



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

Εισαγωγή Αβεβαιότητας στη Βελτιστοποίηση Βασικών Χαρακτηριστικών Πλοίου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τιμολέων Πλέσσας

Επιβλέπων: Απόστολος Δ. Παπανικολάου
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

Εισαγωγή Αβεβαιότητας στη Βελτιστοποίηση Βασικών Χαρακτηριστικών Πλοίου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τιμολέων Πλέσσας

Επιβλέπων: Απόστολος Δ. Παπανικολάου
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή:

.....
Απ. Δ. Παπανικολάου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Γ. Ζαραφωνίτης
Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Α. Γκίνης
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Τιμολέων Πλέσσας

Διπλωματούχος Ναυπηγός Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Copyright © Τιμολέων Πλέσσας 2012.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται ένα μοντέλο πλοίου τύπου Bulk Carrier το οποίο με δεδομένα έξι βασικά χαρακτηριστικά του πλοίου (μήκος, πλάτος, κοίλο, βύθισμα, συντελεστή γάστρας και ταχύτητα) δίνει μια εκτίμηση όλων των βασικών τεχνοοικονομικών μεγεθών που χρειάζονται για την αξιολόγηση μιας επένδυσης που συμπεριλαμβάνει την αγορά και την χρήση ενός πλοίου για ένα δεδομένο χρονικό διάστημα, στα αρχικά στάδια της σχεδίασης ενός πλοίου. Με χρήση αυτού του μοντέλου, ελέγχεται πως επηρεάζει η αβεβαιότητα που υπάρχει ως προς το τελικό αποτέλεσμα κάποιων στοιχείων των οποίων έχει γίνει μια αρχική εκτίμηση (π.χ. κόστος πλοίου) και γενικότερα η αβεβαιότητα σε διάφορες παραμέτρους (π.χ. μήκος διαδρομής ταξιδιού, το οποίο είναι πιθανό να αλλάξει κατά την διάρκεια της ζωής του πλοίου) την βελτιστοποίηση των έξι προαναφερθέντων μεταβλητών στα αρχικά στάδια της σχεδίασης ενός πλοίου τύπου Bulk Carrier. Γίνεται δηλαδή μία στοχαστική βελτιστοποίηση των κύριων διαστάσεων, του συντελεστή γάστρας και της ταχύτητας του πλοίου. Στη συνέχεια, διερευνούνται τα οφέλη μιας τέτοιας σχεδίασης έναντι μίας σχεδίασης που προέκυψε από ντετερμινιστική βελτιστοποίηση, στην οποία δεν λαμβάνεται υπ' όψιν τυχόν απόκλιση των μεγεθών που καθορίζονται ή υπολογίζονται στο μοντέλο. Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η σχεδίαση ενός πλοίου, του οποίου τα κέρδη είναι λιγότερο επιρρεπή στις μεταβολές των αβέβαιων μεταβλητών.

ABSTRACT

In this diploma thesis a bulk carrier model is used in order to define some technical and economical elements that are important for the evaluation of an investment that includes the purchase and usage of a ship for a specific period of time. Those elements are calculated by using six basic characteristics of the ship: Length, Breadth, Depth, Draft, Speed and block coefficient. With this model, an attempt is made to investigate how uncertain factors (ship cost, round trip miles etc.) once included in the estimations made at an early stage of the ship design, can affect the result of an optimization of these six parameters, primarily based on economic criteria. This stochastic optimization is compared with deterministic solutions in order to evaluate its benefits. The aim of this thesis is the design of a ship whose profit is more robust when the uncertain variables differ from their estimated values.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Αντικείμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η βελτιστοποίηση των κύριων διαστάσεων του πλοίου (μήκος, πλάτος, κοίλο, βύθισμα), του συντελεστή γάστρας και της ταχύτητας, λαμβάνοντας υπ' όψιν την αβεβαιότητα που υπάρχει σε μεγέθη που εκτιμούνται κατά τα αρχικά στάδια της σχεδίασης ενός πλοίου. Γι αυτό τον λόγο, αναπτύσσεται μία μέθοδος στοχαστικής βελτιστοποίησης, η οποία στη συνέχεια συγκρίνεται με τα αποτελέσματα μίας αντίστοιχης ντετερμινιστικής.

Σε γενικές γραμμές, κατά την μελέτη και σχεδίαση ενός πλοίου απαιτείται μια σχεδίαση η οποία να προσφέρει το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα με το μικρότερο δυνατό κόστος, ικανοποιώντας πάντα κάποιους αναγκαίους περιορισμούς. Δυστυχώς, η εμπειρία και η ικανότητα του μελετητή δεν είναι αρκετή από μόνη της για να καθορίσει το βέλτιστο αποτέλεσμα, μιας και στα προβλήματα βελτιστοποίησης υπεισέρχονται συχνά πάρα πολλοί παράγοντες, οι οποίοι είναι σχεδόν αδύνατο να ληφθούν υπ' όψιν χωρίς τη βοήθεια μιας μεθόδου βελτιστοποίησης.

Η χρήση μεθόδων βελτιστοποίησης οδηγεί σε μία συγκεκριμένη βέλτιστη λύση η οποία ελαχιστοποιεί (ή μεγιστοποιεί) μια αντικειμενική συνάρτηση, ικανοποιώντας κάποιους περιορισμούς. Όμως στην πράξη πολλές μεταβλητές και παράμετροι περιέχουν το στοιχείο της αβεβαιότητας. Είναι πιθανό κατά την κατασκευή ενός πλοίου πολλά μεγέθη του να έχουν αποκλίσεις από αυτά που είχαν αρχικά εκτιμηθεί. Επίσης, κάποια οικονομικά στοιχεία ή στοιχεία για την λειτουργία του πλοίου που τυχόν να είχαν ληφθεί υπ' όψιν κατά την αξιολόγηση της επένδυσης μπορεί επίσης να διαφέρουν από αυτά που είχαν εκτιμηθεί. Για παράδειγμα, ακόμη και αν οι 'καλύτερες εκτιμήσεις' ως προς πέντε από τα μεγέθη που υπολογίζονται ή προβλέπονται στην ανάλυση, έχουν από 60% πιθανότητα πραγματοποίησης το καθένα, η πιθανότητα να πραγματοποιηθούν και τα πέντε είναι λιγότερο από 8% ($0.6 \cdot 0.6 \cdot \dots \cdot 0.6 = 0.078$). Γι αυτό τον λόγο είναι σημαντικό να ελέγξει κανείς πως και σε ποιο βαθμό επηρεάζει η αβεβαιότητα των παραμέτρων και ποια η διαφορά στην τελική λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης υπό αβεβαιότητα σε σχέση με εκείνη της ντετερμινιστικής βελτιστοποίησης.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία σύντομη ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη του τομέα της βελτιστοποίησης. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται κάποια βασικά στοιχεία σχετικά με την διαδικασία της μελέτης ενός πλοίου. Στο τρίτο κεφάλαιο καθορίζονται όλα τα οικονομικά στοιχεία που εμφανίζονται στην μελέτη που έγινε. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στην θεωρία των πιθανοτήτων και αναλύονται οι έννοιες στις οποίες βασίστηκε η μελέτη. Το πέμπτο κεφάλαιο αναφέρεται στο κομμάτι της βελτιστοποίησης στο οποίο δίνονται αρχικά κάποιοι βασικοί ορισμοί, αιτιολογείται η επιλογή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης από το λογισμικό MATLAB και αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας της μεθόδου βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκε. Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε και τα αποτελέσματα της μελέτης. Στο τέλος παρατίθενται παραρτήματα με λεπτομέρειες για την διαδικασία της μελέτης που προηγήθηκε.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

1	ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	1
2	ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ	
2.1	Βασικά χαρακτηριστικά ενός πλοίου.....	3
2.2	Πλοία μεταφοράς ξηρού φορτίου χύδην - Bulk Carriers.....	6
2.3	Οι φάσεις της μελέτης ενός πλοίου.....	7
2.4	Καθορισμός του προβλήματος.....	9
3	ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	
3.1	Εισαγωγή.....	10
3.2	Βασικές οικονομικές έννοιες.....	10
3.3	Κριτήρια αξιολόγησης επενδύσεων.....	12
3.4	Βασικά στοιχεία για την ναυλαγορά Charter.....	13
4	ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ	
4.1	Εισαγωγή.....	15
4.2	Βασικά στοιχεία θεωρίας πιθανοτήτων.....	15
4.3	Αβέβαιες μεταβλητές και συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας.....	16
4.4	Μέση τιμή και τυπική απόκλιση.....	17
4.5	Εφαρμογή της θεωρίας στο πρόβλημα.....	18
5	ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	
5.1	Εισαγωγή.....	20
5.2	Μαθηματική διατύπωση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης.....	20
5.3	Κατηγοριοποίηση προβλημάτων βελτιστοποίησης.....	21
5.4	Μέθοδοι επίλυσης μη γραμμικών προβλημάτων βελτιστοποίησης με περιορισμούς με χρήση του λογισμικού MATLAB.....	23
5.5	Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση.....	25
5.6	Βασικά στοιχεία μεθόδων βελτιστοποίησης.....	26
5.7	Sequential Quadratic Programming (SQP).....	28
6	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	
6.1	Ντετερμινιστική βελτιστοποίηση.....	32
6.2	Καθορισμός αβέβαιων μεταβλητών.....	34
6.3	Μελέτη ευαισθησίας ως προς τις αβέβαιες μεταβλητές.....	36
6.4	Μεθοδολογία προσέγγισης προβλήματος βελτιστοποίησης.....	39
6.5	Βελτιστοποίηση εύρωστου σχεδιασμού.....	41
6.6	Διερεύνηση της επιρροής στο πλοίο της κάθε αβέβαιης μεταβλητής ξεχωριστά	45

6.7	Επιλογή διαφορετικών αβέβαιων μεταβλητών.....	47
6.8	Παρατηρήσεις και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	54
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – Οι μέθοδοι υπολογισμού που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο.....		55
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – Αριθμητικές μέθοδοι που εφαρμόστηκαν.....		64
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ – Ο δείκτης ενεργειακής απόδοσης EEDI.....		66
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ – Κώδικες.....		67
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		80

ΚΑΦΑΛΑΙΟ 1

ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η ύπαρξη μεθόδων βελτιστοποίησης είναι γνωστή από την εποχή του Newton, του Lagrange και του Cauchy. Η ανάπτυξη μεθόδων βελτιστοποίησης διαφορικού λογισμού ήταν δυνατή χάρις την συνεισφορά των Newton και Leibnitz. Τα θεμέλια του λογισμού των μεταβολών που εφαρμόζεται σε προβλήματα ελαχιστοποίησης τοποθετήθηκαν από τους Bernoulli, Euler, Lagrange και Weirstrass. Η μέθοδος βελτιστοποίησης προβλημάτων με περιορισμούς (constrained optimization methods), που εισάγουν επιπλέον άγνωστους πολλαπλασιαστές στο πρόβλημα, έγινε γνωστή με το όνομα του δημιουργού της, Lagrange. Ο Cauchy έκανε την πρώτη εφαρμογή της μεθόδου steepest descent για να λύσει προβλήματα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς. Παρόλα αυτά, μέχρι τα μέσα του 20^{ου} αιώνα, που εμφανίστηκαν ηλεκτρονικοί υπολογιστές, με υψηλή ταχύτητα υπολογισμών, η πρόοδος επάνω στο θέμα τις βελτιστοποίησης ήταν μικρή.

Έχει ενδιαφέρον το γεγονός ότι η μεγαλύτερη ανάπτυξη στον τομέα των αριθμητικών μεθόδων βελτιστοποίησης προβλημάτων χωρίς περιορισμούς έγινε στο Ηνωμένο Βασίλειο μόλις την δεκαετία του 60. Η ανάπτυξη της μεθόδου simplex από τον Dantzig το 1947 για προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού και η δουλειά του Bellman πάνω σε προβλήματα δυναμικού προγραμματισμού το 1957, άνοιξαν τον δρόμο για την ανάπτυξη μεθόδων βελτιστοποίησης με περιορισμούς. Η δουλειά των Kuhn και Tucker το 1951 για τις αναγκαίες και ικανές συνθήκες για την ύπαρξη βέλτιστης λύσης σε προβλήματα προγραμματισμού συνέβαλαν σημαντικά στην μετέπειτα έρευνα σε μεθόδους μη γραμμικού προγραμματισμού. Σημαντική ήταν επίσης και η συμβολή των Zoutendijk και Rosen σε θέματα μη γραμμικού προγραμματισμού την δεκαετία του 60.

Παρόλο που δεν έχει βρεθεί μία μέθοδος που να επιλύει όλα τα προβλήματα μη γραμμικού προγραμματισμού, με την δουλειά των Carroll, Fiacco και McCormick έγινε εφικτή η επίλυση πολλών δύσκολων προβλημάτων με χρήση γνωστών μεθόδων βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς. Ο γεωμετρικός προγραμματισμός αναπτύχθηκε την δεκαετία του 60 από τους Duffin, Zener και Peterson. Ο Gomory έκανε σημαντική δουλειά στον τομέα του ακέραιου προγραμματισμού, έναν πολύ σημαντικό τομέα, μιας και τα περισσότερα προβλήματα στην πραγματικότητα εντάσσονται σε αυτήν την κατηγορία. Οι Dantzig, Charnes και Cooper ανέπτυξαν στοχαστικές μεθόδους βελτιστοποίησης, επιλύοντας προβλήματα στα οποία θεωρούσαν ότι οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι ανεξάρτητες και κατανέμονται κανονικά.

Η ανάγκη για βελτιστοποίηση περισσότερων συναρτήσεων ταυτόχρονα οδήγησε στην ανάπτυξη της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Ο προγραμματισμός στόχου (Goal Programming) είναι μία γνωστή τεχνική επίλυσης συγκεκριμένων τύπων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης που αρχικά είχε δημιουργηθεί για την επίλυση γραμμικών προβλημάτων από τους Charnes και Cooper το 1961. Τα θεμέλια της θεωρίας των παιγνίων τα έθεσε ο Von Neumann το 1928 και από τότε η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την επίλυση οικονομικών και στρατιωτικών προβλημάτων. Πλέον χρησιμοποιείται και σε προβλήματα μηχανολογικού σχεδιασμού.

