (Stålhane et al., 2012). Οι Mutlu et al. πρότειναν τμηματικές παραδόσεις, δηλαδή ένας μεταφορέας να μπορεί να ταξιδέψει μεταξύ πολλαπλών τερματικών σταθμών επαναεριοποίησης και να παραδώσει το φορτίο εν μέρει σε κάθε τερματικό σταθμό πριν επιστρέψει στον τερματικό σταθμό υδροποίησης (Mutlu et al., 2016). Το μοντέλο αυτό όμως δεν είναι κατάλληλο κατά την εξέταση αβέβαιων απαιτήσεων. Το πρόβλημα δρομολόγησης αποθεμάτων ΥΦΑ (LNG-IRP) εισήχθη από τους Grønhaug και Christiansen για την αντιμετώπιση αυτής της έλλειψης (Grønhaug & Christiansen, 2009). Ο στόχος του προβλήματος δρομολόγησης αποθεμάτων είναι να μεγιστοποιήσει το κέρδος του

πωλητή λαμβάνοντας υπόψη την παραγωγή στο εργοστάσιο υγροποίησης, τον προγραμματισμό και τη δρομολόγηση του στόλου των μεταφορέων ΥΦΑ, καθώς και τις εκτιμώμενες πωλήσεις και αποθέματα στους τερματικούς σταθμούς των αγοραστών. Μόλις ο αγοραστής επιταχύνει τις στρατηγικές αποφάσεις προμήθειας μέσω της επιλογής των συμβολαίων και έχει συμφωνήσει για τις τακτικές αποφάσεις με τη μορφή του ετήσιου προγράμματος με τον πωλήτη, εξακολουθεί να πρέπει να κάνει επιχειρησιακές αποφάσεις εντός του συντομότερου χρονικού πλαισίου 1 έως 3 μηνών. Αυτές οι επιχειρησιακές αποφάσεις μπορούν να λαμβάνουν υπόψη διάφορες αβεβαιότητες, όπως οι υφιστάμενες συνθήκες τιμολόγησης, η υλοποίηση της ζήτησης, η απρόβλεπτη συντήρηση του τερματικού σταθμού αεριοποίησης ή οι αποκλίσεις στα χρονοδιαγράμματα αποστολής που συμφωνήθηκαν στο ετήσιο πρόγραμμα. Η αυξανόμενη διαθεσιμότητα των φορτίων ΥΦΑ από την αγορά άμεσης παράδοσης σε σύντομο χρονικό διάστημα προσφέρει επιπλέον τη δυνατότητα στον αγοραστή να εκμεταλλευτεί τις ευκαιρίες τιμολόγησης. Προς το παρόν, δεν υπάρχει κανένα μοντέλο που να βοηθά τον αγοραστή στη λήψη τέτοιων επιχειρησιακών αποφάσεων (van Goor & Scholtens, 2014).

1.14 Επίπεδα σχεδιασμού ΥΦΑ

Είναι σύνηθες να γίνεται διάκριση μεταξύ τριών επιπέδων σχεδιασμού με διαφορετικούς χρονικούς ορίζοντες κατά τον σχεδιασμό της αλυσίδας εφοδιασμού ΥΦΑ όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1.7**:



Σχήμα 1.7: Επίπεδα σχεδιασμού

Στρατηγικός σχεδιασμός

Οι στρατηγικές αποφάσεις είναι μακροπρόθεσμες αποφάσεις σημαντικές τόσο για τον τακτικό όσο και για τον επιχειρησιακό σχεδιασμό. Στην επιχείρηση ΥΦΑ, οι στρατηγικές αποφάσεις καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα και έχουν αντίκτυπο πολλά χρόνια μελλοντικά. Οι επενδυτικές αποφάσεις περιλαμβάνουν τα φυσικά περιουσιακά στοιχεία που σχετίζονται με τη μονάδα υδροποίησης και τους τερματικούς σταθμούς επαναεριοποίησης, όπου τα βασικά ζητήματα είναι η παραγωγή, η αποθήκευση και οι χωρητικότητες ελλειμνισμού. Επιπλέον, η σύνθεση του στόλου αποτελεί σημαντική μακροπρόθεσμη απόφαση για έναν μεταφορέα ΥΦΑ. Μέχρι σήμερα, το μεγαλύτερο μέρος των πωλήσεων υδροποιημένου φυσικού αερίου συνδέεται με μακροχρόνιες συμβάσεις που μπορεί να έχουν διάρκεια 20 έως 30 ετών. Η στρατηγική απόφαση σχετικά με το χαρτοφυλάκιο συμβάσεων συνδέεται στενά με τις μακροπρόθεσμες αποφάσεις που σχετίζονται με τα υλικά περιουσιακά στοιχεία (Papaleonidas et al., 2020).

Τακτικός σχεδιασμός

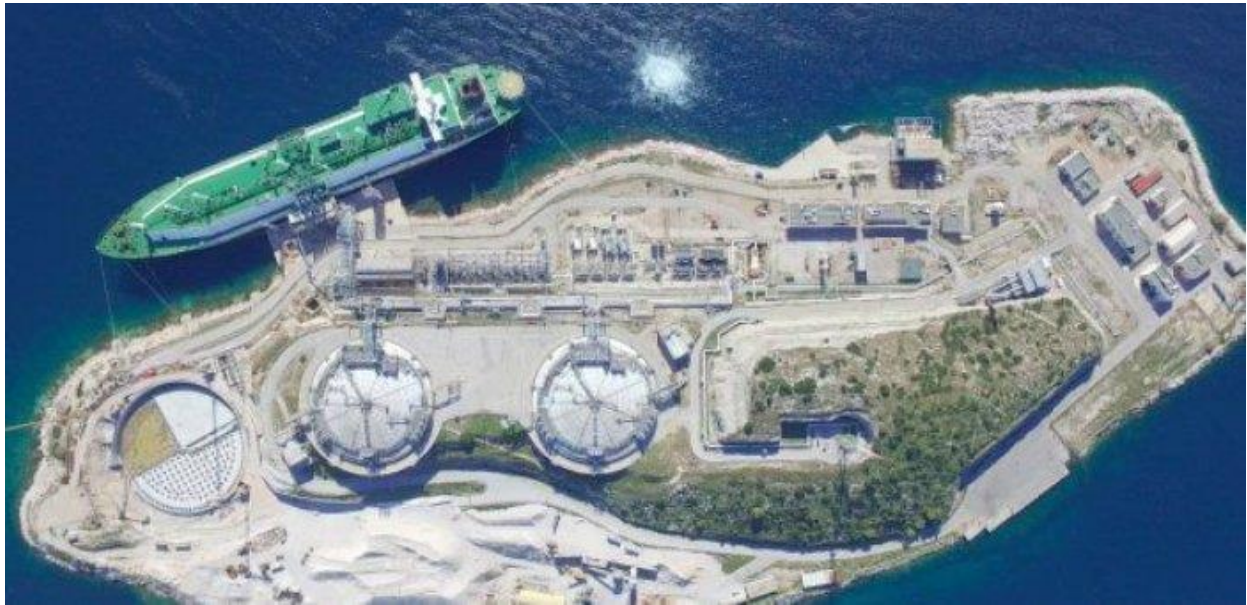
Ένα από τα κύρια καθήκοντα σε τακτικό επίπεδο είναι η δημιουργία ενός νέου ετήσιου προγράμματος. Ο ορίζοντας σχεδιασμού είναι συνήθως ένα έτος, αλλά θα μπορούσε να επεκταθεί έως και 18 μήνες. Κατά τη δημιουργία του προγράμματος, στόχος είναι ο προσδιορισμός ενός βέλτιστου προγράμματος στόλου, συμπεριλαμβανομένων των ημερομηνιών παράδοσης στα διάφορα τερματικά των πελατών. Αυτό το χρονοδιάγραμμα στόλου πρέπει επίσης να ικανοποιεί τις εκτιμήσεις περί απογραφής, καθώς και τις συμβατικές απαιτήσεις. Στην πράξη, η διαδικασία δημιουργίας ενός ετήσιου προγράμματος ξεκινά με τη δημιουργία ενός αρχικού προγράμματος στο γραφείο. Το αρχικό ετήσιο πρόγραμμα χρησιμοποιείται όταν ο παραγωγός διαπραγματεύεται με τους πελάτες του τις ημερομηνίες παράδοσης του ΥΦΑ για το επόμενο έτος. Καθώς ορισμένοι πελάτες ενδέχεται να μην αποδέχονται τις ημερομηνίες παράδοσης που προτείνονται στο αρχικό πρόγραμμα, αυτό ανακατασκευάζεται με ορισμένες ημερομηνίες παράδοσης τροποποιημένες. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται έως ότου όλοι οι πελάτες αποκτήσουν επαρκή προμήθεια υδροποιημένου φυσικού αερίου σε αποδεκτές ημερομηνίες παράδοσης (Nikhalat-Jahromi et al., 2016).

Επιχειρησιακός σχεδιασμός

Το επίπεδο επιχειρησιακού σχεδιασμού ασχολείται με την επικαιροποίηση των χρονοδιαγραμμάτων του στόλου για διάφορους υλικοτεχνικούς, οικονομικούς ή συμβατικούς λόγους. Παραδείγματα λόγω υλικοτεχνικής φύσεως μπορεί να είναι ο επαναπρογραμματισμός λόγω απρογραμμάτιστων γεγονότων, όπως η βλάβη του εξοπλισμού ή καθυστερήσεις πλοίων.

Ένα παράδειγμα οικονομικού λόγου είναι η αλλαγή των τιμών ΥΦΑ στην αγορά-άμεσης παράδοσης, καθώς νέες ευκαιρίες πώλησης ή αγοράς μπορεί να δημιουργήσουν ανάγκες για επαναπρογραμματισμό. Η τυπική διάρκεια του ορίζοντα επιχειρησιακού σχεδιασμού είναι 3 μήνες (Nikhalat-Jahromi et al., 2016).

1.15 Ο τερματικός σταθμός της Ρεβυθούσας



Σχήμα 1.8: Τερματικός σταθμός ΥΦΑ στην Ρεβυθούσα (SAFETY4SEA, 2018)

Ο τερματικός Σταθμός Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου (ΥΦΑ) της Ρεβυθούσας είναι εγκατεστημένος στη νήσο Ρεβυθούσα, 500 μέτρα περίπου από την ακτή της Αγίας Τριάδας, στον κόλπο Πάχης Μεγάρων, 45 χλμ. δυτικά της Αθήνας. Συγκαταλέγεται στους είκοσι οκτώ (28) αντίστοιχους σταθμούς υγροποιημένου φυσικού αερίου, που λειτουργούν σήμερα σε όλο το χώρο της Μεσογείου και της Ευρώπης και ήταν ο μοναδικός στην Ελλάδα για την υποδοχή δεξαμενοπλοίων ΥΦΑ, παραλαβή, αποθήκευση, αεριοποίηση ΥΦΑ και για την τροφοδοσία με Φυσικό Αέριο (ΦΑ) του Εθνικού Συστήματος Μεταφοράς ΦΑ (ΕΣΜΦΑ), μέχρι και την κατασκευή του σταθμού της Αλεξανδρούπολης. Με αποθηκευτική ικανότητα 225,000 κυβικά μέτρα ΥΦΑ και ωριαία δυναμικότητα αεριοποίησης 1250 m³ σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας (Sustained Maximum Send out Rate, SMSR) αποτελεί μια από τις σημαντικότερες εθνικές υποδομές της χώρας, παρέχοντας ασφάλεια ενεργειακής τροφοδοσίας, λειτουργική ευελιξία στο Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς ΦΑ και αυξημένη δυνατότητα κάλυψης εκτάκτων απαιτήσεων της αγοράς ΦΑ. Ο τερματικός Σταθμός ΥΦΑ σχεδιάστηκε σύμφωνα με τις αυστηρότερες προδιαγραφές ασφαλείας τόσο για τους εργαζόμενους στο νησί όσο και για τους κατοίκους των γύρω περιοχών και λειτουργεί σύμφωνα με τις απαιτήσεις της Ευρωπαϊκής

Οδηγίας SEVESO III (Directive 2012/18/EU). Η εκφόρτωση, αποθήκευση και αεριοποίηση του (ΥΦΑ) πραγματοποιείται τηρώντας αυστηρά τις προδιαγραφές ασφάλειας και προστασίας του περιβάλλοντος όπως αυτές προβλέπονται στην Ελληνική και την Ευρωπαϊκή Νομοθεσία (Μητσόπουλος, 2023). Η τήρηση των προαναφερθεισών προδιαγραφών ελέγχονται και πιστοποιούνται διαρκώς από ανεξάρτητους φορείς, καθώς ο σταθμός είναι πιστοποιημένος κατά τα πρότυπα ISO 45001 και ISO 14001. Ο ΔΕΣΦΑ με γνώμονα την αξιοπιστία και την αδιάλειπτη λειτουργία του Εθνικού Συστήματος Φυσικού Αερίου, πραγματοποίησε μια σειρά από σημαντικές επενδύσεις για την ενεργειακή υποδομή της χώρας και τη συνεχή βελτίωση των εγκαταστάσεων του Τερματικού Σταθμού ΥΦΑ. Τον Οκτώβριο του 2007 και το Δεκέμβριο του 2018 ολοκληρώθηκαν η 1^η και η 2^η φάση αναβάθμισης του τερματικού σταθμού αντίστοιχα, αυξάνοντας α) την δυναμικότητα αποθήκευσης με την λειτουργία της 3^{ης} δεξαμενής αποθήκευσης, β) την δυναμικότητα αεριοποίησης ΥΦΑ και γ) την δυνατότητα υποδοχής μεγαλύτερων πλοίων ΥΦΑ μέχρι και του μεγέθους του Q_{max} (170,000 m³). Με τις αναβαθμίσεις αυτές η εγκατάσταση μπορεί να διαχειρίζεται περισσότερες ποσότητες ΥΦΑ και να διατηρεί μεγαλύτερα ενεργειακά αποθέματα, ενισχύοντας τόσο την ρευστότητα της αγοράς όσο και την ασφάλεια εφοδιασμού της χώρας σε φυσικό αέριο. Τον Απρίλιο του 2009, ο στρατηγικός ρόλος του σταθμού ΥΦΑ ενισχύθηκε περαιτέρω με την θέση σε λειτουργία της μονάδας Συμπαγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης (ΣΘΘΥΑ), ισχύος 13MW, με καύσιμο φυσικό αέριο. Με την επένδυση αυτή διασφαλίστηκε η ηλεκτρική αυτονομία της εγκατάστασης ενώ παράλληλα χρησιμοποιείται και η παραγόμενη θερμότητα στη διεργασία αεριοποίησης του ΥΦΑ, αυξάνοντας το βαθμό απόδοσής της μονάδας στο 90% περίπου. Η εν λόγω υποδομή αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα προστασίας του περιβάλλοντος και ενεργειακής αποδοτικότητας. Σε ένα διεθνές περιβάλλον, όπου η ενέργεια αναδεικνύεται σε παράγοντα κλειδί για την ανάπτυξη και την ποιότητα ζωής, ο ΔΕΣΦΑ ενισχύει μια από τις σπουδαιότερες ενεργειακές υποδομές της Ελλάδας, ώστε να καλύψει αποτελεσματικά τις σημερινές αλλά και τις μελλοντικές ενεργειακές ανάγκες της χώρας ((Μητσόπουλος, 2023).

Η Εγκατάσταση ΥΦΑ της Ρεβυθούσας αποτελεί το σημείο εισόδου του ΥΦΑ στο Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς ΦΑ (ΕΣΜΦΑ). Έχει σχεδιαστεί για να πραγματοποιεί τις διαδικασίες της α)έγχυσης ΥΦΑ από πλοίο μεταφοράς, β)αποθήκευσης ποσοτήτων ΥΦΑ, γ) επαναυδροποίησης των αερίων που προκύπτουν από φυσική εξάτμιση του ΥΦΑ στις δεξαμενές, δ) άντλησης και αεριοποίησης του ΥΦΑ και ε) έγχυσης του Φ.Α. στο ΕΣΜΦΑ. Για την έγχυση ΥΦΑ από πλοία μεταφοράς στις δεξαμενές αποθήκευσης της εγκατάστασης ΥΦΑ, υπάρχει κατάλληλο σύστημα

βραχιόνων και γραμμών έγχυσης. Το σύστημα βραχιόνων αποτελείται από 3 βραχίονες έγχυσης ΥΦΑ H3101A/B/C, και έναν βραχίονα αερίων H3102, για τη μεταφορά από και προς το πλοίο μεταφοράς. Ο μέγιστος ρυθμός εκφόρτωσης ΥΦΑ καθορίζεται στα $7250 \frac{m^3}{h}$ (Μητσόπουλος, 2023).

Το ΥΦΑ αποθηκεύεται σε θερμοκρασία περίπου $-160^{\circ}C$ και σε σχεδόν ατμοσφαιρική πίεση. Για την αποθήκευση του ΥΦΑ στην εγκατάσταση ΥΦΑ υπάρχουν τρεις δεξαμενές αποθήκευσης με διαθέσιμη χωρητικότητα $225,000 m^3$. Σε αυτές τις συνθήκες στις δεξαμενές αποθήκευσης ΥΦΑ δημιουργούνται αέρια (κυρίως μεθάνιο και άζωτο) από την φυσική εξάτμιση του. Για τη διατήρηση της πίεσης των δεξαμενών σε χαμηλά επίπεδα στην εγκατάσταση ΥΦΑ έχει προβλεφθεί σύστημα απομάκρυνσης και επανάκτησης των αερίων από τις δεξαμενές. Αυτό το σύστημα αποτελείται από συμπιεστές αερίου και τον επανασυμπυκνωτή αερίων. Το σύστημα άντλησης και αεριοποίησης του αποθηκευμένου ΥΦΑ αποτελείται από αντλίες χαμηλής πίεσης (J3201A/B/C/D/E/F/G/H/I/J/K/L), οι οποίες είναι εμβαισιμένες στις δεξαμενές αποθήκευσης και οδηγούν το αντλούμενο ΥΦΑ στον επανασυμπυκνωτή ή κατευθείαν στις αντλίες υψηλής πίεσης. Ο επανασυμπυκνωτής λειτουργεί επίσης ως δοχείο αναρρόφησης των αντλιών υψηλής πίεσης (J3104A/B, J3102A/B και J3103A/B). Οι αντλίες υψηλής πίεσης ανεβάζουν την πίεση του ΥΦΑ και το αποστέλλουν στους αεριοποιητές για αεριοποίηση. Οι αεριοποιητές (M-3101 A/B/C/D και M-3102 A/B/C/D) είναι εγκαταστάσεις που σκοπό έχουν να δώσουν την απαιτούμενη θερμότητα στο ΥΦΑ για την αεριοποίηση του και επιπλέον την θέρμανση του παραγόμενου Φ.Α. σε θερμοκρασία τουλάχιστον $3.5^{\circ}C$ πριν την είσοδο του στο ΕΣΜΦΑ μεταφοράς. Η εγκατάσταση ΥΦΑ συνδέεται με το ΕΣΜΦΑ μέσω 2 υποθαλάσσιων αγωγών διαμέτρου 24” ο καθένας και μήκους 510m και 620m, μέχρι την Αγία Τριάδα που αποτελεί σημείο εισόδου στο ΕΣΜΦΑ (Μητσόπουλος, 2023).

1.16 Ο τερματικός σταθμός της Αλεξανδρούπολης



Σχήμα 1.9: Τερματικός σταθμός ΥΦΑ στην Αλεξανδρούπολη (Gastrade A.E., n.d.)

Οι τερματικοί σταθμοί ΥΦΑ Αλεξανδρούπολης & Θράκης συμβάλλουν στη διεύρυνση των πηγών και των οδών προμήθειας φυσικού αερίου, στην προώθηση του ανταγωνισμού προς όφελος του τελικού καταναλωτή, στην ασφάλεια εφοδιασμού της Ελλάδας και των Βαλκανικών χωρών, στη βελτίωση της αξιοπιστίας και της ευελιξίας του Εθνικού Συστήματος Φυσικού Αερίου καθώς και των Περιφερειακών και Διευρωπαϊκών Συστημάτων αλλά και στην ενίσχυση των περιβαλλοντικών στόχων της χώρας. Τα δεξαμενόπλοια μεταφοράς ΥΦΑ μεταφέρουν το υγροποιημένο φορτίο μέσω κρυογενικών σωλήνων στις δεξαμενές της πλωτής μονάδας (FSRU) (Gastrade A.E., n.d.).



Σχήμα 1.10: Χωροθέτηση του σταθμού της Αλεξανδρούπολης (Gastrade A.E., n.d.)

Στη συνέχεια το ΥΦΑ αεριοποιείται στις εγκαταστάσεις αεριοποίησης που βρίσκονται πάνω στην πλωτή μονάδα και μέσω ειδικής διάταξης μεταφέρεται στον υποθαλάσσιο αγωγό μεταφοράς φυσικού αερίου ο οποίος ακολουθώντας μία διαδρομή 24 χλμ προσαιγιαλώνεται στην περιοχή του Απαλού, ανατολικά της Αλεξανδρούπολης. Κατόπιν, συνεχίζοντας με βόρεια πορεία 4 χλμ καταλήγει στο νέο Μετρητικό και Ρυθμιστικό Σταθμό στην περιοχή Αμφιρίτης όπου συνδέεται με το Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς Φυσικού Αερίου. Η πλωτή μονάδα του ΑΣΦΑ Αλεξανδρούπολης θα είναι μόνιμα αγκυροβολημένη σε σταθερό σημείο και σε απόσταση 17.6 χλμ ΝΔ από το λιμάνι της Αλεξανδρούπολης και 10 χλμ από την απέναντι ακτή της Μάκρης. Η πλωτή μονάδα του ΑΣΦΑ Θράκης σχεδιάζεται να αγκυροβοληθεί μόνιμα σε απόσταση 8 χλμ ανατολικά από τον τερματικό σταθμό ΥΦΑ «ΑΣΦΑ Αλεξανδρούπολης» (Gastrade A.E., n.d.).



Σχήμα 1.11: Η πλωτή μονάδα παραλαβής, αποθήκευσης και αεριοποίησης ΥΦΑ (Gastrade A.E., n.d.)

Η πλωτή μονάδα παραλαβής, αποθήκευσης και αεριοποίησης ΥΦΑ περιλαμβάνει τα εξής βασικά μέρη (Gastrade A.E., n.d.):

- ❖ Συστήματα πρόσδεσης δεξαμενοπλοίων και μετάγγισης ΥΦΑ
- ❖ Τέσσερις δεξαμενές αποθήκευσης ΥΦΑ συνολικής χωρητικότητας έως 153,500 κυβικά μέτρα
- ❖ Τρεις μονάδες αεριοποίησης δυναμικότητας 315,000 κυβικών μέτρων (267 mmscfd) ΦΑ / ώρα (έκαστη)

- ❖ Μονάδες ηλεκτροπαραγωγής για την εξυπηρέτηση των αναγκών της πλωτής μονάδας σε ηλεκτρική ενέργεια
- ❖ Μετρητική μονάδα για την μέτρηση των ποσοτήτων φυσικού αερίου που αεριοποιούνται
- ❖ Χώρους διαμονής και ενδιαίτησης πληρώματος

Στη συνέχεια, το υγροποιημένο φυσικό αέριο μεταγγίζεται από τα δεξαμενόπλοια μεταφοράς στις κρυογενικές δεξαμενές της πλωτής μονάδας και στη συνέχεια οδηγείται για αεριοποίηση στις τέσσερις μονάδες αεριοποίησης που περιλαμβάνουν:

- ❖ Δύο μονάδες αεριοποίησης τεχνολογίας κλειστού & ανοιχτού κυκλώματος (dual loop)
- ❖ Μία μονάδα αεριοποίησης τεχνολογίας ανοικτού κυκλώματος (open loop)

Η δυναμικότητα αεριοποίησης κάθε μονάδας είναι 315,000 κυβικά μέτρα (267 mmscfd) $\frac{\Phi A}{h}$.

Στην τεχνολογία κλειστού κυκλώματος η αεριοποίηση του ΥΦΑ επιτυγχάνεται με καύση φυσικού αερίου, ενώ στους αεριοποιητές ανοικτού κυκλώματος το ΥΦΑ θερμαίνεται με χρήση θαλασσινού νερού το οποίο αναρροφάται με ειδικές αντλίες αναρρόφησης. Στη συνέχεια το αεριοποιημένο φυσικό αέριο οδηγείται μέσω αγωγών στη μετρητική διάταξη και από εκεί μέσω εύκαμπτων αγωγών στην μονάδα πολλαπλής εξαγωγής τέρματος αγωγού και τελικά στον υποθαλάσσιο αγωγό για τη μεταφορά του προς το χερσαίο αγωγό (Gastrade A.E., n.d.).



Σχήμα 1.12: Ο χερσαίος αγωγός (Gastrade A.E., n.d.)

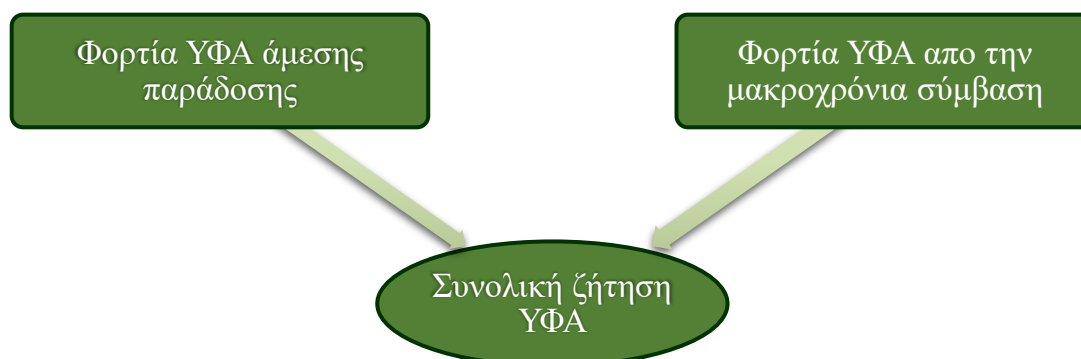
Ο αγωγός σχεδιάζεται με διάμετρο 30 ιντσών σε όλο του το μήκος και μέγιστη πίεση λειτουργίας 110 barg. Προφανώς η πίεση λειτουργίας του αγωγού εξαρτάται από την αντίστοιχη πίεση λειτουργίας των κατάντη συστημάτων με τα οποία συνδέεται. Ο

υποθαλάσσιος αγωγός μήκους 24 χιλιομέτρων ποντίζεται επί του πυθμένα της θάλασσας τοποθετείται σε όρυγμα και επιχώνεται σε όλο το μήκος της διαδρομής του. Ο αγωγός προσαιγιαλώνεται στην περιοχή της ακτογραμμής Απαλού και συνεχίζει υπόγεια την πορεία του προς τον βορρά για 4 χιλιόμετρα ακόμη, μέχρι να συνδεθεί με το Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς Φυσικού Αερίου στην περιοχή της Αμφιτρίτης σε νέο μετρητικό και ρυθμιστικό σταθμό που θα κατασκευασθεί και θα λειτουργείται από τον ΔΕΣΦΑ για τις ανάγκες του ΑΣΦΑ Αλεξανδρούπολης (Gastrade A.E., n.d.).

2 Μαθηματικό μοντέλο

2.1 Θεωρητική περιγραφή μαθηματικού μοντέλου

Η διατήρηση ενός αποθέματος ΥΦΑ σε έναν τερματικό σταθμό κρίνεται απαραίτητη για την ικανοποίηση των ενεργειακών απαιτήσεων μιας μονάδας, μιας περιοχής ή ενός γενικότερου συγκροτήματος. Η αναπλήρωση του αποθέματος αυτού μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω του προγραμματισμού της άφιξης φορτίων ΥΦΑ, προερχόμενων από τις μακροχρόνιες συμβάσεις. Οι μακροπρόθεσμες συμβάσεις χαρακτηρίζονται όπως έχει προαναφερθεί από τον υποχρεωτικά προμηθευόμενο όγκο, ο οποίος κυμαίνεται στο 40-65% της συνολικής ζήτησης (Shahrukh, Srinivasan & Karimi, 2021). Επιπρόσθετα, στα μακροπρόθεσμα αυτά συμβόλαια αναγράφονται οι τερματικοί σταθμοί που λαμβάνουν το ΥΦΑ όπως και τα υγραεριοφόρα πλοία που υπόκεινται στην σύμβαση. Εκτός από τις μακροπρόθεσμες συμβάσεις, ο κάθε αγοραστής ΥΦΑ έχει την δυνατότητα να προμηθεύεται φορτία και από την αγορά άμεσης παράδοσης. Στόχος του αγοραστή ΥΦΑ αποτελεί η ικανοποίηση της ζήτησης σε όλους τους τερματικούς σταθμούς με το ελάχιστο δυνατό κόστος προμήθειας κατά την διάρκεια του ορισθέντος χρονικού ορίζοντα. Ουσιαστικά, πραγματοποιείται συνδυασμός των δύο αγορών, όπως υποδεικνύεται στο **Σχήμα 2.1**, αφού θα υπάρχει η δυνατότητα προμήθειας φορτίων ΥΦΑ και από τις δύο. Με αυτό τον τρόπο καθίσταται βέβαιο ότι τηρούνται οι δεσμεύσεις που απορρέουν από την σύμβαση αλλά παρέχεται και η ευελιξία επιλογής άλλων οικονομικότερων πλοίων από την αγορά άμεσης παράδοσης. Συνεπώς, συνδυάζονται τα οφέλη που προσφέρει έκαστη αγορά προμήθειας ΥΦΑ, με στόχο την βελτιστοποίηση του κόστους προμήθειας.



Σχήμα 2.1: Ικανοποίηση της ζήτησης με συνδυασμό των δύο αγορών

2.2 Ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου

Απώτερος στόχος είναι η βελτιστοποίηση του κόστους προμήθειας ΥΦΑ από τις αγορές μακροπρόθεσμων συμβολαίων και άμεσης παράδοσης. Ο όρος «βελτιστοποίηση» αναφέρεται στην εύρεση της καλύτερης (ή βέλτιστης) λύσης. Αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση τεχνικών μαθηματικής μοντελοποίησης, μέσω των οποίων καθίσταται εφικτός ο προσδιορισμός των βέλτιστων αποφάσεων, ικανοποιώντας ταυτόχρονα μια σειρά από αναγκαίους περιορισμούς του προβλήματος. Ουσιαστικά, βελτιστοποιείται η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος, η οποία στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι το κόστος κι άρα επιδιώκεται η ελαχιστοποίησή του. Το μαθηματικό μοντέλο επιλύεται, αφού εισαχθεί στο λογισμικό βελτιστοποίησης General Algebraic Modeling System (GAMS) (Γεωργιάδης, Ελεκίδης και Γεωργιάδης, 2022).

Το μαθηματικό μοντέλο με το οποίο θα επιλυθούν οι μελέτες περίπτωσης έχει αναπτυχθεί από τον Rajagoralan (2021), μετά από διάφορες διορθώσεις που έγιναν λόγω πλήθους τυπογραφικών και άλλων λαθών. Οι μαθηματικοί περιορισμοί που απαρτίζουν το μαθηματικό μοντέλο παρουσιάζονται στη συνέχεια.

2.2.1 Ονοματολογία

Σύνολα	
$t \in T$	Σύνολο τερματικών σταθμών
$k \in K$	Σύνολο των χρονικών διαστημάτων του χρονικού ορίζοντα
$c \in C$	Σύνολο των πλοίων από τις δύο αγορές
Υποσύνολα	
$l \in C$	Σύνολο των πλοίων από την μακροχρόνια σύμβαση
$s \in C$	Σύνολο των πλοίων από την αγορά άμεσης παράδοσης

Παράμετροι	
V_c	Η χωρητικότητα του κάθε πλοίου σε m^3
P_c	Η τιμή ΥΦΑ για κάθε πλοίο σε $\frac{\$}{m^3}$
J_{tot}^t	Συνολικός αριθμός προβλητών σε κάθε τερματικό σταθμό
$S_{maximum}^t$	Μέγιστη δυναμικότητα κάθε τερματικού σταθμού σε m^3
$S_{minimum}^t$	Ελάχιστη δυναμικότητα κάθε τερματικού σταθμού σε m^3
$Initial_t$	Αρχική ποσότητα ΥΦΑ σε κάθε τερματικό σταθμό σε m^3
$J_{initial}^t$	Αρχικός αριθμός προβλητών σε κάθε τερματικό σταθμό
Q_c^t	Χρόνος μεταφοράς από και προς τον προμηθευτή σε κάθε τερματικό σταθμό σε χρονικά διαστήματα
V_{min}	Ελάχιστος υποχρεωτικός προμηθευόμενος όγκος από την μακροχρόνια σύμβαση σε m^3
V_{max}	Μέγιστος προμηθευόμενος όγκος από την μακροχρόνια σύμβαση σε m^3
$CT_{c,t}$	Κόστος ναύλωσης κάθε πλοίου ανά τερματικό σταθμό σε \$
$EAT_{s,t}$	Νωρίτερος χρόνος άφιξης πλοίου από την αγορά άμεσης παράδοσης σε χρονικά διαστήματα
$LAT_{s,t}$	Αργότερος χρόνος άφιξης πλοίου από την αγορά άμεσης παράδοσης σε χρονικά διαστήματα
$D_{k,t}$	Η ζήτηση ΥΦΑ ανά χρονικό διάστημα σε κάθε τερματικό σταθμό σε m^3

Μεταβλητές**Συνεχείς μεταβλητές**

$S_t(t,k)$	Αποθηκευμένη ποσότητα ΥΦΑ σε κάθε τερματικό σταθμό στο τέλος του χρονικού διαστήματος k
$J(t,k)$	Αριθμός διαθέσιμων προβλητών σε κάθε τερματικό σταθμό στο τέλος κάθε χρονικού διαστήματος

Δυαδικές μεταβλητές

$x(c,t,k)$	1 αν το πλοίο c φθάνει στον τερματικό σταθμό t στην αρχή του χρονικού διαστήματος k , 0 διαφορετικά
$y(c,t,k)$	1 αν το πλοίο c αποχωρεί από τον τερματικό σταθμό t στην αρχή του χρονικού διαστήματος k , 0 διαφορετικά

Ελεύθερες μεταβλητές

PC	Ελάχιστο κόστος προμήθειας σε \$ και σε €
----	---

2.2.2 Μαθηματική διατύπωση μοντέλου

Το μαθηματικό μοντέλο είναι μεικτού ακέραιου προγραμματισμού (MILP) και απαρτίζεται από χρονικούς, αποθηκευτικούς περιορισμούς αλλά και περιορισμούς σχετικούς με τα χαρακτηριστικά των δύο αγορών προμήθειας ΥΦΑ. Στη συνέχεια διατυπώνονται όλοι οι περιορισμοί και η αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου με σαφήνεια και ακρίβεια.