Οι μέθοδοι Προσομοιωμένης απόπτωσης (simulated annealing), οι γενετικοί αλγόριθμοι (Genetic Algorithms) και τα νευρωνικά δίκτυα (Neural Networks) είναι σχετικά πιο σύγχρονες μέθοδοι. Η Προσομοιωμένη απόπτωση, είναι ανάλογη της διαδικασίας της απόπτωσης των υλικών. Ο γενετικός αλγόριθμος είναι μέθοδος που βασίζεται στην βιολογία και μιμείται την διαδικασία επιλογής, αναπαραγωγής και επιβίωσης του πιο 'ικανού'. Τέλος, η βελτιστοποίηση με νευρωνικά δίκτυα βασίζεται στην επίλυση προβλημάτων με χρήση της υπολογιστικής δύναμης ενός δικτύου από διασυνδεδεμένων 'νευρωνικών' επεξεργαστών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ

2.1 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΝΟΣ ΠΛΟΙΟΥ

Πριν ξεκινήσει η ανάλυση για τις φάσεις της μελέτης ενός πλοίου, θα γίνει μία παρουσίαση των βασικών χαρακτηριστικών του. Θα παρουσιαστούν μόνο τα μεγέθη που θα μας απασχολήσουν στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Κύριες διαστάσεις:

- Μήκος μεταξύ καθέτων (L_{BP}): Το μήκος του πλοίου στο ύψος της ισάλου μελέτης μετρούμενο μεταξύ του ακρότατου πρωραίου σημείου του πλοίου και της εξωτερικής ακμής του ποδοστήματος πρύμνηθεν ή του κέντρου του άξονα του πηδαλίου.
- Πλάτος σχεδίασης ή αναφοράς (B): Μέγιστο πλάτος του πλοίου μετρούμενο συνήθως στη μέση τομή του πλοίου εσωτερικώς του πάχους των ελασμάτων.
- Κοίλο ή πλευρικό ύψος αναφοράς (D): Η κάθετη απόσταση στη μέση τομή μεταξύ του βασικού επιπέδου αναφοράς και του ανώτατου, συνεχούς και καιροστεγούς καταστρώματος (κύριο κατάστρωμα) και, συγκεκριμένα, μεταξύ της άνω ακμής της τρόπιδας και της άνω ακμής των ζυγών του καταστρώματος στην πλευρά του πλοίου.
- Βύθισμα σχεδίασης ή αναφοράς (T): Η κάθετη απόσταση της ισάλου πλευσης (κυρίως γραμμή φόρτωσης θέρους) από το βασικό επίπεδο αναφοράς, μετρούμενο στη μέση τομή.

Βάρη:

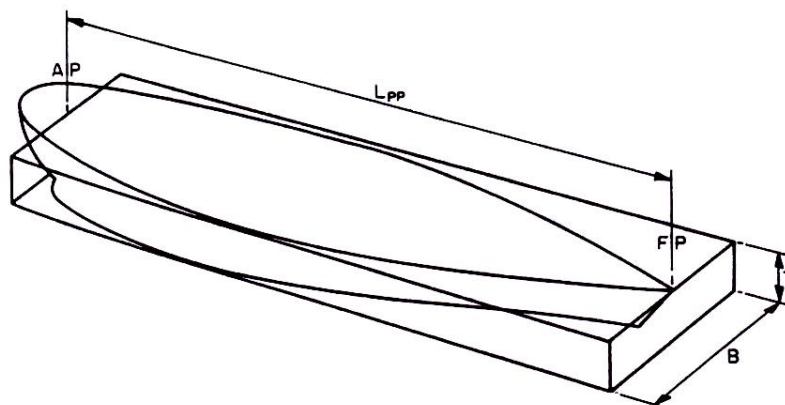
- Βάρος κενού σκάφους (Light Ship - W_L): Είναι το βάρος του πλήρως εξοπλισμένου και έτοιμου προς λειτουργία πλοίου, χωρίς φορτίο και εφόδια. Στο W_L εμπεριέχεται το βάρος μιας πλήρωσης των μηχανολογικών εξαρτημάτων με υγρά λειτουργίας. Στο W_L δεν περιέχονται τα εφόδια (καύσιμο, νερό, λιπαντικά, τρόφιμα, κλπ.), οι επιβάτες με τις αποσκευές και το φορτίο. Ισχύει $W_L = W_{ST} + W_{OT} + W_M$, όπου τα μεγέθη στο δεξί μέλος της εξίσωσης αναλύονται παρακάτω.
- Βάρος μεταλλικής κατασκευής (Steel Weight - W_{ST}): Είναι το βάρος των μεταλλικών στοιχείων της κατασκευής του πλοίου, δηλαδή της γάστρας, των υπερκατασκευών και των υπερστεγασμάτων. Στο W_{ST} δεν ανήκουν τα μεταλλικά στοιχεία της ενδιαίτησης και του εξοπλισμού (W_{OT}), δηλαδή οι ιστοί και βραχίονες φορτωτήρων, φορτοεκφορτωτικά μέσα κτλ.

- Βάρος ενδιαίτησης και εξοπλισμού (Outfit Weight - W_{OT}): Είναι το βάρος όλων των σταθερών και κινητών στοιχείων της ενδιαίτησης και εξοπλισμού του πλοίου που εφαρμόζονται επί της γυμνής μεταλλικής κατασκευής του σκάφους, εκτός του μηχανοστασίου και το καθιστούν έτοιμο προς πλεύση.
- Βάρος μηχανολογικής εγκατάστασης (Machinery Weight - W_M): Είναι το βάρος της κύριας και βοηθητικής μηχανολογικής εγκατάστασης και περιλαμβάνει τα κατασκευαστικά στοιχεία όλων των μηχανολογικών εξαρτημάτων (κύρια και βοηθητική μηχανολογική εγκατάσταση). Ο διαχωρισμός ορισμένων στοιχείων, όπως σωληνώσεις, μηχανήματα καταστρώματος, ψυκτικές εγκαταστάσεις από το βάρος ενδιαίτησης και εξοπλισμού, μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την πρακτική του ναυπηγείου.
- Πρόσθετο ή νεκρό βάρος (Deadweight – DWT): Το σύνολο των πρόσθετων βαρών που φορτώνονται επί του κενού σκάφους, όπως ωφέλιμο φορτίο, καύσιμα, φρέσκο νερό, ψυκτικό νερό, τροφοδοτικό νερό, θαλάσσιο έρμα, λοιπά εφόδια, εργαλεία, ανταλλακτικά, τρόφιμα, πλήρωμα και επιβάτες με αποσκευές, μεταβλητά εξαρτήματα εξοπλισμού, πχ. για την έχμαση του φορτίου.
- Εκτόπισμα (Displacement – Δ): Είναι το βάρος του εκτοπιζόμενου θαλάσσιου νερού καθορισμένης πυκνότητας που αναφέρεται σε ένα ορισμένο βύθισμα λειτουργίας του πλοίου, συνυπολογίζοντας τυχόν διαγωγή ή διαμήκη κάμψη του σκάφους, καθώς και το πάχος του εξωτερικού περιβλήματος και τα παρελκόμενα.

Συντελεστές μορφής:

- Συντελεστής γάστρας (Block coefficient - C_B): Αντιστοιχεί στον λόγο του όγκου εκτοπίσματος ∇ ως προς το γινόμενο του μήκους L , του μέγιστου πλάτους στην ίσαλο B και του βυθίσματος αναφοράς T , δηλαδή ως προς τον όγκο ενός ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου με τις ανωτέρω διαστάσεις:

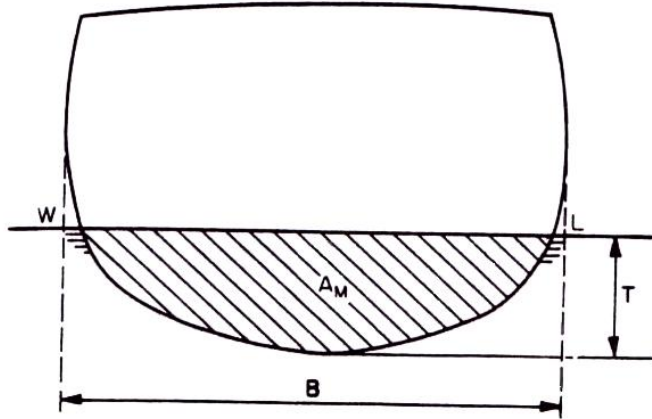
$$C_B = \frac{\nabla}{L \cdot B \cdot T} \quad (2.1)$$



Σχήμα 2.1: Συντελεστής γάστρας - C_B

- Συντελεστής μέσης τομής (Midship coefficient - C_M): Αντιστοιχεί στον λόγο της επιφάνειας της μέσης τομής A_M ως προς το γινόμενο του μέγιστου πλάτους στην ίσαλο B και του βυθίσματος αναφοράς T , δηλαδή ως προς το εμβαδό ενός ορθογωνίου παραλληλόγραμμου με τις ανωτέρω διαστάσεις:

$$C_M = \frac{A_M}{B \cdot T} \quad (2.2)$$



Σχήμα 2.2: Συντελεστής Μέσης Τομής - C_M

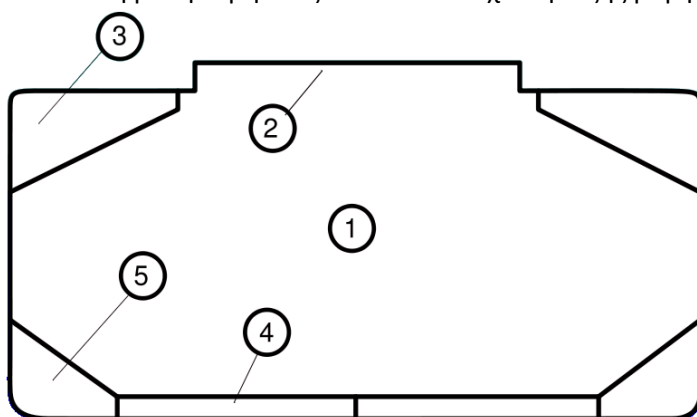
Ταχύτητα:

- Ταχύτητα υπό συνθήκες δοκιμών (V): Είναι η ταχύτητα που ορίζεται στη σύμβαση μεταξύ ναυπηγείου και πλοιοκτήτη και αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο εκτόπισμα του πλοίου, μια αναπτυσσόμενη υποδύναμη της μηχανής, καθώς και τις στροφές τις έλικας υπό συνθήκες δοκιμών. Στην μελέτη θεωρούμε ότι αυτή είναι η μέση ταχύτητα με την οποία κινείται το πλοίο σε όλη την διάρκεια της ζωής του.

2.2 ΠΛΟΙΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΞΗΡΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΧΥΔΗΝ (BULK CARRIERS)

Τα Bulk Carriers είναι φορτηγά πλοία σχεδιασμένα για να μεταφέρουν ξηρό φορτίο χύδην, όπως σιτηρά, κάρβουνο, μεταλλεύματα κτλ. Κύρια χαρακτηριστικά αυτού του είδους των πλοίων είναι η κάθετη πρόσβαση των κυτών μέσω στομιών καταστρώματος, η έλλειψη ενδιάμεσων καταστρωμάτων υποδιαίρεσης, η δυνατότητα αυτερματισμού διαφόρων χώρων κυτών (υψηλές/χαμηλές πλάγιες δεξαμενές), οι ειδικές προδιαγραφές φόρτωσης φορτίου (π.χ. σιτηρά (SOLAS), μεταλλεύματα (εναλλαγές στα κύτη) κτλ.), κατά κανόνα: χωρίς ίδια μέσα φορτοεκφόρτωσης, εκτός εξαιρέσεων (κυλιόμενοι γερανοί, μάντες).

Μια τυπική μέση τομή ενός Bulk Carrier έχει την εξής μορφή:



- 1: Χώρος φορτίου
- 2: Στόμιο κύτους
- 3: Υψηλή πλάγια δεξαμενή (Upper Hopper Tank)
- 4: Διτύθμενο
- 5: Χαμηλή πλάγια δεξαμενή (Lower Hopper Tank)

Σχήμα 2.3: Τυπική μέση τομή ενός Bulk Carrier

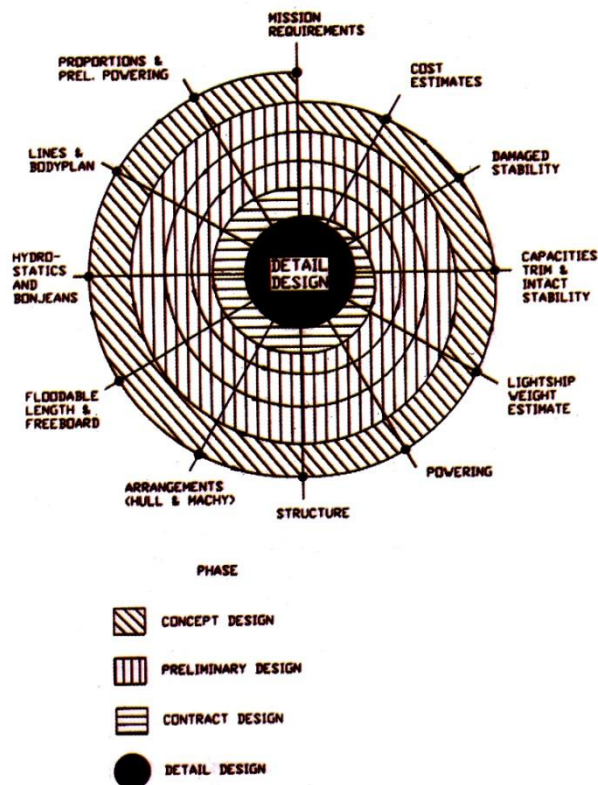
Τα Bulk Carriers χωρίζονται στις εξής κατηγορίες, ανάλογα με το μέγεθός τους:

Κατηγορίες πλοίων τύπου Bulk Carrier			
Κατηγορία	DWT	Ποσοστό του συνολου των Bulk Carriers (αριθμός πλοίων)	Ποσοστό μεταφερόμενου φορτίου (τόνοι φορτίου)
Handysize	10,000 - 35,000	34%	18%
Handymax	35,000 - 60,000	37%	
Panamax	60,000 - 80,000	19%	20%
Capesize	80,000 και πάνω	10%	62%

Πίνακας 2.1: Στατιστικά Στοιχεία για Bulk Carriers

2.3 ΟΙ ΦΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΕΝΟΣ ΠΛΟΙΟΥ

Η διαδικασία μελέτης πλοίου είναι μια επαναληπτική διαδικασία η οποία μπορεί να αναπαρασταθεί γραφικά με την ελικοειδή καμπύλη μελέτης πλοίου (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 2.4: Ελικοειδής καμπύλη μελέτης (Design Spiral) κατά J.H.Evans (1959)

Οι φάσεις στις οποίες χωρίζεται η μελέτη ενός πλοίου είναι οι εξής:

- Μελέτη Εφικτότητας Αρχικού Σχεδιασμού (Concept Design)
Έχοντας κάποιες απαιτήσεις ως προς κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά από τον πλοιοκτήτη, γίνεται μια αρχική μελέτη του προβλήματος στην οποία προϋπολογίζονται το μήκος L , το πλάτος B , το κοίλο D , το βύθισμα T , ο συντελεστής γάστρας C_B και η ισχύς πρόωσης, με στόχο την εύρεση μιας βέλτιστης λύσης, σύμφωνα με κάποιο οικονομοτεχνικό κριτήριο, ικανοποιώντας πάντα τις απαιτήσεις του πλοιοκτήτη.
- Προμελέτη (Preliminary Design)
Αποτελεί μια πιο λεπτομερή προσέγγιση των μεγεθών που προϋπολογίστηκαν στην προηγούμενη φάση της μελέτης, καθορίζονται τα βασικά στοιχεία της γενικής διάταξης και η εσωτερική υποδιαίρεση. Γίνεται και πάλι προσπάθεια να βρεθεί η βέλτιστη οικονομικά λύση εντός των περιορισμών που έχει θέσει ο πλοιοκτήτης.

Οι δύο παραπάνω φάσεις αποτελούν τη **Βασική Μελέτη (Basic Design)** του πλοίου. Η παρούσα διπλωματική εργασία περιορίζεται στην 1^η φάση.

- Μελέτη Προδιαγραφών Συμβολαίου ή Συμβατικής Μελέτης (Contract Design)
Σ' αυτήν την φάση γίνεται η εξομάλυνση των ναυπηγικών γραμμών, ο ακριβής υπολογισμός της απαιτούμενης εγκατεστημένης ισχύος, καθορίζονται οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες της μεταλλικής κατασκευής, γίνεται αναλυτικός υπολογισμός του βάρους του πλοίου και των επιμέρους βαρών που το συνθέτουν, των κέντρων βάρους και πολλές φορές η ανάλυση της συμπεριφοράς του πλοίου σε κυματισμούς, καθώς επίσης και των ελκτικών του δυνατοτήτων. Στη συνέχεια εκπονούνται όλοι οι απαραίτητοι υπολογισμοί και τα σχέδια, τα οποία θα αποτελέσουν μέρος του συμβολαίου για την κατασκευή του πλοίου μεταξύ του ναυπηγείου και του πλοιοκτήτη.
- Μελέτη Λεπτομερούς Σχεδιασμού (Detailed Design)
Είναι η τελευταία φάση της μελέτης κατά την οποία εκπονούνται όλα τα κατασκευαστικά σχέδια και γίνεται η σύνταξη των προδιαγραφών κατασκευής και εγκατάστασης για τους τεχνίτες του ναυπηγείου και τους προμηθευτές της προωστηρίου εγκατάστασης.

Σε μία μελέτη ενός πλοίου, οι συνήθεις απαιτήσεις ενός πλοιοκτήτη είναι:

- ✓ Μεταφορική ικανότητα (ανάλογα με τον τύπο του πλοίου: DWT, χωρητικότητα όγκου κυτών, αριθμός containers, αριθμός επιβατών ή/και οχημάτων)
- ✓ Ταχύτητα υπηρεσίας
- ✓ Ακτίνα Ενέργειας
- ✓ Νηογνώμονας και κλάση

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έχει ως κύριο στόχο την διερεύνηση που έχουν κάποιες αβέβαιες μεταβλητές στη επιλογή των κύριων διαστάσεων, του συντελεστή γάστρας και της ταχύτητας ενός πλοίου. Γι αυτό τον λόγο δεν τέθηκαν αυστηρά όρια ως προς τις παραπάνω απαιτήσεις. Έτσι, το DWT περιορίζεται μεταξύ ενός αρκετά μεγάλου εύρους ($80000 \leq DWT \leq 200000$). Η ταχύτητα δεν καθορίζεται και αποτελεί μια από τις ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος προς βελτιστοποίηση. Η ακτίνα ενέργειας καθορίζεται μέσα στο μοντέλο και αναφέρεται ως διαδρομή πλοίου μετ' επιστροφής (round trip miles). Ο νηογνώμονας και η κλάση δεν καθορίζονται, μιας και επηρεάζουν περισσότερο τις επόμενες φάσεις σχεδίασης και δεν δίνουν σημαντικές πληροφορίες που να απαιτούνται για τον υπολογισμό των οικονομοτεχνικών στοιχείων που υπολογίζονται.

Η επιπλέον απαίτηση που έχει προστεθεί στο υπάρχον μοντέλο είναι η ικανοποίηση του ορίου που έχει τεθεί στον δείκτη ενεργειακής απόδοσης EEDI (Energy Efficiency Design Index). Λεπτομέρειες σχετικά με αυτόν τον δείκτη δίνονται στο παράρτημα Γ.

2.4 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία τα μεγέθη που θα μας απασχολήσουν και αποτελούν τις ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος είναι το μήκος L , το πλάτος B , το κοίλο D , το βύθισμα T , ο συντελεστής γάστρας C_B και η ταχύτητα V_{KN} .

Το πρόβλημα που έχει τεθεί είναι ο βέλτιστος καθορισμός των παραπάνω μεταβλητών με κριτήριο τον ελάχιστο απαιτούμενο ναύλο, λεπτομέρειες για τον οποίο δίνονται σε επόμενο κεφάλαιο. Είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης και για τον καθορισμό αυτών των μεγεθών πρέπει να γίνει μια εκτίμηση των όλων των υπόλοιπων μεγεθών του πλοίου που είναι απαραίτητα, προκειμένου να υπολογιστούν οι οικονομικές παράμετροι, με την χρήση των οποίων θα γίνει και η τελική επιλογή.

Έτσι, για παράδειγμα, για τον υπολογισμό του κόστους του πλοίου, απαιτείται ένας προϋπολογισμός των κύριων βαρών του, τα οποία είναι: το DWT, το βάρος μεταλλικής κατασκευής, βάρος ενδιαίτησης και εξοπλισμού και το βάρος μηχανολογικής εγκατάστασης. Στα αρχικά στάδια όμως η μορφή του πλοίου δεν είναι πλήρως καθορισμένη, και γι αυτό τον λόγο έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι, οι οποίες δίνουν εκτιμήσεις των βαρών αυτών με χρήση μόνο κάποιων πολύ βασικών χαρακτηριστικών (μήκος, πλάτος, κοίλο, βύθισμα, συντελεστή γάστρας κτλ.), τα οποία έχουν καθοριστεί σε αυτά τα αρχικά στάδια. Αυτές οι μέθοδοι προκύπτουν εμπειρικά, από συλλογή δεδομένων από υπάρχοντα πλοία και βοηθούν τον μελετητή να έχει μια αρχική εικόνα για τα βασικά βάρη που συνθέτουν το συνολικό βάρος του πλοίου. Από τις μεθόδους που υπάρχουν, άλλες είναι πιο απλοποιημένες και άλλες πιο αναλυτικές. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν στο συγκεκριμένο μοντέλο παρουσιάζονται στο παράρτημα Α.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η οικονομική ανάλυση ενός συστήματος είναι απαραίτητη κατά τον σχεδιασμό, διότι έτσι μπορεί να αποκαλυφθεί η επίδραση των τεχνικών χαρακτηριστικών του συστήματος αυτού στο κόστος κατασκευής και λειτουργίας του, καθώς και σε άλλα οικονομικά χαρακτηριστικά του. Έτσι, προσδιορίζονται οι τιμές των τεχνικών χαρακτηριστικών που βελτιστοποιούν τα οικονομικά χαρακτηριστικά και γίνεται μια εκτίμηση αυτών. Παρακάτω αναλύονται βασικές οικονομικές έννοιες που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση που γίνεται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

3.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Χρηματοροές:

Πριν γίνει μία πιο αναλυτική οικονομική διατύπωση του προβλήματος, θα διαχωριστούν τα είδη των εσόδων και των εξόδων που συναντιούνται στο συγκεκριμένο πρόβλημα.

Έσοδα:

- *Είσπραξη ναύλων:* Τα έσοδα της συγκεκριμένης επένδυσης προέρχονται στην πλειοψηφία τους από τους εισπραττόμενους ναύλους που επιβάλλονται οι οποίοι, στο συγκεκριμένο πρόβλημα είναι ανάλογοι του φορτίου (σε £/τον-φορτίου). Μια παραδοχή που γίνεται, προκειμένου να είναι εφικτός ο υπολογισμός της παρούσας αξίας (για την παρούσα αξία γίνεται αναφορά παρακάτω) κάθε χρηματοροής, είναι ότι όλες οι συναλλαγές πραγματοποιούνται στο τέλος κάθε έτους.
- *Αξία πλοίου μετά την περίοδο εκμετάλλευσής του (διάλυση ή μεταπώληση):* αυτή η αξία εκφράζεται ως ένα ποσοστό της αρχικής αξίας του πλοίου.

Έξοδα:

- *Αρχικό κόστος:* Είναι όλα τα έξοδα που εμφανίζονται πριν την έναρξη λειτουργίας ενός συστήματος. Στο πρόβλημά μας το αρχικό κόστος είναι το 30% του κόστους του πλοίου.
- *Κόστος λειτουργίας, συντήρησης και εξόφληση δανείου:* Περιλαμβάνει το κόστος καυσίμου, εργατικών, φόρους και γενικότερα όλα τα έξοδα που έχουν να κάνουν με την λειτουργία του πλοίου και είναι επαναλαμβανόμενα ανά συγκεκριμένες χρονικές περιόδους. Κι εδώ γίνεται η παραδοχή ότι όλες οι οικονομικές συναλλαγές πραγματοποιούνται στο τέλος κάθε έτους.

Για να γίνει η οικονομική ανάλυση του προβλήματος, πρέπει πρώτα να καθοριστούν όλες οι παράμετροι που επηρεάζουν το πρόβλημα.

Η αξία του χρήματος στον χρόνο:

Ένα ποσό X το οποίο είναι διαθέσιμο σήμερα, μπορεί να αξιοποιηθεί με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε μετά από N έτη να έχει αυξηθεί κατά τον τόκο του (αποταμίευση, επένδυση κτλ.). Έτσι, μετά από το πέρας των N ετών το ποσό που θα υπάρχει είναι: $(X + \text{τόκος})$. Αντίθετα, εάν το ποσό αυτό είναι διαθέσιμο μετά από N έτη, τότε δεν θα αυξηθεί καθόλου. Άρα το ίδιο χρηματικό ποσό σε διαφορετικές χρονικές στιγμές δεν έχει την ίδια αξία. Δύο είναι οι βασικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την αγοραστική αξία του χρήματος: το επιτόκιο αγοράς και ο πληθωρισμός.

Επιτόκιο (interest):

- *Επιτόκιο Δανεισμού (Loan interest):* Κατά την χορήγηση ενός δανείου, ο δανειζόμενος οφείλει μέχρι την λήξη της περιόδου δανεισμού να καταβάλλει ένα επιπλέον ποσό, πέρα από αυτό που δανείστηκε. Το ποσό αυτό εκφράζεται ως ποσοστό των χρημάτων που δανείστηκε και ονομάζεται τόκος. Έτσι, οι τράπεζες ορίζουν ένα επιτόκιο δανεισμού το οποίο εκφράζει τον τόκο ανά μονάδα χρόνου και κεφαλαίου.
- *Επιτόκιο αγοράς:* Καθορίζει τον τόκο που κερδίζει κάποιος όταν δανείζει ή επενδύει χρήματα και εξαρτάται από τις συνθήκες που επικρατούν στην αγορά. Εκφράζει ουσιαστικά το κέρδος που θα είχε ο επενδυτής εάν επέλεγε να μην διαθέσει τα χρήματά του στην συγκεκριμένη επένδυση. Στο πρόβλημά μας, ως επιτόκιο αγοράς ορίζεται το επιτόκιο της τράπεζας (Bank Interest), θεωρώντας ότι η εναλλακτική σίγουρη επένδυση είναι η δέσμευση των χρημάτων στην τράπεζα για το χρονικό διάστημα που διαρκεί η επένδυση με κέρδος τον τόκο που θα προκύψει στο τέλος.

Πληθωρισμός (inflation):

Όσο περνάει ο χρόνος οι τιμές των αγαθών και των υπηρεσιών μεταβάλλονται. Η ποσοστιαία μεταβολή των τιμών αυτών για ένα έτος ονομάζεται ετήσιος δείκτης πληθωρισμού των συγκεκριμένων αγαθών ή υπηρεσιών. Στις οικονομικές αναλύσεις, πολλές φορές ο δείκτης πληθωρισμού θεωρείται σταθερός και ίσως με μία μέση τιμή f .

Παρούσα αξία:

- *Παρούσα Αξία P ενός Μελλοντικού Ποσού F*

Εάν επενδυθεί σήμερα ένα ποσό P , τότε η αξία του μετά από N περιόδους θα είναι:

$$F = P \cdot \prod_{n=1}^N (1 + i_n) \quad (3.1)$$

Όπου i_n το επιτόκιο αγοράς την χρονική στιγμή n .