Περιορισμός για τα πλοία από την αγορά άμεσης παράδοσης

$$\sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K x_{ctk} \leq 1 \quad \forall c \in S \quad (2.1)$$

Εάν ένα πλοίο s από την αγορά άμεσης παράδοσης αφιχθεί στον τερματικό σταθμό t στην αρχή του χρονικού διαστήματος k , τότε δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί η άφιξη του σε αυτό τον σταθμό t ξανά εντός του χρονικού ορίζοντα αλλά ούτε και σε κανένα άλλο. Ο περιορισμός αυτός σχετίζεται με την δομή της αγοράς άμεσης παράδοσης, η οποία εμπεριέχει συμβάσεις που αφορούν συνήθως στην μία και μόνο χρήση του πλοίου. Σε αυτή ακριβώς την επιλογή επαφίεται και η ευελιξία στις τιμές στην άμεση αγορά.

Περιορισμός της μακροχρόνιας σύμβασης

$$V_{min} \leq \sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K x_{ctk} \cdot V_c \leq V_{max} \quad (2.2)$$

Ο αγοραστής ΥΦΑ πρέπει να πληροί τις προϋποθέσεις αγοράς για κάθε μακροχρόνια σύμβαση. Όπως έχει αναφερθεί και στην θεωρία ένα ποσοστό της ζήτησης θα πρέπει να ικανοποιείται από την μακροχρόνια σύμβαση (40-65%). Συνεπώς, θα πρέπει ο προμηθευόμενος όγκος από την σύμβαση να είναι τουλάχιστον ίσος ή μεγαλύτερος από τον ελάχιστο που ορίζει η σύμβαση και σαφώς μικρότερος από το ανώτατο όριο που εκείνη ορίζει.

Ισοζύγια προβλητών

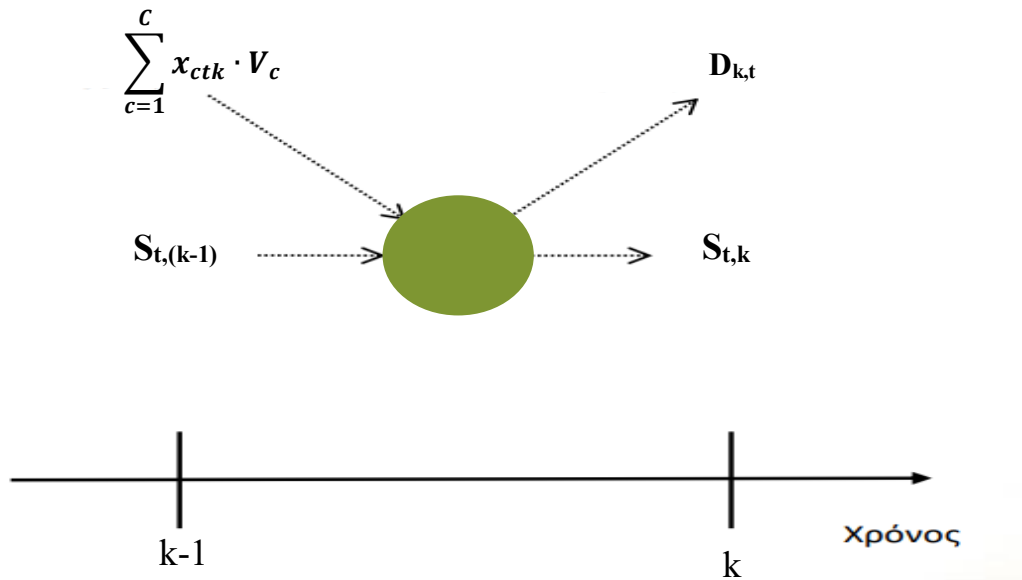
$$J_{t,k} = J_{t,(k-1)} + \sum_{c=1}^C x_{ctk} - \sum_{c=1}^C y_{ct(k+1)} \quad \forall t \in T, \quad k \in K \quad (2.3)$$

$$j_{t0} = J_{tot}^t \quad \forall t \in T \quad (2.4)$$

Ο αριθμός των διαθέσιμων προβλητών στο τέλος κάθε χρονικού διαστήματος k , για κάθε τερματικό σταθμό t είναι ίσος με τον αριθμό των προβλητών που χρησιμοποιούνται στο τέλος του προηγούμενου χρονικού διαστήματος $k-1$, συν τον αριθμό των πλοίων που φθάνουν στο σταθμό στην αρχή του διαστήματος k , μείον τον αριθμό των πλοίων που φεύγουν από το σταθμό στο τέλος του χρονικού διαστήματος k , δηλαδή στην αρχή του χρονικού διαστήματος $k+1$. Επίσης, για κάθε τερματικό σταθμό ο αρχικός αριθμός προβλητών είναι ίσος με την παράμετρο J_{tot}^t .

Ισοζύγιο μάζας ΥΦΑ

$$S_{t,k} = S_{t,(k-1)} - D_{k,t} + \sum_{c=1}^C x_{ctk} \cdot V_c \quad \forall t \in T, k \in K \quad (2.5)$$



Σχήμα 2.2: Σχηματική αναπαράσταση ισοζυγίου μάζας

Στο Σχήμα 2.2 αναπαρίσταται σχηματικά το ισοζύγιο μάζας. Η αποθηκευμένη ποσότητα ΥΦΑ στο τέλος του χρονικού διαστήματος k για κάθε τερματικό σταθμό είναι ίση με την αποθηκευμένη ποσότητα ΥΦΑ στο τέλος του προηγούμενου χρονικού διαστήματος $k-1$, μείον την ζήτηση ΥΦΑ η οποία θα πρέπει να ικανοποιηθεί στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, συν τον επιπρόσθετο όγκο ΥΦΑ, ο οποίος προέρχεται από την άφιξη των πλοίων στην αρχή του χρονικού διαστήματος k στο συγκεκριμένο σταθμό.

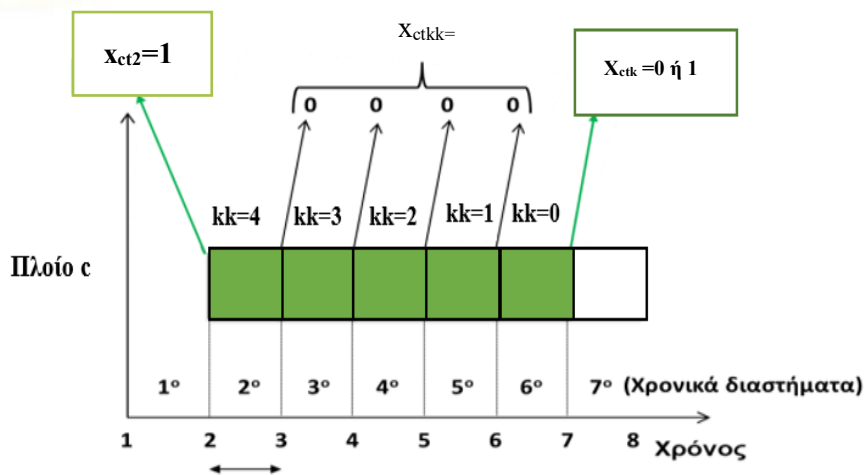
Χρονικοί περιορισμοί

$$x_{ctk} = y_{ct(k+1)} \quad \forall c \in C, t \in T, k \in K \quad (2.6)$$

Κάθε πλοίο που φτάνει σε κάθε σταθμό στην αρχή του χρονικού διαστήματος k θα πρέπει εντός ενός χρονικού διαστήματος, όσο δηλαδή είναι και ο χρόνος της εκφόρτωσης να αποχωρεί από τον σταθμό, δηλαδή στην αρχή του διαστήματος $(k+1)$.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{kk=0}^{Q_c^t} x_{ct(k-kk)} \leq 1 \quad \forall c \in L, k \in K \quad (2.7)$$

Εάν ένα πλοίο από την μακροχρόνια σύμβαση φθάσει σε ένα τερματικό σταθμό t στην αρχή του χρονικού διαστήματος k , τότε μπορεί να λάβει ξανά χώρα η άφιξή του μετά από συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Η παράμετρος Q_c^t αναφέρεται στο συνολικό χρόνο μεταφοράς για ένα πλοίο από την μακροχρόνια σύμβαση από και προς τον προμηθευτή. Επίσης, πρέπει να ληφθεί υπόψη και ο χρόνος για την εκφόρτωση στον σταθμό που έφτασε, ο οποίος είναι ίσος με ένα χρονικό διάστημα. Δηλαδή, αν εάν ένα πλοίο αφιχθεί στον τερματικό σταθμό t στην αρχή του χρονικού διαστήματος k , τότε θα μπορεί να γίνει η άφιξη του ξανά μετά από $(Q_c^t + 1)$ χρονικά διαστήματα. Όπως είναι εμφανές ο χρόνος kk αρχίζει από το μηδέν και συνεπώς για να είναι σωστή η διάρκεια του θα φτάνει μέχρι και $(Q_c^t + 1 - 1)$, εντέλει Q_c^t χρονικά διαστήματα. Με την βοήθεια του **Σχήμα 2.3** ο περιορισμός μπορεί να γίνει περισσότερο κατανοητός.



Σχήμα 2.3: Σχηματική αναπαράσταση χρονικού περιορισμού

Έστω ότι ένα πλοίο της μακροχρόνιας σύμβασης χρειάζεται 4 χρονικά διαστήματα για να μπορέσει να ταξιδέψει από τον προμηθευτή και προς ένα συγκεκριμένο τερματικό σταθμό. Επίσης θα χρειάζεται ένα ακόμη χρονικό διάστημα για να γίνει η εκφόρτωση από τον προηγούμενο τερματικό σταθμό. Συνεπώς, το πλοίο θα μπορεί να αφιχθεί μετά από πέντε χρονικά διαστήματα ή αλλιώς μετά το πέρας του 6^{ου} χρονικού διαστήματος (δηλαδή στην αρχή του 7^{ου}).

Περιορισμός για τα πλοία της spot αγοράς

$$x_{ctk} = 0 \quad \forall c \in S, t \in T, \quad EAT_{s,t} \leq k \leq LAT_{s,t} \quad (2.8)$$

Τα πλοία από την αγορά άμεσης παράδοσης πρέπει να φθάνουν σε ένα τερματικό σταθμό t μόνο εντός του χρονικού περιθωρίου $EAT_{s,t} - LAT_{s,t}$. Δηλαδή, δεν νοείται ένα πλοίο από την

αγορά άμεσης παράδοσης να φθάσει σε ένα τερματικό σταθμό, νωρίτερα από νωρίτερο χρόνο άφιξης του $EAT_{s,t}$ και αργότερα από τον αργότερο χρόνο άφιξης του, $LAT_{s,t}$. Για κάθε πλοίο και κάθε σταθμό αυτό το χρονικό περιθώριο διαφέρει.

$$x_{c,t,(90-(Q_c^t+1))} = 0 \quad \forall c \in C, \forall t \in T \quad (2.9)$$

Τέλος, θα πρέπει στο τέλος του χρονικού ορίζοντα τα πλοία της μακροχρόνιας σύμβασης να βρίσκονται στην αφετηρία τους, δηλαδή στον προμηθευτή. Άρα, η μεταβλητή $x_{c,t,k}$ θα πάψει να μπορεί να είναι 1, από το διάστημα $(90-(Q_c^t + 1))$, το οποίο όπως είναι εμφανές εξαρτάται από τον κάθε τερματικό σταθμό. Εάν, ένα πλοίο της μακροχρόνιας σύμβασης αφιχθεί σε έναν τερματικό σταθμό σε χρονικό διάστημα k μεγαλύτερο από το αναφερόμενο, τότε η άφιξη του θα πραγματοποιηθεί σε διάστημα, το οποίο θα είναι εκτός του χρονικού ορίζοντα, γεγονός το οποίο είναι άτοπο.

Περιορισμοί χωρητικότητας

$$S_{\text{minimum}}^t \leq S_{t,k} \leq S_{\text{maximum}}^t \quad \forall t \in T, k \in K \quad (2.10)$$

Η αποθηκευμένη ποσότητα σε κάθε τερματικό σταθμό και κάθε χρονικό διάστημα πρέπει να διατηρείται εντός ορισμένων ορίων. Δηλαδή, είναι ανέφικτο να αποθηκευτεί ποσότητα, η οποία υπερβαίνει την μέγιστη χωρητικότητα του εκάστοτε σταθμού. Επίσης, είναι απαραίτητη η ύπαρξη μια ελάχιστης αποθηκευμένης ποσότητας στο σταθμό, ώστε να είναι εφικτή η ικανοποίηση της ζήτησης.

$$\sum_{c=1}^C x_{ctk} \leq J_{tot}^t \quad \forall t \in T, \forall k \in K \quad (2.11)$$

Σε ένα τερματικό σταθμό σε κάθε χρονικό διάστημα είναι αδύνατο να καταφθάνουν πλοία περισσότερα από τον διαθέσιμο αριθμό προβλητών. Συνεπώς, ο αριθμός των πλοίων που καταφθάνουν στο κάθε σταθμό θα είναι το πολύ ίσος με τον αριθμό των προβλητών του συγκεκριμένου σταθμού. Διαφορετικά, οποιοδήποτε επιπρόσθετο πλοίο αφιχθεί στο σταθμό δεν θα μπορέσει να προσδεθεί και να εκφορτώσει το ΥΦΑ.

Αντικειμενική συνάρτηση

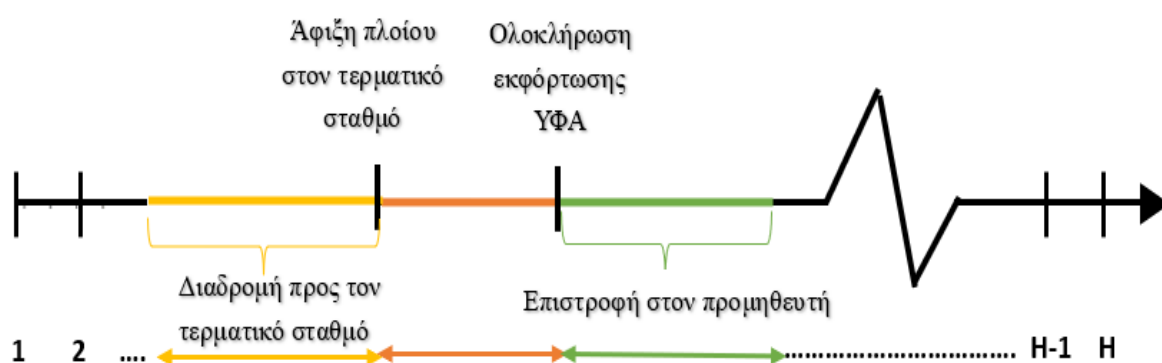
$$PC = \sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K x_{ctk} \cdot V_c \cdot P_c + \sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K 2 \cdot x_{ctk} \cdot CT_{c,t} \quad (2.12)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση αποτελείται από το κόστος μεταφοράς του ΥΦΑ ως αγαθό, το οποίο είναι το πρώτο άθροισμα και από το κόστος ναύλωσης, το οποίο είναι το δεύτερο άθροισμα. Ο συντελεστής 2 στο δεύτερο άθροισμα χρησιμοποιείται για να ληφθεί υπόψη ολόκληρη η διαδρομή από και προς τον προμηθευτή, καθώς τα χρονικά διαστήματα, για να υπολογιστεί το κόστος ναύλωσης, που δίνονται αφορούν την μισή διαδρομή, δηλαδή μόνο από τον προμηθευτή προς τον τερματικό σταθμό. Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση αυτών των αθροισμάτων με την λήψη των κατάλληλων αποφάσεων

3 Μελέτες περίπτωσης

3.1 Μελέτη περίπτωσης Α

Μετά την διατύπωση του μαθηματικού μοντέλου ακολουθεί η επίλυση ενός βιβλιογραφικού παραδείγματος, όπως αυτό διατυπώθηκε από τον Rajagoralan (2021). Συγκεκριμένα, πρέπει να επιτευχθεί η ικανοποίηση της ζήτησης ΥΦΑ τριών περιφερειακά καταναμημένων τερματικών σταθμών, με συνδυασμό των υγραεριοφόρων πλοίων από τις δύο αγορές. Ο σχεδιασμός πραγματοποιείται σε χρονικό ορίζοντα 30 ημερών. Αυτός ο ορίζοντας προγραμματισμού διαχωρίζεται σε 90 ομοιόμορφα χρονικά διαστήματα των 8 ωρών. Κάθε πλοίο, αποθηκευτική δεξαμενή και προβλήτα μοντελοποιείται ως ένας ξεχωριστός «πόρος». Για κάθε «πόρο» ο χρονικός ορίζοντας διακρίνεται σε αυτά τα 90 ομοιόμορφα χρονικά διαστήματα, όπου το κάθε ένα έχει προκαθορισμένο μέγεθος (1 χρονικό διάστημα). Ο χρονικός ορίζοντας είναι κοινός για όλους τους «πόρους».



Σχήμα 3.1: Αναπαράσταση χρονικού ορίζοντα

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζονται οι διάφορες ενέργειες που πραγματοποιούνται από τα πλοία κατά τη διάρκεια του ορίζοντα. Δηλαδή, ο μεταφορέας ΥΦΑ χρειάζεται ορισμένα χρονικά διαστήματα, προκειμένου να αφιχθεί στον τερματικό σταθμό, να εκφορτώσει και εντέλει να επιστρέψει στην αφετηρία του, στον προμηθευτή.

Στα πλαίσια της εν λόγω μελέτης περίπτωσης γίνονται ορισμένες παραδοχές:

- ❖ Το κόστος ναύλωσης για τα φορτία των μακροπρόθεσμων συμβάσεων θεωρείται ότι ενσωματώνεται στην τιμή μεταφοράς του ΥΦΑ.
- ❖ Κάθε πλοίο από την αγορά άμεσης παράδοσης έχει διαφορετικό χρονικό περιθώριο άφιξης ανά τερματικό σταθμό.

- ❖ Κάθε πλοίο της αγοράς άμεσης παράδοσης έχει διαφορετικό όγκο και τιμή ΥΦΑ όπως επίσης κι ένα πρόσθετο κόστος ναύλωσης, το οποίο εξαρτάται από τον αριθμό των ημερών που πρέπει να ναυλωθεί ένας μεταφορέας για το εν λόγω φορτίο.
- ❖ Τα φορτία των μακροπρόθεσμων συμβάσεων μπορούν να προγραμματιστούν να φθάσουν σε έναν τερματικό σταθμό οποιαδήποτε στιγμή κατά τη διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού, ενώ τα φορτία της αγοράς άμεσης παράδοσης μπορούν να φθάσουν μόνο κατά τη διάρκεια ενός προκαθορισμένου χρονικού διαστήματος.
- ❖ Ακόμη τα φορτία των μακροπρόθεσμων συμβάσεων μπορούν να αγοραστούν πολλές φορές εντός του χρονικού ορίζοντα, ενώ τα φορτία από την αγορά άμεσης παράδοσης μπορούν να αγοραστούν μόνο μία φορά.
- ❖ Κάθε πλοίο της μακροχρόνιας σύμβασης έχει μια γνωστή τοποθεσία από την οποία προέρχεται, ενώ ένα φορτίο της αγοράς άμεσης παράδοσης μπορεί να βρίσκεται οπουδήποτε.
- ❖ Κάθε τερματικός σταθμός έχει προκαθορισμένες απαιτήσεις για κάθε χρονικό διάστημα. Τα δεδομένα ζήτησης για κάθε χρονικό διάστημα δημιουργήθηκαν με την κλιμάκωση της ονομαστικής ζήτησης και την προσθήκη μιας στοχαστικής διακύμανσης $\pm 30\%$ αυτής.
- ❖ Ο απαιτούμενος χρόνος για την εκφόρτωση ΥΦΑ από τα πλοία και των δύο αγορών είναι ίσος με 1 χρονικό διάστημα.
- ❖ Ο χρόνος μεταφοράς αφορά τον χρόνο για την διεκπεραίωση της διαδρομής από τον προμηθευτή προς τον τερματικό σταθμό αλλά και από τον τερματικό σταθμό προς τον προμηθευτή.
- ❖ Το κόστος ναύλωσης θεωρείται για τα πλοία της αγοράς άμεσης παράδοσης ίσο με $57,034 \frac{\$}{\text{χρονικό διάστημα}}$ (IAEE, 2016)

Ορισμένα από τα δεδομένα όπως η ζήτηση, ο ελάχιστος προμηθευόμενος όγκος και χαρακτηριστικά των σταθμών για τη μελέτη περίπτωσης Α παρουσιάζονται στη συνέχεια (Πίνακας 3.1). Τα υπόλοιπα δεδομένα της μελέτης περίπτωσης Α παρουσιάζονται στο **Παράρτημα Α** αναλυτικά. Αξίζει να σημειωθεί ότι διατίθεται μία μόνο μακροχρόνια σύμβαση και συνολικά 60 πλοία από την αγορά άμεσης παράδοσης

Πίνακας 3.1: Δεδομένα μελέτης περίπτωσης Α

	Τερματικός σταθμός 1	Τερματικός σταθμός 2	Τερματικός σταθμός 3
Ζήτηση (MMTPA)	12	8	6
Αρχική ποσότητα ΥΦΑ (m ³)	148,000	103,000	74,000
Μέγιστη δυναμικότητα (m ³)	444,000	350,800	300,000
Ελάχιστη δυναμικότητα (m ³)	44,400	35,080	30,000
Αριθμός προβλητών	2	2	2
	Ελάχιστη ποσότητα (m³)		Μέγιστη ποσότητα (m³)
Ποσότητα προμήθειας (m ³)	1,801,125		3,001,875
Υποψήφιοι μεταφορείς	Χωρητικότητα (m³)		P_c (\$/m³)
Disha	136,026		219
Aseem	155,000		219
Prachi	173,323		219
Raahi	136,026		219
Χρόνος μεταφοράς	Τερματικός σταθμός 1	Τερματικός σταθμός 2	Τερματικός σταθμός 3
Διάρκεια (χρονικά διαστήματα)	21	19	17

3.2 Μελέτη περίπτωσης της Ελλάδας

Η δεύτερη μελέτη περίπτωσης επικεντρώνεται στον ελλαδικό χώρο. Ειδικότερα, επιδιώκεται η βελτιστοποίηση του κόστους προμήθειας ΥΦΑ από την αγορά άμεσης παράδοσης και την μακροχρόνια σύμβαση στους τερματικούς σταθμούς της Ρεβυθούσας και της Αλεξανδρούπολης. Η Ελλάδα διαθέτει μια μακροχρόνια σύμβαση και 20 πλοία από την αγορά άμεσης παράδοσης. Ο χρονικός ορίζοντας για αυτό το πρόβλημα είναι ξανά οι 30 ημέρες και πλέον αυτός διακριτοποιείται σε 30 ομοιόμορφα χρονικά διαστήματα, τα οποία έχουν διάρκεια το καθένα μία ημέρα. Οι παραδοχές οι οποίες έγιναν για αυτό το πρόβλημα είναι εν μέρει διαφορετικές από αυτές που έγιναν στο πρώτο πρόβλημα, καθώς για τον σταθμό της Αλεξανδρούπολης τα δεδομένα είναι ιδιαίτερα προσεγγιστικά για λόγους εμπιστευτικότητας μιας και η κατασκευή του τερματικού αυτού σταθμού, προβλέπεται να ολοκληρωθεί τον Ιανουάριο του 2024. Όσες παραδοχές της μελέτης περίπτωσης δεν έχουν τροποποιηθεί συνεχίζουν να ισχύουν και για την περίπτωση της Ελλάδας. Συνοψίζοντας, οι παραδοχές είναι οι εξής:

- ❖ Το κόστος ναύλωσης για τα πλοία της μακροχρόνιας σύμβασης πλέον δεν ενσωματώνεται στην τιμή μεταφοράς του ΥΦΑ, αλλά αποτελεί ξεχωριστό κόστος.
- ❖ Το κόστος ναύλωσης τόσο για τα πλοία της αγοράς άμεσης παράδοσης όσο και για τα πλοία της μακροπρόθεσμης σύμβασης θεωρείται $100,000 \frac{\$}{\text{ημέρα}}$ (FreightWaves, 2021).
- ❖ Θεωρείται ότι υπάρχουν μόνο τρεις τύποι πλοίων χωρητικότητας $70,000 \text{ m}^3$, $140,000 \text{ m}^3$, $170,000 \text{ m}^3$.
- ❖ Η τιμή μεταφοράς ΥΦΑ θεωρείται και για τις δύο αγορές ίση με $206 \frac{\$}{\text{m}^3}$ (www.cmegroup.com, n.d.).
- ❖ Η ζήτηση είναι σταθερή για κάθε χρονικό διάστημα και ίση στους δύο σταθμούς.
- ❖ Ο χρόνος μεταφοράς στην σύμβαση αφορά μόνο την διαδρομή από τον τερματικό σταθμό προς τον προμηθευτή.
- ❖ Ο επιπλέον χρόνος που απαιτεί ένα πλοίο για να ταξιδέψει ως την Αλεξανδρούπολη είναι 1 ημέρα.

Στα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν μετέπειτα έχουν συμβεί όλες οι απαραίτητες μετατροπές των κοστών από δολάρια (\$) στο νόμισμα της Ελλάδας, ευρώ (€). Στη συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένα από τα δεδομένα για αυτό το πρόβλημα (Πίνακας 3.2). Τα υπόλοιπα δεδομένα παρατίθενται στο Παράρτημα Γ.

Πίνακας 3.2: Δεδομένα μελέτης περίπτωσης της Ελλάδας

	Τερματικός σταθμός Αλεξανδρούπολης	Τερματικός σταθμός Ρεβυθούσας
Ζήτηση ($\cdot 10^3 \frac{m^3}{\mu\eta\nu\alpha}$)	745	745
Αρχική ποσότητα ΥΦΑ (m^3)	100,000	50,000
Μέγιστη δυναμικότητα (m^3)	225,000	155,00
Ελάχιστη δυναμικότητα (m^3)	22,500	15,500
Αριθμός προβλητών	2	1
	Ελάχιστη ποσότητα (m^3)	Μέγιστη ποσότητα (m^3)
Ποσότητα προμήθειας ($\cdot 10^3 m^3$)	614.4	921.6
Υποψήφιοι μεταφορείς	Χωρητικότητα(m^3)	P _c (\$/m ³)
Cape-Ann	140,000	206
Lng-Bonny-II	170,000	206
Lalla-Fatmansoumer	140,000	206
Velikiy-Novgorod	170,000	206
Χρόνος μεταφοράς	Τερματικός σταθμός Αλεξανδρούπολης	Τερματικός σταθμός Ρεβυθούσας
Διάρκεια (χρονικά διαστήματα)	5	4

4 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται λεπτομερώς τα αποτελέσματα των μελετών περίπτωσης, όπως επίσης και τα αποτελέσματα των παραμετρικών τους αναλύσεων. Συνολικά, εξετάζονται για τις δύο μελέτες περίπτωσης 37 σενάρια. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται, με κύριο άξονα το κόστος προμήθειας του κάθε σεναρίου, τον προμηθευόμενο όγκο, την αποθηκευμένη ποσότητα ΥΦΑ και άλλες σημαντικές μεταβλητές και παραμέτρους.

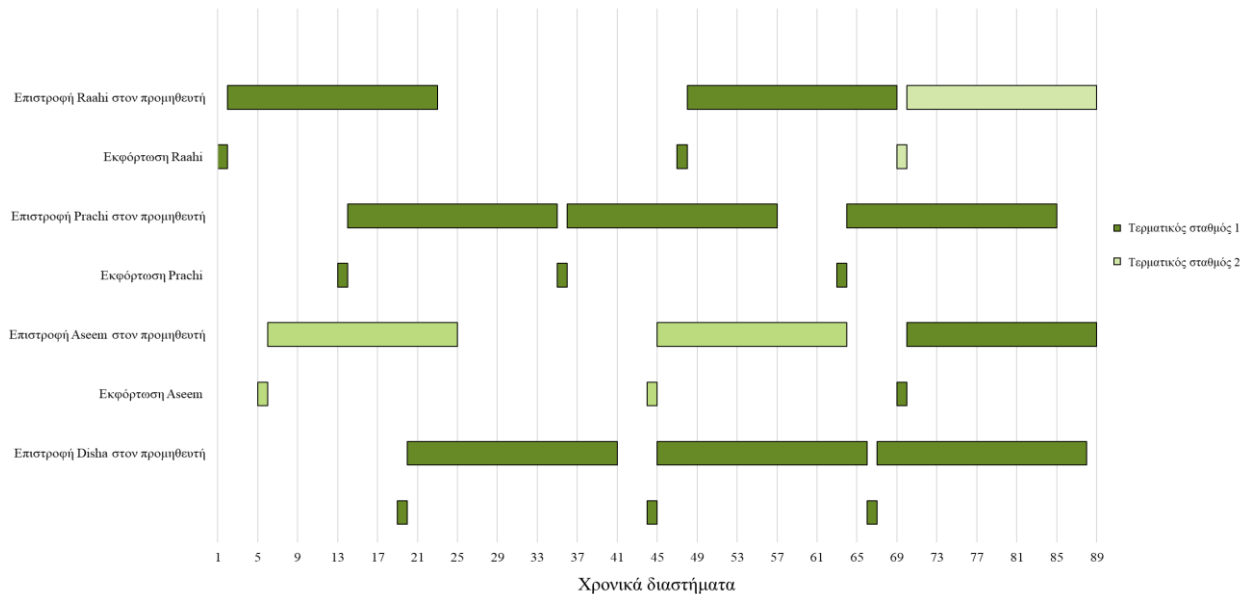
Σε πρώτο στάδιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πρώτης μελέτης περίπτωσης που αφορούν τον μηνιαίο χρονοπρογραμματισμό των πλοίων από την μακροπρόθεσμη σύμβαση και την αγορά άμεσης παράδοσης στους τρεις τερματικούς σταθμούς. Ακόμη, αναπτύσσεται μία παραμετρική ανάλυση 27 σεναρίων, στην οποία συνδυάζονται η διακύμανση της ζήτησης, η ρευστότητα των τιμών ΥΦΑ στις δύο αγορές αλλά και τα όρια του ελάχιστου και μέγιστου προμηθευόμενου όγκου ΥΦΑ από την μακροχρόνια σύμβαση.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα από την μελέτη περίπτωσης της Ελλάδας. Επίσης, μελετώνται 9 σενάρια στα οποία μεταβάλλεται η δυναμικότητα του τερματικού σταθμού της Αλεξανδρούπολης και οι τιμές ΥΦΑ από την αγορά άμεσης παράδοσης. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται και αξιολογούνται με βάση το συνολικό κόστος προμήθειας. Τέλος, εξάγεται μια ανάλυση, στην οποία εξετάζεται η εύρεση της κατάλληλης δυναμικότητας, σε περίπτωση τετραπλασιασμού της ζήτησης στον σταθμό της Αλεξανδρούπολης.

Σαφώς, για την λύση των δύο προβλημάτων και την μελέτη όλων των περιπτώσεων χρησιμοποιείται το λογισμικό βελτιστοποίησης GAMS και ο επιλυτής ILOG CPLEX, καθώς θεωρείται κατάλληλος για την επίλυση μεγάλων προβλημάτων μεικτού αέριου προγραμματισμού. Τέλος, για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων, χρησιμοποιούνται διάφορα γραφήματα όπως τα χρονοδιαγράμματα (Gantt Charts). Με αυτό τον τρόπο καθίσταται ευκολότερη η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και η πιστοποίηση της αξιοπιστίας του μαθηματικού μοντέλου.

4.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται ο μηνιαίος χρονοπρογραμματισμός των πλοίων που υπόκεινται στην μακροχρόνια σύμβαση, σύμφωνα με τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου για την μελέτη περίπτωσης Α στο λογισμικό GAMS.

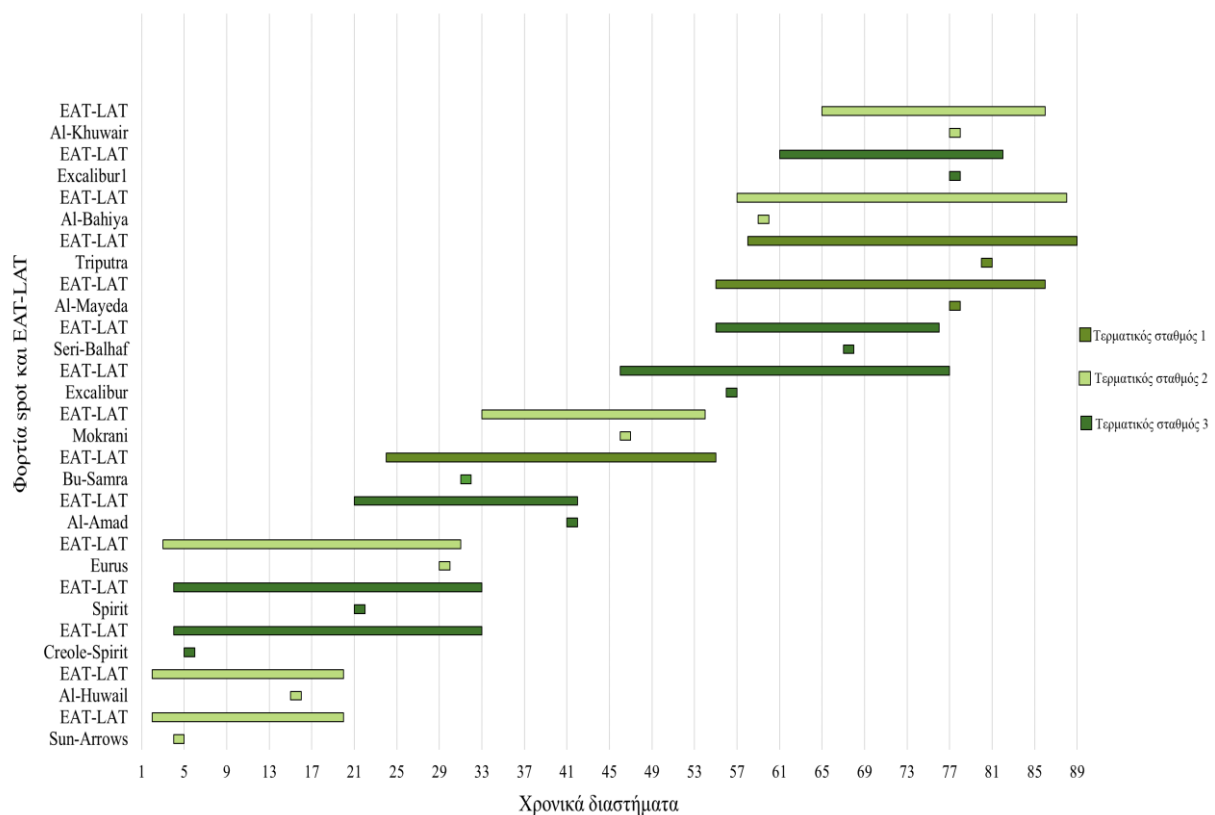


Σχήμα 4.1: Χρονοδιάγραμμα των πλοίων της μακροχρόνιας σύμβασης

Γενικότερα, το χρονοδιάγραμμα (Gantt chart) αποτελεί μια ιδιαίτερα σημαντική απεικόνιση, καθώς μέσω αυτού εξάγονται σημαντικές πληροφορίες. Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά την διάρκεια του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού επιλέγονται και οι τέσσερις υποψήφιοι μεταφορείς ΥΦΑ που υπόκεινται στην μακροχρόνια σύμβαση. Μάλιστα, τα πλοία του συμβολαίου καταφθάνουν μόνο στους τερματικούς σταθμούς 1 και 2, γεγονός το οποίο καταδεικνύει ότι η ζήτηση του τρίτου τερματικού σταθμού ικανοποιείται μόνο από την αγορά άμεσης παράδοσης.