Αν το επιτόκιο αγοράς θεωρηθεί σταθερό, τότε η παίρνει την εξής μορφή:

$$F = P \cdot (1 + i)^N \quad (3.2)$$

Αντίστροφα, για να αποκτηθεί μετά από N περιόδους ένα ποσό F , η επένδυση που πρέπει να γίνει τώρα είναι:

$$P = \frac{1}{(1+i)^N} \cdot F \quad (3.3)$$

Το P είναι η παρούσα αξία του μελλοντικού ποσού F .

- **Παρούσα Αξία P ενός Επαναλαμβανόμενου Ποσού A κάθε χρονική περίοδο n**

Με χρήση της σχέσης που προέκυψε παραπάνω, υπολογίζεται η παρούσα αξία ενός επαναλαμβανόμενου ποσού A κάθε περίοδο, για N περιόδους:

$$P = \frac{A}{1+i} + \frac{A}{(1+i)^2} + \dots + \frac{A}{(1+i)^N} = \frac{A}{(1+i)^N} \cdot [(1+i)^{N-1} + (1+i)^{N-2} + (1+i) + 1]$$

Τελικά

$$P = A \cdot \frac{(1+i)^N - 1}{i \cdot (1+i)^N} = A \cdot PWF(N, i) \quad (3.4)$$

$$\text{Όπου } PWF(N, i) = \frac{(1+i)^N - 1}{i \cdot (1+i)^N} \quad (\text{Present Worth Factor}) \quad (3.5)$$

Ο πληθωρισμός επηρεάζει τον υπολογισμό της παρούσας αξίας με τον εξής τρόπο:

$$PWF(N, f, i) = \sum_{n=1}^N \frac{(1+f)^{n-1}}{(1+i)^n} = \begin{cases} \frac{1}{i-f} \cdot \left[1 - \left(\frac{1+f}{1+i} \right)^N \right] & \text{για } f \neq i \\ \frac{N}{1+f} & \text{για } f = i \end{cases} \quad (3.6)$$

Επειδή όμως η ανάλυση γίνεται με σταθερές τιμές του δείκτη πληθωρισμού και του επιτοκίου αγοράς, χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς το αποπληθωρισμένο επιτόκιο αγοράς, το οποίο δίνεται από την σχέση:

$$i' = \frac{1+i}{1+f} - 1 \quad (3.7)$$

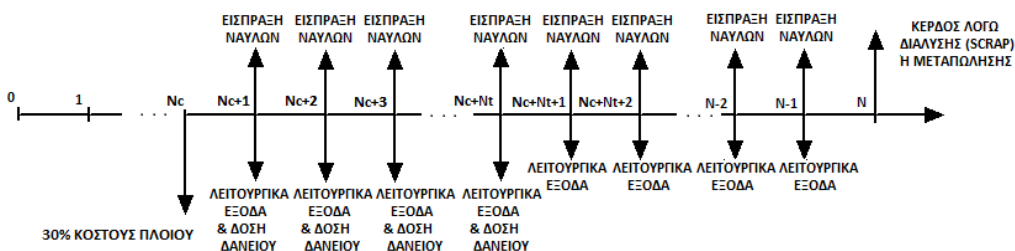
Έτσι, στους υπολογισμούς δεν χρησιμοποιείται η σχέση που συμπεριλαμβάνει και το επιτόκιο αγοράς, και τον πληθωρισμό, παρά μόνο ένα ισοδύναμο επιτόκιο που συμπεριλαμβάνει και τα δύο.

3.3 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΕΩΝ

Γνωρίζοντας πλέον όλες τις οικονομικές συναλλαγές που εμφανίζονται στο πρόβλημα και το πώς επηρεάζεται η αξία τους στον χρόνο, πρέπει να οριστεί κάποιο κριτήριο με βάση το οποίο θα αξιολογηθεί η επένδυση.

Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ) (Net Present Value – NPV):

Με την μέθοδο της καθαρής παρούσας αξίας είναι εφικτό να αποκτηθεί μια ρεαλιστική εικόνα για το αν μια επένδυση είναι βιώσιμη ή όχι. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, θεωρούμε ότι ο πλοιοκτήτης παίρνει δάνειο με επιτόκιο t για να καλύψει το 70% του κόστους αγοράς του πλοίου και το ξεχρεώνει μέσα σε $N_t=10$ χρόνια, και το υπόλοιπο 30% το πληρώνει με μετρητά κατά την παράδοση του πλοίου. Η συνολική επένδυση θα διαρκέσει N χρόνια. Το διάγραμμα των χρηματοροών παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα χρηματοροών

Επομένως, η καθαρή παρούσα αξία βρίσκεται από την σχέση:

$$\begin{aligned}
 \text{ΚΠΑ} &= -30\% \text{ ΚΟΣΤΟΥΣ ΠΛΟΙΟΥ} \cdot \frac{1}{(1+i)^{Nc}} \\
 &+ (\text{ΕΙΣΠΡΑΤΤΟΜΕΝΟΙ ΝΑΥΛΟΙ} - \text{ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΕΞΟΔΑ} - \text{ΔΟΣΗ ΔΑΝΕΙΟΥ}) \cdot \text{PWF}(Nt, r) \cdot \frac{1}{(1+i)^{Nc}} \\
 &+ (\text{ΕΙΣΠΡΑΤΤΟΜΕΝΟΙ ΝΑΥΛΟΙ} - \text{ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΕΞΟΔΑ}) \cdot \text{PWF}(N', r) \cdot \frac{1}{(1+i)^{Nc+Nt}} \\
 &+ \text{ΤΕΛΙΚΗ ΑΞΙΑ ΠΛΟΙΟΥ} \cdot \frac{1}{(1+i)^N}
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

Όπου:

$$r = \frac{1+i}{1+f} - 1$$

$$\text{PWF}(N, r) = \frac{(1+r)^N - 1}{r \cdot (1+r)^N}$$

$$N' = N - Nt - Nc$$

Ελάχιστος Απαιτούμενος Ναύλος (EAN) (Required Freight Rate – RFR):

Ο EAN είναι ο ναύλος για τον οποίο η σχέση της ΚΠΑ, που διατυπώθηκε παραπάνω, δίνει μηδενική τιμή. Είναι το πλοίο που θα παρουσιάζει το μικρότερο κόστος ανά μονάδα μεταφορικής ικανότητας. Αυτό το κριτήριο είναι πολύ χρήσιμο στην περίπτωση μας, μιας και ερευνούμε μία επένδυση με διάρκεια 20 έτη, για την οποία είναι αδύνατο να έχουμε πρόβλεψη για το ύψος των ναύλων. Είναι επίσης χρήσιμο όταν η μελέτη περιλαμβάνει πλοία με μεγάλο εύρος DWT, όπως συμβαίνει στην περίπτωση μας.

Στη συνέχεια ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των συνθηκών που επικρατούν στις ναυλαγορές charter, στις οποίες ανήκουν και οι ναυλαγορές ξηρού φορτίου.

3.4 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΝΑΥΛΑΓΟΡΑ CHARTER

Η ναυλαγορά charter είναι μία από τις δύο κατηγορίες ναυλαγορών που υπάρχουν (η άλλη είναι η ναυλαγορά liner). Στην συγκεκριμένη ναυλαγορά υπάρχει «τέλειος ανταγωνισμός», που σημαίνει ότι η τιμή στην οποία προσφέρεται η υπηρεσία της μεταφοράς των προϊόντων από το ένα λιμάνι στο άλλο δεν μπορεί να επηρεαστεί ή να ελεγχθεί ούτε από ένα μεμονωμένο αγοραστή (ναυλωτής), ούτε από ένα μεμονωμένο πωλητή (πλοιοκτήτης). Έτσι, οι ναύλοι καθορίζονται καθαρά από την αλληλεπίδραση προσφοράς και ζήτησης (μεταφορικής ικανότητας). Η υπηρεσία που προσφέρεται είναι η ναύλωση ολόκληρου του πλοίου κάτω από αμοιβαία αποδεκτούς όρους μεταξύ του πλοιοκτήτη και του ναυλωτή. Ο ναυλωτής έχει ολόκληρο το πλοίο στη διάθεσή του και μπορεί να κάνει οτιδήποτε με αυτό (εκτός από το να το πουλήσει).

Στις ναυλαγορές charter έχουμε μεγάλες, ομοιογενείς, ποσότητες εμπορευμάτων, σχετικά χαμηλής ειδικής αξίας (\$/ton). Συνήθως το πλοίο είναι εντελώς γεμάτο στη μία κατεύθυνση, και άδειο στην επιστροφή και τα προϊόντα που μεταφέρονται είναι κυρίως φορτία χύδην, όπως πετρέλαιο, μεταλλεύματα, κάρβουνο, σιτηρά κλπ. Τα πλοία που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως εξειδικευμένα πλοία, όπως δεξαμενόπλοια, bulk carriers, πλοία μεταλλευμάτων, ΟΒΟ's κλπ. Και η ταχύτητά τους είναι σχετικά χαμηλή (το πολύ μέχρι 16 κόμβους).

Είδη ναύλων και συμβολαίων:

- **Ναύλωση μονού ταξιδιού (voyage charter):** Ο πλοιοκτήτης συμφωνεί να μεταφέρει μια συγκεκριμένη ποσότητα εμπορεύματος με ένα προκαθορισμένο πλοίο από ένα δεδομένο λιμάνι Α σε ένα δεδομένο λιμάνι Β και μέσα σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα. Η τιμή ορίζεται σε \$/τόνο εμπορεύματος. Ο πλοιοκτήτης πληρώνει όλα τα έξοδα λειτουργίας του πλοίου (καύσιμα, πλήρωμα κλπ.). Η ναύλωση μονού ταξιδιού μπορεί να είναι:
 - α) άμεση: εκτελείται μέσα σε μερικές εβδομάδες από την υπογραφή του συμβολαίου και ο αντίστοιχος ναύλος λέγεται **στιγμιαίος ναύλος** (spot rate)
 - β) μελλοντική (forward charter): εκτελείται κάποτε στο μέλλον, π.χ. σε δύο μήνες
 - γ) επαναληπτική (consecutive): όταν αφορά έναν αριθμό από όμοια επαναληπτικά ταξίδια.
- **Χρονοναύλωση (term charter) ή Ναύλωση Προθεσμίας:** Το πλοίο και το πλήρωμα ενοικιάζονται για κάποιο διάστημα, με τον πλοιοκτήτη να παρέχει το πλήρωμα και την συντήρηση και την εγγύηση ότι ικανοποιούνται διάφορα κριτήρια απόδοσης (ταχύτητα, κατανάλωση κλπ.). Η τιμή εδώ ορίζεται σε \$/τόνο DWT/ μήνα. Σ' αυτό το είδος συμβολαίου ο ναυλωτής πληρώνει τα καύσιμα, τα λιμενικά τέλη και τα έξοδα φορτοεκφόρτωσης. Κατά την διάρκεια της χρονοναύλωσης, ο ναυλωτής μπορεί να χρησιμοποιήσει το πλοίο όπως θέλει, ακόμα και να το ναυλώσει σε κάποιον άλλο. Η χρονοναύλωση μπορεί να είναι:
 - α) Άμεση
 - β) Μελλοντική
 - γ) "Bareboat" (ο ναυλωτής παρέχει και το πλήρωμα)
- **Συμβόλαιο Φόρτωσης (Contract of affreightment):** Είναι παρόμοιο με την επαναληπτική ναύλωση, αλλά το όνομα του πλοίου δεν προκαθορίζεται. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε πλοίο για να εκπληρωθούν οι υποχρεώσεις που καθορίζονται από το συμβόλαιο.

Στην παρούσα διπλωματική, θεωρούμε ότι ο πλοιοκτήτης σκοπεύει να υπογράψει μια επαναληπτική ναύλωση μονού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όταν σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης υπεισέρχονται αβέβαιες παράμετροι, τότε το πρόβλημα είναι στοχαστικό. Ο στοχαστικός προγραμματισμός αντιμετωπίζει προβλήματα όπου κάποιες ή όλες οι παράμετροι του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι στοχαστικές, αντί για ντετερμινιστικές. Οι λόγοι που εμφανίζονται στοχαστικές μεταβλητές σε ένα πρόβλημα ποικίλουν. Στην περίπτωση μας οφείλονται είτε σε αδυναμία ακριβής πρόβλεψης κάποιων μεταβλητών στο μέλλον (πχ. κόστος καυσίμου, διαδρομή πλοίου κτλ.), είτε στην αβεβαιότητα που υπάρχει για κάποια στοιχεία, επειδή στο συγκεκριμένο στάδιο της μελέτης, δεν είναι εφικτός ο ακριβής υπολογισμός τους (πχ. βάρος μεταλλικής κατασκευής, κόστος πλοίου κτλ.). Ανάλογα με την φύση των εξισώσεων που διαπραγματευόμαστε στο πρόβλημα, τα προβλήματα χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες: Στοχαστικό γραμμικό, γεωμετρικό, δυναμικό ή μη γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Η βασική ιδέα σε ένα στοχαστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι η μετατροπή του σε ένα ισοδύναμο ντετερμινιστικό. Έτσι, το ισοδύναμο ντετερμινιστικό πρόβλημα επιλύεται με τις γνωστές μεθόδους γραμμικού, γεωμετρικού, δυναμικού ή μη γραμμικού προγραμματισμού.

4.2 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ

Αρχικά πρέπει να δοθεί ένας ορισμός για τον όρο 'πιθανότητα'. Είναι προφανές ότι στον κόσμο υπάρχουν φαινόμενα που εμπεριέχουν, σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό, το στοιχείο της αβεβαιότητας. Για παράδειγμα η ταχύτητα του ανέμου σε μία περιοχή, ο αριθμός των πλοίων που εισέρχονται σε ένα λιμάνι, η αντοχή μιας δοκού ή ο χρόνος ζωής μιας μηχανολογικής κατασκευής, είναι στοιχεία που δεν μπορούν να καθοριστούν με ακρίβεια. Τέτοιου είδους στοιχεία, πρέπει να περιγραφούν με τέτοιο τρόπο, ώστε σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης να λαμβάνεται υπ' όψιν η τυχαία φύση τους.