Ειδικότερα, το πλοίο Disha καταφθάνει στον τερματικό σταθμό 1 τρεις φορές κατά την διάρκεια του ορίζοντα όπως και το πλοίο Prachi. Το πλοίο Raahi καταφθάνει δύο φορές στον τερματικό σταθμό 1 και μία στον τερματικό σταθμό 2, ενώ το πλοίο Aseem δύο φορές στον τερματικό σταθμό 2 και μία στον τερματικό σταθμό 1. Επίσης, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι ικανοποιείται ο βασικός χρονικός περιορισμός (2.7), ο οποίος αναφέρει ότι ένα πλοίο μπορεί να εκτελέσει σε ένα χρονικό διάστημα μία διαδρομή, αλλά και ότι εάν ένα πλοίο φθάσει σε έναν τερματικό σταθμό στην αρχή του χρονικού διαστήματος k , η επόμενη φορά κατά την οποία θα μπορέσει να γίνει η άφιξή του στον σταθμό είναι μετά από χρονικό διάστημα ίσο με $Q_c(t)+1$. Δηλαδή, χρόνο ίσο με το χρόνο του ταξιδιού από τον τερματικό σταθμό προς τον προμηθευτή και τον

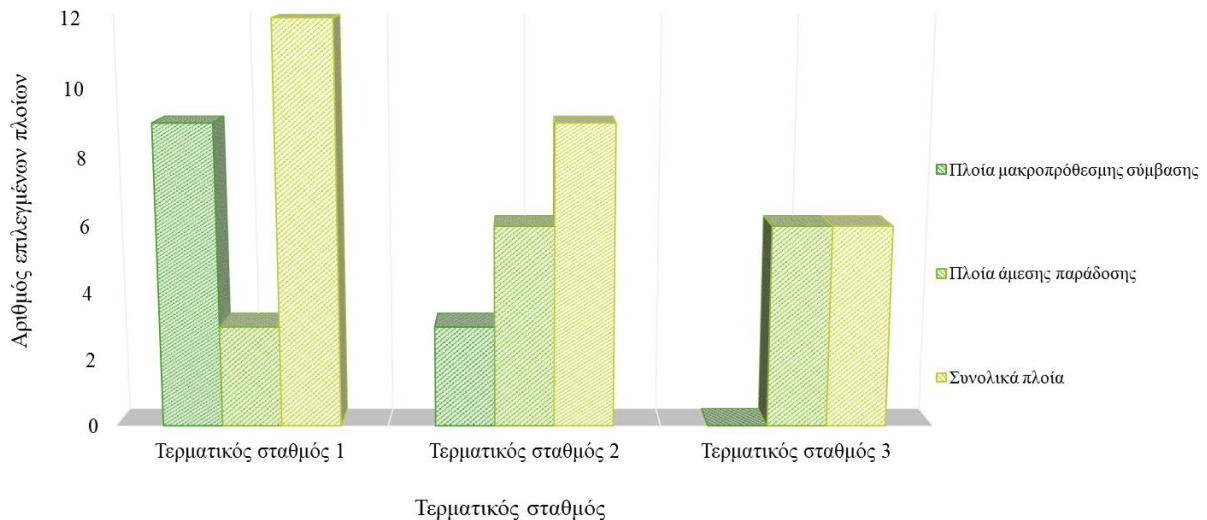
χρόνο του ταξιδιού από τον προμηθευτή προς τον επόμενο τερματικό σταθμό συν τον χρόνο της εκφόρτωσης ΥΦΑ. Επομένως, η δυαδική μεταβλητή x_{ctk} είναι αδύνατον να γίνει ίση με 1 πριν παρέλθει ένα ορθό χρονικό διάστημα. Όπως αναφέρεται (Πίνακας 3.1) στα δεδομένα της μελέτης περίπτωσης για το πλοίο Disha και τον τερματικό σταθμό 1, αυτός ο χρόνος είναι ίσος με είκοσι ένα (21) χρονικά διαστήματα και όπως είναι εμφανές από το Σχήμα 4.1, ο μεταφορέας Disha επιλέγεται κατά τα διαστήματα 19, 44 και 66 που απέχουν μεταξύ τους 22 ή και περισσότερα χρονικά διαστήματα. Το ίδιο ισχύει και για τα υπόλοιπα πλοία και συνεπώς αυτός ο πολύ βασικός και θεμελιώδης χρονικός περιορισμός ικανοποιείται, προσδίδοντας σωστά και έγκυρα αποτελέσματα.



Σχήμα 4.2: Χρονοδιάγραμμα των πλοίων της αγοράς άμεσης παράδοσης

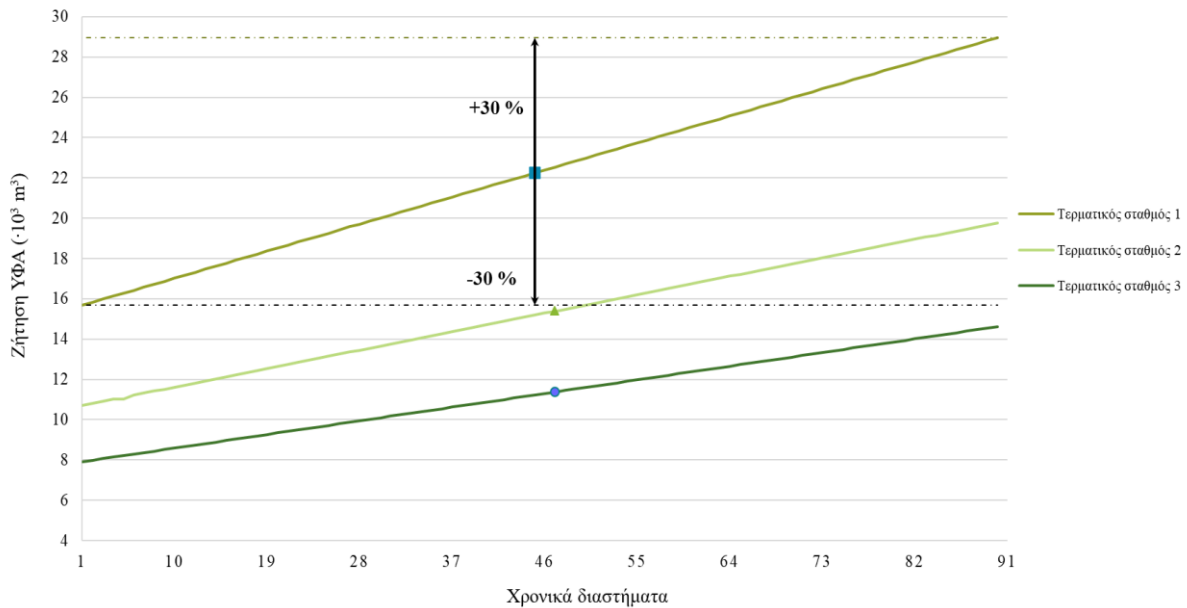
Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται το χρονοδιάγραμμα των πλοίων της αγοράς άμεσης παράδοσης. Γίνεται εύληπτο ότι οι περιορισμοί, οι οποίοι ισχύουν για τα πλοία άμεσης παράδοσης ικανοποιούνται πλήρως. Αρχικά, είναι γνωστό ότι τα πλοία αυτής της αγοράς έχουν ένα χρονικό περιθώριο εντός του οποίου μπορούν να καταφθάσουν σε κάθε τερματικό σταθμό. Επίσης, τα πλοία της αγοράς άμεσης παράδοσης μπορούν να επιλεγθούν το πολύ μια φορά κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα. Όπως είναι εμφανές από το χρονοδιάγραμμα οι προαναφερθέντες περιορισμοί ικανοποιούνται. Ένα παράδειγμα θα μπορούσε να αποτελέσει το πλοίο Sun-Arrows, του οποίου η άφιξη λαμβάνει χώρα στην αρχή του χρονικού διαστήματος 4. Το νωρίτερο χρονικό

διάστημα ($EAT_{s,t}$) που μπορεί να φτάσει το εν λόγω πλοίο στον συγκεκριμένο σταθμό είναι 2 και το αργότερο ($LAT_{s,t}$) είναι 20. Συνεπώς, το χρονικό διάστημα 4 εμπίπτει εντός του χρονικού περιθωρίου και ο περιορισμός επαληθεύεται. Το ίδιο ισχύει και για τα υπόλοιπα πλοία. Από τα εξήντα διαθέσιμα πλοία άμεσης παράδοσης στους τερματικούς σταθμούς καταφθάνουν τα 15. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι μεταφορές ΥΦΑ από τις βραχυπρόθεσμες συμβάσεις καταφθάνουν και στους τρεις τερματικούς σταθμούς, ώστε να ικανοποιηθεί πλήρως η ζήτηση.



Σχήμα 4.3: Αριθμός αδιχθέντων πλοίων από κάθε αγορά σε ένα τερματικό σταθμό

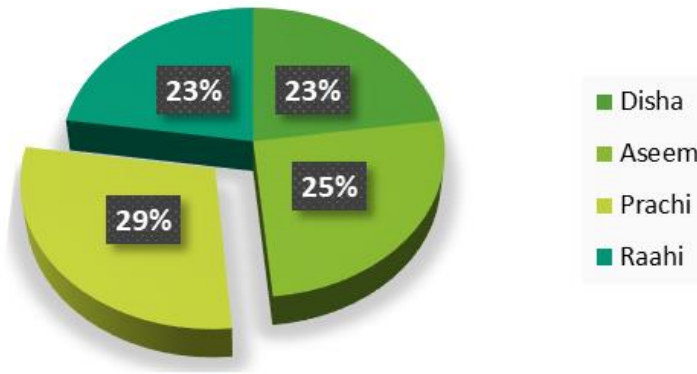
Στο **Σχήμα 4.3** παρουσιάζεται ο αριθμός των πλοίων, τα οποία έχουν καταφθάσει ανά σταθμό είτε από την άμεση αγορά είτε από την μακροπρόθεσμη σύμβαση είτε συνολικά και από τις δύο συμβάσεις. Στον τερματικό σταθμό 1, από τα δώδεκα πλοία τα τρία προέρχονται από την αγορά άμεσης παράδοσης. Τα υπόλοιπα εννέα είναι πλοία από την μακροχρόνια σύμβαση, από τα οποία ορισμένα έχουν επιλεγεί όπως προαναφέρθηκε παραπάνω από μία φορές. Στον τερματικό σταθμό 2 παρατηρείται ότι καταφθάνουν εννέα πλοία από τα οποία τα 3 πλέον προέρχονται από την σύμβαση. Ενώ στον τερματικό σταθμό 3, όπως έχει προαναφερθεί η ζήτηση καλύπτεται εξ ολοκλήρου από την αγορά άμεσης παράδοσης. Συμπερασματικά, παρατηρείται ότι όσο μειώνεται η απόσταση του σταθμού από τον προμηθευτή, τόσο μεγαλύτερη τάση υπάρχει να επιλέγονται πλοία άμεσης παράδοσης. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να αιτιολογηθεί παρατηρώντας το προφίλ της ζήτησης ανά τερματικό σταθμό όπως απεικονίζεται στο **Σχήμα 4.4**.



Σχήμα 4.4: Προφίλ ζήτησης ανά τερματικό σταθμό σε κάθε χρονικό διάστημα

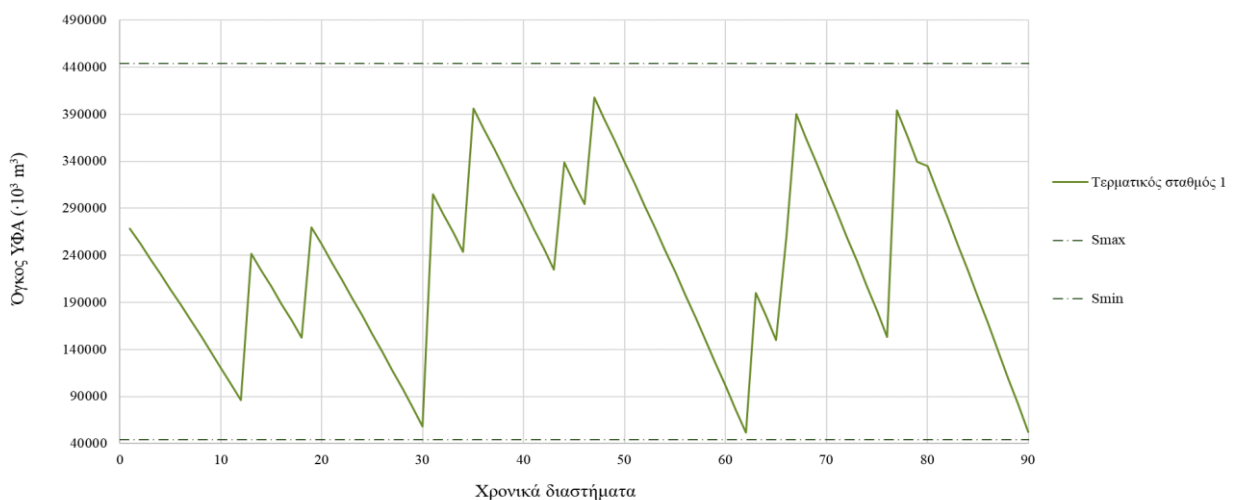
Είναι εμφανές ότι η ζήτηση του τερματικού σταθμού 1 είναι κατά πολύ μεγαλύτερη του σταθμού 3, συγκεκριμένα διπλάσια αλλά και μεγαλύτερη κατά 1.6 φορές του σταθμού 2. Ειδικότερα, κυμαίνεται μεταξύ του -30% και του +30% μιας βασικής τιμής που ορίζεται για κάθε σταθμό και απεικονίζεται με το αντίστοιχο σύμβολο στο διάγραμμα ανάλογα με τον σταθμό στον οποίο αντιστοιχεί. Επί παραδείγματι, έχει δημιουργηθεί αυτή η κλιμάκωση μόνο για τον σταθμό 1. Το ίδιο ισχύει και για τους τερματικούς σταθμούς 2 και 3. Εφόσον, λοιπόν, η ζήτηση του τερματικού σταθμού 1 είναι μεγαλύτερη (όπως και η χωρητικότητα του) θα πρέπει να αφιχθούν περισσότερα πλοία ώστε αυτή να ικανοποιηθεί. Αξίζει να τονιστεί ότι όπως προκύπτει από τα δεδομένα του προβλήματος στο **Παράρτημα Α**, τα πλοία της αγοράς άμεσης παράδοσης απαιτούν πολλά περισσότερα χρονικά διαστήματα για να καταφθάσουν στον σταθμό 1 σε σχέση με τα πλοία της μακροπρόθεσμης σύμβασης. Συνεπώς, αυτό θα δημιουργούσε ένα υψηλό επιπρόσθετο κόστος, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι τα πλοία άμεσης παράδοσης εν συγκρίσει με αυτά της μακροχρόνιας σύμβασης διαθέτουν σε γενικές γραμμές μεγαλύτερη χωρητικότητα. Οπότε, θα δημιουργούνταν κι ένα υψηλό επιπρόσθετο κόστος από την μεταφορά του ΥΦΑ ως αγαθού. Ουσιαστικά, η λύση καθορίζεται από τον τερματικό σταθμό 1, καθώς σε αυτόν πραγματοποιείται η μεγαλύτερη συμφόρηση από πλοία, λόγω της αυξημένης ζήτησης του ΥΦΑ σε αυτόν. Όσον αφορά τον τερματικό σταθμό 2 ο οποίος αποτελεί τον σταθμό με την δεύτερη πιο υψηλή ζήτηση, παρατηρείται ότι επιλέγονται πλοία από την αγορά άμεσης παράδοσης, τα οποία διαθέτουν μεγάλη χωρητικότητα (με εξαίρεση 2) και το συνολικό τους μοναδιαίο κόστος (μεταφοράς ΥΦΑ και ναύλωσης) σε σχέση με αυτό των πλοίων από μακροχρόνιες συμβάσεις είναι μικρότερο. Συνεπώς, κρίνεται συμφέρον να επιλεχθούν περισσότερα πλοία άμεσης παράδοσης. Τέλος, στον τρίτο τερματικό σταθμό καταφθάνουν έξι μόνο πλοία από την αγορά άμεσης παράδοσης, εφόσον είναι και ο σταθμός με την χαμηλότερη ζήτηση. Παράλληλα είναι και ο σταθμός, ο οποίος έχει την μικρότερη απόσταση από τους άλλους δύο όσον αφορά την μακροχρόνια σύμβαση. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι τα πλοία τα οποία επιλέγονται έχουν μεγαλύτερη

χωρητικότητα από αυτή της μακροχρόνιας σύμβασης κι επίσης έχουν αρκετά χαμηλότερη τιμή ΥΦΑ. Συνεπώς, η ζήτηση στον σταθμό 3 προτιμάται να ικανοποιηθεί με λιγότερα πλοία, τα οποία φέρουν μεγαλύτερη χωρητικότητα και χαμηλότερες τιμές, οι οποίες απορρέουν από την αγορά άμεσης παράδοσης.



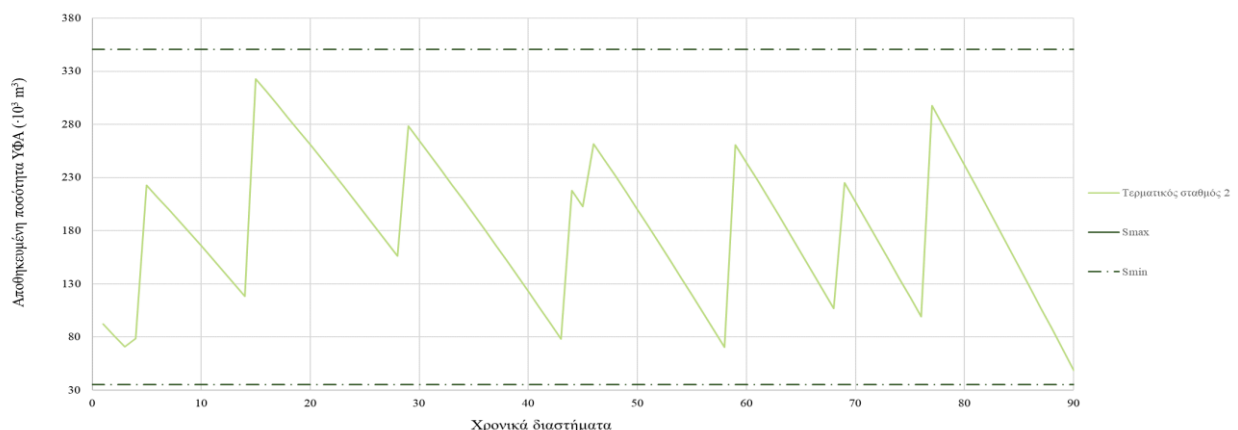
Σχήμα 4.5: Ποσοστά όγκου ΥΦΑ πλοίων της μακροχρόνιας σύμβασης

Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζονται τα ποσοστά του όγκου ΥΦΑ τα οποία παραδίδει κάθε πλοίο κατά την διάρκεια του χρονικού ορίζοντα. Είναι εμφανές, ότι τα πλοία Prachi και Aseem χαρακτηρίζονται από τα μεγαλύτερα ποσοστά, καθώς οι εν λόγω μεταφορείς διαθέτουν και τις πιο μεγάλες χωρητικότητες, κι έχουν αφιχθεί ίσες φορές στους τερματικούς σταθμούς. Επίσης, τα πλοία Disha και Raahi συνεισφέρουν το ίδιο ποσοστό, διότι έχουν και την ίδια χωρητικότητα και έχουν αφιχθεί επίσης ίσες φορές στους τερματικούς σταθμούς. Μια ακόμη σημαντική μεταβλητή, η οποία πρέπει να ληφθεί υπόψη για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων είναι αυτή της αποθηκευμένης ποσότητας.



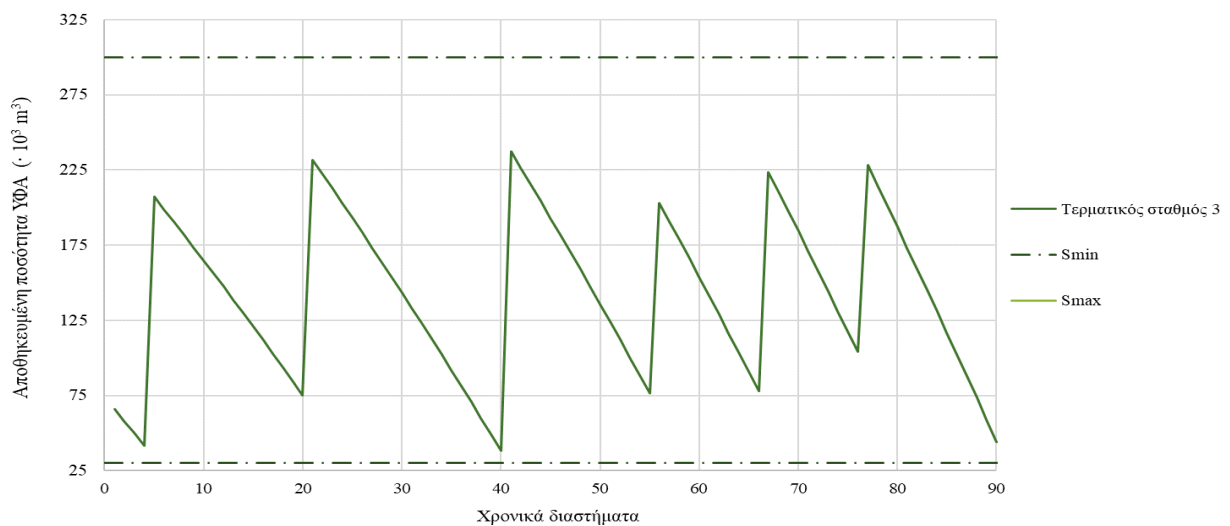
Σχήμα 4.6: Αποθηκευμένη ποσότητα ΥΦΑ στον τερματικό σταθμό 1 κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα

Στο **Σχήμα 4.6** παρατηρείται αρχικά ότι επαληθεύονται οι περιορισμοί που αφορούν στην αποθηκευτική δυναμικότητα. Δηλαδή, η αποθηκευμένη ποσότητα ΥΦΑ βρίσκεται εντός των θεμιτών ορίων που έχουν τεθεί για τον τερματικό σταθμό 1. Ακόμη, παρατηρείται ότι υπάρχουν έντονες αυξομειώσεις στην ποσότητα αυτή, αφού στο ισοζύγιο μάζας συμπεριλαμβάνονται διάφοροι όροι, όπως έχει ήδη αναλυθεί. Οι κορυφές σηματοδοτούν την άφιξη ενός ή δύο πλοίων στο σταθμό, διότι από το ισοζύγιο μάζας ΥΦΑ η μόνη προστιθέμενη ποσότητα είναι αυτή του/ων όγκου/ων του/ων αφιχθέντος/ων στον σταθμό πλοίου/ων. Επί παραδείγματι, στο διάστημα 30 η ποσότητα του ΥΦΑ παρουσιάζει πτώση καθώς σε αυτό το χρονικό διάστημα δεν καταφθάνει κανένα πλοίο ούτε από την αγορά άμεσης παράδοσης ούτε από την μακροχρόνια σύμβαση. Συνεπώς, ο τερματικός σταθμός προμηθεύει με ΥΦΑ από το ήδη υπάρχον όπως ισχύει και για το διάστημα 62. Ειδικότερα, παρατηρείται μετά το διάστημα 80 μια συνεχόμενη πτώση της αποθηκευμένης ποσότητας, η οποία οφείλεται στην απουσία άφιξης πλοίου/ων και από τις δύο αγορές. Δηλαδή, ο τερματικός σταθμός έχει λάβει όλη την απαραίτητη ποσότητα που θα έπρεπε από τα προηγούμενα χρονικά διαστήματα και από το διάστημα 80 έως και το 90 προμηθεύει με ΥΦΑ τον αγοραστή από τα αποθέματά του. Προφανώς, έχουν ληφθεί υπόψη όλοι οι περιορισμοί με σκοπό η αποθηκευμένη ποσότητα να διατηρηθεί στα επιθυμητά επίπεδα. Μάλιστα, η άφιξη των μεταφορέων της μακροχρόνιας σύμβασης έχει διακοπεί από το χρονικό διάστημα 67, όπου και καταφθάνει το τελευταίο πλοίο όπως επιβεβαιώνεται και από το **Σχήμα 4.1**. Διαφορετικά, εάν οι μεταφορείς εισέπλεαν στον τερματικό σταθμό μετά από 22 χρονικά διαστήματα (που είναι και ο χρόνος ταξιδιού από και προς τον προμηθευτή μαζί με τον χρόνο της εκφόρτωσης στον σταθμό), δηλαδή στην αρχή του διαστήματος 89, τότε η επιστροφή του πλοίου θα ενέπιπτε εκτός του χρονικού ορίζοντα. Τέλος, κατά τα χρονικά διαστήματα 77 και 80 λαμβάνει χώρα η άφιξη των πλοίων από την αγορά άμεσης παράδοσης, ώστε να ικανοποιηθεί πλήρως η ζήτηση σε αυτόν τον σταθμό.



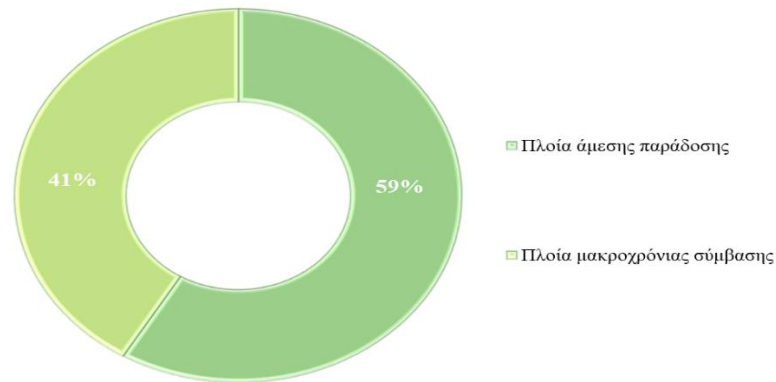
Σχήμα 4.7: Αποθηκευμένη ποσότητα ΥΦΑ στον τερματικό σταθμό 2 κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα

Είναι εμφανές ότι για τον τερματικό σταθμό 2 η αποθηκευμένη ποσότητα εμπίπτει μέσα στα επιτρεπτά όρια που ορίζουν τα χαρακτηριστικά του σταθμού (διακεκομμένες γραμμές). Από το διάστημα 77 και έπειτα παρατηρείται μείωση της αποθηκευμένης ποσότητας καθώς κανένα άλλο πλοίο δεν καταφθάνει στον σταθμό από το διάστημα αυτό κι έπειτα. Το τελευταίο πλοίο από την μακροχρόνια σύμβαση καταφθάνει στην αρχή του διαστήματος 69, όπως φαίνεται και από το **Σχήμα 4.7**, το οποίο είναι το τελευταίο χρονικό διάστημα που θα μπορούσε να αφιχθεί στον σταθμό, διότι ο χρόνος εκφόρτωσης και πλεύσης από και προς τον προμηθευτή είναι ίσος με είκοσι χρονικά διαστήματα και συνεπώς εμπίπτει εντός του χρονικού ορίζοντα. Επομένως, η άνοδος της αποθηκευμένης ποσότητας σηματοδοτεί την άφιξη ενός πλοίου από την αγορά άμεσης παράδοσης, όπως καταδεικνύει και το **Σχήμα 4.2**.



Σχήμα 4.8: Αποθηκευμένη ποσότητα ΥΦΑ στον τερματικό σταθμό 3 κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα

Τέλος, το προφίλ της αποθηκευμένης ποσότητας στον τερματικό σταθμό 3 επιβεβαιώνει ότι και σε αυτόν τον σταθμό ικανοποιούνται οι περιορισμοί για τα όρια της ποσότητας ΥΦΑ. Από το διάστημα 77 και μέχρι το τέλος του χρονικού ορίζοντα παρατηρείται μείωση της αποθηκευμένης ποσότητας, καθώς κανένα πλοίο από την αγορά άμεσης παράδοσης δεν καταφθάνει στον τερματικό σταθμό. Ο σταθμός τροφοδοτεί με το αποθεματικό ΥΦΑ των προηγούμενων διαστημάτων τον καταναλωτή. Τέλος, ο αριθμός των προβλητών στο τέλος του κάθε χρονικού διαστήματος παραμένει ίσος με δύο, επαληθεύοντας το ισοζύγιο αλλά και το ανώτατο όριο, που ορίζουν τα δομικά χαρακτηριστικά των σταθμών. Τα ίδια ακριβώς ισχύουν και για τους σταθμούς 1 και 3.



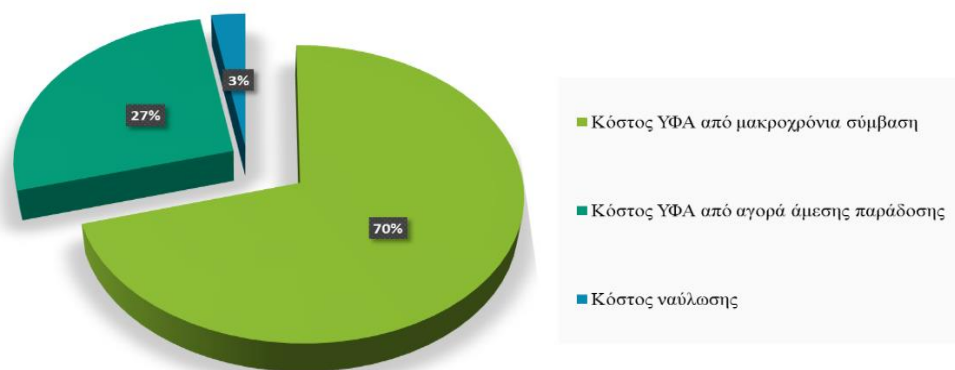
Σχήμα 4.9: Ποσοστά όγκων ΥΦΑ από τις δύο αγορές

Στο **Σχήμα 4.9** παρουσιάζονται το ποσοστό του όγκου που προέρχεται από τα πλοία των μακροχρόνιων συμβάσεων (41%) και το ποσοστό του όγκου που προέρχεται από τα πλοία της αγοράς άμεσης παράδοσης (59%). Τα ποσοστά αυτά είναι σύμφωνα με την θεωρία, καθώς ο όγκος των συμβάσεων κυμαίνεται στο 40-65% της συνολικής ζήτησης. Συνολικά, 1.8 εκ. m³ ΥΦΑ προμηθεύονται από την σύμβαση και 2.5 εκ. m³ από την άμεση αγορά. Συμπερασματικά, είναι περισσότερο προτιμητέα η άμεση αγορά λόγω της ευελιξίας που προσφέρει.

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα μελέτης περίπτωσης Α για τον τερματικό σταθμό 1

Τερματικός σταθμός 1					
Όνομα πλοίου	Τύπος πλοίου	Διάστημα	Όγκος (m ³)	Κόστος ΥΦΑ (\$)	Κόστος ναύλωσης (\$)
Disha	Μ.Σ.	19	136,036	27,705,775	2,083,918
Disha	Μ.Σ.	44	136,036	27,705,775	2,083,918
Disha	Μ.Σ.	66	136,036	27,705,775	2,083,918
Aseem	Μ.Σ.	5	155,000	31,570,400	2,374,600
Prachi	Μ.Σ.	13	173,323	35,302,428	2,655,308
Prachi	Μ.Σ.	35	173,323	35,302,428	2,655,308
Prachi	Μ.Σ.	63	173,323	35,302,428	2,655,308
Raahi	Μ.Σ.	1	136,026	27,705,775	2,083,918
Raahi	Μ.Σ.	47	136,026	27,705,775	2,083,918
Bu-Samra	Α.Α.Π.	31	267,335	54,605,847	3,764,244
Al-Mayeda	Α.Α.Π.	77	267,335	52,806,682	3,422,040
Triputra	Α.Α.Π.	80	23,096	4,717,588	4,106,448

Ο Πίνακας 4.1 περιέχει όλα τα στοιχεία που αφορούν τον τερματικό σταθμό 1. Συνοπτικά, στον τερματικό σταθμό 1 πραγματοποιούνται δώδεκα δρομολόγια εντός του χρονικού ορίζοντα, για τα οποία αναγράφονται αναλυτικά ο μεταφορέας που πραγματοποίησε την διαδρομή, η αγορά από την οποία προέρχεται, το χρονικό διάστημα άφιξης στον σταθμό, η χωρητικότητα του και τα κόστη της ναύλωσης και της μεταφοράς του ΥΦΑ σε δολάρια. Το κόστος για την μεταφορά του ΥΦΑ επηρεάζεται εκτός από τον όγκο κι από την τιμή μεταφοράς, η οποία εξαρτάται σε ποια αγορά υπόκεινται το κάθε πλοίο.