Πριν εισάγουμε την έννοια της πιθανότητας, είναι αναγκαίο να καθοριστούν οι όροι 'πείραμα' και 'ενδεχόμενο'. 'Πείραμα' είναι η πραγματοποίηση μιας δραστηριότητας της οποίας το αποτέλεσμα δεν είναι απολύτως γνωστό εκ των προτέρων. Για παράδειγμα η ρίψη ενός νομίσματος μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα 'κορώνα' ή 'γράμματα', η ρίψη ενός ζαριού μπορεί να έχει αποτέλεσμα 1, 2, 3, 4, 5 ή 6 κτλ. 'Ενδεχόμενο' είναι μία από τις παρατηρήσεις που προκύπτει μετά από ένα 'πείραμα'. Για παράδειγμα η 'κορώνα' στο νόμισμα ή το '7' στο ζάρι.

Η πιθανότητα εκφράζει το πόσο σίγουρη είναι η πραγματοποίηση ενός συγκεκριμένου ενδεχομένου. Αν E είναι ένα ενδεχόμενο, τότε η πιθανότητα να συμβεί αυτό το ενδεχόμενο εκφράζεται συνήθως ως $P(E)$. Η πιθανότητα αυτή εξαρτάται από τον αριθμό των παρατηρήσεων που έχουν γίνει με την συνεχή επανάληψη ενός πειράματος.

$$P(E) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{m}{n} \quad (4.1)$$

Όπου m είναι ο αριθμός που πραγματοποιήθηκε μία συγκεκριμένη παρατήρηση και n είναι ο αριθμός των συνολικών πειραμάτων. Είναι προφανές ότι η πιθανότητα είναι ένας θετικός αριθμός μικρότερος του ένα.

$$0 \leq P(E) \leq 1 \quad (4.2)$$

Όπου όταν $P(E) = 0$ το ενδεχόμενο είναι απίθανο να συμβεί, και όταν $P(E) = 1$ το ενδεχόμενο είναι σίγουρο ότι θα συμβεί. Για παράδειγμα, η πιθανότητα να έχουμε και 'κορώνα' και 'γράμματα' είναι μηδέν (αδύνατο ενδεχόμενο), ενώ στο ζάρι, η πιθανότητα να έχουμε έναν αριθμό μεταξύ του 1 και του 6 είναι ένα (σίγουρο ενδεχόμενο).

Πρέπει να σημειωθεί ότι αν ένα ενδεχόμενο E_1 δεν επηρεάζει με κανέναν τρόπο την πραγματοποίηση ενός ενδεχομένου E_2 , τότε τα ενδεχόμενα E_1 και E_2 είναι στατιστικά ανεξάρτητα και ισχύει ότι:

$$P(E_1 E_2) = P(E_1) \cdot P(E_2) \quad (4.3)$$

Για παράδειγμα αν η πιθανότητα να βρέξει σε μία συγκεκριμένη περιοχή είναι $P(E_1) = 0,4$ και η πιθανότητα να ρίξουμε έναν νόμισμα και να τύχει 'γράμματα' είναι $P(E_2) = 0,5$, τότε προφανώς τα δύο ενδεχόμενα είναι στατιστικά ανεξάρτητα και η πιθανότητα να συμβούν και τα δύο είναι: $P(E_1 E_2) = P(E_1) \cdot P(E_2) = 0,2$

4.3 ΑΒΕΒΑΙΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΚΑΙ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ

Ως ενδεχόμενο έχει οριστεί ένα πιθανό αποτέλεσμα ενός πειράματος. Ας υποθέσουμε ότι ένα τυχαίο ενδεχόμενο είναι η μέτρηση μιας ποσότητας X που παίρνει τιμές από $-\infty$ έως $+\infty$. Μία τέτοια μεταβλητή ονομάζεται τυχαία μεταβλητή. Οι τυχαίες μεταβλητές μπορεί να είναι είτε διακριτές, είτε συνεχείς. Οι πρώτες είναι εκείνες που μπορούν να πάρουν συγκεκριμένες τιμές και όχι κάποιες ενδιάμεσες, όπως για παράδειγμα το πείραμα με το ζάρι μπορεί να πάρει μόνο τις τιμές 1, 2, 3, 4, 5 ή 6. Αντιθέτως, οι συνεχείς μεταβλητές μπορούν να πάρουν οποιαδήποτε τιμή όπως για παράδειγμα η ποσότητα της βροχής σε μία περιοχή. Στην περίπτωση μας όλες οι αβέβαιες μεταβλητές είναι συνεχείς, επομένως η περίπτωση των διακριτών μεταβλητών δεν θα μας απασχολήσει άλλο.

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας μιας συνεχούς μεταβλητής ορίζεται ως εξής:

$$f_X(x)dx = P(x \leq X \leq x + dx) \quad (4.4)$$

Όπου είναι η πιθανότητα η ποσότητα X να πάρει τιμή μεταξύ της απειροστής απόστασης $(x + dx)$.

Η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας του X ορίζεται ως η πιθανότητα το X να είναι μικρότερο ή ίσο του x .

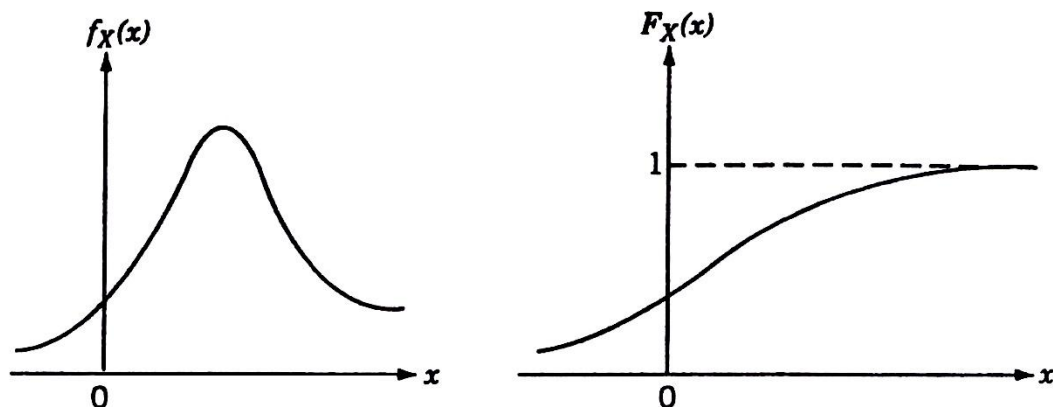
$$F_X(x) = \int_{-\infty}^x f_X(x')dx' \quad (4.5)$$

Όπου $F_X(-\infty) = 0$

Εάν το άνω όριο του ολοκληρώματος τείνει στο άπειρο τότε η τιμή του ολοκληρώματος γίνεται ένα: (normalization condition)

$$\int_{-\infty}^{\infty} f_X(x)dx = F_X(\infty) = 1 \quad (4.6)$$

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται μία τυπική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας και μία τυπική συνάρτηση κατανομής πιθανότητας.



Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας

Συνάρτηση κατανομής πιθανότητας

Σχήμα 4.1: Τυπικές συναρτήσεις πυκνότητας και κατανομής πιθανότητας

4.4 ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΚΑΙ ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ

Οι συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας ή κατανομής πιθανότητας περιέχει όλες τις πληροφορίες που αφορούν την μεταβλητή. Παρόλα αυτά σε πολλές περιπτώσεις δεν χρειαζόμαστε ολόκληρη την πληροφορία, παρά μόνο ορισμένα χαρακτηριστικά της. Σ' αυτές τις περιπτώσεις, υπολογίζεται η μέση τιμή της μεταβλητής και η διασπορά γύρω από αυτήν την τιμή.

Μέση τιμή:

Αν $f_X(x)$ είναι συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας μιας συνεχής μεταβλητής X , η μέση τιμή δίνεται από την σχέση:

$$\bar{X} = \mu_X = E(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f_X(x) dx \quad (4.7)$$

Τυπική απόκλιση:

Ένα μέτρο για την απόκλιση της τυχαίας μεταβλητής από την μέση τιμή δίνεται από την τυπική απόκλιση. Αρχικά, ορίζεται η διασπορά μίας τυχαίας μεταβλητής ως εξής:

$$\begin{aligned} \sigma_X^2 &= \text{Var}(X) = E[(X - \mu_X)^2] \\ &= E[X^2 - 2 \cdot X \cdot \mu_X + \mu_X^2] \\ &= E(X^2) - 2 \cdot \mu_X \cdot E(X) + E(\mu_X^2) \\ &= E(X^2) - \mu_X^2 \end{aligned} \quad (4.8)$$

Έτσι, προκύπτει η τυπική απόκλιση:

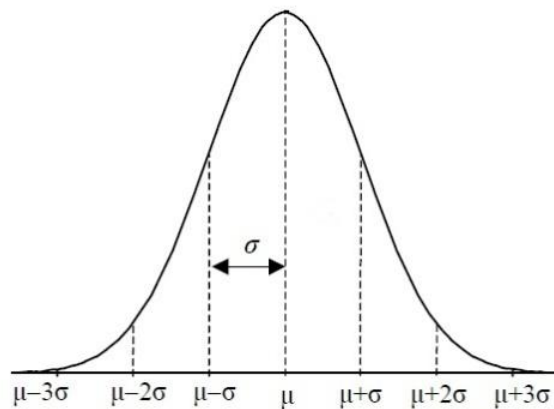
$$\sigma_X = \sqrt{\text{Var}(X)} = \sqrt{E(X^2) - \mu_X^2} \quad (4.9)$$

Κανονική κατανομή:

Μία από τις χρησιμότερες συνεχείς κατανομές στη θεωρία των πιθανοτήτων είναι η κανονική κατανομή. Ιστορικά, η πρώτη εφαρμογή της κανονικής κατανομής οφείλεται στον de Moivre (1733). Όμως ο Gauss (1777-1855) ήταν αυτός που διαπίστωσε ότι τα τυχαία σφάλματα στις μετρήσεις μιας ποσότητας ακολουθούν κανονική κατανομή. Για το λόγο αυτό η κανονική κατανομή είναι επίσης γνωστή ως γκαουσιανή.

Μια τυχαία μεταβλητή X ακολουθεί κανονική κατανομή με παραμέτρους μ, σ ($-\infty < \mu < +\infty, \sigma > 0$), και συμβολίζεται $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ όταν έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} \cdot (x - \mu)^2\right\} \quad (4.10)$$



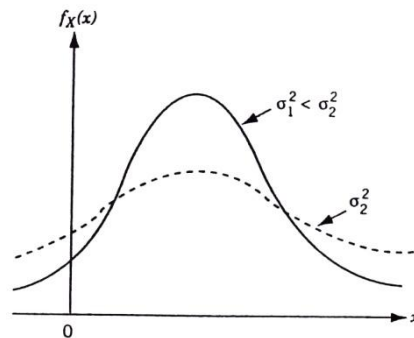
Σχήμα 4.2: Κανονική κατανομή

Είναι προφανές ότι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας έχει κορυφή το σημείο $x = \mu$, και είναι συμμετρική ως προς τον άξονα που διέρχεται από το μ . Επίσης στο διάστημα $(\mu-3\sigma, \mu+3\sigma)$ περιέχονται σχεδόν όλες οι 'πιθανές' τιμές της τυχαίας μεταβλητής X . Συγκεκριμένα $P(|X - \mu| > 3\sigma) \cong 0,003$.

4.5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΣΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Σε γενικές γραμμές, το επιθυμητό αποτέλεσμα στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι η εύρεση μιας λύσης με τυπική απόκλιση μικρότερη από αυτή της ντετερμινιστικής λύσης. Αυτό θα υποδήλωνε ότι ο ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος, που είναι η αντικειμενική συνάρτηση στην περίπτωση μας, δεν μεταβάλλεται πολύ όταν οι αβέβαιες μεταβλητές αποκλίνουν από την μέση τιμή τους. Έτσι θα έχουμε ένα πλοίο του οποίου τα κέρδη είναι λιγότερο επιρρεπή στις μεταβολές των αβέβαιων μεταβλητών, άρα μία πιο 'εύρωστη' σχεδίαση. Γι αυτό στην βιβλιογραφία, τέτοιου είδους βελτιστοποιήσεις χαρακτηρίζονται βελτιστοποιήσεις εύρωστου σχεδιασμού (Robust Design Optimization – RDO).

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας μίας πιο εύρωστης λύσης θα είχε ιδανικά την ίδια μέση τιμή, αλλά μικρότερη τυπική απόκλιση:



Σχήμα 4.3: Συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας με διαφορετική τυπική απόκλιση

Παρόλα αυτά, η μείωση της τυπικής απόκλισης δεν μπορεί να επιτευχθεί χωρίς να ‘θυσιάσουμε’ κάτι από την μέση τιμή. Έτσι το πρόβλημα βελτιστοποίησης εύρωστου σχεδιασμού μετατρέπεται σε ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα με αντικειμενικές συναρτήσεις την μέση τιμή και την τυπική απόκλιση, όπου γίνεται προσπάθεια να βρεθεί μία λύση που μειώνει την τυπική απόκλιση, χωρίς να αυξάνει πολύ τον ελάχιστο απαιτούμενο ναύλο.

Για να ληφθεί υπ’ όψιν η αβεβαιότητα στην διαδικασία της σχεδίασης πρέπει κάποιες από τις μεταβλητές να θεωρηθεί ότι είναι αβέβαιες. Δηλαδή ότι δεν παίρνουν μία σταθερή τιμή, αλλά κυμαίνονται γύρω από κάποια εκτίμηση που έχει μία πιθανότητα πραγματοποίησης η οποία έχει προκύψει από κάποια μελέτη που έχει προηγηθεί. Θεωρούμε λοιπόν ότι οι προβλέψεις μας όσον αφορά τα αβέβαια μεγέθη ακολουθούν κανονική κατανομή, με μέση τιμή την πιο πιθανή πρόβλεψη για το συγκεκριμένο μέγεθος και τυπική απόκλιση που εξαρτάται από την μέγιστη και ελάχιστη τιμή που μπορεί να πάρει η μεταβλητή αυτή σύμφωνα με τις προβλέψεις μας.

$$\mu_i = \bar{x}_i \quad (4.11)$$

$$\sigma_i = \frac{\lambda \cdot \bar{x}_i}{4} \quad (4.12)$$

Όπου \bar{x}_i : η τιμή με την μεγαλύτερη πιθανότητα πραγματοποίησης

λ : μέγιστο ποσοστό απόκλισης από την μέση τιμή

Όπως είπαμε, η αναλυτική έκφραση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της κανονικής κατανομής της κάθε μεταβλητής και δίνεται από την σχέση (4.10).