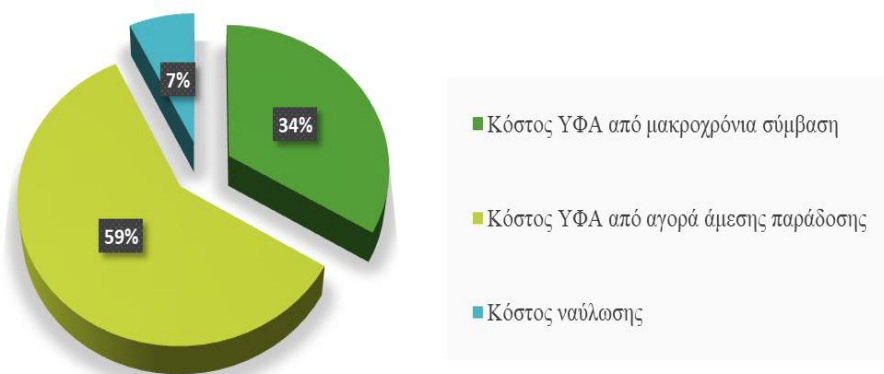
Σχήμα 4.10: Καταμερισμός του συνολικού κόστους στον τερματικό σταθμό 1

Στο Σχήμα 4.10 απεικονίζεται ο καταμερισμός του κόστους προμήθειας του πρώτου τερματικού σταθμού. Είναι εμφανές ότι το μεγαλύτερο μέρος του κόστους οφείλεται στο κόστος μεταφοράς του ΥΦΑ (97%), καθώς το κόστος ναύλωσης αποτελεί ένα πολύ μικρό ποσοστό. Εξάλλου, το κόστος ναύλωσης είναι στις περισσότερες περιπτώσεις πλοίων υποδεκαπλάσιο του κόστους μεταφοράς ΥΦΑ (Πίνακας 4.1). Όσον αφορά στα κόστη ΥΦΑ από τις δύο αγορές, μεγαλύτερη συνεισφορά στο κόστος προμήθειας έχει το κόστος ΥΦΑ από τις μακροχρόνιες συμβάσεις, αφού οι περισσότερες εκφορτώσεις στον σταθμό αυτό έχουν πραγματοποιηθεί από πλοία της σύμβασης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα το κόστος προμήθειας που οφείλεται στον τερματικό σταθμό 1 είναι 420,189,531 \$.

Ο Πίνακας 4.2 περιέχει τα αποτελέσματα για τον τερματικό σταθμό 2:

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα μελέτης περίπτωσης Α για τον τερματικό σταθμό 2

Τερματικός σταθμός 2					
Όνομα πλοίου	Τύπος πλοίου	Διάστημα	Όγκος (m ³)	Κόστος ΥΦΑ (\$)	Κόστος ναύλωσης (\$)
Aseem	Μ.Σ.	44	155,000	31,570,400	2,374,600
Aseem	Μ.Σ.	67	155,000	31,570,400	2,374,600
Raahi	Μ.Σ.	69	136,026	27,705,775	2,083,918
Sun-Arrows	Α.Α.Π.	4	19,100	3,988,462	3,356,108
Al-Huwaila	Α.Α.Π.	15	217,000	21,928,432	2,851,700
Eurus	Α.Α.Π.	29	136,019	26,344,159	2,851,700
Mokrani	Α.Α.Π.	46	74,365	15,564,594	4,562,720
Al-Bahiya	Α.Α.Π.	59	207,111	41,059,755	4,220,516
Al-Khuwair	Α.Α.Π.	77	217,000	42,603,610	2,851,700



Σχήμα 4.11: Καταμερισμός του συνολικού κόστους στον Τερματικό σταθμό 2

Στον τερματικό σταθμό 2 σύμφωνα με το Σχήμα 4.11 το μεγαλύτερο κόστος ΥΦΑ οφείλεται στα πλοία της αγοράς άμεσης παράδοσης. Το κόστος προμήθειας για τον τερματικό σταθμό 2 είναι 289,830,800 \$ και είναι σχεδόν υποδιπλάσιο του συνολικού κόστους του τερματικού σταθμού 1. Το ποσοστό συνεισφοράς του κόστους ναύλωσης για τον δεύτερο τερματικό σταθμό είναι μεγαλύτερο από αυτό του πρώτου, παρόλο που για τον σταθμό 2 τα πλοία της μακροχρόνιας σύμβασης χρειάζονται λιγότερα χρονικά διαστήματα. Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η ζήτηση

στον σταθμό 2 ικανοποιείται με περισσότερα πλοία της αγοράς άμεσης παράδοσης, τα οποία χρειάζονται περισσότερα χρονικά διαστήματα ώστε να αφιχθούν στο σταθμό.

Ο Πίνακας 4.3 περιέχει τα αποτελέσματα για τον τερματικό σταθμό 3:

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα μελέτης περίπτωσης Α για τον τερματικό σταθμό 3

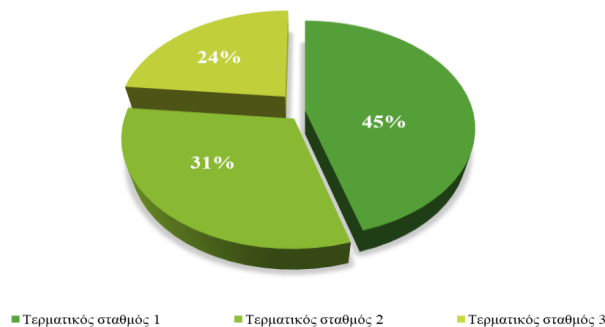
Τερματικός σταθμός 3					
Όνομα πλοίου	Τύπος πλοίου	Διάστημα	Όγκος (m ³)	Κόστος ΥΦΑ (\$)	Κόστος ναύλωσης (\$)
Creole-Spirit	Α.Α.Π.	5	173,545	33,403,941	2,965,768
Spirit	Α.Α.Π.	21	166,130	35,129,849	4,334,584
Al-Amad	Α.Α.Π.	41	210,100	42,106,141	3,650,176
Excalibur	Α.Α.Π.	56	138,200	29,157,436	2,623,564
Seri-Balhaf	Α.Α.Π.	67	158,149	30,858,032	2,623,564
Excalibur1	Α.Α.Π.	77	138,034	26,999,450	2,965,768



Σχήμα 4.12: Καταμερισμός του συνολικού κόστους στον Τερματικό σταθμό 3

Στον τερματικό σταθμό 3 το μεγαλύτερο ποσοστό του κόστους οφείλεται εξ ολοκλήρου στο κόστος μεταφοράς ΥΦΑ από πλοία της άμεσης αγοράς. Επίσης, παρατηρείται ότι σε σχέση με τους άλλους δύο σταθμούς ο τερματικός σταθμός 3 έχει μεγαλύτερο ποσοστό που αφορά στο κόστος ναύλωσης. Αυτό συμβαίνει γιατί τα πλοία της αγοράς άμεσης παράδοσης χρειάζονται περισσότερα χρονικά διαστήματα ώστε να καταφθάσουν στον σταθμό, καθώς διαθέτουν μεγαλύτερη χωρητικότητα, η οποία συνδέεται άμεσα με την ευκινησία του πλοίου. Ακόμη, τα πλοία της άμεσης παράδοσης μπορούν να βρίσκονται σε οποιαδήποτε αφετηρία κι επομένως

χρειάζονται περισσότερο χρόνο ώστε να φτάσουν στον τερματικό σταθμό. Τέλος, το κόστος προμήθειας για τον τερματικό σταθμό 3 είναι 216,818,275 \$.



Σχήμα 4.13 : Καταμερισμός του συνολικού κόστους για όλους τους τερματικούς σταθμούς

Συνολικά, απεικονίζονται στο **Σχήμα 4.13** τα ποσοστά του κόστους προμήθειας ανά τερματικό σταθμό. Το ελάχιστο συνολικό κόστος προμήθειας από την αγορά άμεσης παράδοσης και την αγορά της μακροχρόνιας σύμβασης είναι 926,838,607 \$. Το ποσοστό συνεισφοράς του τερματικού σταθμού 1 είναι 45% και συνεπώς σχεδόν το μισό κόστος προμήθειας οφείλεται σε αυτόν τον σταθμό. Ακολουθώντας, συνεισφέρουν σε μικρότερο ποσοστό οι σταθμοί 2 (31%) και 3 (24%). Το κόστος σχετίζεται άμεσα με την ζήτηση που πρέπει να ικανοποιηθεί στον εκάστοτε σταθμό. Μεγαλύτερη ζήτηση συνδέεται με άφιξη περισσότερων πλοίων κι άρα υψηλότερο κόστος. Τέλος, είναι εμφανές ότι οι αποφάσεις άφιξης των πλοίων από τις δύο αγορές αντικατοπτρίζονται πλήρως μέσω της ανάλυσης των οικονομικών στοιχείων του βιβλιογραφικού παραδείγματος.

4.2 Παραμετρική ανάλυση προβλήματος A

Στο αρχικό πρόβλημα ορισμένες από τις παραμέτρους θεωρήθηκαν σταθερές. Σε πραγματική βάση όμως υπάρχουν διάφορες αβεβαιότητες στην αγορά του ΥΦΑ, οι οποίες μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά τις σχετικές επιδόσεις και το υπολογιστικό κόστος του προβλήματος. Για αυτό, λοιπόν, πραγματοποιήθηκε μια παραμετρική ανάλυση βασισμένη στην αβεβαιότητα τριών σημαντικών παραμέτρων:

- Της μηνιαίας ζήτησης στους τερματικούς σταθμούς
- Του υποχρεωτικού προμηθευόμενου όγκου προμήθειας ΥΦΑ από τις μακροχρόνιες συμβάσεις
- Των τιμών ΥΦΑ της αγοράς άμεσης παράδοσης

Η ζήτηση διαμορφώνεται ως εξής:

- Χαμηλή, δηλαδή η ζήτηση μειώνεται στο 50% της αρχικής
- Μέση, δηλαδή η ζήτηση είναι στο 70% της αρχικής
- Υψηλή, δηλαδή η ζήτηση είναι ίση με την αρχική

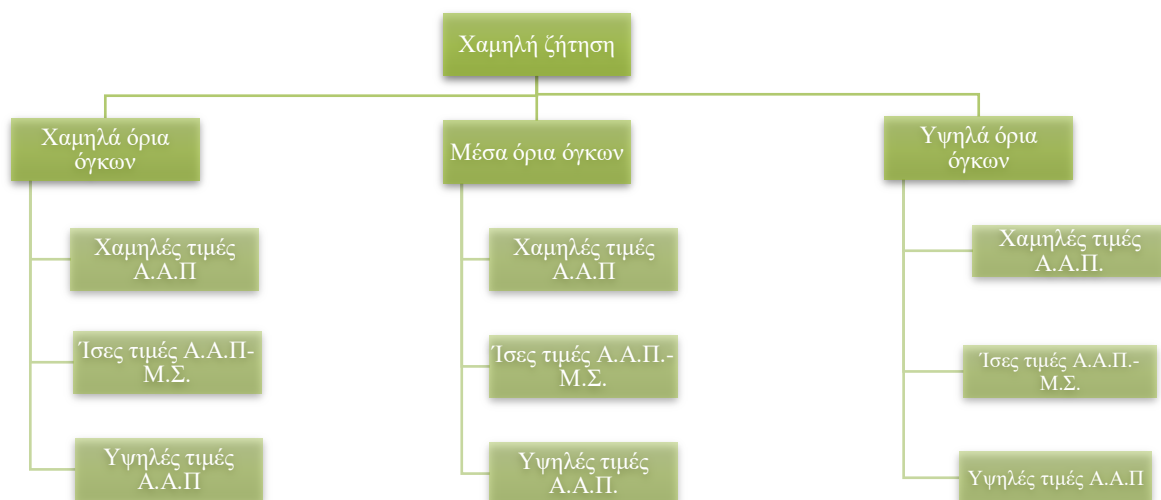
Τα όρια του όγκου τα οποία μπορεί ο αγοραστής να προμηθευτεί από την μακροπρόθεσμη σύμβαση διαμορφώνονται ως εξής:

- Χαμηλά, δηλαδή στο 11.5 % των αρχικών όγκων
- Μεσαία, δηλαδή στο 37% των αρχικών όγκων
- Υψηλά, δηλαδή στο 62% των αρχικών όγκων

Τέλος, οι τιμές της μεταφοράς του ΥΦΑ από την αγορά άμεσης παράδοσης και την μακροπρόθεσμη σύμβαση διαμορφώνονται ως εξής:

- Φθηνότερες τιμές της αγοράς άμεσης παράδοσης (Α.Α.Π.) ($120 \frac{\$}{m^3}$ έως $140 \frac{\$}{m^3}$) σε αντίθεση με τις κανονικές τιμές από την μακροχρόνια σύμβαση (Μ.Σ) ($219 \frac{\$}{m^3}$)
- Ίσες τιμές και για τις δύο αγορές ($219 \frac{\$}{m^3}$)
- Ακριβότερες τιμές της αγοράς άμεσης παράδοσης ($240 \frac{\$}{m^3}$ έως $264 \frac{\$}{m^3}$) σε αντίθεση με φθηνότερες τιμές από την μακροχρόνια σύμβαση ($192 \frac{\$}{m^3}$)

Επομένως, δημιουργούνται για κάθε περίπτωση της ζήτησης εννέα σενάρια όπως υποδεικνύεται και στο **Σχήμα 4.14** κι άρα συνολικά τα σενάρια είναι 27.



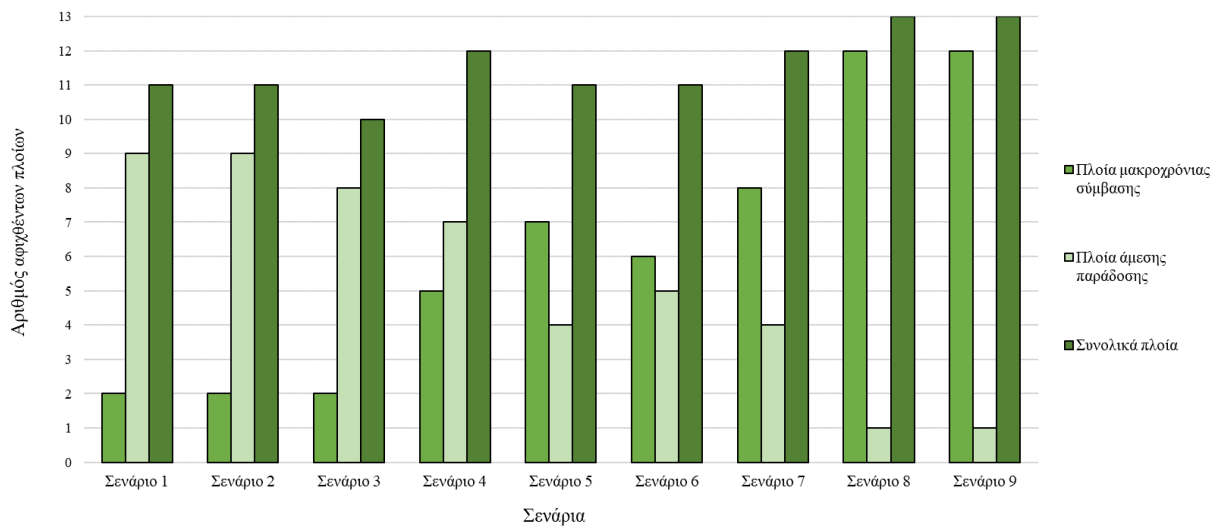
Σχήμα 4.14: Υποπεριπτώσεις σεναρίων χαμηλής ζήτησης

Ο **Πίνακας 4.4** περιέχει τα αποτελέσματα για τα εννέα σενάρια στα οποία η ζήτηση έχει μειωθεί στο 50% της αρχικής. Συγκεκριμένα, συμπεριλαμβάνονται ο συνολικός όγκος ΥΦΑ ($V_{\text{συν.}}, m^3$),

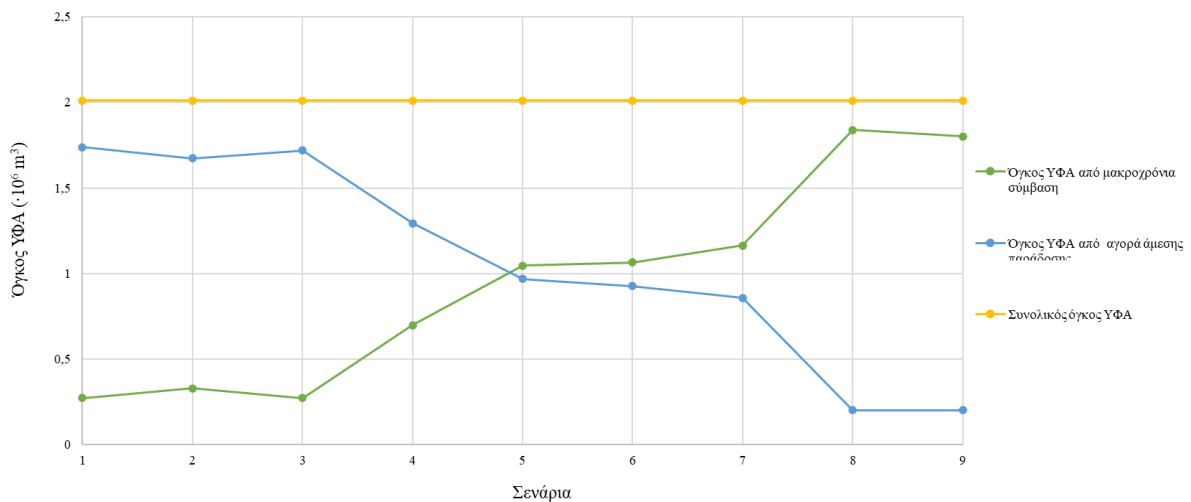
ο όγκος ΥΦΑ από την αγορά άμεσης παράδοσης (SpV, m^3), ο όγκος ΥΦΑ από την μακροχρόνια σύμβαση (LtV, m^3), το κόστος προμήθειας ($PC, \$$), το κόστος μεταφοράς ΥΦΑ ($LC, \$$) και το κόστος ναύλωσης ($LC, \$$). Όλα τα προαναφερθέντα μεγέθη αναγράφονται σε εκατομμύρια.

Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα σεναρίων με χαμηλή ζήτηση

Σενάρια	Φθηνές τιμές spot	Ίσες τιμές	Ακριβές τιμές Α.Α.Π.
Χαμηλά όρια όγκων της μακροχρόνιας σύμβασης	$V_{\text{συν.}}=2$	$V_{\text{συν.}}=2$	$V_{\text{συν.}}=2$
	$LtV=0.3$	$LtV=0.3$	$LtV=0.3$
	$SpV=1.7$	$SpV=1.7$	$SpV=1.7$
	$LC=280$	$LC=438$	$LC=478$
	$TC=29$	$TC=30$	$TC=27$
	$PC=309$	$PC=468$	$PC=506$
Μέσα όρια όγκων της μακροχρόνιας σύμβασης	$V_{\text{συν.}}= 2$	$V_{\text{συν.}}= 2$	$V_{\text{συν.}}= 2$
	$LtV= 0.7$	$LtV= 1,05$	$LtV= 1,1$
	$SpV= 1.3$	$SpV= 968,335$	$SpV= 0.9$
	$LC= 317$	$LC= 441$	$LC= 433$
	$TC=23$	$TC=11$	$TC=15$
	$PC=340$	$PC=452$	$PC=448$
Υψηλά όρια όγκων της μακροχρόνιας σύμβασης	$V_{\text{συν.}}= 2.1$	$V_{\text{συν.}}= 2$	$V_{\text{συν.}}= 2$
	$LtV= 1.3$	$LtV= 1.8$	$LtV= 1.8$
	$SpV= 0.8$	$SpV= 0.2$	$SpV= 0.2$
	$LC= 375$	$LC= 446$	$LC= 345$
	$TC=13$	$TC=3.4$	$TC=52$
	$PC=368$	$PC=449.4$	$PC=397$



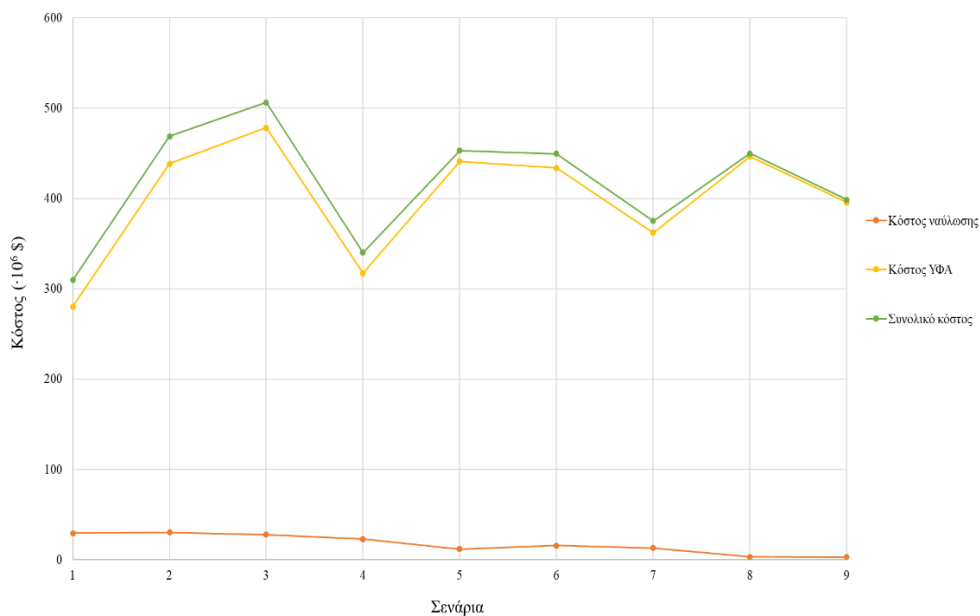
Σχήμα 4.15: Αριθμός αφιχθέντων πλοίων ανά σενάριο χαμηλής ζήτησης



Σχήμα 4.16: Όγκοι ΥΦΑ ανά σενάριο χαμηλής ζήτησης

Στο Σχήμα 4.15 παρουσιάζεται ο αριθμός των αφιχθέντων πλοίων από κάθε αγορά σε κάθε σενάριο με χαμηλή ζήτηση. Γενικότερα, στα τρία πρώτα σενάρια όπου τα όρια των όγκων από την μακροχρόνια σύμβαση είναι χαμηλά (στο 11.5% των αρχικών ορίων), ανεξαρτήτως της διαφοράς των τιμών του ΥΦΑ από τις δυο αγορές, ο αριθμός των πλοίων που επιλέγονται από την μακροχρόνια σύμβαση και στα τρία σενάρια είναι ίσος με 2. Καθώς αυξάνεται η τιμή της αγοράς άμεσης παράδοσης, ειδικά στο τρίτο σενάριο, παρατηρείται ότι επιλέγονται λιγότερα πλοία από αυτήν, προκειμένου να ικανοποιηθεί η ζήτηση. Λαμβάνοντας υπόψη και το Σχήμα 4.16 στο οποίο απεικονίζεται ο όγκος ΥΦΑ από τις δύο αγορές αλλά και ο συνολικός, διακρίνεται μια αύξηση στον όγκο προμήθειας του ΥΦΑ από την αγορά άμεσης παράδοσης, γεγονός που σημαίνει ότι είναι περισσότερο προτιμητέα η επιλογή λιγότερων πλοίων με μεγαλύτερη χωρητικότητα. Στα σενάρια 4 έως 6 στα οποία πλέον τα όρια των όγκων από την μακροχρόνια

σύμβαση είναι πλέον στο 37% των αρχικών ορίων, παρατηρείται ότι αυξάνεται ο αριθμός των πλοίων της μακροχρόνιας σύμβασης και μειώνονται τα πλοία της άμεσης αγοράς που προμηθεύουν με ΥΦΑ τους τερματικούς σταθμούς. Επίσης αυτό είναι εμφανές και από το **Σχήμα 4.16** στο οποίο παρατηρείται αύξηση του προμηθευόμενου όγκου από την μακροχρόνια σύμβαση σε σχέση με τα σενάρια 1 έως 3. Επιπρόσθετα, παρατηρείται ότι στο σενάριο 4 τα πλοία της άμεσης αγοράς είναι περισσότερο προτιμητέα λόγω της χαμηλής τιμής τους αλλά στο σενάριο 5 που οι τιμές είναι ίσες, περισσότερο επιλέξιμα είναι τα πλοία της μακροπρόθεσμης σύμβασης, καθώς η αμέσως επόμενη παράμετρος που έχει καθοριστικό ρόλο είναι το κόστος ναύλωσης, το οποίο είναι λιγότερο για αυτού του είδους τα πλοία. Συγκρίνοντας, τα σενάρια συνολικά προκύπτει το συμπέρασμα ότι όσο αυξάνονται τα όρια των όγκων από την μακροχρόνια σύμβαση τόσο ελαττώνεται το ποσοστό των πλοίων από την αγορά άμεσης παράδοσης, καθώς οι μακροχρόνιες συμβάσεις επιτάσσουν την προμήθεια ενός ελάχιστου όγκου ΥΦΑ.



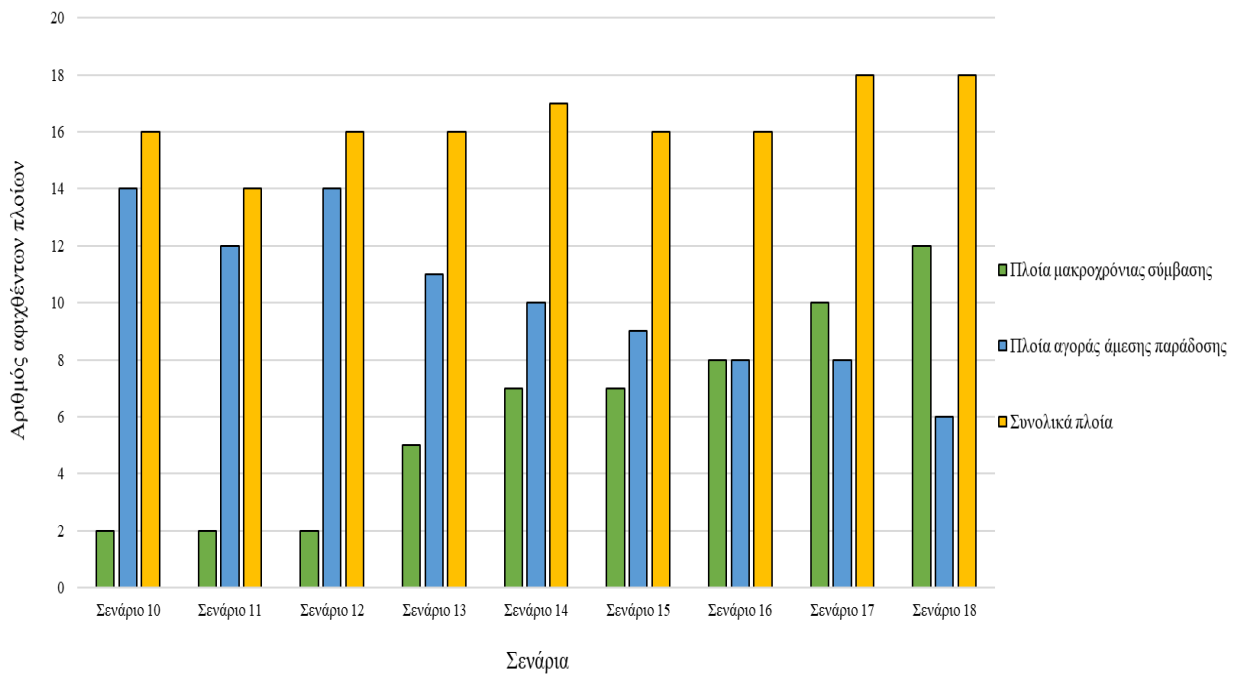
Σχήμα 4.17: Συνολικό κόστος, κόστος ναύλωσης και κόστος ΥΦΑ συναρτήσει σεναρίων χαμηλής ζήτησης

Στο **Σχήμα 4.17** παρουσιάζονται τα συνολικά κόστη, τα κόστη ναύλωσης και μεταφοράς ΥΦΑ ανά σενάριο. Παρατηρείται ότι το κόστος ναύλωσης είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με το κόστος μεταφοράς ΥΦΑ το οποίο αποτελεί και το μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού κόστους προμήθειας. Αξίζει να σημειωθεί ότι για τα τρία πρώτα σενάρια όπου τα όρια των όγκων για την σύμβαση είναι χαμηλά και καθώς η τιμή της άμεσης αγοράς αυξάνεται παρατηρείται αύξηση του κόστους προμήθειας αλλά και του κόστους μεταφοράς ΥΦΑ και μείωση του κόστους ναύλωσης. Αυτή η αύξηση οφείλεται προφανώς στην αύξηση των τιμών της αγοράς άμεσης

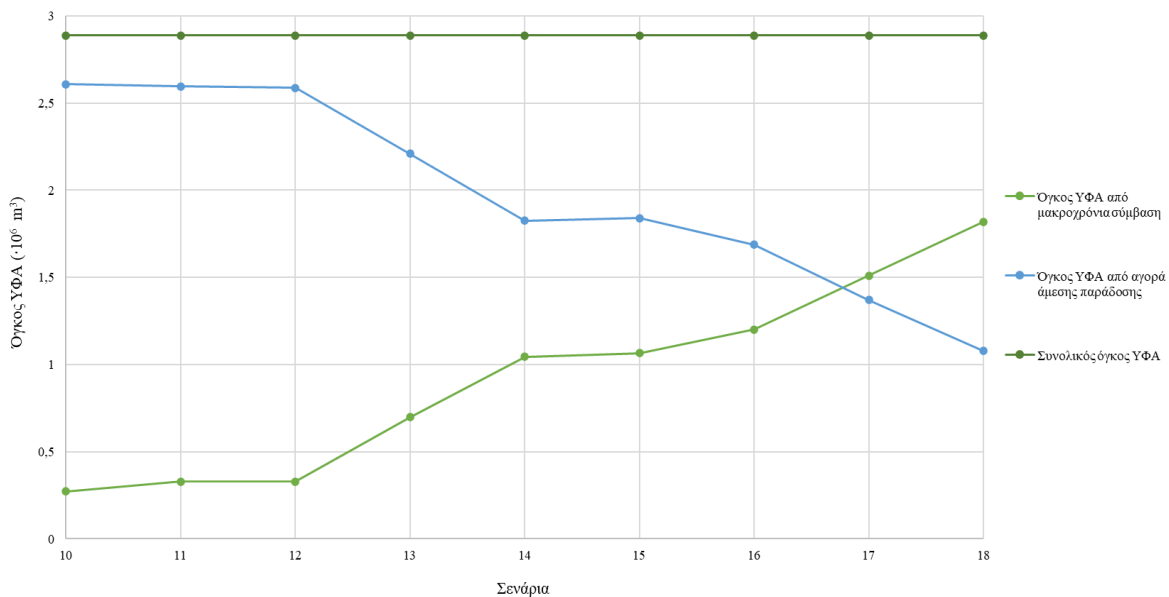
παράδοσης της οποίας τα πλοία συνεισφέρουν περισσότερο στην ικανοποίηση της ζήτησης. Στα σενάρια 4 έως 6 υπάρχουν μικρές αυξομειώσεις. Τέλος, στα σενάρια 7 έως 9 είναι εμφανές ότι το κόστος ναύλωσης έχει μειωθεί κατά πολύ αφού σύμφωνα με τα σχήματα αυξάνεται πλέον και το ποσοστό των πλοίων της μακροχρόνιας αγοράς, λόγω της αύξησης των ορίων του όγκου. Όλα τα κόστη στα σενάρια 8 και 9 είναι μεγαλύτερα από αυτά του σεναρίου 7, αφού οι τιμές της άμεσης αγοράς είναι αυξημένες. Ο Πίνακας 4.5 περιέχει τα αποτελέσματα για τα εννέα σενάρια στα οποία η ζήτηση έχει μειωθεί στο 70% της αρχικής.

Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα σεναρίων με μέση ζήτηση

Σενάρια	Φθηνές τιμές spot	Ίσες τιμές	Ακριβές τιμές spot
Χαμηλά όρια όγκων της μακροχρόνιας σύμβασης	$V_{\text{συν.}}= 2.9$	$V_{\text{συν.}}= 2.9$	$V_{\text{συν.}}=2.9$
	$LtV=0.3$	$LtV=0.3$	$LtV=0.3$
	$SpV=2.6$	$SpV=2.6$	$SpV=2.6$
	$LC=393$	$LC=640$	$LC=702$
	$TC= 48$	$TC=38$	$TC=48$
	$PC= 441$	$PC=678$	$PC=750$
Μέσα όρια όγκων της μακροχρόνιας σύμβασης	$V_{\text{συν.}}= 2.9$	$V_{\text{συν.}}= 2.9$	$V_{\text{συν.}}= 2.9$
	$LtV= 0.7$	$LtV= 1.1$	$LtV= 1.1$
	$SpV= 2.2$	$SpV= 1.8$	$SpV= 1.8$
	$LC= 434$	$LC= 628$	$LC= 659$
	$TC=38$	$TC=33$	$TC=31$
	$PC=472$	$PC=661$	$PC=690$
Υψηλά όρια όγκων της μακροχρόνιας σύμβασης	$V_{\text{συν.}}= 2.9$	$V_{\text{συν.}}= 2.9$	$V_{\text{συν.}}= 2$
	$LtV= 1.2$	$LtV= 1.5$	$LtV= 1.8$
	$SpV= 1.7$	$SpV= 1.4$	$SpV= 1.1$
	$LC= 476$	$LC= 630$	$LC= 616$
	$TC=27$	$TC=27$	$TC=69$
	$PC=503$	$PC=657$	$PC=686$



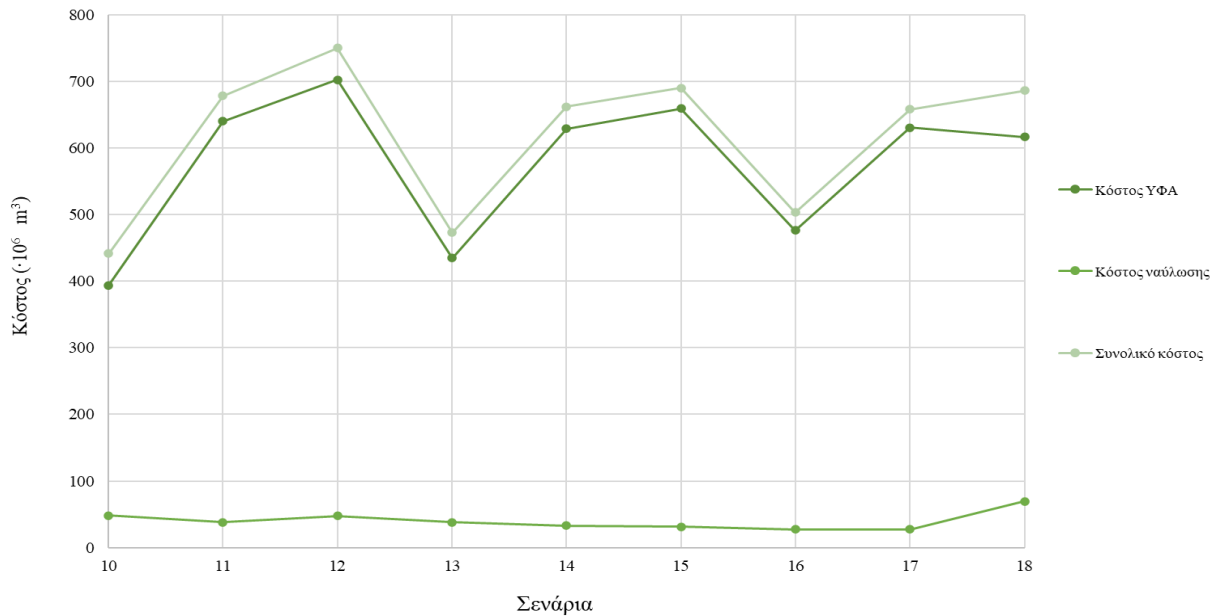
Σχήμα 4.18: Αριθμός αφιχθέντων πλοίων ανά σενάριο μέσης ζήτησης



Σχήμα 4.19: Όγκοι ΥΦΑ ανά σενάριο μέσης ζήτησης

Αρχικά, και στα δύο σχήματα παρατηρείται ότι ο όγκος ΥΦΑ από την σύμβαση αυξάνεται καθώς αυξάνονται τα όρια των όγκων της σύμβασης. Στα σενάρια 10 και 12 παρατηρείται ότι και οι δύο τύποι πλοίων επιλέγονται ίσες φορές. Στο σενάριο 11, όπου το ΥΦΑ έχει την ίδια τιμή και για τις δύο αγορές παρατηρείται ότι επιλέγονται λιγότερα πλοία από την αγορά άμεσης παράδοσης σε σχέση με τα σενάρια 10 και 12. Μια ενδεχόμενη εξήγηση είναι ότι τα όρια των όγκων είναι ιδιαίτερα χαμηλά για αυτά τα σενάρια και εκ των πραγμάτων θα επιλεγθούν τα πλοία της άμεσης αγοράς προκειμένου να καλυφθεί η ζήτηση. Στην δεύτερη περίπτωση

επιλέγονται λιγότερα πλοία, διότι υπάρχει η δυνατότητα να επιλεγθεί ένα πλοίο με μεγάλο όγκο και το κόστος να μην αυξηθεί σημαντικά, καθώς οι τιμές ΥΦΑ της αγοράς άμεσης παράδοσης είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες του σεναρίου 12. Όλα τα προαναφερθέντα αποτυπώνονται και στο **Σχήμα 4.20**.



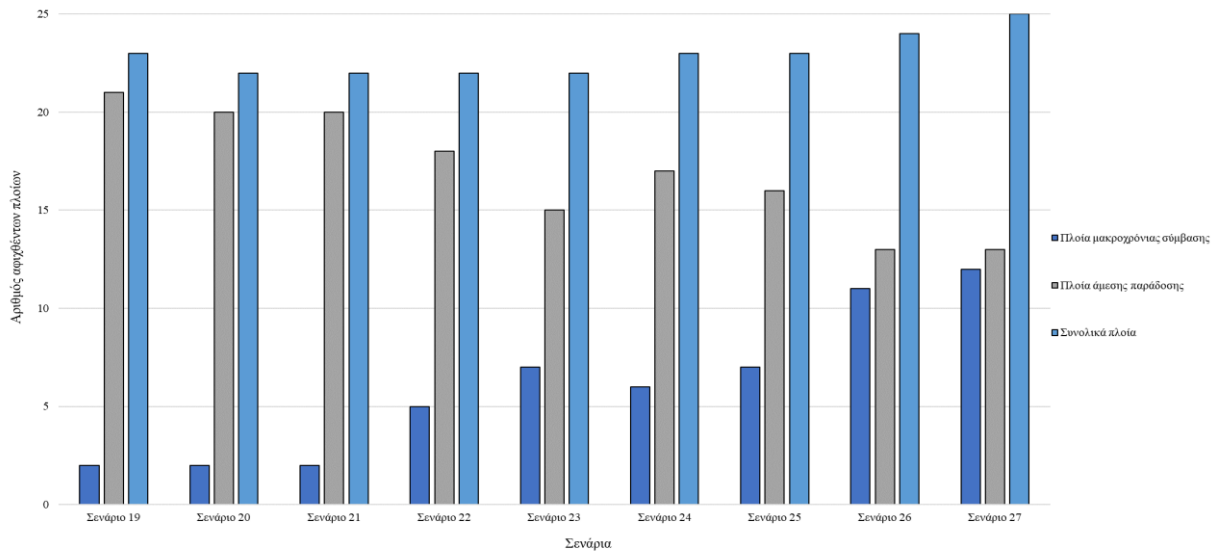
Σχήμα 4.20: Συνολικό κόστος, κόστος ναύλωσης και κόστος ΥΦΑ συναρτήσει σεναρίων μέσης ζήτησης

Το κόστος παρουσιάζει αυξομειώσεις οι οποίες σχετίζονται άμεσα με την εναλλαγή των τιμών ΥΦΑ στα σενάρια. Επίσης παρατηρείται ότι από τα τρία σενάρια τα οποία φέρουν χαμηλές τιμές ΥΦΑ της άμεσης αγοράς (10,13,16) αυτό με το χαμηλότερο κόστος είναι αυτό με τα χαμηλότερα όρια προμηθευόμενου όγκου από την μακροχρόνια σύμβαση. Με αυτό τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα στον αγοραστή να προμηθευτεί πολλά φορτία άμεσης παράδοσης, μειώνοντας αρκετά το κόστος προμήθειας. Αντίθετα, τα κόστη των σεναρίων 13 και 16 είναι υψηλότερα καθώς περιορίζεται η ευελιξία που προσφέρει η άμεση αγορά και ο ελάχιστος προμηθευόμενος όγκος της μακροχρόνιας σύμβασης αυξάνεται. Τα κόστη προμήθειας των σεναρίων 14 και 17 είναι χαμηλότερα από αυτό του σεναρίου 11 λόγω της μείωσης του κόστους ναύλωσης. Το ίδιο ισχύει και για τα υπόλοιπα σενάρια.

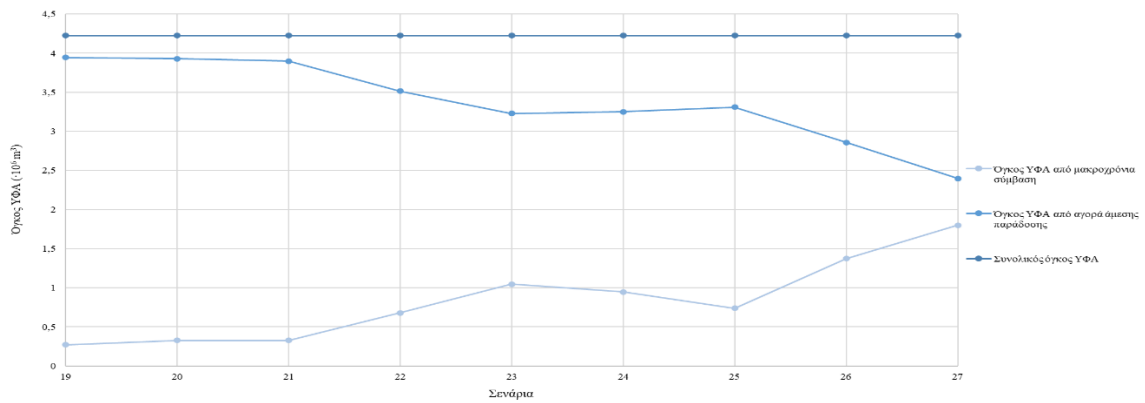
Ο Πίνακας 4.6 περιέχει τα αποτελέσματα για τα εννέα σενάρια στα οποία η ζήτηση είναι ίση με την αρχική της μελέτης περίπτωσης.

Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα σεναρίων με υψηλή ζήτηση

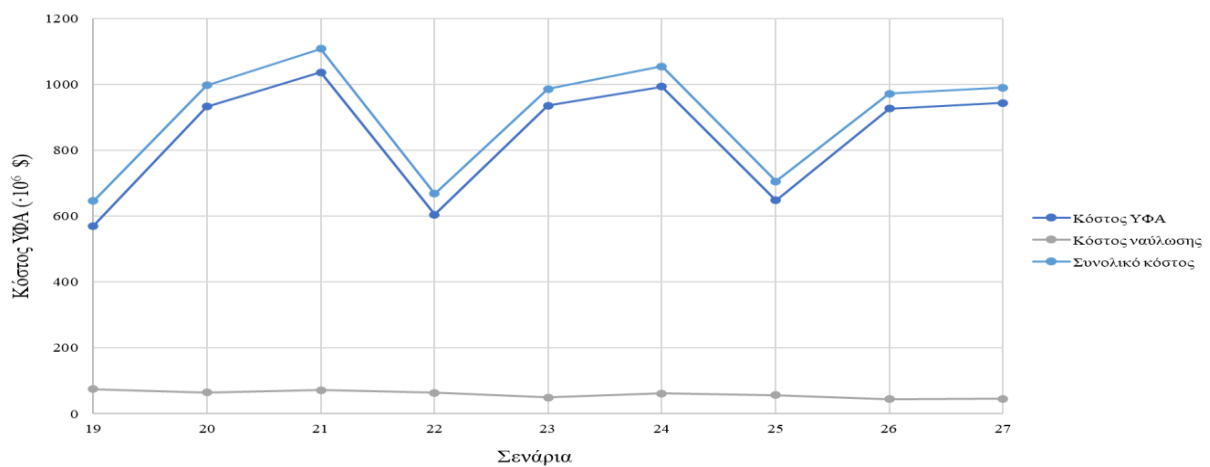
Σενάρια	Φθηνές τιμές spot	Ίσες τιμές	Ακριβές τιμές spot
Χαμηλά όρια όγκων της μακροχρόνιας σύμβασης	$V_{\text{συν.}}=4.2$	$V_{\text{συν.}}=4.2$	$V_{\text{συν.}}=4.2$
	$LtV=0.3$	$LtV=0.3$	$LtV=0.3$
	$SpV=3.9$	$SpV=3.9$	$SpV=3.9$
	$LC=570$	$LC=932$	$LC=1036$
	$TC=75$	$TC=65$	$TC=71.5$
	$PC=645$	$PC=997$	$PC=1107$
Μέσα όρια όγκων της μακροχρόνιας σύμβασης	$V_{\text{συν.}}=4.2$	$V_{\text{συν.}}=4.2$	$V_{\text{συν.}}=4.2$
	$LtV=0.7$	$LtV=1$	$LtV=1$
	$SpV=3.5$	$SpV=3.2$	$SpV=3.25$
	$LC=604$	$LC=936$	$LC=993$
	$TC=64$	$TC=50$	$TC=61$
	$PC=668$	$PC=986$	$PC=1054$
Υψηλά όρια όγκων της μακροχρόνιας σύμβασης	$V_{\text{συν.}}=4.2$	$V_{\text{συν.}}=4.2$	$V_{\text{συν.}}=4.2$
	$LtV=1.1$	$LtV=1.4$	$LtV=1.8$
	$SpV=3.1$	$SpV=2.8$	$SpV=2.4$
	$LC=648$	$LC=927$	$LC=944$
	$TC=57$	$TC=44$	$TC=46$
	$PC=705$	$PC=971$	$PC=990,$



Σχήμα 4.21: Αριθμός αφιχθέντων πλοίων ανά σενάριο υψηλής ζήτησης

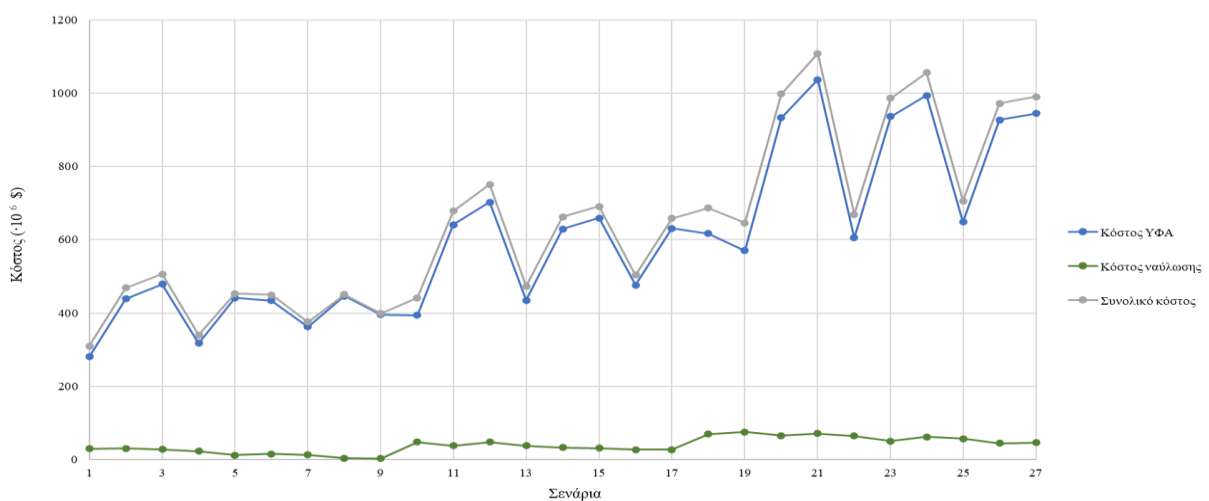


Σχήμα 4.22: Όγκοι ΥΦΑ ανά σενάριο υψηλής ζήτησης



Σχήμα 4.23: Συνολικό κόστος, κόστος ναύλωσης και κόστος ΥΦΑ συναρτήσει σεναρίων υψηλής ζήτησης

Στο **Σχήμα 4.22** παρατηρείται ότι καθώς τα όρια του όγκου από την μακροχρόνια σύμβαση αυξάνονται το κόστος προμήθειας σημειώνει μείωση. Το κόστος ναύλωσης επίσης παρουσιάζει μια ελαφρά μείωση. Αξίζει να σημειωθεί ότι για τα σενάρια 19 έως 21 όπως αναμένεται το κόστος αυξάνεται όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις καθώς αυξάνονται και οι τιμές της αγοράς άμεσης παράδοσης. Το ίδιο ισχύει και για τις άλλες δύο τριάδες σεναρίων. Από το διάγραμμα του όγκου, δηλαδή το **Σχήμα 4.23** παρατηρείται ότι μέχρι και το σενάριο 23 ο όγκος που προέρχεται από τους μεταφορείς της μακροχρόνιας σύμβασης αυξάνεται. Ωστόσο, για τα σενάρια 24 και 25 σημειώνεται μείωση, η οποία θα μπορούσε να ερμηνευθεί συνδυαστικά με το **Σχήμα 4.21**. Γενικότερα, αποτυπώνεται μια αύξηση των φορέων της μακροχρόνιας σύμβασης. Επίσης, παρατηρείται για την τριάδα των σεναρίων 22 έως 24 ότι στο σενάριο 23 επιλέγονται λιγότερα φορτία από την αγορά άμεσης παράδοσης, ενώ στο σενάριο 24 που οι τιμές άμεσης αγοράς είναι ακριβότερες επιλέγονται περισσότερα. Αυτό, συμβαίνει διότι όπως φαίνεται και στα αποτελέσματα στο **Παράρτημα Β** σε αυτή την περίπτωση προτιμάται από το πρόβλημα ο όγκος από την αγορά άμεσης παράδοσης (ο οποίος είναι ίδιος για τα σενάρια 23 και 24) στο σενάριο 23 να παραδοθεί μέσω λιγότερων πλοίων και μεγαλύτερων χωρητικοτήτων και στο σενάριο 24 (όπου οι τιμές ΥΦΑ στην άμεση αγορά έχουν αυξηθεί αρκετά) να παραδοθεί μέσω περισσότερων πλοίων τα οποία έχουν μικρότερες δυναμικότητες. Με αυτό τον τρόπο το κόστος στο σενάριο 24 δεν αυξάνεται υπερβολικά όπως φαίνεται και από το **Σχήμα 4.23**. Στα υπόλοιπα σενάρια όπου πλέον τα όρια των όγκων από την σύμβαση είναι υψηλά τα αφιχθέντα φορτία από την μακροχρόνια σύμβαση αυξάνονται σε σχέση με αυτά της αγοράς άμεσης παράδοσης. Τέλος, παρατίθεται το **Σχήμα 4.24** το οποίο περιέχει όλα τα κόστη όλων των σεναρίων συγκεντρωμένα και ακολουθεί μία σύντομη ανάλυσή του.

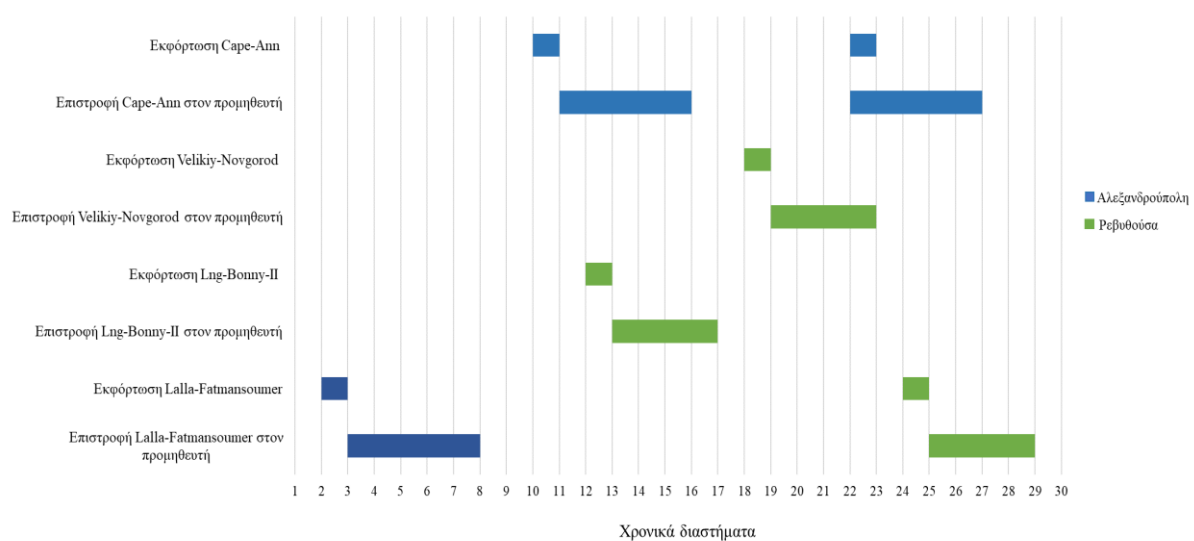


Σχήμα 4.24: Συνολικά κόστη όλων των σεναρίων ζήτησης

Παρατηρείται ότι καθώς η ζήτηση αυξάνεται, δηλαδή από τα σενάρια 1 προς 27 το συνολικό κόστος αυξάνεται. Μάλιστα, το υψηλότερο κόστος εντοπίζεται στο 21^ο σενάριο όπου για ζήτηση ίδια με αυτή του βασικού σεναρίου (μελέτη περίπτωσης Α), και χαμηλά όρια των όγκων της σύμβασης, επιλέγονται πολλά πλοία από την αγορά άμεσης παράδοσης τα οποία σε αυτή την περίπτωση έχουν τις υψηλότερες τιμές ΥΦΑ. Το χαμηλότερο κόστος εντοπίζεται στο 1^ο σενάριο όπου η ζήτηση είναι μειωμένη στο 50% της αρχικής, τα όρια των όγκων χαμηλά και οι τιμές ΥΦΑ της άμεσης αγοράς οι χαμηλότερες. Επίσης, το κόστος ναύλωσης παρουσιάζει μικρή αύξηση με την αύξηση της ζήτησης (σενάρια 10, 19), αφού για να ικανοποιηθεί μεγαλύτερη ζήτηση περισσότεροι φορείς θα πρέπει να παραδώσουν ΥΦΑ στους τερματικούς σταθμούς. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι στα σενάρια 1 έως 9 (χαμηλή ζήτηση) τα σενάρια 2 και 3 έχουν υψηλότερο συνολικό κόστος από τα σενάρια 5 και 6, 8 και 9. Το ίδιο ισχύει και για τις άλλες δύο περιπτώσεις της ζήτησης. Συμπερασματικά, ο ελάχιστος και μέγιστος προμηθευόμενος όγκος σε συνδυασμό με την αύξηση της τιμής ΥΦΑ στην αγορά άμεσης παράδοσης διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του κόστους.

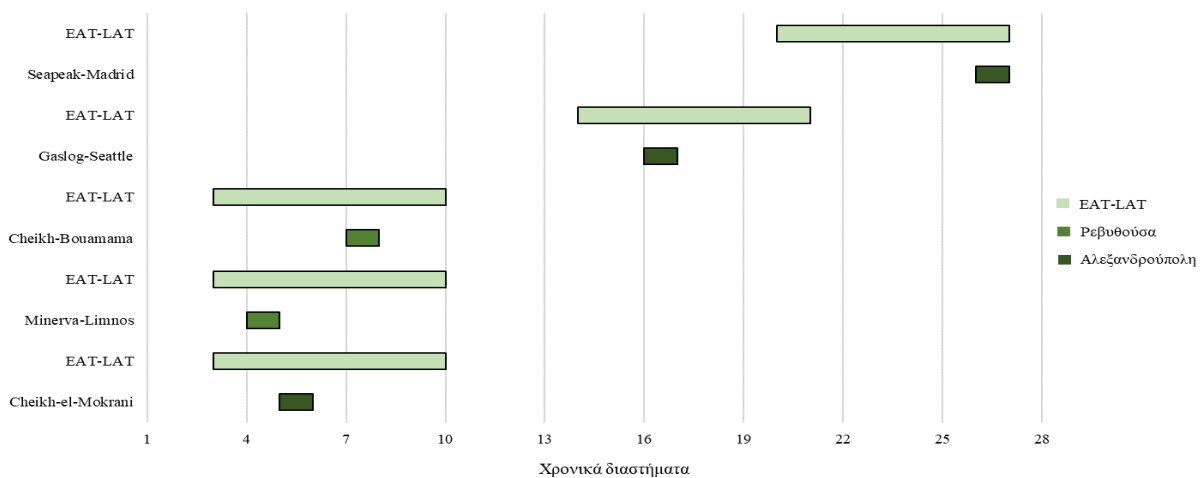
4.3 Αποτελέσματα περίπτωσης της Ελλάδας

Στο **Σχήμα 4.25** παρουσιάζεται ο μηνιαίος χρονοπρογραμματισμός των πλοίων από την μακροχρόνια σύμβαση στο χρονοδιάγραμμα, με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου στο λογισμικό GAMS. Είναι εμφανές από το **Σχήμα 4.25** ότι και οι 4 μεταφορείς της μακροχρόνιας σύμβασης επιλέγονται κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα και από τους δύο τερματικούς σταθμούς.



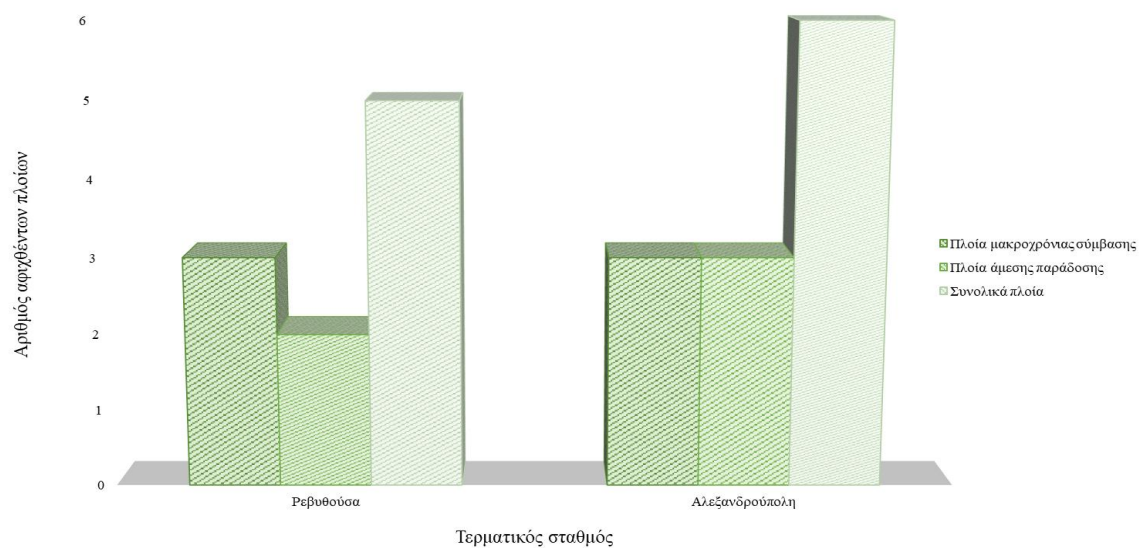
Σχήμα 4.25: Χρονοδιάγραμμα πλοίων από την μακροχρόνια σύμβαση (Ελλάδα)

Συνολικά, πραγματοποιούνται 6 δρομολόγια από τα πλοία της μακροχρόνιας σύμβασης. Τα πλοία Velikiy-novgorod και Lng-bonny II καταφθάνουν από μία φορά στο σταθμό της Ρεβυθούσας, ενώ το πλοίο Lalla-fatmansoumer πραγματοποιεί μία φορά την άφιξή του στο σταθμό της Αλεξανδρούπολης και μία φορά στο σταθμό της Ρεβυθούσας. Τέλος, το πλοίο Cape-Ann καταφθάνει 2 φορές στο σταθμό της Ρεβυθούσας. Όσον αφορά στους χρονικούς περιορισμούς, αξίζει να σημειωθεί ότι το πλοίο Lalla-Fatmansoumer φθάνει στον σταθμό της Αλεξανδρούπολης στο χρονικό διάστημα 2 και έπειτα φθάνει μετά από 22 χρονικά διαστήματα στον σταθμό της Ρεβυθούσας. Το αποτέλεσμα είναι ορθό, αν ληφθεί υπόψη ότι ο χρόνος της εκφόρτωσης, αθροιζόμενος με τον χρόνο για την διαδρομή από τον προμηθευτή και προς τον τερματικό σταθμό της Ρεβυθούσας είναι 10 χρονικά διαστήματα. Αντίστοιχα, ο μεταφορέας Cape-Ann καταφθάνει στον σταθμό της Αλεξανδρούπολης στο χρονικό διάστημα 10 και μετά από 12 χρονικά διαστήματα λαμβάνει χώρα η άφιξή του πάλι στον ίδιο σταθμό. Ο χρόνος που μεσολαβεί είναι στα πλαίσια του επιτρεπόμενου αφού αθροιστικά ο χρόνος της εκφόρτωσης και ο χρόνος για την διαδρομή από και προς τον σταθμό είναι 11 χρονικά διαστήματα. Είναι άξιο παρατήρησης, σύμφωνα με το **Σχήμα 4.25**, το γεγονός ότι το τελευταίο χρονικό διάστημα στο οποίο καταφθάνει πλοίο από την μακροχρόνια σύμβαση είναι το 24° στο σταθμό της Ρεβυθούσας. Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι ισχύει και ο περιορισμός, ο οποίος αναφέρει ότι με το τέλος του χρονικού ορίζοντα τα πλοία από την μακροχρόνια σύμβαση θα έπρεπε να βρίσκονται στην αφετηρία τους. Εφόσον, το πλοίο Lalla-Fatmansoumer φθάνει στην Ρεβυθούσα στο χρονικό διάστημα 24 χρειάζεται συνολικά 5 χρονικά διαστήματα, προκειμένου να επιστρέψει στον προμηθευτή, συμπεριλαμβανομένου και του χρόνου εκφόρτωσης. Συνεπώς, δεν εμπίπτει η επιστροφή του εκτός του χρονικού ορίζοντα.



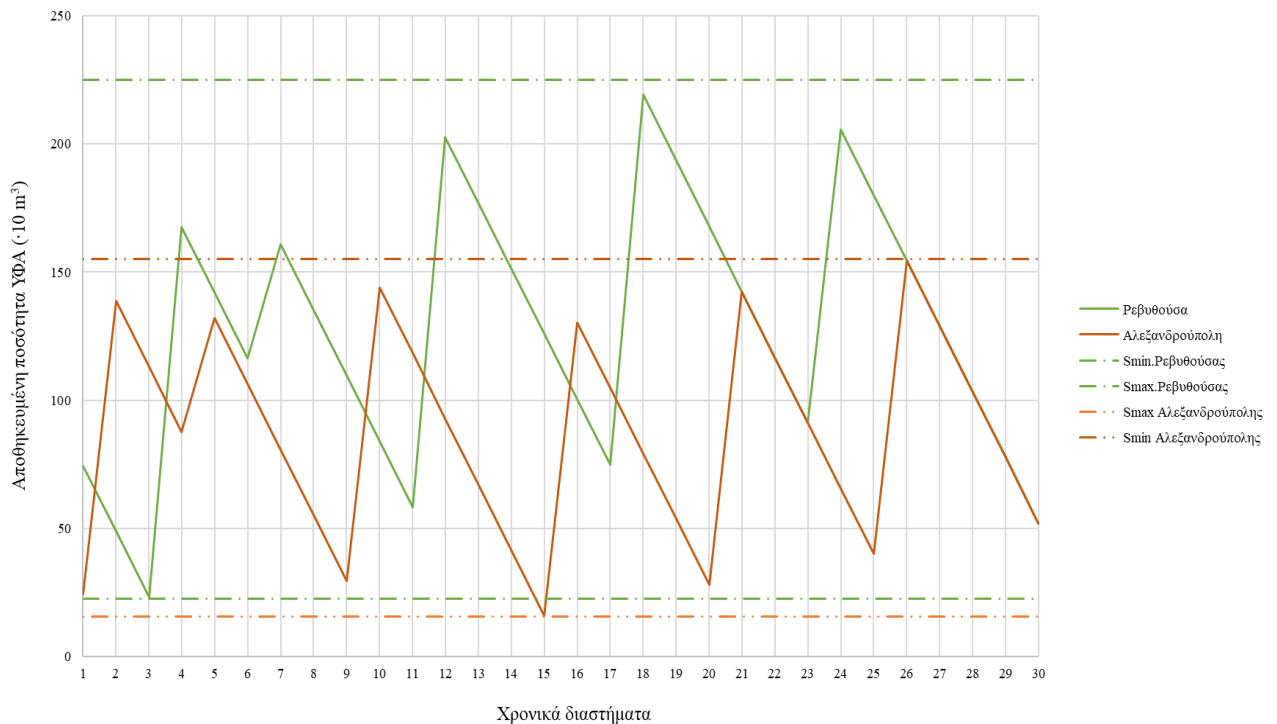
Σχήμα 4.26: Χρονοδιάγραμμα πλοίων άμεσης παράδοσης (Ελλάδα)

Σύμφωνα με το **Σχήμα 4.26** πραγματοποιείται η άφιξη 5 πλοίων από τα συνολικά 20 από την αγορά άμεσης παράδοσης. Είναι εμφανές ότι ικανοποιούνται οι στοιχειώδεις περιορισμοί για τα πλοία της άμεσης αγοράς. Αρχικά, τα πλοία επιλέγονται μόνο μία φορά εντός του χρονικού ορίζοντα και το χρονικό διάστημα άφιξης τους στους τερματικούς σταθμούς εμπίπτει εντός του χρονικού περιθωρίου, το οποίο ορίζει ο κάθε σταθμός για κάθε πλοίο. Τέλος, δεν καταφθάνει κανένα πλοίο στο τέλος του χρονικού ορίζοντα, δηλαδή στο χρονικό διάστημα 30, καθώς με την συμπερίληψη του χρονικού διαστήματος της εκφόρτωσης, αυτή θα ενέπιπτε εκτός του χρονικού ορίζοντα.



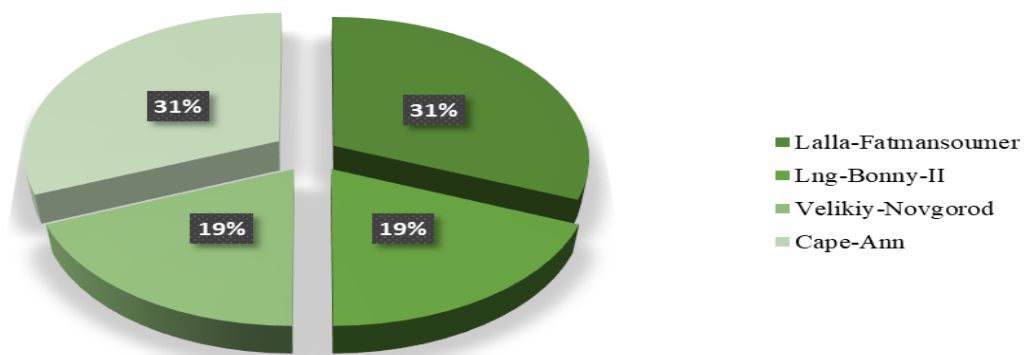
Σχήμα 4.27: Αριθμός αφιχθέντων πλοίων στους 2 τερματικούς σταθμούς

Από το **Σχήμα 4.27** είναι διαπιστώνεται ότι στον τερματικό σταθμό της Αλεξανδρούπολης καταφθάνουν συνολικά 6 πλοία εκ των οποίων τα 3 είναι πλοία από την μακροχρόνια σύμβαση. Αντίθετα, στην Ρεβυθούσα καταφθάνουν συνολικά 5 πλοία, από τα οποία τα 3 υπόκεινται στην μακροχρόνια σύμβαση. Όπως έχει προαναφερθεί, η ζήτηση στους δύο σταθμούς είναι ίση και σταθερή ανά χρονικό διάστημα κι αυτό σημαίνει ότι έχουν τις ίδιες απαιτήσεις σε ΥΦΑ. Το γεγονός αυτό μπορεί να εξηγηθεί με βάση τα πλοία που επιλέγονται από τον εκάστοτε σταθμό. Παρατηρώντας, συνδυαστικά τα χρονοδιαγράμματα των πλοίων και από τις δύο αγορές συμπεραίνεται ότι στην Ρεβυθούσα καταφθάνουν λιγότερα πλοία, αλλά αυτά έχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα από αυτά που καταφθάνουν στην Αλεξανδρούπολη, τα οποία μπορεί να είναι επιπρόσθετα κατά 1, αλλά έχουν μικρότερη δυναμικότητα. Επίσης, η άφιξη των πλοίων σε κάθε σταθμό εξαρτάται από την διαθεσιμότητα των πλοίων από τις δυο αγορές και τους περιορισμούς που έχουν τεθεί.