Με γνωστές τις κατανομές των αβέβαιων μεταβλητών μπορεί να υπολογιστεί η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της αντικειμενικής συνάρτησης από τις εξής σχέσεις:

$$\mu_f(x) = \int \int \dots \int f(x_1, x_2, \dots, x_i) \cdot p(x_1, x_2, x_3) dx_1 dx_2 \dots dx_i \quad (4.13)$$

$$\sigma_f^2(x) = \int \int \dots \int f^2(x_1, x_2, \dots, x_i) \cdot p(x_1, x_2, x_3) dx_1 dx_2 \dots dx_i \quad (4.14)$$

Θεωρούμε ότι $p(x_1, x_2, \dots, x_i) = p(x_1) \cdot p(x_2) \cdot \dots \cdot p(x_i)$ (ανεξάρτητα) (4.15)

Η ολοκλήρωση γίνεται με όρια $\pm 4\sigma$, που καλύπτει το 99.99% της επιφάνειας κάτω από την καμπύλη της κανονικής κατανομής. Για την ολοκλήρωση χρησιμοποιείται ο κανόνας του ορθογωνίου, που οι λεπτομέρειες για την εφαρμογή του δίνονται στο παράρτημα Β.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Βελτιστοποίηση είναι η διαδικασία εύρεσης της καλύτερης δυνατής λύσης σε ένα πρόβλημα κάτω από δεδομένες συνθήκες. Στη σχεδίαση και την κατασκευή ενός μηχανολογικού συστήματος, όπως για παράδειγμα ενός πλοίου, ο ναυπηγός καλείται να πάρει πολλές αποφάσεις οι οποίες πρέπει να μεγιστοποιούν το όφελος που θα προκύψει στο τέλος της μελέτης. Στην πράξη, το όφελος αυτό εκφράζεται σαν μία συνάρτηση που εξαρτάται από κάποιες μεταβλητές, επομένως η βελτιστοποίηση δεν είναι τίποτα άλλο από την ελαχιστοποίηση ή την μεγιστοποίηση της συγκεκριμένης συνάρτησης, λαμβάνοντας υπ' όψιν τυχόν περιορισμούς που μπορεί να υπάρχουν μεταξύ των μεταβλητών του προβλήματος. Δυστυχώς δεν υπάρχει μία μέθοδος η οποία να λύνει όλα τα προβλήματα βελτιστοποίησης αποδοτικά. Γι αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι βελτιστοποίησης που επιλύουν διαφορετικά είδη προβλημάτων.

5.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΕΝΟΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Ως πρόβλημα βελτιστοποίησης ορίζεται το εξής:

Εύρεση του $\mathbf{X} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_n \end{Bmatrix}$ που ελαχιστοποιεί την $f(\mathbf{X})$

Ικανοποιώντας τους περιορισμούς:

$$\begin{aligned} g_j(\mathbf{X}) &\leq 0, & j &= 1, 2, \dots, m \\ l_j(\mathbf{X}) &= 0, & j &= 1, 2, \dots, p \end{aligned} \quad (5.1)$$

Όπου \mathbf{X} είναι ένα n-διάστατο διάνυσμα που λέγεται διάνυσμα σχεδίασης (design vector), $f(\mathbf{X})$ είναι η αντικειμενική συνάρτηση, $g_j(\mathbf{X})$ και $l_j(\mathbf{X})$ είναι οι ανισοτικοί και οι ισοτικοί περιορισμοί αντίστοιχα.

Το παραπάνω πρόβλημα ονομάζεται πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς (constrained optimization problem). Υπάρχουν και προβλήματα χωρίς περιορισμούς (unconstrained optimization problem) των οποίων η διατύπωση είναι ίδια με αυτήν που φαίνεται πάνω, χωρίς όμως να συμπεριλαμβάνει τους ανισοτικούς και ισοτικούς περιορισμούς ($g_j(\mathbf{X})$ και $l_j(\mathbf{X})$).

Στο παραπάνω πρόβλημα μπορούν να ενταχθούν και περιορισμοί στις μεταβλητές σχεδίασης, θέτοντας άνω και κάτω όρια:

$$x_{i_{lower}} \leq x_i \leq x_{i_{upper}}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5.2)$$

5.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Τα προβλήματα βελτιστοποίησης χωρίζονται σε πολλές κατηγορίες:

- Ανάλογα με την **ύπαρξη περιορισμών** τα προβλήματα βελτιστοποίησης χωρίζονται σε εκείνα που έχουν περιορισμούς (constrained) και εκείνα που δεν έχουν περιορισμούς (unconstrained).
- Ανάλογα με την **φύση των μεταβλητών σχεδίασης**, χωρίζονται σε στατικά προβλήματα (Static Optimization Problems) και δυναμικά προβλήματα (Dynamic Optimization Problems). Τα πρώτα, είναι εκείνα που οι μεταβλητές σχεδίασης είναι συγκεκριμένες τιμές που ελαχιστοποιούν (ή μεγιστοποιούν) μια συνάρτηση. Τα προβλήματα δυναμικού προγραμματισμού είναι εκείνα που οι μεταβλητές σχεδίασης είναι συνεχείς συναρτήσεις μιας άλλης παραμέτρου:
$$\mathbf{X}(t) = \begin{Bmatrix} x_1(t) \\ \dots \\ x_n(t) \end{Bmatrix}$$
- Ανάλογα με την **φυσική δομή του προβλήματος**, τα προβλήματα βελτιστοποίησης χωρίζονται σε προβλήματα βέλτιστου ελέγχου (Optimal Control Problems) και προβλήματα μη βέλτιστου ελέγχου (Non-Optimal Control Problems). Το πρώτο αναφέρεται σε προβλήματα που περιλαμβάνουν μια σειρά από διαφορετικές φάσεις, όπου η κάθε μία προκύπτει από την προηγούμενη με συγκεκριμένο τρόπο, και οι μεταβλητές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: εκείνες που καθορίζουν την εξέλιξη του συστήματος από την μία φάση στην άλλη (control variables) και εκείνες που περιγράφουν την συμπεριφορά του συστήματος σε κάθε φάση (state variables).
- Ανάλογα με την **φύση των εξισώσεων που καθορίζουν το πρόβλημα**, έχουμε γραμμικά προβλήματα (Linear Programming - LP), όπου όλες οι εξισώσεις αποτελούν ένα γραμμικό σύστημα, και τα μη γραμμικά προβλήματα (Nonlinear Programming - NLP), που είναι εκείνα που έστω και μία από τις εξισώσεις που εμφανίζονται στο πρόβλημα είναι μη γραμμική.
- Ανάλογα με τις **επιτρεπτές τιμές των μεταβλητών σχεδίασης**, το πρόβλημα χωρίζεται σε προβλήματα με μεταβλητές ακέραιους αριθμούς (Integer-Valued Programming Problems) και σε προβλήματα με μεταβλητές πραγματικούς αριθμούς (Real-Valued Programming Problems).
- Ανάλογα με την **ντετερμινιστική φύση του μεταβλητών**, τα προβλήματα βελτιστοποίησης χωρίζονται σε ντετερμινιστικά (deterministic) και στοχαστικά (stochastic), όπου στην δεύτερη περίπτωση, κάποιες από τις μεταβλητές θεωρούμε ότι δεν έχουν σταθερή τιμή, αλλά κυμαίνονται μεταξύ κάποιων τιμών, με γνωστή την πιθανότητα πραγματοποίησης κάθε ενδεχομένου.

- Ανάλογα με το **αν μπορούν να διασπαστούν οι συναρτήσεις** (η αντικειμενική συνάρτηση και οι συναρτήσεις των περιορισμών), κατηγοριοποιούνται σε εκείνες που χωρίζονται (separable) και εκείνες που δεν χωρίζονται (non-separable).
- Ανάλογα με τον **αριθμό των αντικειμενικών συναρτήσεων**, χωρίζονται σε μονοκριτηριακά προβλήματα (Single-Objective), που έχουν μία αντικειμενική συνάρτηση, και πολυκριτηριακά προβλήματα (Multi-Objective) που έχουν πάνω από μία.

Σύμφωνα με τα παραπάνω το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία εντάσσεται στις εξής κατηγορίες: (θα χρησιμοποιηθεί η αγγλική ορολογία)

- ✓ Constrained
- ✓ Static
- ✓ Non-Optimal Control
- ✓ Non-Linear
- ✓ Real-Valued
- ✓ Stochastic
- ✓ Non-separable
- ✓ Multi-Objective

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων βελτιστοποίησης με περιορισμούς. Όλες οι μέθοδοι μπορούν να ενταχθούν σε δύο υποκατηγορίες, ξεχωριστά από εκείνες που αναφέρθηκαν έως τώρα: τις άμεσες (Direct Methods) και τις έμμεσες (Indirect Methods). Στην πρώτη, οι περιορισμοί λαμβάνονται υπ' όψιν από την μέθοδο με άμεσο τρόπο, ενώ στην δεύτερη, το πρόβλημα επιλύεται με μία ακολουθία προβλημάτων χωρίς περιορισμούς. Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιείται η μέθοδος Sequential Quadratic Programming (SQP) η οποία ανήκει στην πρώτη κατηγορία. Λεπτομέρειες για την συγκεκριμένη μέθοδο δίνονται σε επόμενο κεφάλαιο.

5.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΜΑΤΛΑΒ

Η επιλογή του αλγόριθμου βελτιστοποίησης στο MATLAB γίνεται με βάση το είδος της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών. Πιο συγκεκριμένα, η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να είναι:

- Γραμμική (Linear)
- Τετραγωνική (Quadratic)
- Άθροισμα δυνάμεων (Sum-of-squares)
- Λεία, μη γραμμική (Smooth Nonlinear)
- Μη λεία (Non Smooth)

Στην δική μας περίπτωση, για τον υπολογισμό τριών εκ των μεταβλητών που υπολογίζονται στο μοντέλο (ισχύς κύριας μηχανής, ισχύς γεννητριών και βάρος μηχανολογικής εγκατάστασης), γίνεται γραμμική παρεμβολή μεταξύ κάποιων σημείων, επομένως η πρώτη παράγωγος παρουσιάζει ασυνέχεια σε κάποια σημεία. Παρόλα αυτά, οι ασυνέχειες αυτές είναι μικρές. Επίσης η εντολή που δίνει το MATLAB για λείες συναρτήσεις ('fmincon') μπορεί να επιλύσει και μη λεία προβλήματα. Γι αυτό τον λόγο, στην επιλογή της εντολής αντιμετωπίζουμε την συνάρτηση ως λεία, μη γραμμική.

Στη συνέχεια πρέπει να αναγνωρίσουμε το είδος των περιορισμών, οι οποίοι μπορεί να είναι:

- Να μην υπάρχουν (None)
- Όρια (Bound)
- Γραμμικοί περιορισμοί (Linear)
- Γενικά λείοι περιορισμοί (General Smooth)
- Διακριτοί (Discrete)

Στην περίπτωσή μας έχουμε γενικά λείους περιορισμούς (General Smooth), και πάλι με την παραδοχή που έγινε προηγουμένως ως προς την λειότητα της συνάρτησης.

Έτσι, ο παρακάτω πίνακας δείχνει ποιοι αλγόριθμοι ενδείκνυνται για κάθε συνδιασμό των παραπάνω:

Constraint Type	Objective Type				
	Linear	Quadratic	Least Squares	Smooth nonlinear	Nonsmooth
None	n/a ($f = \text{const}$, or $\text{min} = -\infty$)	quadprog	lsqcurvefit, lsqnonlin	fminsearch, fminunc	fminsearch
Bound	linprog	quadprog	lsqcurvefit, lsqin, lsqnonlin, lsqnonneg	fminbnd, fmincon, fseminf	
Linear	linprog	quadprog	lsqin	fmincon, fseminf	
General smooth	fmincon	fmincon	fmincon	fmincon, fseminf	
Discrete	bintprog				

Πίνακας 5.1: Πίνακας επιλογής μεθόδου βελτιστοποίησης στο MATLAB

Από τον πίνακα της προηγούμενης σελίδας προκύπτει ότι οι εντολές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο πρόβλημά μας είναι οι `fmincon` και `fseminf`, όπου η δεύτερη επιλύει προβλήματα ειδικού τύπου (Semi-Infinite Optimization) επομένως, η εντολή που επιλέγεται είναι ο `fmincon`.

Η εντολή `fmincon` δίνει την δυνατότητα επιλογής μεταξύ τεσσάρων αλγορίθμων.

- ✓ 'interior-point'
- ✓ 'sqp'
- ✓ 'active-set'
- ✓ 'trust-region-reflective'

Από αυτούς, ο τελευταίος δεν μπορεί να εφαρμοστεί, διότι το πρόβλημα πρέπει να έχει ή μόνο όρια (bounds) ή μόνο γραμμικούς ιστοτικούς περιορισμούς. Επομένως μπορούμε να επιλέξουμε έναν από τους τρεις πρώτους. Μιας και οι τρεις είναι κατάλληλοι για το πρόβλημά μας, δεν έγινε περαιτέρω διερεύνηση και επιλέχθηκε ο αλγόριθμος 'sqp' (Sequential Quadratic Programming). Η μέθοδος αυτή αναλύεται σε επόμενο κεφάλαιο.

5.5 ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Pareto Optimum Solutions:

Σε γενικές γραμμές, στα προβλήματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης δεν υπάρχει ένα μοναδικό διάνυσμα X που να ελαχιστοποιεί όλες τις αντικειμενικές συναρτήσεις. Γι αυτό εφαρμόζεται μια διαφορετική μεθοδολογία που χρησιμοποιεί λύσεις που ονομάζονται 'Pareto Optimum Solutions'. Μία εφικτή λύση X ενός πολυκριτηριακού προβλήματος βελτιστοποίησης ονομάζεται 'Pareto Optimal' όταν δεν υπάρχει κάποια εφικτή λύση Y για την οποία να ισχύει $f_i(X) \leq f_i(Y)$ για $i = 1, 2, \dots, k$ με $f_j(Y) < f_j(X)$ να ισχύει για τουλάχιστον ένα j . Με άλλα λόγια, ένα εφικτό διάνυσμα X ονομάζεται 'Pareto Optimal' εάν δεν υπάρχει άλλο εφικτό διάνυσμα Y που θα μείωνε μία από τις αντικειμενικές συναρτήσεις χωρίς να προκαλέσει ταυτόχρονη αύξηση για τουλάχιστον μία από τις υπόλοιπες αντικειμενικές συναρτήσεις. Έτσι, στα προβλήματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης η βέλτιστη λύση είναι μία εκ των 'Pareto Optimal' λύσεων και η επιλογή της εξαρτάται από τους συμβιβασμούς που μπορούν να γίνουν μεταξύ των αντικειμενικών συναρτήσεων και διαφέρει από πρόβλημα σε πρόβλημα.

Μέθοδος 'Normed Weighted Sum Optimum':

Το MATLAB διαθέτει και αλγόριθμους για πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, όμως στην παρούσα εργασία η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση γίνεται με τον ίδιο αλγόριθμο, χρησιμοποιώντας την μέθοδο 'Normed Weighted Sum Optimum', η οποία λειτουργεί ως εξής:

Έχοντας δύο ζεύγη λύσεων (μ_1, σ_1) και (μ_2, σ_2) , που το καθένα έχει προκύψει από μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση των δύο 'αντικρουόμενων' αντικειμενικών συναρτήσεων, μπορεί να εφαρμοστεί μια πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, όπου ως αντικειμενική συνάρτηση χρησιμοποιείται το άθροισμα των κανονικοποιημένων τιμών της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης, με χρήση κάποιων συντελεστών βάρους w_k :

$$\min \left[w_1 \cdot \frac{\mu}{\mu_1} + w_2 \cdot \frac{\sigma}{\sigma_2} \right] \quad (5.3)$$

Όπου

$$\sum_{k=1}^2 w_k = 1 \quad (5.4)$$

Η εμφάνιση των βέλτιστων λύσεων (Pareto Optimum Solutions) προκύπτει μεταβάλλοντας τα βάρη w_1 και w_2 .

5.6 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΕΘΟΔΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Πριν αναλυθεί ο τρόπος λειτουργίας της μεθόδου βελτιστοποίησης, θα καθοριστούν κάποια στοιχεία τα οποία εμφανίζονται σε μεθόδους που επίλυσης με χρήση της κλίσης των συναρτήσεων (Gradient Methods).

Κλίση (Gradient):

Η κλίση συναρτήσεων με πολλές μεταβλητές είναι ένα σημαντικό στοιχείο που καθορίζει την λύση σε μη γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης, ιδιαίτερα σε προβλήματα χωρίς περιορισμούς. Η κλίση μιας συνάρτησης σχετίζεται με την παράγωγό της. Για μία συνάρτηση με μία μεταβλητή, η παράγωγος της συνάρτησης σε ένα σημείο είναι η κλίση της, και αντιπροσωπεύει μία γραμμή που εφάπτεται σε εκείνο το σημείο με την συνάρτηση.

Για μια συνάρτηση $f(x)$, η παράγωγος συμβολίζεται ως $\frac{df}{dx}$.

Για μία συνάρτηση με περισσότερες από μία μεταβλητές, η κλίση της συνάρτησης σε ένα σημείο είναι ένα διάνυσμα των μερικών παραγώγων της. Η φυσική της σημασία είναι ότι αποτελεί την κατεύθυνση από το συγκεκριμένο σημείο, κατά την οποία η συνάρτηση έχει τη πιο απότομη μείωση (ή αύξηση). Για μία συνάρτηση με πολλές μεταβλητές

$$f(\mathbf{X}) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

η κλίση (Gradient) είναι:

$$\nabla f(\mathbf{X}) = \left[\frac{\partial f}{\partial x_1} \quad \frac{\partial f}{\partial x_2} \quad \dots \quad \frac{\partial f}{\partial x_n} \right]^T \quad (5.5)$$

Ιακωβιανός πίνακας (Jacobian):

Ο ιακωβιανός πίνακας είναι μία έκφραση των κλίσεων πολλών συναρτήσεων (που σχετίζονται μεταξύ τους). Σε προβλήματα βελτιστοποίησης είναι συνήθως ένα διάνυσμα περιορισμών.

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \frac{\partial g_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial g_2}{\partial x_1} & \frac{\partial g_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_2}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial g_m}{\partial x_1} & \frac{\partial g_m}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial x_n} \end{bmatrix}_{m \times n} = \begin{bmatrix} \nabla g_1 \\ \nabla g_2 \\ \dots \\ \nabla g_m \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Εσσιανός πίνακας (Hessian):

Ο εσσιανός πίνακας μίας συνάρτησης είναι η μήτρα των δεύτερων παραγώγων:

$$[H] = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Σειρά Taylor:

Η σειρά Taylor χρησιμοποιείται για την προσέγγιση μίας συνάρτησης γύρω από ένα σημείο, στο οποίο η συνάρτηση είναι πλήρως καθορισμένη (δηλαδή είναι γνωστή η τιμή της συνάρτησης, και των παραγώγων της). Για συνάρτηση μίας μεταβλητής η σχέση είναι η εξής:

$$f(x + \Delta x) \cong f(x) + \frac{df}{dx} \cdot \Delta x + \frac{1}{2!} \cdot \frac{d^2f}{dx^2} \cdot \Delta x^2 + \dots + \frac{1}{n!} \cdot \frac{d^nf}{dx^n} \cdot \Delta x^n \quad (5.8)$$

Η σειρά Taylor χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για να εξασφαλιστεί η συνέχεια σε ένα μοντέλο. Είναι ο στυλοβάτης πολλών αριθμητικών μεθόδων, συμπεριλαμβανομένων και των μεθόδων βελτιστοποίησης. Η παραπάνω σχέση, συνήθως περιορίζεται στους πρώτους δύο ή τρεις όρους του δεξιού μέλους, όπου δίνει ένα τελικό σφάλμα το οποίο θα εξαρτάται από τους όρους που παραλήφθηκαν. Για συνάρτηση πολλών μεταβλητών, η σχέση γράφεται:

$$f(\mathbf{X} + \Delta \mathbf{X}) \approx f(\mathbf{X}) + \nabla f(\mathbf{X})^T \Delta \mathbf{X} + \frac{1}{2} \Delta \mathbf{X}^T H(\mathbf{X}) \Delta \mathbf{X} \quad (5.9)$$

Όπου $H(\mathbf{X})$ είναι ο εσσιανός πίνακας.

Ακολουθεί η ανάλυση της μεθόδου Sequential Quadratic Programming.

5.7 SEQUENTIAL QUADRATIC PROGRAMMING (SQP)

- ✓ Το πρόβλημα βελτιστοποίησης έχει την εξής μορφή:

$$\text{Ελαχιστοποίηση: } f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

$$\text{Ικανοποιώντας: } h_k(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad , \quad k = 1, 2, \dots, l$$

$$g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0 \quad , \quad k = 1, 2, \dots, m$$

$$\text{Περιορισμοί: } x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \quad , \quad i = 1, 2, \dots, n$$

- ✓ Το υπο-πρόβλημα SQP που επιλύεται είναι:

$$\text{Ελαχιστοποίηση: } f(X_i + \Delta X) \approx f(X_i) + \nabla f(X_i)^T \Delta X + \frac{1}{2} \Delta X^T \nabla^2 f(X_i) \Delta X$$

$$\text{Ικανοποιώντας: } h_k(X_i + \Delta X): \quad h_k(X_i) + \nabla h_k^T(X_i) \Delta X = 0 \quad , \quad k = 1, 2, \dots, l$$

$$g_j(X_i + \Delta X): \quad g_j(X_i) + \nabla g_j^T(X_i) \Delta X \leq 0 \quad , \quad j = 1, 2, \dots, m$$

$$\text{Περιορισμοί: } \Delta x_i^l \leq \Delta x_i \leq \Delta x_i^u \quad , \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Το παραπάνω είναι πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού (Quadratic Programming – QP). Η αντικειμενική συνάρτηση αναπαριστάται τετραγωνικά γύρω από μία τιμή X_i , με την βοήθεια ενός δευτεροβάθμιου πολυώνυμου Taylor, ενώ οι περιορισμοί αναπαριστάνονται γραμμικά με πρωτοβάθμιο πολυώνυμο Taylor.

Όπου στον πίνακα των πρώτων παραγώγων $\nabla f(\vec{x}_0)$ (Gradient), οι παράγωγοι υπολογίζονται ως διακριτές διαφορές:

$$\frac{\partial f}{\partial x_{X_m}} \cong \frac{f(X_m + \Delta x_i \mathbf{u}_i) - f(X_m)}{\Delta x_i} \quad , \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5.10)$$

Όπου X_m : το σημείο πάνω στο οποίο αναπτύσσεται το πολυώνυμο Taylor

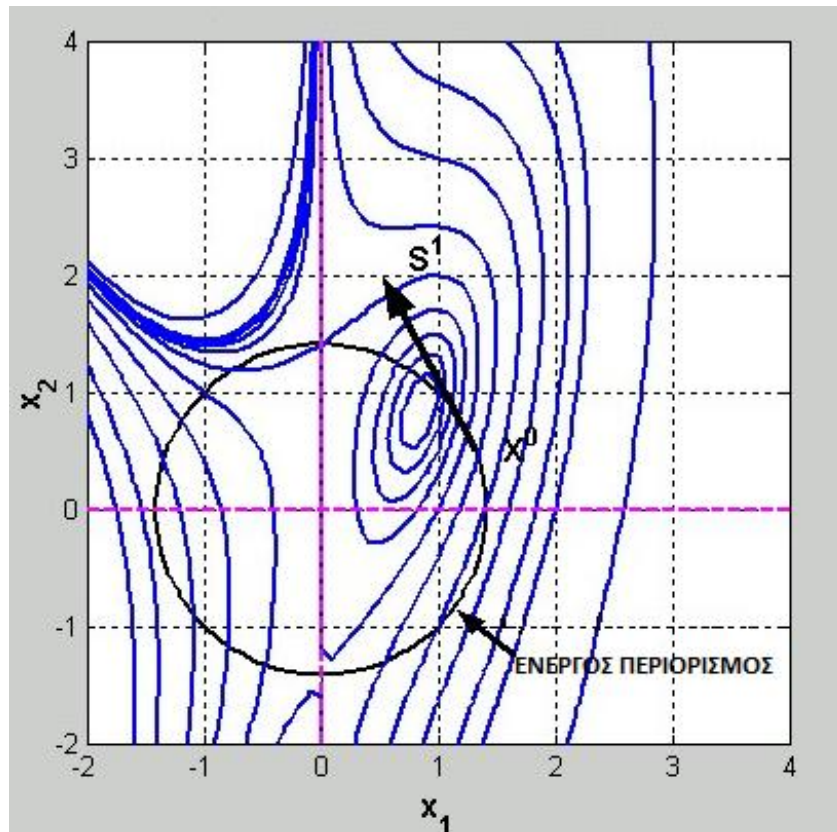
Δx_i : μια μικρή απόσταση

\mathbf{u}_i : ένα διάνυσμα τάξης n που το στοιχείο i είναι 1 και τα υπόλοιπα 0

Ο πίνακας των δεύτερων παραγώγων $\nabla^2 f(\vec{x}_0)$ (Εσσιανός πίνακας, σχέση (5.7)) δεν υπολογίζεται, αλλά θεωρείται αρχικά μοναδιαίος και σε κάθε βήμα 'ενημερώνεται' με χρήση της μεθόδου Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS), η οποία παρουσιάζεται λίγο παρακάτω.

Επομένως ο μόνος άγνωστος στο παραπάνω υπο-πρόβλημα είναι η ποσότητα ΔX . Το συγκεκριμένο υπο-πρόβλημα τετραγωνικού είναι καλά τεθειμένο και έχει μοναδική λύση.

Γράφοντας το ΔX ως την κατεύθυνση αναζήτησης S . Το πρόβλημα QP για το S τροποποιεί τους ισοτικούς περιορισμούς, έτσι ώστε να μπορεί να βρεθεί μια εφικτή λύση όταν οι περιορισμοί είναι ενεργοί. Αυτή η τροποποίηση φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.2: Κατεύθυνση αναζήτησης όταν υπάρχει ενεργός περιορισμός

Στο σχήμα, βρισκόμαστε στο σημείο X^0 και για την εύρεση της λύσης πρέπει να κινηθούμε σε μια διαδρομή παράλληλη με την εφαπτόμενη στον περιορισμό. Έτσι, όσο μικρό και να είναι το βήμα ο περιορισμός θα παραβιαστεί. Για να μπορέσει να βρεθεί ένα νέο σημείο που να ικανοποιεί τους περιορισμούς πρέπει να κινηθούμε σε μία κατεύθυνση ελαφρώς μικρότερη από την κλίση που προέκυψε. Μελέτες έχουν δείξει ότι μια απόκλιση 90 με 95% από την εφαπτόμενη δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Το υπο-πρόβλημα με χρήση της κατεύθυνσης S είναι το εξής:

$$\text{Ελαχιστοποίηση: } f(S) \approx f(X_i) + \nabla f(X_i)^T S + \frac{1}{2} S^T [H] S$$

$$\text{Ικανοποιώντας: } h_k(S): c h_k(X_i) + \nabla h_k^T(X_i) S = 0 \quad , \quad k = 1, 2, \dots, l$$

$$g_j(S): c g_j(X_i) + \nabla g_j^T(X_i) S \leq 0 \quad , \quad j = 1, 2, \dots, l$$

$$\text{Περιορισμοί: } S_i^l \leq S_i \leq S_i^u \quad , \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Όπου ο παράγοντας c παίρνει τιμή 0.90 – 0.95, ενώ στον ανισοτικό περιορισμό παίρνει την τιμή 1 όταν ο περιορισμός δεν είναι ενεργός.