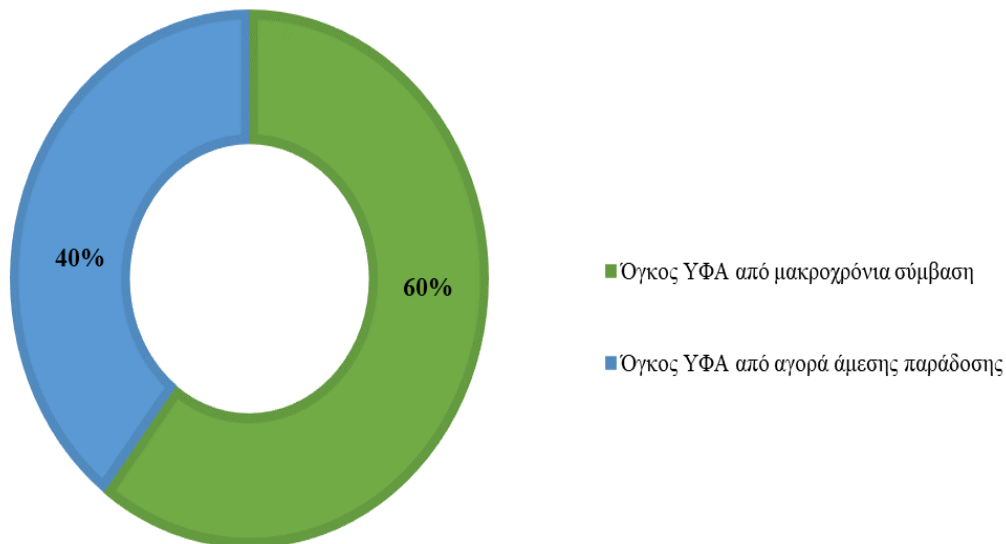
Σχήμα 4.28: Αποθηκευμένη ποσότητα ΥΦΑ σε κάθε χρονικό διάστημα στους 2 τερματικούς σταθμούς

Από το Σχήμα 4.28 είναι εμφανές ότι τηρούνται οι περιορισμοί της αποθηκευτικής δυναμικότητας και για τους δύο σταθμούς. Η αποθηκευμένη ποσότητα ΥΦΑ κυμαίνεται τόσο για την Αλεξανδρούπολη όσο και για την Ρεβυθούσα στα επιτρεπτά όρια. Όπως είχε σχολιαστεί και στη πρώτη μελέτη περίπτωσης οι κορυφές υποδηλώνουν την άφιξη ενός ή δυο πλοίων στον τερματικό σταθμό, καθώς η ποσότητα του ΥΦΑ αυξάνεται. Επίσης, ισχύει ότι για την Ρεβυθούσα η άφιξη των πλοίων παύει στο 24° χρονικό διάστημα, ενώ για την Αλεξανδρούπολη στο 26° χρονικό διάστημα. Συνεπώς, εάν ένα διάγραμμα ερμηνευτεί κατάλληλα και συνδυαστικά με τα υπόλοιπα, μπορούν να εκμαιευθούν πολλές και χρήσιμες πληροφορίες.



Σχήμα 4.29: Ποσοστά όγκων ΥΦΑ LTC πλοίων Ελλάδας

Στο **Σχήμα 4.29** παρουσιάζονται τα ποσοστά συνεισφοράς του κάθε πλοίου από την μακροχρόνια σύμβαση. Τα πλοία Lalla-Fatmansoumer και Cape-Ann συνεισφέρουν ίσο ποσοστό και μάλιστα το μεγαλύτερο μέρος του όγκου της μακροχρόνιας σύμβασης. Ακολουθούν, οι μεταφορείς Velikiy-Novgorod και Lng-Bonny II σε επίσης ίσο ποσοστό, οι οποίοι έχουν ίσες χωρητικότητες και για αυτό εξάλλου συνεισφέρουν το ίδιο, λαμβάνοντας επίσης υπόψη από το χρονοδιάγραμμα ότι επιλέγονται μία φορά κατά τη διάρκεια του ορίζοντα.

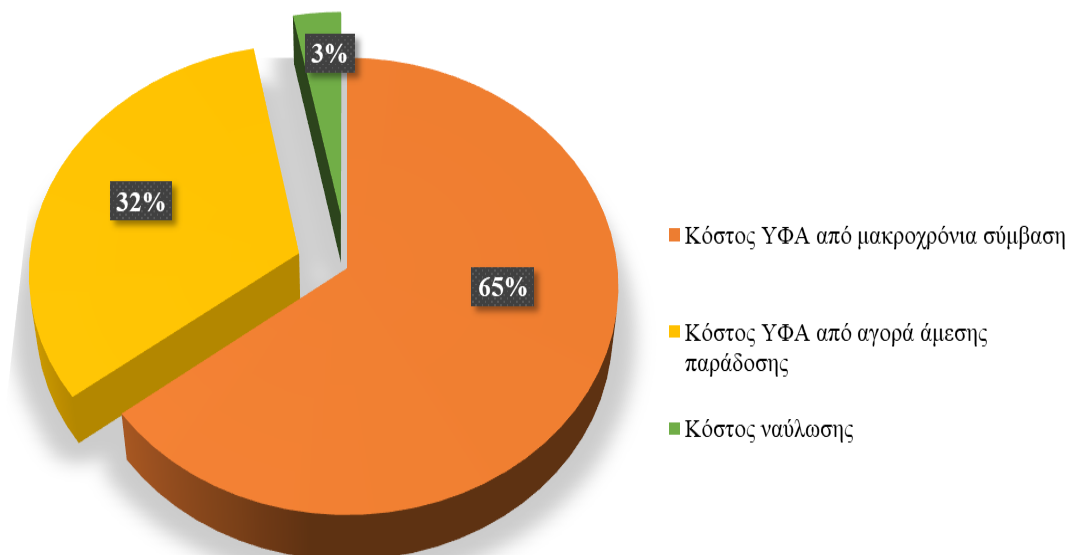


Σχήμα 4.30: Ποσοστά όγκων ΥΦΑ από τις δύο αγορές

Επιπρόσθετα, στο **Σχήμα 4.30** απεικονίζονται το ποσοστό του προμηθευόμενου όγκου από την μακροχρόνια σύμβαση και το ποσοστό του προμηθευόμενου όγκου από την αγορά άμεσης παράδοσης. Ο όγκος ΥΦΑ από το μακροπρόθεσμο συμβόλαιο είναι το 60% της συνολικής ζήτησης, ποσοστό το οποίο είναι στα επιτρεπτά όρια. Το γεγονός αυτό, είναι λογικό, εάν ληφθεί υπόψη ότι οι τιμές για την μεταφορά ΥΦΑ και από τις δύο αγορές έχουν θεωρηθεί ίσες και ότι το κόστος ναύλωσης για ορισμένα πλοία της μακροχρόνιας αγοράς είναι μικρότερο σε σχέση το κόστος ναύλωσης άλλων πλοίων από την αγορά άμεσης παράδοσης. Συνεπώς, υπάρχει η τάση ικανοποίησης της ζήτησης με περισσότερο όγκο από την μακροχρόνια σύμβαση. Συνολικά, προμηθεύονται 900,000 m³ ΥΦΑ από την μακροχρόνια σύμβαση και 590,000 m³ από την αγορά άμεσης παράδοσης. Ο **Πίνακας 4.7** περιέχει αναλυτικά τα στοιχεία των κοστών που αφορούν τον σταθμό της Ρεβυθούσας.

Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα προβλήματος Β για τον σταθμό της Ρεβυθούσας

Ρεβυθούσα					
Όνομα πλοίου	Τύπος πλοίου	Διάστημα	Όγκος (m ³)	Κόστος ΥΦΑ (€)	Κόστος ναύλωσης (€)
Lalla-Fatmansoumer	Μ.Σ.	24	140,000	27,398,000	760,000
Lng-Bonny-II	Μ.Σ.	18	170,000	33,269,000	190,000
Velikiy-Novgorod	Μ.Σ.	12	170,000	33,269,000	2,090,000
Minerva-Limnos	Α.Α.Π.	4	170,000	33,269,000	760,000
Cheikh-Bouamama	Α.Α.Π.	7	70,000	14,420,000	760,000



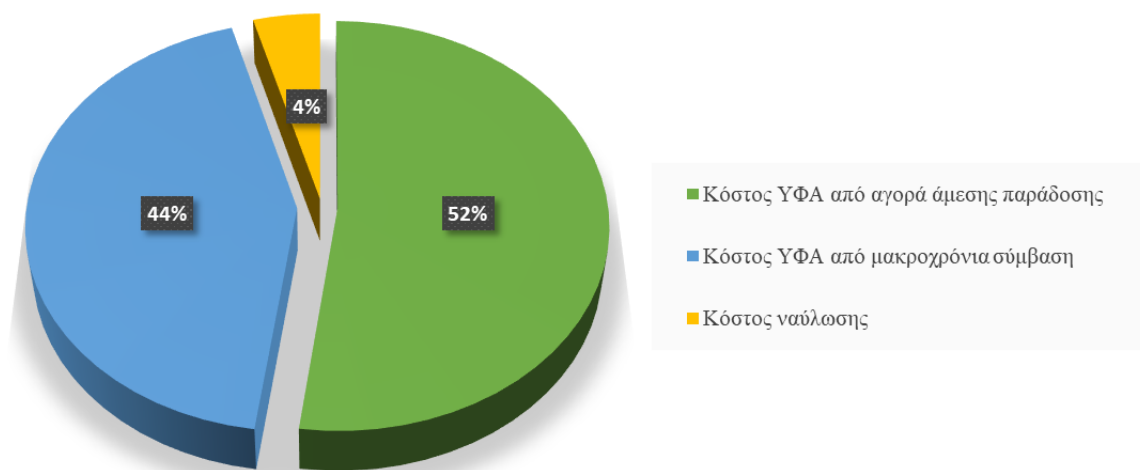
Σχήμα 4.31: Καταμερισμός του συνολικού κόστους στον Τερματικό σταθμό της Ρεβυθούσας

Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.31, το κόστος ΥΦΑ αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού κόστους και σχεδόν το μισό αυτού του ποσοστού είναι το κόστος ΥΦΑ από την αγορά των μακροχρόνιων συμβάσεων, καθώς τα πλοία της μακροχρόνιας σύμβασης που καταφθάνουν

στον σταθμό της Ρεβυθούσας είναι περισσότερα από αυτά της άμεσης αγοράς. Τέλος, το κόστος ναύλωσης αποτελεί το μικρότερο ποσοστό του συνολικού κόστους, όπως είναι αναμενόμενο. Το κόστος προμήθειας για τον τερματικό σταθμό της Ρεβυθούσας είναι 145,464,000 €.

Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα τερματικού σταθμού Αλεξανδρούπολης

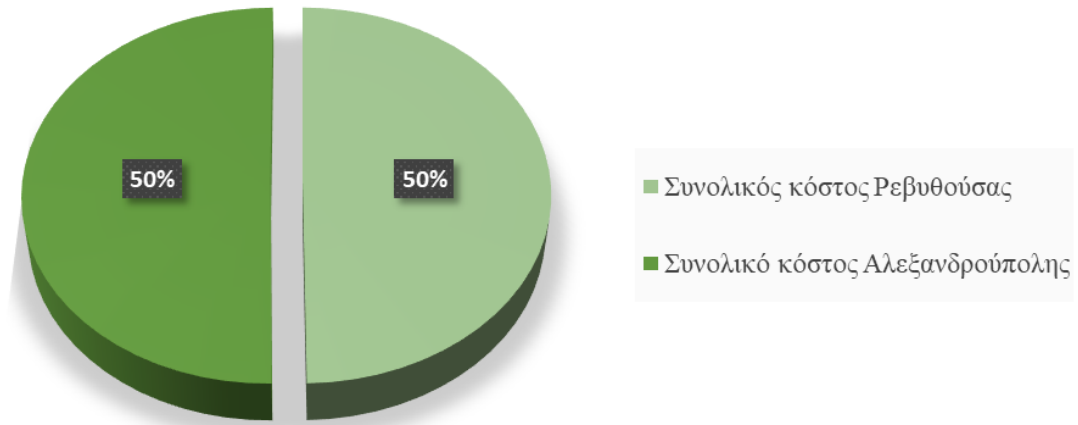
Αλεξανδρούπολη					
Όνομα πλοίου	Τύπος πλοίου	Διάστημα	Όγκος (m ³)	Κόστος ΥΦΑ (€)	Κόστος ναύλωσης (€)
Cape-Ann	Μ.Σ.	10	140,000	27,398,000	1,900,000
Lalla-Fatmansoumer	Μ.Σ.	2	140,000	27,398,000	1,900,000
Cheikh-El-Mokrani	Α.Α.Π.	5	70,000	13,699,000	2,090,000
Gaslog-Seattle	Α.Α.Π.	16	140,000	27,398,000	2,090,000
Seapeak-Madrid	Α.Α.Π.	26	140,000	27,398,000	1,140,000



Σχήμα 4.32: Καταμερισμός του συνολικού κόστους στον Τερματικό σταθμό της Αλεξανδρούπολης

Στο Σχήμα 4.32 το κόστος ΥΦΑ από την αγορά άμεσης παράδοσης κατέχει μεγαλύτερο ποσοστό στον σταθμό της Αλεξανδρούπολης, καθώς σε αυτό το σταθμό καταφθάνουν περισσότερα πλοία από την αγορά άμεσης παράδοσης. Το ποσοστό του κόστους ναύλωσης είναι αυξημένο σε σχέση

με τον σταθμό της Ρεβυθούσας, καθώς απαιτούνται περισσότερες μέρες για τα πλοία ώστε να φτάσουν στο σταθμό της Αλεξανδρούπολης, στον οποίο το κόστος προμήθειας είναι 125,790,450 €. Τελικά, το ελάχιστο κόστος προμήθειας ΥΦΑ ανέρχεται στα 298,528,520 €.



Σχήμα 4.33: Ποσοστό συνεισφοράς των τερματικών σταθμών στο συνολικό κόστος

Στο **Σχήμα 4.33** απεικονίζονται τα ποσοστά συνεισφοράς του κάθε τερματικού σταθμού στο συνολικό κόστος. Οι δυο τερματικοί σταθμοί συνεισφέρουν κατά ίσο ποσοστό στην διαμόρφωση του συνολικού κόστους. Αυτό οφείλεται στην παραδοχή που έχει γίνει για την ζήτηση, ότι δηλαδή είναι ίδια και για τους δύο σταθμούς κι άρα δεν δημιουργείται η ανάγκη προσέλευσης περισσότερων πλοίων σε έναν από τους δύο σταθμούς, όπως δηλαδή έγινε στην μελέτη περίπτωσης Α.

4.4 Παραμετρική ανάλυση για την περίπτωση της Ελλάδας

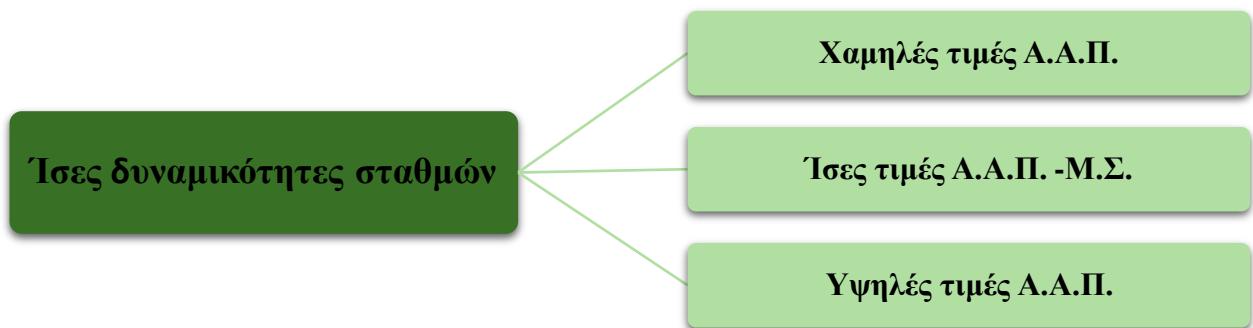
Ομοίως, για την περίπτωση της Ελλάδας διεκπεραιώνεται μία παραμετρική ανάλυση 10 σεναρίων. Ειδικότερα, διακρίνονται τρεις βασικές περιπτώσεις για την δυναμικότητα του σταθμού της Αλεξανδρούπολης:

- ❖ Η δυναμικότητα του σταθμού της Αλεξανδρούπολης είναι **μικρότερη** από την δυναμικότητα του σταθμού της Ρεβυθούσας.
- ❖ Οι δυναμικότητες των δύο σταθμών είναι **ίσες**.
- ❖ Η δυναμικότητα του σταθμού της Αλεξανδρούπολης είναι **μεγαλύτερη (διπλάσια)** από την δυναμικότητα του σταθμού της Ρεβυθούσας.

Συνάμα, λαμβάνεται υπόψη η ρευστότητα των τιμών ΥΦΑ στην αγορά άμεσης παράδοσης και διακριτοποιούνται ακόμη τρεις περιπτώσεις, με βάση αυτό το χαρακτηριστικό:

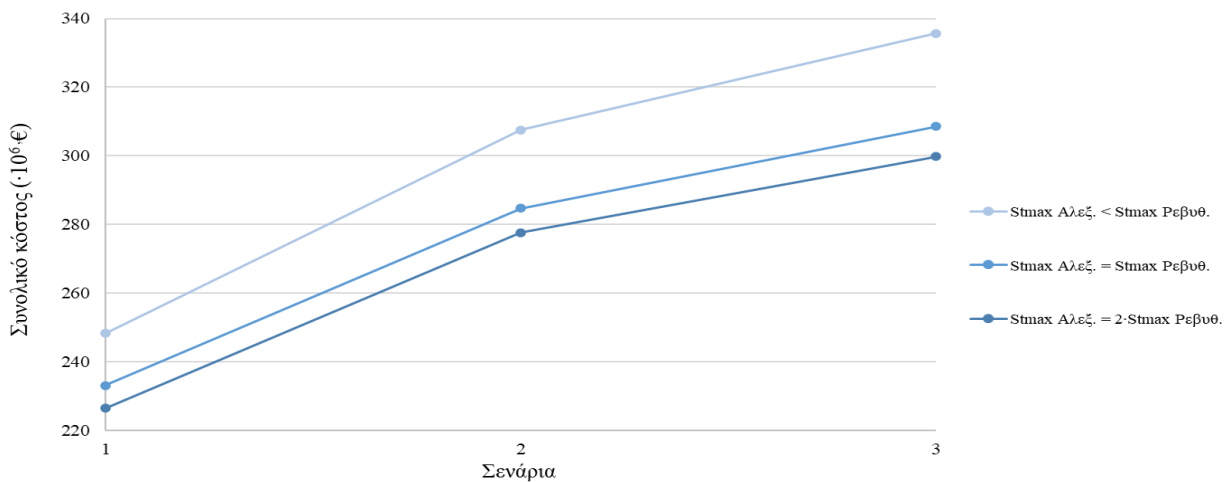
- ❖ Χαμηλές τιμές ΥΦΑ (120 έως $144 \frac{\$}{m^3}$) στην αγορά Άμεσης Παράδοσης (Α.Α.Π.)
- ❖ Ίσες τιμές ΥΦΑ στις δύο αγορές ($192 \frac{\$}{m^3}$ έως $216 \frac{\$}{m^3}$)
- ❖ Υψηλές τιμές ΥΦΑ στην Α.Α.Π. ($240 \frac{\$}{m^3}$ έως $264 \frac{\$}{m^3}$)

Συνεπώς, οι δύο αυτές παράμετροι συνδυάζονται και δημιουργούνται εννέα σενάρια, δηλαδή 3 σενάρια για κάθε περίπτωση της δυναμικότητας του σταθμού της Αλεξανδρούπολης, όπως απεικονίζεται και στο **Σχήμα 4.34**. Τέλος, μελετάται η επέκταση της δυναμικότητας του σταθμού της Αλεξανδρούπολης, στην περίπτωση όπου η ζήτηση ΥΦΑ αυξηθεί ραγδαία (τετραπλασιαστεί) λόγω της τροφοδότησης με ΥΦΑ ορισμένων γειτονικών χωρών.



Σχήμα 4.34: Υποπεριπτώσεις για ίσες δυναμικότητες των σταθμών

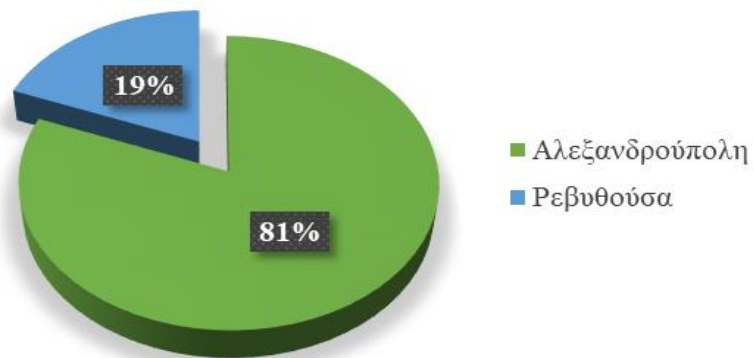
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου στο GAMS δημιουργήθηκε το **Σχήμα 4.35**, στο οποίο παρουσιάζονται τα κόστη προμήθειας ΥΦΑ ανά σενάριο και ανά δυναμικότητα.



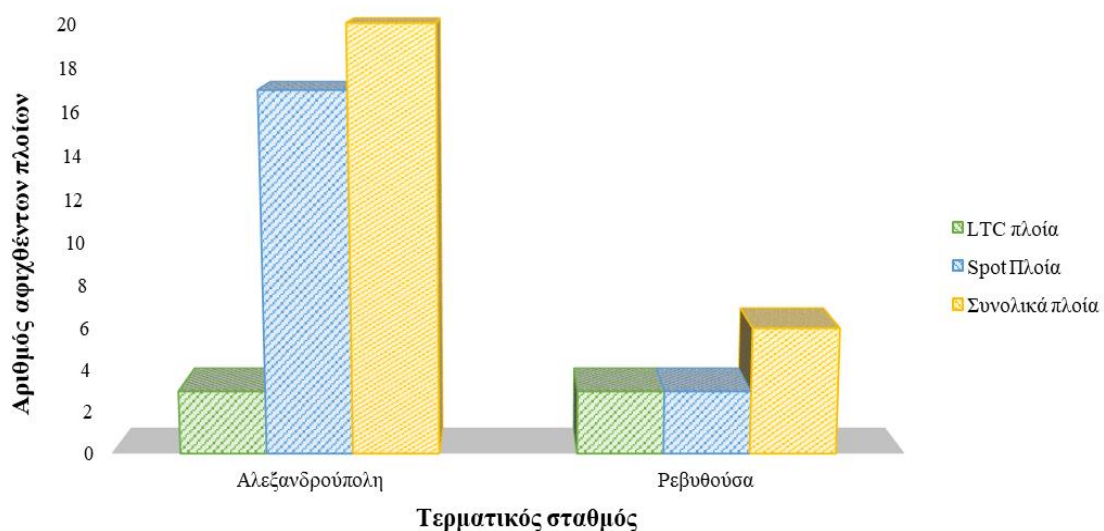
Σχήμα 4.35: Συνολικό κόστος ανά περίπτωση δυναμικότητας

Είναι εμφανές ότι η αύξηση της δυναμικότητας προκαλεί μείωση του συνολικού κόστους. Όταν η δυναμικότητα της Αλεξανδρούπολης είναι μικρότερη από αυτήν της Ρεβυθούσας παρατηρείται ότι το κόστος παρουσιάζει σταδιακή αύξηση, καθώς αυξάνονται οι τιμές ΥΦΑ από την αγορά άμεσης παράδοσης. Στο πρώτο σενάριο και στις τρεις περιπτώσεις οι τιμές του ΥΦΑ από την άμεση αγορά είναι κατά πολύ οικονομικότερες από αυτές της μακροχρόνιας σύμβασης. Οπότε το πρώτο σενάριο ανά περίπτωση δυναμικότητας αποτελεί την λύση με το χαμηλότερο κόστος. Επιπλέον, παρατηρείται ότι η επέκταση της δυναμικότητας στον σταθμό της Αλεξανδρούπολης και οι χαμηλότερες δυνατές τιμές στην αγορά άμεσης παράδοσης οδηγούν σε σημαντική εξοικονόμηση (περίπου 30 εκ. €) συγκριτικά με την περίπτωση όπου η δυναμικότητα της Αλεξανδρούπολης είναι μικρότερη (ή και ίση) με αυτή της Ρεβυθούσας. Επίσης, παρατηρείται ότι όταν οι δυναμικότητες των δύο σταθμών εξισωθούν το κόστος μειώνεται αρκετά, ειδικά στην περίπτωση των χαμηλών τιμών ΥΦΑ από την αγορά άμεσης παράδοσης. Συγκρίνοντας, τις περιπτώσεις όπου η δυναμικότητα της Αλεξανδρούπολης είναι ίση και μεγαλύτερη από αυτή της Ρεβυθούσας διαπιστώνεται ότι το κόστος δεν σημειώνει σημαντική μείωση. Συνεπώς, εάν ο διπλασιασμός της δυναμικότητας του σταθμού της Αλεξανδρούπολης είναι μια ιδιαίτερα δαπανηρή διαδικασία θα μπορούσε εναλλακτικά να πραγματοποιηθεί η εξίσωση των δυναμικοτήτων των δύο σταθμών, μειώνοντας με αυτό τον τρόπο το κόστος κατασκευής. Ωστόσο, θα πρέπει να ληφθούν κι άλλοι παράγοντες υπόψη για μια τέτοια κατασκευής όπως η απόσβεσή της. Να κριθεί δηλαδή μέσω μιας τεχνικό-οικονομικής μελέτης εάν μια τέτοια επένδυση είναι κερδοφόρα ή ασύμφορη.

Ωστόσο, μεσοπρόθεσμα η Αλεξανδρούπολη θα κληθεί να ικανοποιήσει την ζήτηση όχι μόνο της Ελλάδας αλλά κι άλλων γειτονικών χωρών όπως της Βουλγαρίας. Συνεπώς, θα πρέπει να γίνει μία διερεύνηση με βάση την ζήτηση. Στο αρχικό πρόβλημα για την Ρεβυθούσα και την Αλεξανδρούπολη παρατηρήθηκε ότι με την δεδομένη δυναμικότητα, μικρή αύξηση της ζήτησης στον σταθμό της Αλεξανδρούπολης καθιστά την μελέτη περίπτωσης μη πιύσιμη (infeasible). Θα πρέπει λοιπόν να διερευνηθεί η δυναμικότητα για την οποία το πρόβλημα επιλύεται σε περιόδους ιδιαίτερα αυξημένης ζήτησης. Συγκεκριμένα, η ζήτηση τετραπλασιάζεται μόνο για τον σταθμό της Αλεξανδρούπολης και εντέλει τα αποτελέσματα οδηγούν σε δυναμικότητα ίση με 500,000 m³ (σχεδόν διπλάσια από αυτή της Ρεβυθούσας). Το συνολικό κόστος προμήθειας ανέρχεται πλέον τα 811,492,126 €, το οποίο αριθμητικά είναι περίπου τριπλάσιο από αυτό του βασικού σεναρίου, καθώς η ζήτηση πλέον είναι ιδιαίτερα αυξημένη και απαιτείται η ναύλωση περισσότερων πλοίων για την ικανοποίηση της.



Σχήμα 4.36: Καταμερισμός συνολικού κόστους στους 2 τερματικούς σταθμούς



Σχήμα 4.37: Αριθμός αφιχθέντων πλοίων στους δύο τερματικούς σταθμούς για πολύ υψηλή ζήτηση

Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.36** το μεγαλύτερο μέρος του κόστους οφείλεται στον τερματικό σταθμό της Αλεξανδρούπολης, καθώς η ζήτηση του πλέον είναι ιδιαίτερα αυξημένη. Συνδυαστικά με το **Σχήμα 4.37** επισημαίνεται ότι ο αριθμός των πλοίων που καταφθάνουν στον τερματικό σταθμό της Αλεξανδρούπολης είναι σχεδόν τριπλάσιος από τον αριθμό των πλοίων στην Ρεθυθούσα. Μάλιστα, τα πλοία τα οποία επιλέγονται στην Αλεξανδρούπολη είναι κατά κύριο λόγο από την αγορά άμεσης παράδοσης, καθώς είναι πολλά περισσότερα από τα πλοία των μακροχρόνιων συμβάσεων και διαθέτουν μεγαλύτερη χωρητικότητα. Αξίζει να σημειωθεί ότι πραγματοποιείται ιδιαίτερη συμφόρηση στο σταθμό της Αλεξανδρούπολης καθώς αυτός διαθέτει μία μόνο προβλήτα σε αντίθεση με τον σταθμό της Ρεθυθούσας που διαθέτει 2 προβλήτες. Σε περιόδους υψηλής ζήτησης η αγορά

άμεσης παράδοσης προσφέρει σημαντική ευελιξία στον καταναλωτή, καθώς πληθώρα μεταφορέων ΥΦΑ μπορούν να συμβάλλουν στην ικανοποίηση της ζήτησης. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να διερευνηθεί εάν μία τέτοια επέκταση θεωρείται συμφέρουσα συγκρίνοντας το κέρδος που προκύπτει από την προμήθεια του ΥΦΑ με το κόστος για μια τέτοια κατασκευή.

5 Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω μελέτη

5.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική αποβλέπει στην βελτιστοποίηση του κόστους προμήθειας ΥΦΑ από την αγορά άμεσης παράδοσης και την αγορά των μακροχρόνιων συμβάσεων, μέσω του μαθηματικού προγραμματισμού. Η προμήθεια του ΥΦΑ συνιστά πλέον θέμα μείζονος σημασίας, καθώς το υγροποιημένο φυσικό αέριο είναι ένα καύσιμο λιγότερο δαπανηρό σε σχέση με άλλα και με χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Μάλιστα, οι δύο αγορές προμήθειας ΥΦΑ είναι εκ δια μέτρου αντίθετες, καθώς η ευελιξία της αγοράς άμεσης παράδοσης συνοδεύεται από αβεβαιότητα, ενώ η σταθερότητα των μακροχρόνιων συμβολαίων συνδέεται με την ακαμψία (υποχρεωτική αγορά μιας ελάχιστης ποσότητας όγκου). Συνεπώς, κρίνεται απαραίτητος ο συγκερασμός των δύο αγορών, ώστε να συνδυαστούν τα πλεονεκτήματα εκάστης. Η βελτιστοποίηση του κόστους καθίσταται τελέσφορη με τη ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου Μεικτού Ακέραιου Προγραμματισμού (MILP), το οποίο περιγράφει τον προγραμματισμό άφιξης των πλοίων από τις δύο αγορές και διέπεται από τους κατάλληλους λογικούς περιορισμούς. Το μαθηματικό μοντέλο εφαρμόζεται για δύο βασικές μελέτες περίπτωσης και επιλύεται στο λογισμικό βελτιστοποίησης GAMS.

Η πρώτη μελέτη περίπτωσης αφορά ένα βιβλιογραφικό παράδειγμα τριών τερματικών σταθμών, για τους οποίους πραγματοποιείται ο χρονοπρογραμματισμός της άφιξης των υγραεριοφόρων πλοίων σε χρονικό ορίζοντα 30 ημερών. Ειδικότερα, διατίθενται εξήντα πλοία από την αγορά άμεσης παράδοσης και μια μακροχρόνια σύμβαση, στην οποία υπόκεινται τέσσερις μεταφορές ΥΦΑ. Η βελτιστοποίηση του κόστους οδήγησε στην άφιξη 15 φορτίων ΥΦΑ από την αγορά άμεσης παράδοσης και 12 φορτίων ΥΦΑ από την μακροχρόνια σύμβαση. Αυτή η κατανομή των φορτίων αντιστοιχεί ποσοστιαία σε 40% προμήθεια ΥΦΑ από την αγορά των μακροχρόνιων συμβάσεων και σε 60% προμήθεια από την αγορά άμεσης παράδοσης. Δηλαδή, η αγορά άμεσης παράδοσης συνιστά μια περισσότερο ελκυστική επιλογή σε σχέση με την μακροχρόνια σύμβαση για την συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης, λόγω των οικονομικότερων τιμών ΥΦΑ στην άμεση αγορά. Συν τοις άλλοις, παρατηρείται ότι ο πρώτος τερματικός σταθμός διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση του συνολικού κόστους, καθώς αποτελεί τον τερματικό σταθμό με την μεγαλύτερη ζήτηση ΥΦΑ αλλά και αυτόν με τα μεγαλύτερα κόστη ναύλωσης. Αξίζει να επισημανθεί ότι το κόστος ναύλωσης συμβάλλει κατά πολύ μικρότερο βαθμό στη διαμόρφωση του κόστους και για τους τρεις τερματικούς σταθμούς.

Τα αποτελέσματα αξιολογήθηκαν με σκοπό να πιστοποιηθεί η αξιοπιστία του μοντέλου. Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι οι περιορισμοί του μαθηματικού μοντέλου τηρούνται αλλά και ότι τα αποτελέσματα ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται μια παραμετρική ανάλυση 27 σεναρίων στην οποία για τρεις βασικές βαθμίδες της ζήτησης (χαμηλή, μεσαία και υψηλή) διακρίνονται υποπεριπτώσεις με βάση την τιμή ΥΦΑ στην αγορά άμεσης παράδοσης (χαμηλή, μέση, υψηλή) και τα όρια των προμηθευόμενων όγκων της σύμβασης. Δηλαδή, σε κάθε βαθμίδα της ζήτησης αντιστοιχούν εννέα σενάρια, στα οποία συνδυάζονται οι διάφορες υποπεριπτώσεις. Σύμφωνα με την ανάλυση των αποτελεσμάτων παρατηρείται από το 1^ο σενάριο προς το 27^ο αύξηση του συνολικού κόστους ανά εννεάδα σεναρίων, γεγονός το οποίο οφείλεται στην αύξηση της ζήτησης. Επιπρόσθετα, το κόστος ναύλωσης αυξάνεται με την αλλαγή της ζήτησης, το οποίο επίσης αποδίδεται στην κλιμάκωση της και μάλιστα παρατηρείται ότι για σταθερή ζήτηση αυτό μειώνεται, λόγω της αντίστοιχης κλιμάκωσης στα όρια του υποχρεωτικά προμηθευόμενου όγκου από την αγορά των μακροχρόνιων συμβάσεων. Το χαμηλότερο συνολικό κόστος εντοπίζεται στο 1^ο σενάριο, όπου η ζήτηση είναι χαμηλή, τα όρια των όγκων είναι επίσης χαμηλά, όπως και οι τιμές ΥΦΑ της αγοράς άμεσης παράδοσης, διότι παρέχεται η ευελιξία ικανοποίησης της ζήτησης με περισσότερα πλοία από την άμεση αγορά. Αντίθετα, το υψηλότερο κόστος εντοπίζεται στο 21^ο σενάριο όπου τα όρια των όγκων είναι υψηλά, η ζήτηση είναι υψηλή και οι τιμές ΥΦΑ της άμεσης αγοράς υψηλές. Η υψηλή ζήτηση συνδέεται με την άφιξη περισσότερων πλοίων, τα οποία λόγω του αυξημένου υποχρεωτικά προμηθευόμενου όγκου θα πρέπει να προέρχονται από την μακροχρόνια σύμβαση. Οι τιμές των πλοίων από την μακροχρόνια σύμβαση είναι σχετικά υψηλές και εντέλει ο συνδυασμός όλων αυτών των παραγόντων οδηγεί στην διαμόρφωση του υψηλότερου κόστους. Συμπερασματικά, οι τρεις παράμετροι με βάση τους οποίους εφαρμόστηκε η ανάλυση διαμορφώνουν καθοριστικά το κόστος.

Η δεύτερη μελέτη περίπτωσης αφορά την Ελλάδα και συγκεκριμένα την Ρεβυθούσα και τον υπό κατασκευή σταθμό της Αλεξανδρούπολης. Ομοίως μελετάται ο χρονοπρογραμματισμός της άφιξης των πλοίων από τις δύο αγορές στη διάρκεια ενός μήνα. Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης οδήγησαν στην άφιξη έξι φορτίων από την μακροχρόνια σύμβαση και 5 φορτίων από την αγορά άμεσης παράδοσης. Αυτή η κατανομή των φορτίων αντιστοιχεί σε ποσοστά όγκων 60% από την μακροχρόνια σύμβαση και 40% από την αγορά άμεσης παράδοσης. Στη περίπτωση της Ελλάδας, είναι περισσότερο προτιμητέα η αγορά των μακροχρόνιων συμβάσεων, λόγω του χαμηλότερου κόστους ναύλωσης, καθώς οι τιμές ΥΦΑ

έχουν θεωρηθεί ίσες και για τις δυο αγορές. Ακόμη, παρατηρείται ότι οι δυο τερματικοί σταθμοί συνεισφέρουν εξίσου στην διαμόρφωση του κόστους, καθώς η ζήτηση έχει θεωρηθεί ίδια και για τους δυο σταθμούς. Η ζήτηση στον τερματικό σταθμό της Ρεβυθούσας ικανοποιείται με περισσότερα πλοία από την αγορά μακροχρόνιων συμβάσεων και αυτό αντανακλάται στον καταμερισμό του κόστους προμήθειας του σταθμού. Δηλαδή, το ποσοστό κόστους μεταφοράς ΥΦΑ από την αγορά των μακροχρόνιων συμβάσεων είναι υψηλότερο από το αντίστοιχο ποσοστό της αγοράς άμεσης παράδοσης. Αντίστοιχος καταμερισμός παρατηρείται και για τον τερματικό σταθμό της Αλεξανδρούπολης. Αξίζει να τονιστεί ότι οι παραδοχές που έγιναν για την επίλυση της εν λόγω μελέτης περίπτωσης επηρεάζουν άμεσα τα αποτελέσματα. Σαφώς, η ύπαρξη πληρέστερων και ακριβέστερων δεδομένων θα μπορούσε να αποδώσει μία λύση με καλύτερη ανταπόκριση στην πραγματικότητα.

Στην περίπτωση της Ελλάδας εφαρμόστηκε μια παραμετρική ανάλυση σχετιζόμενη με την δυναμικότητα του σταθμού της Αλεξανδρούπολης και την μεταβλητότητα στις τιμές ΥΦΑ από την αγορά άμεσης παράδοσης. Αρχικά, διακρίνονται τρεις βασικές περιπτώσεις για την δυναμικότητα του σταθμού της Αλεξανδρούπολης: i) δυναμικότητα μικρότερη από αυτή της Ρεβυθούσας, ii) δυναμικότητα ίση με αυτή της Ρεβυθούσας και iii) δυναμικότητα μεγαλύτερη από αυτή της Ρεβυθούσας. Για κάθε περίπτωση δυναμικότητας διακρίνονται επίσης τρεις υποπεριπτώσεις για τις τιμές ΥΦΑ από την αγορά άμεσης παράδοσης (χαμηλές, μεσαίες και υψηλές). Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται για κάθε περίπτωση δυναμικότητας τρία σενάρια με βάση τις τιμές ΥΦΑ της άμεσης αγοράς. Γενικότερα, παρατηρείται ότι αύξηση της δυναμικότητας οδηγεί σε μείωση του συνολικού κόστους. Μάλιστα, το χαμηλότερο κόστος εντοπίζεται στην περίπτωση όπου οι τιμές από την αγορά άμεσης παράδοσης είναι χαμηλές και η δυναμικότητα του σταθμού της Αλεξανδρούπολης μεγαλύτερη από αυτή της Ρεβυθούσας (συγκεκριμένα διπλάσια). Το υψηλότερο κόστος παρατηρείται στην περίπτωση όπου η δυναμικότητα της Αλεξανδρούπολης είναι χαμηλότερη από αυτή της Ρεβυθούσας και οι τιμές ΥΦΑ στην άμεση αγορά υψηλές. Επιπλέον, μελετήθηκε ένα ακόμη σενάριο του τετραπλασιασμού της ζήτησης του σταθμού της Αλεξανδρούπολης και διερευνήθηκε η επέκταση της δυναμικότητας του σταθμού, καθώς με την ήδη υπάρχουσα δυναμικότητα καθίσταται αδύνατη η τροφοδότηση με ΥΦΑ άλλων γειτονικών χωρών, όπως προβλέπεται στο άμεσο μέλλον. Η δυναμικότητα αυτή ανέρχεται στα 500,000 m³ και είναι σχεδόν διπλάσια από αυτή του τερματικού σταθμού της Αλεξανδρούπολης. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε αυτή την περίπτωση πραγματοποιείται μεγάλη συμφόρηση στον σταθμό της Αλεξανδρούπολης, ο οποίος εξυπηρετείται από όλους τους μεταφορείς της μακροχρόνιας σύμβασης αλλά και της

αγοράς άμεσης παράδοσης. Τέλος, η επέκταση της δυναμικότητας θα πρέπει να πιστοποιηθεί και με την εκπόνηση τεχνικο-οικονομικής μελέτης, ώστε να κριθεί εάν είναι μια ασύμφορη ή κερδοφόρα επένδυση.

Συμπερασματικά, το μαθηματικό μοντέλο είναι αξιόπιστο καθώς οι περιορισμοί που το διέπουν λειτουργούν ορθά και για τις δύο μελέτες περίπτωσης. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι όσο ακριβές και εάν είναι ένα μαθηματικό μοντέλο πάντοτε υπάρχει μια μικρή διαφορά σε σχέση με την πραγματικότητα, καθώς υπάρχουν διάφοροι αστάθμητοι παράγοντες και ο κάθε αγοραστής ΥΦΑ συνάπτει συμφωνίες με διαφορετικούς όρους.

5.2 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω μελέτη του μαθηματικού μοντέλου και των δύο μελετών περίπτωσης, με σκοπό την επίτευξη βελτιωμένων αποτελεσμάτων.

Το μαθηματικό μοντέλο της απλής παράδοσης (single delivery problem) αποτελεί ένα πρώτο βήμα προς την ανάπτυξη μιας στρατηγικής προμηθειών για τους αγοραστές ΥΦΑ. Θα μπορούσε να επεκταθεί στο μέλλον με τη μοντελοποίηση ενός μεταφορέα ΥΦΑ ως ανεξάρτητου πόρου με δυνατότητα κατανεμημένης παράδοσης σε πολλαπλούς τερματικούς σταθμούς/πελάτες σε ένα ταξίδι (split delivery problem). Επίσης, μπορούν να εξεταστούν πολλαπλές ποιότητες υγροποιημένου φυσικού αερίου. Όσον αφορά τον χρονικό ορίζοντα προτείνεται επίσης επέκταση αυτού στη βάση του ενός έτους, ώστε να προκύπτει το ετήσιο πρόγραμμα άφιξης των πλοίων, καθώς είναι ιδιαίτερα χρήσιμο. Περαιτέρω, στο τρέχον μοντέλο, όλες οι λειτουργίες, έχουν αναπαρασταθεί με διακριτούς χρόνους. Μελλοντικά, μπορεί να εξεταστεί μια αναπαράσταση σε συνεχή χρόνο. Επιπλέον, το μοντέλο θα μπορούσε να επεκταθεί με τη συμπερίληψη και άλλων χαρακτηριστικών του επιχειρησιακού σχεδιασμού. Όταν ένας μεταφορέας ΥΦΑ ελλιμενίζεται σε έναν τερματικό σταθμό, θα πρέπει να καταβάλει δασμούς για την είσοδο στο λιμάνι, τη χρήση του κρηπιδώματος και την εκφόρτωση του φορτίου. Αυτά τα πρόσθετα έξοδα θα έχουν αντίκτυπο στα οικονομικά των τερματικών σταθμών κι ως εκ τούτου, η επίδραση αυτή πρέπει να μελετηθεί μελλοντικά. Όσον αφορά την μελέτη της Ελλάδας θα μπορούσαν να εφαρμοστούν όλα τα προαναφερθέντα και να γίνει μια ενδελεχέστερη διερεύνηση για την επέκταση της δυναμικότητας του σταθμού της Αλεξανδρούπολης. Θα πρέπει να κριθεί δηλαδή εάν μια τέτοια επένδυση αντισταθμίζει την μείωση τους κόστους, που προκαλείται από την υλοποίηση της.

Βιβλιογραφία

Dong, L., Tan, W., Liu, L., Zhu, G. and Peng, L. (2017). Research on maximum explosion overpressure in LNG storage tank areas. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 49, pp.162–170. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.06.010>.

Rathnayaka, S., Khan, F. and Amyotte, P. (2012). Accident modeling approach for safety assessment in an LNG processing facility. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 25(2), pp.414–423. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2011.09.006>.

Anon, (n.d.). *Overview of the LNG industry | OwnerTeamConsultation*. [online] Available at: <https://www.ownerteamconsult.com/overview-of-the-lng-industry/>.

Lee, I., Park, J. and Moon, I. (2017). Key Issues and Challenges on the Liquefied Natural Gas Value Chain: A Review from the Process Systems Engineering Point of View. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57(17), pp.5805–5818. doi:<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b03899>.

SAFETY4SEA. (2018). *Greece launches new LNG tank at Revithoussa LNG terminal*. [online] Available at: <https://safety4sea.com/greece-launches-new-lng-tank-at-revithoussa-lng-terminal/>.

Keep Talking Greece. (2022). *Greece, Balkan leaders, EUCO Michel inaugurate liquefied gas terminal FSRU in Alexandroupolis*. [online] Available at: <https://www.keeptalkinggreece.com/2022/05/03/fsru-terminalliquefied-gas-alexandroupolis-inauguration-greece/> [Accessed 2 Oct. 2023].

Duncan, D. (2021). *LNG demand state of play in 5 charts*. [online] Timera Energy. Available at: <https://timera-energy.com/lng-demand-state-of-play-in-5-charts/>.

Διβόλης, Σ. (2017). *Τεχνοοικονομική Ανάλυση Εφοδιαστικής Αλυσίδας Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου*, Διπλωματική εργασία, Σχολή Ναυτιλίας και Βιομηχανίας, Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας.

Khan, M.S., Karimi, I.A. and Wood, D.A. (2017). Retrospective and future perspective of natural gas liquefaction and optimization technologies contributing to efficient LNG supply: A Journal of Natural Science and Engineering review. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jngse.2017.04.035>.

Δεληγεώρογλου, Ν. (2017). *Θαλάσσια μεταφορά υγροποιημένου φυσικού αερίου*, Διπλωματική εργασία, Σχολή Οικονομικών, Επιχειρηματικών και Διεθνών Σπουδών, Πανεπιστήμιο Πειραιώς.

Ευαγγελακοπούλου Δ. (2012), Περιβαλλοντική εκτίμηση, αξιολόγηση και προτάσεις για μέτρα αντιρρύπανσης κατά τη διαδικασία φόρτωσης απαερίων, ψύξης δεξαμενών πλοίων LNG, Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Τμήμα ναυτιλιακών σπουδών, Πανεπιστήμιο Πειραιά.

Λέκκας Π. (2018), Η αγορά του LNG και οι τάσεις για το μέλλον, Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Τμήμα ναυτιλιακών σπουδών, Πανεπιστήμιο Πειραιά.

Wartsila.com. (n.d.). *Mid- and small scale LNG terminals*. [online] Available at: <https://www.wartsila.com/marine/products/gas-solutions/onshore-solutions/terminal-systems>.

Κακαρούνας, Π. and Μπραγκατζή, Α. (2005). *Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο*, Τεχνολογικό εκπαιδευτικό ίδρυμα Καβάλας, Τμήμα τεχνολογίας πετρελαίου και φυσικού αερίου.

Saeid Mokhatab (2014). *Handbook of liquefied natural gas*. Amsterdam: Elsevier/Gulf Professional Publishing.

Μιχαλοπούλου Ε. (2016), “LNG Φυσικό Αέριο, μεταφορά δια θαλάσσης, οι περιβαλλοντικές και οι οικονομικές του συνέπειες”, Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Τμήμα ναυτιλιακών σπουδών, Πανεπιστήμιο Πειραιά.

Νικολάου Κ. 2021, Σταθμοί Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου, παρούσα κατάσταση και προοπτικές , Διπλωματική εργασία, ΠΑΔΑ.

Τσάμας Α. 2017, Το LNG ως καύσιμο στη ναυτιλία και η ανάγκη για λιμενικούς σταθμούς ανεφοδιασμού, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Πειραιά.

Pfoser, S., Aschauer, G., Simmer, L. and Schauer, O. (2016). Facilitating the implementation of LNG as an alternative fuel technology in landlocked Europe: A study from Austria. *Research in Transportation Business & Management*, 18, pp.77–84. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2016.01.004>.

Al-Haidous, S. and Al-Ansari, T. (2019). Sustainable Liquefied Natural Gas Supply Chain Management: A Review of Quantitative Models. *Sustainability*, 12(1), p.243. doi:<https://doi.org/10.3390/su12010243>.

Andersson, H., Christiansen, M. and Fagerholt, K. (2010). Transportation Planning and Inventory Management in the LNG Supply Chain. *Energy, Natural Resources and Environmental Economics*, pp.427–439. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-642-12067-1_24.

Shahrukh, M., Srinivasan, R. and Karimi, I.A. (2021). Optimal Procurement of Liquefied Natural Gas Cargos from Long-Term Contracts and Spot Market through Mathematical Programming. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(9), pp.3658–3669. doi:<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c05757>.

Germanischer, L. (2013). *European Maritime Safety Agency (EMSA) - Study on Standards and Rules for bunkering of gas-fuelled Ships* . Olaf Drews, p.108.

Melling, A.J. (2010). *Natural Gas Pricing and Its Future: Europe as the Battleground*. Cheniere Energy.

S. Levine, P. Carpenter, A. Tharpal, 2014, Understanding Natural Gas Markets, American Petroleum Institute

Erdős, P. and Ormos, M. (2012). Natural Gas Prices on Three Continents. *Energies*, 5(10), pp.4040–4056. doi:<https://doi.org/10.3390/en5104040>.

Efe Biresselioglu, Hakan Demir, M. and Kandemir, C. (2012). Modeling Turkey's future LNG supply security strategy. *Energy Policy*, 46, pp.144-152. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.03.045>

Shaikh, F., Ji, Q., Fan, Y., Shaikh, P.H. and Uqaili, M.A. (2017). Modelling an optimal foreign natural gas import scheme for China. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 40, pp.267–276. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jngse.2017.02.029>.

Kim, J. (2018). Optimal Portfolio for LNG Importation in Korea Using a Two-Step Portfolio Model and a Fuzzy Analytic Hierarchy Process *Energies*, p.3049. doi:<https://doi.org/10.3390/en11113049>

Plebankiewicz, E. and Kubek, D. (2016). Multicriteria Selection of the Building Material Supplier Using AHP and Fuzzy AHP. *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(1), p.04015057. doi:[https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001033](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001033).

Khalilpour, R. and Karimi, I.A. (2011). Selection of Liquefied Natural Gas (LNG) Contracts for Minimizing Procurement Cost. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(17), pp.10298–10312. doi:<https://doi.org/10.1021/ie200275m>.

Rajab Khalilpour and Karimi, I.A. (2012). Contract selection under uncertainty. *Elsevier eBooks*, pp.1487–1491. doi:<https://doi.org/10.1016/b978-0-444-59506-5.50128-0>.

Bittante, A., Jokinen, R., Pettersson, F. and Saxén, H. (2015). Optimization of LNG Supply Chain. *12th International Symposium on Process Systems Engineering and 25th European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, pp.779–784. doi:<https://doi.org/10.1016/b978-0-444-63578-5.50125-0>.

Rakke, J.G., Stålhane, M., Moe, C.R., Christiansen, M., Andersson, H., Fagerholt, K. and Norstad, I. (2011). A rolling horizon heuristic for creating a liquefied natural gas annual delivery program. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(5), pp.896–911. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trc.2010.09.006>.

Andersson, H., Christiansen, M., Desaulniers, G. and Rakke, J.G. (2015). Creating annual delivery programs of liquefied natural gas. *Optimization and Engineering*, 18(1), pp.299–316. doi:<https://doi.org/10.1007/s11081-015-9305-y>.

Mutlu, F., Msakni, M.K., Yildiz, H., Sönmez, E. and Pokharel, S. (2016). A comprehensive annual delivery program for upstream liquefied natural gas supply chain. *European Journal of Operational Research*, [online] 250(1), pp.120–130. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.10.031>.

Grønhaug, R. and Christiansen, M. (2009). Supply Chain Optimization for the Liquefied Natural Gas Business. *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, [online] pp.195–218. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-540-92944-4_10.

Stålhane, M., Rakke, J.G., Moe, C.R., Andersson, H., Christiansen, M. and Fagerholt, K. (2012). A construction and improvement heuristic for a liquefied natural gas inventory routing problem. *Computers & Industrial Engineering*, 62(1), pp.245–255. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.09.011>.

van Goor, H. and Scholtens, B. (2014). Modeling natural gas price volatility: The case of the UK gas market. *Energy*, 72, pp.126–134. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.016>.

Papaleonidas, C., Lyridis, D.V., Papakostas, A. and Konstantinidis, D.A. (2020). An innovative decision support tool for liquefied natural gas supply chain planning. *Maritime Business Review*, 5(1), pp.121–136. doi:<https://doi.org/10.1108/mabr-09-2019-0036>.

Nikhalat-Jahromi, H., Bell, M.G.H., Fontes, D.B.M.M., Cochrane, R.A. and Angeloudis, P. (2016). Spot sale of uncommitted LNG from Middle East: Japan or the UK? *Energy Policy*, 96, pp.717–725. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.06.027>.

Anon, (2017). *ΔΕΣΦΑ Α.Ε.* |. [online] Available at: <https://www.desfa.gr/>.

Gastrade A.E. (n.d.). *Το Έργο.* [online] Available at: <https://www.gastrade.gr/to-ergo/> [Accessed 2 Oct. 2023].

FreightWaves. (2021). *More container ships score 'astronomical' \$100,000/day rates.* [online] Available: <https://www.freightwaves.com/news/more-container-ships-score-astronomical-100000day-rates>.

www.cmegroup.com. (n.d.). *LNG North West Europe Marker (Platts) Quotes - CME Group.* [online] Available at: <https://www.cmegroup.com/markets/energy/natural-gas/lng-north-west-europe-marker-platts.html#venue=globex>.

Μητσόπουλος, Α. (2023). *Χωροθέτηση σταθμών υγροποιημένου φυσικού αερίου μικρής κλίμακας, παρούσα κατάσταση και προοπτικές*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής.

www.iaee.org. (n.d.). *IAEE Online Conference Proceedings.* [online] Available at: <https://www.iaee.org/proceedings/conference/94> [Accessed 5 Jun. 2023]

Γεωργιάδης, Μ., Ελεκίδης, Α. & Γεωργιάδης, Γ. (2022). *Τεχνικές Βελτιστοποίησης Παραγωγής σε Βιομηχανίες Διεργασιών.*

Παράρτημα

Παράρτημα Α

Πίνακας Α.1: Δεδομένα Μελέτης Περίπτωσης Α

Όνομα πλοίου	Όγκος V_c (m ³)	Earliest Arrival Time [T ₁ , T ₂ , T ₃] EAT _c (χρονικά διαστήματα)	Latest Arrival Time [T ₁ , T ₂ , T ₃] LAT _c (χρονικά διαστήματα)	Τιμή ΥΦΑ (\$/m ³)	Αριθμός χρονικών διαστημάτων που απαιτούνται για την ναύλωση [T ₁ , T ₂ , T ₃] (χρονικά διαστήματα)
Sun-Arrows	19,100	[1,2,1]	[21,20,22]	208.82	[33,31,29]
SK-Stellar	138,375	[1,2,1]	[21,20,22]	196.08	[30,28,26]
Al-Oraiq	210,100	[1,2,1]	[21,20,22]	197.29	[42,40,38]
Al-Huwaila	217,000	[1,2,1]	[21,20,22]	192.24	[27,25,23]
TaitarNo3	147,366	[1,2,1]	[21,20,22]	205.94	[36,34,32]
Marib-Spirit	169,256	[1,2,1]	[21,20,22]	209.54	[36,34,32]
Heather	144,787	[1,2,1]	[21,20,22]	196.81	[42,40,38]
Sohar-LNG	138,375	[1,2,1]	[21,20,22]	204.01	[39,37,35]
TaitarNo2	147,500	[2,3,4]	[32,31,33]	202.09	[36,34,32]
Creole-Spirit	173,545	[2,3,4]	[32,31,33]	192.48	[30,28,26]
TaitarNo1	147,362	[2,3,4]	[32,31,33]	213.15	[27,25,23]
Al-Hamla	216,000	[2,3,4]	[32,31,33]	199.93	[42,40,38]
KFreesia	135,256	[2,3,4]	[32,31,33]	215.31	[36,34,32]
Spirit	166,130	[2,3,4]	[32,31,33]	211.46	[42,40,38]
Eurus	136,019	[2,3,4]	[32,31,33]	193.68	[27,25,23]
Al-Dafna	267,335	[2,3,4]	[32,31,33]	204.98	[33,31,29]
Fraiha	212,666	[17,16,18]	[38,37,39]	204.26	[42,40,38]

Πίνακας Α.1 (Συνέχεια)

Όνομα πλοίου	Όγκος V_c (m ³)	Earliest Arrival Time [T ₁ , T ₂ , T ₃] EAT _c (χρονικά διαστήματα)	Latest Arrival Time [T ₁ , T ₂ , T ₃] LAT _c (χρονικά διαστήματα)	Τιμή ΥΦΑ (\$/m ³)	Αριθμός χρονικών διαστημάτων που απαιτούνται για την ναύλωση [T ₁ , T ₂ , T ₃] (χρονικά διαστήματα)
Voyager	162,400	[18,17,19]	[49,48,50]	209.06	[45,43,41]
Oceanpia	135,000	[19,18,20]	[40,39,41]	206.66	[36,34,32]
Al-Amad	210,100	[20,19,21]	[41,40,42]	200.41	[36,34,32]
Magellan	168,049	[20,19,21]	[51,50,52]	210.50	[39,37,35]
Tessala	171,787	[21,20,22]	[52,51,53]	210.02	[36,34,32]
Emerald	154,983	[22,23,24]	[43,42,44]	213.39	[39,37,35]
Mozah	267,335	[23,22,24]	[44,43,45]	215.31	[42,40,38]
Murwab	200,398	[23,22,24]	[54,53,55]	210.98	[30,28,26]
Bu-Samra	267,335	[24,23,25]	[55,54,56]	204.26	[33,31,29]
Batur	145,700	[24,23,25]	[45,44,46]	208.34	[42,40,38]
GDF-Suez	162,400	[25,24,26]	[56,55,57]	200.65	[30,28,26]
Al-Aamriya	210,168	[32,31,33]	[53,52,54]	204.74	[39,37,35]
Al-Ruwais	210,100	[33,32,34]	[64,63,65]	201.61	[42,40,38]
Mokrani	74,365	[34,33,35]	[55,54,56]	209.30	[42,40,38]
Gaselys	154,983	[35,34,36]	[66,65,67]	207.38	[27,25,23]
Palung	155,642	[38,37,39]	[59,58,60]	197.77	[45,43,41]

Πίνακας Α.1 (Συνέχεια)

Όνομα πλοίου	Όγκος V_c (m^3)	Earliest Arrival Time [T_1, T_2, T_3] EAT _c (χρονικά διαστήματα)	Latest Arrival Time [T_1, T_2, T_3] LAT _c (χρονικά διαστήματα)	Τιμή ΥΦΑ ($\$/m^3$)	Αριθμός χρονικών διαστημάτων που απαιτούνται για την ναύλωση [T_1, T_2, T_3] (χρονικά διαστήματα)
Gallina	137,001	[39,38,40]	[70,69,71]	203.29	[39,37,35]
Aquapia	135,000	[40,39,41]	[61,60,62]	201.61	[45,43,41]
Soyo	162,400	[41,40,42]	[72,71,73]	199.45	[33,31,29]
SK-Splendor	138,375	[44,43,45]	[65,64,66]	214.59	[30,28,26]
Excalibur	138,200	[45,44,46]	[76,75,77]	210.98	[27,25,23]
Arrow	154,982	[46,45,47]	[67,66,68]	209.06	[42,40,38]
Santiago	157,535	[47,46,48]	[78,77,79]	196.08	[42,40,38]
Bu-Samra1	267,000	[48,47,49]	[69,68,70]	213.15	[30,28,26]
Al-Safliya	210,134	[49,48,50]	[80,70,81]	205.94	[42,40,38]
SK-Supreme	138,200	[51,50,52]	[72,71,73]	211.70	[45,43,41]
Hela	173,010	[52,51,53]	[83,82,84]	198.01	[42,40,38]
Seri-Balhaf	158,149	[54,53,55]	[75,74,76]	195.12	[27,25,23]
Al-Mayeda	267,335	[55,54,56]	[86,85,87]	197.53	[30,28,26]
Tessala1	171,800	[57,56,58]	[78,77,79]	194.88	[42,40,38]
BW-Paris	162,400	[58,57,59]	[89,88,90]	206.42	[30,28,26]

Πίνακας Α.1 (Συνέχεια)

Όνομα πλοίου	Όγκος V_c (m^3)	Earliest Arrival Time [T_1, T_2, T_3] EAT _c (χρονικά διαστήματα)	Latest Arrival Time [T_1, T_2, T_3] LAT _c (χρονικά διαστήματα)	Τιμή ΥΦΑ ($\$/m^3$)	Αριθμός χρονικών διαστημάτων που απαιτούνται για την ναύλωση [T_1, T_2, T_3] (χρονικά διαστήματα)
Triputra	23,096	[58,57,59]	[89,88,90]	204.26	[36,34,32]
Liberty	164,563	[58,57,59]	[89,88,90]	213.15	[39,37,35]
Al-Bahiya	207,111	[58,57,59]	[89,88,90]	198.25	[39,37,35]
Al-Shamal	219,573	[58,57,59]	[89,88,90]	204.98	[39,37,35]
Golar-Maria	145,700	[58,57,59]	[89,88,90]	202.81	[27,25,23]
Hanjin	138,200	[58,57,59]	[89,88,90]	194.64	[39,37,35]
Cygnus	147,200	[59,58,60]	[90,88,90]	194.64	[42,40,38]
Excalibur1	138,034	[60,59,61]	[81,80,82]	195.60	[30,28,26]
Breeze	147,608	[65,64,66]	[85,84,86]	202.57	[42,40,38]
Al-Khuwair	217,000	[66,65,67]	[87,86,88]	196.33	[27,25,23]
Al-Hamla1	216,000	[68,67,69]	[89,88,90]	214.59	[27,25,23]
Camellia	150,200	[69,68,70]	[89,88,90]	193.20	[45,43,41]

Πίνακας Α.2: : Ζήτηση ΥΦΑ ανά χρονικό διάστημα και σταθμό

Χρονικό διάστημα	Τερματικός σταθμός 1	Τερματικός σταθμός 2	Τερματικός σταθμός 3
1	15,680	10,704	7,914
2	15,829	10,806	7,990
3	15,979	10,908	8,065
4	16,128	11,010	8,140
5	16,277	11,012	8,216
6	16,426	11,214	8,291
7	16,575	11,316	8,366
8	16,725	11,417	8,441
9	16,874	11,519	8,517
10	17,023	11,621	8,592
11	17,172	11,723	8,667
12	17,321	11,825	8,743
13	17,470	11,927	8,818
14	17,620	12,029	8,893
15	17,769	12,130	8,969
16	17,918	12,232	9,044
17	18,067	12,334	9,119
18	18,216	12,436	9,194
19	18,366	12,538	9,270
20	18,515	12,640	9,345
21	18,664	12,741	9,420
22	18,813	12,843	9,496
23	18,962	12,945	9,571
24	19,112	13,047	9,646
25	19,261	13,149	9,721
26	19,410	13,251	9,797
27	19,599	13,353	9,872
28	19,708	13,454	9,947
29	19,857	13,556	10,023
30	20,007	13,658	10,098

Πίνακας Α.2 (Συνέχεια)

Χρονικό διάστημα	Τερματικός σταθμός 1	Τερματικός σταθμός 2	Τερματικός σταθμός 3
31	20,156	13,760	10,173
32	20,305	13,852	10,249
33	20,454	13,964	10,324
34	20,603	14,065	10,399
35	20,753	14,167	10,474
36	20,902	14,269	10,550
37	21,051	14,371	10,625
38	21,200	14,473	10,700
39	21,349	14,575	10,776
40	21,498	14,677	10,851
41	21,648	14,778	10,926
42	21,797	14,880	11,002
43	21,946	14,982	11,077
44	22,095	15,084	11,152
45	22,244	15,186	11,227
46	22,394	15,288	11,303
47	22,543	15,389	11,378
48	22,692	15,491	11,453
49	22,841	15,593	11,529
50	22,990	15,695	11,604
51	23,139	15,797	11,679
52	23,289	15,899	11,755
53	23,438	16,001	11,830
54	23,587	16,102	11,905
55	23,736	16,204	11,980
56	23,885	16,306	12,056
57	24,035	16,408	12,131

Πίνακας Α.2 (Συνέχεια)

Χρονικό διάστημα	Τερματικός σταθμός 1	Τερματικός σταθμός 2	Τερματικός σταθμός 3
58	24,184	16,510	12,206
59	24,333	16,612	12,282
60	24,482	16,713	12,357
61	24,631	16,815	12,432
62	24,780	16,917	12,508
63	24,930	17,019	12,583
64	25,079	17,121	12,658
65	25,228	17,223	12,733
66	25,377	17,324	12,809
67	25,526	17,426	12,884
68	25,676	17,528	12,959
69	25,825	17,630	13,035
70	25,974	17,732	13,110
71	26,123	17,834	13,185
72	26,272	17,936	13,260
73	26,422	18,037	13,336
74	26,571	18,139	13,411
75	26,720	18,241	13,486
76	26,869	18,343	13,562
77	27,018	18,445	13,637
78	27,167	18,547	13,712
79	27,317	18,658	13,788
80	27,466	18,750	13,863
81	27,615	18,852	13,938
82	27,764	18,954	14,013
83	27,913	19,056	14,089
84	28,063	19,158	14,164
85	28,212	19,260	14,239
86	28,361	19,361	14,315
87	28,510	19,463	14,390
88	28,659	19,565	14,465
89	28,808	19,667	14,541
90	28,958	19,769	14,616

Παράρτημα Β

Πίνακας Β.1: Τιμή ΥΦΑ της αγοράς άμεσης παράδοσης στα 27 σενάρια

Όνομα Πλοίου	Σενάρια (1, 4,7, 10,13,16,19,22,25)	Σενάρια (2,5,8,11,14,17,23,26)	Σενάρια 3 (3,6,9,12,15,18,24,27)
Disha	219	219	192
Aseem	219	219	192
Prachi	219	219	192
Raahi	219	219	192
Sun-Arrows	120	216	240
SK-Stellar	120.4	216	240.4
Al-Oraiq	120.8	216	240.8
Al-Huwaila	121.2	216	241.2
TaitarNo3	121.6	216	241.6
Marib-Spirit	122	216	242
Heather	122.4	216	242.4
Sohar-LNG	122.8	216	242.8
TaitarNo2	123.2	216	243.2
Creole-Spirit	123.6	216	243.6
TaitarNo1	124	216	244
Al-Hamla	124.4	216	244.4
KFreesia	124.8	216	244.8

Πίνακας Β.1 (Συνέχεια)

Όνομα Πλοίου	Σενάρια (1, 4,7, 10,13,16,19,22,25)	Σενάρια (2,5,8,11,14,17,23,26)	Σενάρια 3 (3,6,9,12,15,18,24,27)
Spirit	125.2	216	245.2
Eurus	125.6	216	245.6
Al-Dafna	126	216	246
Fraiha	126.4	216	246.4
Voyager	126.8	216	246.8
Oceanpia	127.2	216	247.2
Al-Amad	127.6	216	247.6
Magellan	128	216	248
Tessala	128.4	216	248.4
Emerald	128.8	216	248.8
Mozah	129.2	216	249.2
Murwab	129.6	216	249.6
Bu-Samra	130	216	250
Batur	130.4	216	250.4
GDF-Suez	130.8	216	250.8
Al-Aamriya	131.2	216	251.2
Al-Ruwais	131.6	216	251.6
Mokrani	132	216	252
Gaselys	132.4	216	252.4
Palung	132.8	216	252.8

Πίνακας Β.1 (Συνέχεια)

Όνομα Πλοίου	Σενάρια (1, 4,7, 10,13,16,19,22,25)	Σενάρια (2,5,8,11,14,17,23,26)	Σενάρια 3 (3,6,9,12,15,18,24,27)
Gallina	133.2	216	253.2
Aquaria	133.6	216	253.6
Soyo	134	216	254
SK-Splendor	134.4	216	254.4
Excalibur	134.8	216	254.8
Arrow	135.2	216	255.2
Santiago	135.6	216	255.6
Bu-Samral	136	216	256
Al-Safliya	136.4	216	256.4
SK-Supreme	136.8	216	256.8
Hela	137.2	216	257.2
Seri-Balhaf	137.6	216	257.6
Al-Mayeda	138	216	258
Tessala1	138.4	216	258.4
BW-Paris	138.8	216	258.8
Triputra	139.2	216	259.2
Liberty	139.6	216	259.6
Al-Bahiya	140	216	260
Al-Shamal	140.4	216	260.4

Πίνακας Β.1 (Συνέχεια)

Όνομα Πλοίου	Σενάρια (1, 4,7, 10,13,16,19,22,25)	Σενάρια (2,5,8,11,14,17,23,26)	Σενάρια 3 (3,6,9,12,15,18,24,27)
Golar-Maria	140.8	216	260.8
Hanjin	141.2	216	261.2
Cygnus	141.6	216	261.6
Excalibur1	142	216	262
Breeze	142.4	216	262.4
Al-Khuwair	142.8	216	262.8
Al-Hamla1	143.2	216	263.2
Camellia	143.6	216	263.6

Πίνακας Β.2: Τιμές ελάχιστου και μέγιστου προμηθευόμενου όγκου ανά σενάριο

	Ελάχιστος Προμηθευόμενος όγκος ΥΦΑ (m³)	Μέγιστος Προμηθευόμενος όγκος ΥΦΑ (m³)
Σενάρια (1, 4,7, 10,13,16,19,22,25)	207,129	345,215
Σενάρια (1, 4,7, 10,13,16,19,22,25)	666,416	1,110,693
Σενάρια (1, 4,7, 10,13,16,19,22,25)	1,116,697	1,861,162

Πίνακας Β.3: Αποτελέσματα σεναρίων 1-2-3

Μεταβλητή	Όνομα Πλοίου	Τερματικός σταθμός	Παραδοτέος Όγκος	Μεταβλητή	Όνομα Πλοίου	Τερματικός σταθμός	Παραδοτέος Όγκος	Μεταβλητή	Όνομα Πλοίου	Τερματικός σταθμός	Παραδοτέος Όγκος
X	Disha	T1	136026	X	Aseem	T1	155000	X	Disha	T1	272052
X	Raahi	T1	136026	X	Prachi	T2	173323	X	Al-Oraiq	T1	210100
X	SK-Stellar	T3	138375	X	Sun-Arrows	T2	19100	X	Al-Huwaila	T2	217000
X	Al-Oraiq	T1	210100	X	Al-Oraiq	T2	210100	X	KFreesia	T2	135256
X	Al-Huwaila	T2	217000	X	Al-Huwaila	T1	217000	X	Al-Dafna	T3	267335
X	Creole-Spirit	T3	173545	X	TaitarNo3	T3	147366	X	Murwab	T3	200398
X	TaitarNo1	T2	147362	X	Creole-Spirit	T3	173545	X	Bu-Samra	T1	267335
X	Bu-Samra	T1	267335	X	Al-Dafna	T1	267335	X	Gaselys	T1	154983
X	GDF-Suez	T3	162400	X	Gaselys	T3	154983	X	Bu-Samra1	T2	267000
X	Gaselys	T1	154983	X	Al-Mayeda	T1	267335	X			
X	Bu-Samra1	T2	267000	X	Al-Khuwair	T2	217000	X			

Πίνακας Β.4: Αποτελέσματα σεναρίων 4-5-6

Μεταβλητή	Όνομα Πλοίου	Τερματικός σταθμός	Παραδοτέος Όγκος	Μεταβλητή	Όνομα Πλοίου	Τερματικός σταθμός	Παραδοτέος Όγκος	Μεταβλητή	Όνομα Πλοίου	Τερματικός σταθμός	Παραδοτέος Όγκος
X	Disha	T1	408078	X	Disha	T1	272052	X	Disha	T1	272052
X	Aseem	T1	155000	X	Aseem	T1	465000	X	Disha	T2	136026
X	Raahi	T2	136026	X	Prachi	T1	173323	X	Aseem	T1	155000
X	SK-Stellar	T3	138375	X	Raahi	T2	136026	X	Aseem	T3	155000
X	Al-Huwaila	T2	217000	X	Al-Huwaila	T3	217000	X	Prachi	T1	346646
X	Creole-Spirit	T3	173545	X	Al-Dafna	T2	267335	X	Creole-Spirit	T3	173545
X	Murwab	T1	200398	X	Bu-Samra1	T3	267000	X	TaitarNo1	T2	147362
X	Bu-Samra	T2	267335	X	Al-Khuwair	T2	217000	X	Al-Dafna	T1	267335
X	Excalibur	T1	138200	X				X	Murwab	T2	200398
X	Seri-Balhaf	T3	158149	X				X	SK-Splendor	T3	138375

Πίνακας Β.5: Αποτελέσματα σεναρίων 7-8-9

Μεταβλητή	Όνομα Πλοίου	Τερματικός σταθμός	Παραδοτέος Όγκος	Μεταβλητή	Όνομα Πλοίου	Τερματικός σταθμός	Παραδοτέος Όγκος	Μεταβλητή	Όνομα Πλοίου	Τερματικός σταθμός	Παραδοτέος Όγκος
X	Disha	T1	272052	X	Disha	T1	136026	X	Disha	T1	136026
X	Disha	T2	136026	X	Disha	T3	136026	X	Disha	T2	136026
X	Aseem	T2	310000	X	Aseem	T1	155000	X	Disha	T3	136026
X	Prachi	T1	173323	X	Aseem	T2	310000	X	Aseem	T1	465000
X	Raahi	T3	272052	X	Prachi	T2	346646	X	Prachi	T1	346646
X	Al-Huwaila	T3	217000	X	Prachi	T3	346646	X	Prachi	T2	173323
X	Creole-Spirit	T2	173545	X	Raahi	T1	136026	X	Raahi	T1	136026
X	Al-Dafna	T1	267335	X	Raahi	T2	272052	X	Raahi	T2	136026
X	Murwab	T1	200398	X	Murwab	T1	200398	X	Raahi	T3	136026
								X	Murwab	T3	200398

Πίνακας Β.6: Αποτελέσματα σεναρίων 10-11-12

Μεταβλητή	Όνομα πλοίου	Τερματικός σταθμός	Παραδοτέος όγκος	Μεταβλητή	Όνομα πλοίου	Τερματικός σταθμός	Παραδοτέος όγκος	Μεταβλητή	Όνομα πλοίου	Τερματικός σταθμός	Παραδοτέος όγκος
X	Disha	T3	136026	X	Aseem	T1	155000	X	Aseem	T1	155000
X	Raahi	T2	136026	X	Prachi	T1	173323	X	Prachi	T2	173323
X	SK-Stellar	T3	138375	X	Al-Huwaila	T2	217000	X	Sun-Arrows	T2	19100
X	Al-Huwaila	T1	217000	X	Creole-Spirit	T3	173545	X	SK-Stellar	T1	138375
X	TaitarNo3	T1	147366	X	Al-Dafna	T1	267335	X	Al-Oraiq	T3	210100
X	Marib-Spirit	T2	169256	X	Al-Amad	T2	210100	X	Al-Huwaila	T1	217000
X	Creole-Spirit	T2	173545	X	Murwab	T3	200398	X	Marib-SpiriT	T2	169256
X	TaitarNo1	T2	147362	X	Bu-Samra	T1	267335	X	Creole-SpiriT	T2	173545
X	Al-Dafna	T1	267335	X	Gaselys	T3	154983	X	TaitarNo1	T3	147362
X	Magellan	T3	168049	X	Excalibur	T3	138200	X	Al-Dafna	T1	267335
X	Murwab	T3	200398	X	Bu-Samra1	T2	267000	X	Al-Amad	T2	210100
X	Bu-Samra	T1	267335	X	Al-Mayeda	T1	267335	X	Murwab	T3	200398
X	Gaselys	T1	154983	X	Al-Khuwair	T1	217000	X	Bu-Samra	T1	267335
X	Bu-Samra1	T2	267000	X	Al-Hamla1	T2	216000	X	GDF-Suez	T2	162400
X	Al-Mayeda	T1	267335	X				X	Excalibur	T3	138200
X	Triputra	T3	23096	X				X	Al-Mayeda	T1	267335

Πίνακας Β.7: Αποτελέσματα σεναρίων 13-14-15

Μεταβλητή	Όνομα πλοίου	Τερματικός σταθμός	Παραδοτέος όγκος	Μεταβλητή	Όνομα πλοίου	Τερματικός σταθμός	Παραδοτέος όγκος	Μεταβλητή	Όνομα πλοίου	Τερματικός σταθμός	Παραδοτέος όγκος
X	Disha	T1	136026	X	Disha	T1	136026	X	Disha	T1	136026
X	Disha	T2	136026	X	Disha	T2	272052	X	Disha	T3	136026
X	Aseem	T2	155000	X	Prachi	T1	173323	X	Prachi	T1	173323
X	Raahi	T1	272052	X	Prachi	T3	173323	X	Prachi	T2	173323
X	SK-Stellar	T3	138375	X	Raahi	T1	136026	X	Raahi	T2	136026
X	Al-Oraiq	T2	210100	X	Al-Huwaila	T1	217000	X	SK-Stellar	T2	138375
X	Al-Huwaila	T1	217000	X	Al-Dafna	T3	267335	X	Al-Oraiq	T1	210100
X	TaitarNo3	T1	147366	X	Murwab	T2	200398	X	Marib-Spirit	T3	169256
X	TaitarNo1	T3	147362	X	Mokrani	T3	74365	X	Creole-Spirit	T3	173545
X	Eurus	T2	136019	X	Gaselys	T3	154983	X	TaitarNo1	T2	147362
X	Al-Dafna	T1	267335	X	Excalibur	T2	138200	X	Al-Dafna	T1	267335
X	Murwab	T3	200398	X	Bu-Samra1	T1	267000	X	Murwab	T3	200398
X	Bu-Samra	T2	267335	X	Al-Mayeda	T2	267335	X	Bu-Samra	T1	267335
X	Al-Saffiya	T3	210134	X	Triputra	T1	23096	X	Bu-Samra	T1	267335
X	Al-Mayeda	T1	267335	X	Al-Hamla1	T1	216000	X	Al-Mayeda	T1	267335

Πίνακας Β.8: Αποτελέσματα σεναρίων 16-17-18

Μεταβλητή	Όνομα πλοίου	Τερματικός σταθμός	Παραδοτέος όγκος	Μεταβλητή	Όνομα πλοίου	Τερματικός σταθμός	Παραδοτέος όγκος	Μεταβλητή	Όνομα πλοίου	Τερματικός σταθμός	Παραδοτέος όγκος
X	Disha	T2	136026	X	Disha	T1	136026	X	Disha	T2	272052
X	Disha	T3	136026	X	Disha	T3	272052	X	Aseem	T1	310000
X	Aseem	T1	155000	X	Aseem	T1	155000	X	Aseem	T3	310000
X	Aseem	T2	155000	X	Aseem	T3	155000	X	Prachi	T1	519969
X	Prachi	T1	173323	X	Prachi	T1	173323	X	Raahi	T2	272052
X	Prachi	T3	173323	X	Prachi	T2	346646	X	Raahi	T3	136026
X	Raahi	T1	272052	X	Raahi	T1	272052	X	SK-Stellar	T3	138375
X	SK-Stellar	T2	138375	X	Al-Huwaila	T3	217000	X	Al-Huwaila	T2	217000
X	Al-Oraiq	T3	210100	X	GDF-Suez	T1	162400	X	Al-Dafna	T2	267335
X	Al-Huwaila	T2	217000	X	SK-Splendor	T1	138375	X	GDF-Suez	T1	162400
X	Creole-Spirit	T1	173545	X	Excalibur	T2	138200	X	Aquapia	T3	135000
X	TaitarNo1	T3	147362	X	Santiago	T2	157535	X	Seri-Balhaf	T1	158149
X	Al-Dafna	T1	267335	X	Bu-Samra1	T2	267000				
X	Bu-Samra	T2	267335	X	Al-Mayeda	T1	267335				
X	Al-Mayeda	T1	267335	X	Triputra	T3	23096				

Πίνακας Β.9: Αποτελέσματα σεναρίων 19-20-21

Μεταβλητή	Όνομα πλοίου	Τερματικός σταθμός	Παραδοτέος όγκος	Μεταβλητή	Όνομα πλοίου	Τερματικός σταθμός	Παραδοτέος όγκος	Μεταβλητή	Όνομα πλοίου	Τερματικός σταθμός	Παραδοτέος όγκος
X	Disha	T2	136026	X	Aseem	T1	155000	X	Aseem	T1	155000
X	Raahi	T3	136026	X	Prachi	T1	173323	X	Prachi	T2	173323
X	SK-STellar	T3	138375	X	SK-Stellar	T2	138375	X	SK-Stellar	T3	138375
X	Al-Oraiq	T2	210100	X	Al-Huwaila	T2	217000	X	Al-Oraiq	T2	210100
X	Al-Huwaila	T1	217000	X	Creole-Spirit	T3	173545	X	Al-Huwaila	T3	217000
X	Creole-Spirit	T2	173545	X	TaitarNo1	T3	147362	X	Marib-Spirit	T2	169256
X	TaitarNo1	T3	147362	X	Al-Dafna	T1	267335	X	Creole-Spirit	T2	173545
X	Al-Hamla	T1	216000	X	Al-Amad	T1	210100	X	TaitarNo1	T3	147362
X	KFreesia	T2	135256	X	Murwab	T2	200398	X	Al-Dafna	T1	267335
X	Eurus	T3	136019	X	Bu-Samra	T1	267335	X	Fraiha	T1	212666
X	Al-Dafna	T1	267335	X	GDF-Suez	T2	162400	X	Al-Amad	T1	210100
X	Mozah	T1	267335	X	Gaselys	T3	154983	X	Tessala	T1	171787
X	Murwab	T2	200398	X	Excalibur	T3	138200	X	Murwab	T2	200398
X	Bu-Samra	T1	267335	X	Bu-Samra1	T1	267000	X	Bu-Samra	T1	267335
X	GDF-Suez	T3	162400	X	Seri-Balhaf	T3	158149	X	GDF-Suez	T3	162400
X	Gaselys	T2	154983	X	Al-Mayeda	T1	267335	X	Gaselys	T3	154983
X	Gallina	T3	137001	X	BW-Paris	T2	162400	X	SK-Splendor	T1	138375
X	SK-Splendor	T1	138375	X	Al-Bahiya	T3	207111	X	Arrow	T2	154982
X	Excalibur	T2	138200	X	Al-Shamal	T2	219573	X	Bu-Samra1	T1	267000
X	Arrow	T2	154982	X	Excalibur1	T1	138034	X	Al-Mayeda	T2	267335
X	Bu-Samra1	T1	267000	X	Al-Khuwair	T2	217000	X	Al-Khuwair	T1	217000
X	Al-Mayeda	T1	267335	X	Al-Hamla1	T1	216000	X	Camellia	T3	150200
X	Camellia	T3	150200								

Πίνακας Β.10: Αποτελέσματα σεναρίων 22-23-24

Μεταβλητή	Όνομα πλοίου	Τερματικός σταθμός	Παραδοτέος όγκος	Μεταβλητή	Όνομα πλοίου	Τερματικός σταθμός	Παραδοτέος όγκος	Μεταβλητή	Όνομα πλοίου	Τερματικός σταθμός	Παραδοτέος όγκος
X	Disha	T1	136026	X	Disha	T1	272052	X	Disha	T1	136026
X	Disha	T2	136026	X	Aseem	T1	465000	X	Aseem	T1	155000
X	Raahi	T1	136026	X	Prachi	T1	173323	X	Aseem	T2	310000
X	Raahi	T2	272052	X	Raahi	T1	136026	X	Prachi	T1	346646
X	Al-Oraiq	T1	210100	X	Al-Oraiq	T3	210100	X	SK-Stellar	T3	138375
X	Al-Huwaila	T2	217000	X	Al-Huwaila	T1	217000	X	Al-Oraiq	T1	210100
X	Creole-Spirit	T3	173545	X	Eurus	T1	136019	X	Al-Huwaila	T2	217000
X	TaitarNo1	T3	147362	X	Al-Dafna	T2	267335	X	Creole-Spirit	T2	173545
X	Al-Dafna	T1	267335	X	Mozah	T2	267335	X	TaitarNo1	T3	147362
X	Frailha	T1	212666	X	Murwab	T2	200398	X	Spirit	T2	166130
X	Al-Amad	T2	210100	X	Bu-Samra	T1	267335	X	Eurus	T3	136019
X	Magellan	T3	168049	X	GDF-Suez	T3	162400	X	Al-Dafna	T1	267335
X	Tessala	T3	171787	X	Gaselys	T3	154983	X	Mozah	T1	267335
X	Murwab	T2	200398	X	Bu-Samra1	T3	267000	X	Murwab	T3	200398
X	Bu-Samra	T1	267335	X	Seri-Balhaf	T2	158149	X	Bu-Samra	T1	267335
X	Batur	T1	145700	X	Al-Mayeda	T1	267335	X	Gallina	T3	137001
X	Gaselys	T3	154983	X	Al-Shamal	T3	219573	X	Bu-Samra1	T2	267000
X	Excalibur	T2	138200	X	Al-Khuwair	T2	217000	X	Al-Mayeda	T1	267335
X	Bu-Samra1	T2	267000	X	Al-Hamla1	T2	216000	X	Triputra	T2	23096
X	Seri-Balhaf	T3	158149					X	Al-Shamal	T3	219573
X	Al-Mayeda	T1	267335					X	Cygnus	T2	147200
X	Hanjin	T1	138200								

Πίνακας Β.11: Αποτελέσματα σεναρίων 25-26-27

Μεταβλητή	Όνομα πλοίου	Τερματικός σταθμός	Παραδοτέος όγκος	Μεταβλητή	Όνομα πλοίου	Τερματικός σταθμός	Παραδοτέος όγκος	Μεταβλητή	Όνομα πλοίου	Τερματικός σταθμός	Παραδοτέος όγκος
X	Disha	T1	136026	X	Disha	T1	136026	X	Disha	T1	136026
X	Aseem	T1	310000	X	Disha	T2	272052	X	Disha	T2	136026
X	Aseem	T3	155000	X	Aseem	T1	310000	X	Aseem	T1	310000
X	Prachi	T1	519969	X	Prachi	T1	519969	X	Aseem	T2	155000
X	Al-Oraiq	T2	210100	X	Raahi	T1	136036	X	Prachi	T1	173323
X	Al-Huwaila	T2	217000	X	Raahi	T2	136026	X	Prachi	T2	346646
X	Marib-Spirit	T3	169256	X	Raahi	T3	136026	X	Raahi	T1	272052
X	Creole-Spirit	T3	173545	X	SK-Stellar	T3	138375	X	Raahi	T3	272052
X	Al-Hamla	T1	216000	X	Al-Oraiq	T3	210100	X	SK-Stellar	T3	138375
X	Al-Amad	T2	210100	X	Creole-Spirit	T2	173545	X	Al-Oraiq	T3	210100
X	Tessala	T1	171787	X	Spirit	T2	166130	X	Al-Huwaila	T2	217000
X	Mozah	T1	267335	X	Al-Amad	T2	210100	X	TaitarNo1	T3	147362
X	Murwab	T3	200398	X	Bu-Samra	T1	267335	X	Spirit	T2	166130
X	Bu-Samra	T2	267335	X	Gaselys	T3	154983	X	Magellan	T2	168049
X	Gaselys	T3	154983	X	Gallina	T3	137001	X	Tessala	T1	171787
X	Excalibur	T2	138200	X	Bu-Samra1	T2	267000	X	Murwab	T3	200398
X	Bu-Samra1	T2	267000	X	Al-Mayeda	T1	267335	X	Gaselys	T2	154983
X	Al-Mayeda	T1	267335	X	BW-Paris	T1	162400	X	Excalibur	T2	138200
X	BW-Paris	T3	162400	X	Al-Khuwair	T2	217000	X	Bu-Samra1	T1	267000
X	Triputra	T1	23096	X	Al-Hamla1	T3	216000	X	Al-Mayeda	T1	267335
								X	Camellia	T3	150200

Παράρτημα Γ

Πίνακας Γ.1: Δεδομένα της μελέτης περίπτωσης της Ελλάδας

Όνομα πλοίου	Όγκος V_c (m ³)	Earliest Arrival Time [Ρεβυθούσα, Αλεξανδρούπολη] EAT _c (χρονικά διαστήματα)	Latest Arrival Time [Ρεβυθούσα, Αλεξανδρούπολη] LAT _c (χρονικά διαστήματα)	Τιμή ΥΦΑ (\$/m ³)	Αριθμός χρονικών διαστημάτων που απαιτούνται για την ναύλωση [T ₁ , T ₂ , T ₃] (χρονικά διαστήματα)
Seapeak-meridian	140,000	[1,2]	[8,9]	206	[7,8]
Flex-Volunteer	140,000	[1,2]	[8,9]	206	[21,22]
Cheikh-El-Mokrani	70,000	[2,3]	[9,10]	206	[10,11]
Lng-Alliance	140,000	[2,3]	[9,10]	206	[21,22]
Pskov	170,000	[2,3]	[9,10]	206	[13,14]
Minerva-Limnos	170,000	[3,4]	[10,11]	206	[1,2]
Lng-Enterprise	170,000	[3,4]	[10,11]	206	[3,4]
Cheikh-Bouamama	70,000	[3,4]	[10,11]	206	[11,12]
La-Seine	170,000	[4,9]	[11,16]	206	[1,2]
Global-Energy	170,000	[4,9]	[11,16]	206	[20,21]
Diamond-Gas-Sakura	170,000	[4,9]	[11,16]	206	[18,19]
Seapeak-Marib	170,000	[5,14]	[12,21]	206	[20,21]
Seapeakarwa	170,000	[5,14]	[12,21]	206	[20,21]
Gaslog-Seattle	140,000	[5,14]	[12,21]	206	[10,11]

Πίνακας Γ.1 (Συνέχεια)

Όνομα πλοίου	Όγκος V_c (m^3)	Earliest Arrival Time [Ρεβυθούσα, Αλεξανδρούπολη] EAT_c (χρονικά διαστήματα)	Latest Arrival Time [Ρεβυθούσα, Αλεξανδρούπολη] LAT_c (χρονικά διαστήματα)	Τιμή ΥΦΑ ($\$/m^3$)	Αριθμός χρονικών διαστημάτων που απαιτούνται για την ναύλωση [T_1, T_2, T_3] (χρονικά διαστήματα)
Bw-Pavilionaranthera	170,000	[6,16]	[13,23]	206	[18,19]
Sk-Resolute	170,000	[6,16]	[13,23]	206	[15,16]
Cheikh-Mokrani	70,000	[6,16]	[13,23]	206	[14,15]
Gaslog-Hong-Kong	170,000	[7,20]	[14,27]	206	[10,11]
Seapeak-Madrid	140,000	[7,20]	[14,27]	206	[5,6]
Lng-Fukurokuju	170,000	[8,20]	[15,27]	206	[14,15]
Cape-Ann	140,000	-	-	206	[4,5]
Lalla-Fatmansoumer	140,000	-	-	206	[4,5]
Lng-Bonny-II	170,000	-	-	206	[4,5]
Velikiy-Novgorod	170,000	-	-	206	[4,5]

Πίνακας Γ.2: Ζήτηση ΥΦΑ (m³) ανα χρονικό διάστημα στους 2 τερματικούς σταθμούς

Χρονικό Διάστημα	Ρεβυθούσα	Αλεξανδρούπολη
1	25,600	25,600
2	25,600	25,600
3	25,600	25,600
4	25,600	25,600
5	25,600	25,600
6	25,600	25,600
7	25,600	25,600
8	25,600	25,600
9	25,600	25,600
10	25,600	25,600
11	25,600	25,600
12	25,600	25,600
13	25,600	25,600
14	25,600	25,600
15	25,600	25,600
16	25,600	25,600
17	25,600	25,600
18	25,600	25,600
19	25,600	25,600
20	25,600	25,600
21	25,600	25,600
22	25,600	25,600
23	25,600	25,600

Πίνακας Γ.2 (Συνέχεια)

Χρονικό Διάστημα	Ρεβυθούσα	Αλεξανδρούπολη
24	25,600	25,600
25	25,600	25,600
26	25,600	25,600
27	25,600	25,600
28	25,600	25,600
29	25,600	25,600
30	25,600	25,600

Πίνακας Γ.3: Αποτελέσματα σεναρίων 1-2-3 ($S_{\max, \text{Αλεξ.}} < S_{\max, \text{Ρεβ.}}$)

Μεταβλητή	Όνομα Πλοίου	Τερματικός σταθμός	Παραδοτέος όγκος	Μεταβλητή	Όνομα Πλοίου	Τερματικός σταθμός	Παραδοτέος όγκος	Μεταβλητή	Όνομα Πλοίου	Τερματικός σταθμός	Παραδοτέος όγκος
X	Seapeak-Meridian	Αλεξανδρούπολη	140000	X	Cheikh-El-Mokrani	Αλεξανδρούπολη	70000	X	Cheikh-El-Mokrani	Αλεξανδρούπολη	70000
X	Flex-Volunteer	Ρεβθούσα	140000	X	Lalla-Fatmansoumer	Αλεξανδρούπολη	280000	X	Lalla-Fatmansoumer	Αλεξανδρούπολη	140000
X	Cheikh-El-Mokrani	Ρεβθούσα	70000	X	Minerva-Limnos	Ρεβθούσα	170000	X	Lalla-Fatmansoumer	Ρεβθούσα	140000
X	Lalla-Fatmansoumer	Αλεξανδρούπολη	140000	X	La-Seine	Ρεβθούσα	170000	X	Minerva-Limnos	Ρεβθούσα	170000
X	Cheikh-Bouamama	Αλεξανδρούπολη	70000	X	Cheikh-Mokrani	Ρεβθούσα	70000	X	Cheikh-Bouamama	Ρεβθούσα	70000
X	La-Seine	Ρεβθούσα	170000	X	Velikiy-Novgorod	Ρεβθούσα	170000	X	Lng-Bonny-II	Ρεβθούσα	170000
X	Lng-Bonny-II	Ρεβθούσα	170000	X	Gaslog-Seattle	Αλεξανδρούπολη	140000	X	Velikiy-Novgorod	Ρεβθούσα	170000
X	Velikiy-Novgorod	Ρεβθούσα	170000	X	Cape-Ann	Αλεξανδρούπολη	140000	X	Gaslog-Seattle	Αλεξανδρούπολη	140000
X	Gaslog-Seattle	Αλεξανδρούπολη	140000	X	Cape-Ann	Ρεβθούσα	140000	X	Cape-Ann	Αλεξανδρούπολη	140000
X	Cape-Ann	Αλεξανδρούπολη	140000	X	Seapeak-Madrid	Αλεξανδρούπολη	140000	X	Cape-Ann	Αλεξανδρούπολη	140000
X	Seapeak-Madrid	Αλεξανδρούπολη	140000	X	Seapeak-Madrid	Αλεξανδρούπολη	140000	X	Seapeak-Madrid	Αλεξανδρούπολη	140000

Πίνακας Γ.4: Αποτελέσματα σεναρίων 4-5-6 ($S_{\max, \text{Αλεξ.}} = S_{\max, \text{Ρεβ.}}$)

Μεταβλητή	Όνομα Πλοίου	Τερματικός σταθμός	Παραδοτέος όγκος	Μεταβλητή	Όνομα Πλοίου	Τερματικός σταθμός	Παραδοτέος όγκος	Μεταβλητή	Όνομα Πλοίου	Τερματικός σταθμός	Παραδοτέος όγκος
X	Seapeak-Meridian	Αλεξανδρούπολη	140000	X	Seapeak-Meridian	Αλεξανδρούπολη	140000	X	Seapeak-Meridian	Αλεξανδρούπολη	140000
X	Flex-Volunteer	Αλεξανδρούπολη	140000	X	Cheikh-El-Mokrani	Ρεβθούσα	70000	X	Cheikh-El-Mokrani	Ρεβθούσα	70000
X	Cheikh-El-Mokrani	Ρεβθούσα	70000	X	Lalla-Fatmansoumer	Αλεξανδρούπολη	140000	X	Lalla-Fatmansoumer	Αλεξανδρούπολη	140000
X	Lalla-Fatmansoumer	Αλεξανδρούπολη	140000	X	Lalla-Fatmansoumer	Αλεξανδρούπολη	140000	X	Lalla-Fatmansoumer	Αλεξανδρούπολη	140000
X	Minerva-Limnos	Ρεβθούσα	170000	X	Minerva-Limnos	Ρεβθούσα	170000	X	Minerva-Limnos	Ρεβθούσα	170000
X	Lng-Bonny-II	Ρεβθούσα	170000	X	Lng-Bonny-II	Ρεβθούσα	170000	X	Lng-Bonny-II	Ρεβθούσα	170000
X	Velikiy-Novgorod	Ρεβθούσα	170000	X	Velikiy-Novgorod	Ρεβθούσα	170000	X	Velikiy-Novgorod	Ρεβθούσα	170000
X	Gaslog-Seattle	Αλεξανδρούπολη	140000	X	Cape-Ann	Ρεβθούσα	140000	X	Cape-Ann	Αλεξανδρούπολη	140000
X	Cape-Ann	Ρεβθούσα	140000	X	Seapeak-Madrid	Αλεξανδρούπολη	140000	X	Cape-Ann	Αλεξανδρούπολη	140000
X	Seapeak-Madrid	Αλεξανδρούπολη	140000	X	Seapeak-Madrid	Αλεξανδρούπολη	140000	X	Seapeak-Madrid	Ρεβθούσα	140000

Πίνακας Γ.5: Αποτελέσματα σεναρίων 7-8-9 ($S_{\max, \text{Αλεξ.}} = 2 \cdot S_{\max, \text{Ρεβ.}}$)

Μεταβλητή	Όνομα Πλοίου	Τερματικός Σταθμός	Παραδοτέος όγκος	Μεταβλητή	Όνομα Πλοίου	Τερματικός Σταθμός	Παραδοτέος όγκος
X	Cheikh-el-Mokrani	Ρεβυθούσα	70000	X	Seapeak-Meridian	Ρεβυθούσα	140000
X	Minerva-Limnos	Αλεξανδρούπολη	170000	X	Minerva-Limnos	Αλεξανδρούπολη	170000
X	Lng-Bonny-II	Αλεξανδρούπολη	170000	X	Lng-Bonny-II	Αλεξανδρούπολη	170000
X	Lng-Bonny-II	Ρεβυθούσα	170000	X	Velikiy-Novgorod	Αλεξανδρούπολη	170000
X	Velikiy-Novgorod	Ρεβυθούσα	170000	X	Cape-Ann	Ρεβυθούσα	280000
X	Cape-Ann	Ρεβυθούσα	280000	X	Lalla-Fatmansoumer	Ρεβυθούσα	140000
X	Pskov	Ρεβυθούσα	170000	X	Lng-Enterprise	Αλεξανδρούπολη	170000
X	Lng-Enterprise	Αλεξανδρούπολη	170000	X	La-Seine	Ρεβυθούσα	170000
X	La-Seine	Αλεξανδρούπολη	170000				

Μεταβλητή	Όνομα Πλοίου	Τερματικός Σταθμός	Παραδοτέος όγκος
X	Cheiki-el-Mokrani	Ρεβυθούσα	70000
X	Minerva-Limnos	Αλεξανδρούπολη	170000
X	Lng-Bonny-II	Αλεξανδρούπολη	170000
X	Velikiy-Novgorod	Αλεξανδρούπολη	170000
X	Cape-Ann	Ρεβυθούσα	280000
X	Cheiki-Mokrani	Ρεβυθούσα	70000
X	Lng-Enterprise	Αλεξανδρούπολη	170000
X	La-Seine	Αλεξανδρούπολη	170000
X	Lalla-Fatmansoumer	Ρεβυθούσα	280000

Πίνακας Γ.6: Αποτελέσματα σεναρίου 10 (τετραπλασιασμός ζήτησης)

Μεταβλητή	Όνομα Πλοίου	Τερματικός Σταθμός	Παραδοτέος όγκος
X	Seapeak-Meridian	Αλεξανδρούπολη	140000
X	Flex-Volunteer	Αλεξανδρούπολη	140000
X	Cheikh-El-Mokrani	Αλεξανδρούπολη	70000
X	Lng-Alliance	Αλεξανδρούπολη	140000
X	Pskov	Αλεξανδρούπολη	170000
X	Lalla-Fatmansoumer	Αλεξανδρούπολη	280000
X	Minerva-Limnos	Αλεξανδρούπολη	170000
X	Lng-Enterprise	Αλεξανδρούπολη	170000
X	Cheikh-Bouamama	Ρεβυθούσα	70000
X	La-Seine	Αλεξανδρούπολη	170000
X	Lng-Bonny-II	Αλεξανδρούπολη	170000
X	Global-Energy	Αλεξανδρούπολη	170000
X	Diamond-Gas-Sakura	Αλεξανδρούπολη	170000
X	Seapeak-Marib	Αλεξανδρούπολη	170000
X	Seapeakarwa	Αλεξανδρούπολη	170000
X	Velikiy-Novgorod	Ρεβυθούσα	170000
X	Gaslog-Seattle	Αλεξανδρούπολη	140000
X	Bw-Pavilionarathera	Αλεξανδρούπολη	170000
X	Sk-Resolute	Αλεξανδρούπολη	170000
X	Cheikh-Mokrani	Ρεβυθούσα	70000
X	Gaslog-Hong-Kong	Αλεξανδρούπολη	170000
X	Cape-Ann	Ρεβυθούσα	280000
X	Seapeak-Madrid	Ρεβυθούσα	140000
X	Lng-Fukurokuju	Αλεξανδρούπολη	170000