Το παραπάνω υπο-πρόβλημα επιλύεται με την μέθοδο ενεργού συνόλου (Active set), όπου στη συγκεκριμένη μέθοδο δημιουργείται ένα ενεργό σύνολο, το οποίο υπολογίζει πόσοι περιορισμοί είναι ενεργοί στο κάθε σημείο. Με βάση αυτό το σύνολο, δημιουργείται μία κατεύθυνση αναζήτησης, η οποία εξασφαλίζει ότι δεν θα παραβιαστούν οι περιορισμοί. Πέρα από την εύρεση της κατεύθυνσης S , απαιτείται και η εύρεση του μεγέθους του βήματος, το οποίο ελαχιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση.

Έτσι, αφού βρεθεί η κατεύθυνση S με επίλυση του παραπάνω συστήματος, καθορίζεται το μέγεθος του βήματος a^* το οποίο είναι απαραίτητο για να βρεθεί το επόμενο σημείο X_{i+1} .

$$X_{q+1} = X_q + a^*S \quad (5.11)$$

Όπου a^* το βέλτιστο βήμα προς την κατεύθυνση S , το οποίο υπολογίζεται ελαχιστοποιώντας την παρακάτω συνάρτηση με μία μη γραμμική μονοδιάστατη μέθοδο βελτιστοποίησης (με χρήση 'penalty function' για να μην επιτραπεί η παραβίαση των περιορισμών):

$$\varphi = f(X_{q+1}) + \sum_{j=1}^m \lambda_j (\max[0, g_j(X_{q+1})]) + \sum_{k=1}^p \lambda_{m+k} |h_k(X_{q+1})| \quad (5.12)$$

$$\text{Όπου } \lambda_j = \begin{cases} |\lambda_j| & , j = 1, 2, \dots, m+p \text{ στην πρώτη επανάληψη} \\ \max\{|\lambda_j|, \frac{1}{2}(\tilde{\lambda}_j, |\lambda_j|)\} & \text{στις υπόλοιπες επαναλήψεις} \end{cases}$$

με $\tilde{\lambda}_j = \lambda_j$ της προηγούμενης επανάληψης

Ο υπολογισμός των πολλαπλασιαστών λ_j (πολλαπλασιαστές Lagrange) γίνεται με χρήση των συνθηκών Kuhn-Tucker. Οι συνθήκες Kuhn-Tucker είναι οι αναγκαίες συνθήκες (και ικανές όταν η αντικειμενική συνάρτηση είναι κυρτή [convex]) που ελαχιστοποιούν την παραπάνω συνάρτηση:

$$\begin{aligned} \frac{\theta f}{\theta x_i} + \sum_{j=1}^m \lambda_j \frac{\theta g_j}{\theta x_i} + \sum_{k=m+1}^p \lambda_{m+k} \frac{\theta h_k}{\theta x_i} &= 0 \\ \lambda_j g_j &= 0 \quad , j = 1, 2, \dots, m \\ g_j &\leq 0 \quad , j = 1, 2, \dots, m \\ h_k &= 0 \quad , k = 1, 2, \dots, p \\ \lambda_j &\geq 0 \quad , j = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (5.13)$$

Οι πολλαπλασιαστές των ανισοτικών περιορισμών παίρνουν μηδενική τιμή όταν οι περιορισμοί δεν είναι ενεργοί.

Αφού επιλυθεί το σύστημα, βρεθούν οι πολλαπλασιαστές, και στη συνέχεια ελαχιστοποιηθεί η συνάρτηση φ (που θα έχει πλέον μοναδικό άγνωστο το a^*), υπολογίζεται το X_{q+1} .

Πριν γίνει η επόμενη επανάληψη, ο Εσσιανός πίνακας H 'ενημερώνεται' με χρήση της μεθόδου BFGS. Η BFGS είναι μια Quasi-Newton μέθοδος, δηλαδή προσεγγίζει τον Εσσιανό πίνακα της συνάρτησης Lagrange, με χρήση μόνο των πρώτων παραγώγων. Η σχέση που χρησιμοποιείται δίνεται παρακάτω:

$$H_{k+1} = H_k + \frac{q_k q_k^T}{q_k^T s_k} - \frac{H_k^T s_k^T s_k H_k}{s_k^T H_k s_k} \quad (5.14)$$

Όπου

$$s_k = x_{k+1} - x_k \quad (5.15)$$

$$q_k = (\nabla f(X_{k+1}) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot \nabla g_i(x_{k+1})) - (\nabla f(X_k) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot \nabla g_i(x_k)) \quad (5.16)$$

Είναι καλύτερο ο Εσσιανός πίνακας να είναι θετικά ορισμένος (positive definite), παρόλο που μπορεί στο σημείο που είναι η λύση να μην είναι (positive indefinite). Ο θετικά ορισμένος πίνακας εξασφαλίζεται αν ο όρος $q_k^T s_k$ είναι θετικός σε κάθε 'ενημέρωση' και αν ο αρχικός πίνακας είναι θετικά ορισμένος (που ισχύει, εφόσον χρησιμοποιείται ο μοναδιαίος πίνακας). Αν ο όρος $q_k^T s_k$ δεν είναι θετικός, το q_k τροποποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτευχθεί $q_k^T s_k > 0$. Η γενική ιδέα είναι να τροποποιηθούν τα στοιχεία του q_k που είναι απαραίτητο για να γίνει θετικός ο παραπάνω όρος, όσο το δυνατόν λιγότερο. Έτσι, στα αρχικά στάδια της τροποποίησης, το πιο αρνητικό στοιχείο του q_k διαιρείται με το δύο, μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Αν και πάλι ο όρος δεν είναι θετικός (ή μεγαλύτερος από μια μικρή αρνητική τιμή) προστίθεται στο q_k ένα διάνυσμα v πολλαπλασιασμένο με μία σταθερά w :

$$q_k = q_k + w \cdot v_i \quad (5.17)$$

Όπου,

$$v_i = \nabla g_i(x_{k+1}) \cdot g_i(x_{k+1}) - \nabla g_i(x_k) \cdot g_i(x_k) \quad (5.18)$$

Όταν $(q_k)_i \cdot w < 0$ και $(q_k)_i \cdot (s_k)_i < 0$, $i = 1, \dots, m$
 $v_i = 0$ στις υπόλοιπες περιπτώσεις

Το w αυξάνεται μέχρι να ισχύει $q_k^T s_k > 0$

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης έχει την παρακάτω μορφή:

Βήμα 1	Επιλογή X_1, N_s (αριθμός επαναλήψεων), ε_1 (μικρή ποσότητα που χρησιμοποιείται ως κριτήριο σύγκλισης) $q = 1$ (μετρητής επαναλήψεων)
Βήμα 2	Κάλεσμα QP για βελτιστοποίηση του τετραγωνικού υπο-προβλήματος Output: S Υπολογισμός του a^* $\Delta X = a^* S$ $X_{q+1} = X_q + \Delta X$
Βήμα 3	Σύγκλιση της μεθόδου SQP Αν $h_k = 0$, Για $k = 1, 2, \dots, l$; Αν $g_i \leq 0$, Για $j = 1, 2, \dots, m$; Αν ικανοποιούνται οι συνθήκες Kuhn-Tacker Σύγκλιση Τερματισμός επαναλήψεων Κριτήρια τερματισμού επαναλήψεων: Αν $\Delta X^T \Delta X \leq \varepsilon_1$: Τερματισμός (δεν υπάρχει αλλαγή στη λύση) Αν $q = N_s$: Τερματισμός (μέγιστος αριθμός επαναλήψεων)
	Συνέχεια 'Ενημέρωση' του Εσσιανού πίνακα $q \leftarrow q + 1$ Επιστροφή στο Βήμα 2

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.1 ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Έχουμε κατασκευάσει ένα μοντέλο, όπου με δεδομένα 6 στοιχεία του πλοίου υπολογίζει όλα τα τεχνοοικονομικά μεγέθη που απαιτούνται για την αξιολόγηση μιας πιθανής επένδυσης που αφορά την κατασκευή και την αξιοποίηση ενός πλοίου bulk carrier. Ως αντικειμενική συνάρτηση για την αξιολόγηση της επένδυσης χρησιμοποιείται το κριτήριο του Ελάχιστου Απαιτούμενου Ναύλου (EAN).

Πιο συγκεκριμένα, οι ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος είναι: Μήκος (L), Πλάτος (B), Κοίλο (D), Βύθισμα (T), Συντελεστής Μορφής (CB) και Ταχύτητα (VKN)

Τα μεγέθη που υπολογίζονται στο μοντέλο είναι τα εξής (Παράρτημα Α):
(Για την μελέτη ευαισθησίας θα χρησιμοποιηθούν οι αγγλικοί όροι)

- | | |
|--------------------------|-------------------------|
| ✓ DISPLACEMENT | ✓ PORT COST |
| ✓ STEEL WEIGHT | ✓ HANDLING RATE |
| ✓ OUTFIT WEIGHT | ✓ MISCELLANEOUS DWT |
| ✓ POWER | ✓ FUEL PRICE |
| ✓ MACHINERY WEIGHT | ✓ CARGO DWT |
| ✓ LIGHT SHIP | ✓ PORT DAYS |
| ✓ DWT | ✓ ROUND TRIP PER YEAR |
| ✓ SHIPCOST | ✓ ANNUAL CARGO |
| ✓ CAPITAL COST | ✓ VOYAGE COST |
| ✓ RUNNING COSTS | ✓ ANNUAL COST |
| ✓ ROUND TRIP MILES | ✓ TRANSPORTATION COST |
| ✓ FUEL PRICE | ✓ LOAN INTEREST |
| ✓ SEA DAYS | ✓ BANK INTEREST |
| ✓ AUXILARY ENGINES POWER | ✓ INFLATION |
| ✓ DAILY CONSUMPTION | ✓ SHIP VALUE IN THE END |
| ✓ FUEL COST | ✓ RFR |

Μελετάμε μία επένδυση που θα διαρκέσει 20 έτη, με την παραδοχή ότι, ο πλοιοκτήτης πληρώνει το 30% της επένδυσης μετρητά, και το υπόλοιπο 70% με δάνειο, το οποίο ξεχρεώνεται μέσα σε 10 έτη. Λαμβάνεται επίσης υπ' όψιν και ο χρόνος από την παραγγελία μέχρι την παράδοση του πλοίου ($N_c=2$ έτη). Η χρηματοροές φαίνονται στο σχήμα (3.1).

Στον κώδικα δίνονται κάποιες αρχικές τιμές:

Κόστος Καυσίμου=400 €/ton

Επιτόκιο δανεισμού=8%

Επιτόκιο τράπεζας=8%

Πληθωρισμός=3%

Διαδρομή: New Orleans – Rotterdam (R=4800 nm)

Cargo Handling Rate=6000 ton/day

Το εύρος του DWT είναι:

$80000 \leq DWT \leq 200000$ (κατηγορία Capesize)

Τα όρια που έχουν τεθεί στις ανεξάρτητες μεταβλητές είναι τα εξής:

$150 \leq L \leq 300$ m

$20 \leq B \leq 50$ m

$13 \leq D \leq 30$ m

$10 \leq T \leq 20$ m

$13 \leq V_{KN} \leq 16$ kn

$0.63 \leq C_B \leq 0.85$

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΗΣΗΣ:

Το πλοίο που προέκυψε έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

L = 286.7655 m	(Μήκος)
B = 40.9508 m	(Πλάτος)
D = 25.9136 m	(Κοίλο)
T = 18.8395 m	(Βύθισμα)
VKN = 13.0000 kn	(Ταχύτητα)
CB = 0.8500	(Συντελεστής γάστρας)
DISP = 192750 ton	(Εκτόπισμα)
POW = 11556 kW	(Ισχύς)
LS = 22214 ton	(Βάρος άφορτου σκάφους)
DWT = 170540 ton	(‘Νεκρό’ βάρος)
SHIPCOST = 25028000 €	(Κόστος πλοίου)
EEDI = 2.2787	(Δείκτης EEDI)
EEDIreq = 2.8477	(Απαιτούμενος δείκτης EEDI)
TRANSCOST = 14.0500 €/ton φορτίου	(Κόστος ανά μονάδα φορτίου)
TELIKI_AKSIA = 5005500 €	(Αξία πλοίου στο τέλος της επένδυσης)
EAN = 16.5830 €/ton φορτίου	(Ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος)

6.2 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΑΒΕΒΑΙΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

Παρακάτω παρουσιάζονται όλα τα μεγέθη που εμφανίζονται στο μοντέλο του πλοίου. Σε παρένθεση αναγράφονται τα μεγέθη με βάση τα οποία έχει γίνει ο υπολογισμός του κάθε στοιχείου.

Από αυτή την λίστα γίνεται η επιλογή των αβέβαιων μεταβλητών, χρωματίζοντας τα μεγέθη με βάση το είδος της αβεβαιότητας που υπάρχει. Η κατηγοριοποίηση που έγινε είναι η εξής:

- Κατασκευαστικές Αβεβαιότητες (κόκκινο χρώμα)
- Λειτουργικές Αβεβαιότητες (μπλε χρώμα)
- Οικονομικές Αβεβαιότητες (πράσινο χρώμα)

Η λογική πίσω από την επιλογή των αβέβαιων μεταβλητών είναι η εξής:

- Τα μεγέθη που δεν εξαρτώνται από άλλα, και οι τιμές τους ορίζονται μέσα από τον κώδικα, επιλέχθηκαν όλα ως αβέβαιες μεταβλητές, με εξαίρεση τις ανεξάρτητες μεταβλητές (L, B, D, T, VKN, CB), καθώς επίσης και τις ειδικές καταναλώσεις των κινητήρων.
- Για τα μεγέθη που εξαρτώνται από άλλα τέθηκε το ερώτημα: Εάν τα μεγέθη μέσα στις παρενθέσεις είναι πλήρως καθορισμένα, τότε το στοιχείο εκτός παρενθέσεως είναι πλήρως καθορισμένο; Ή υπάρχει αβεβαιότητα ως προς τον καθορισμό του;

- | | |
|--|---|
| ✓ L | ✓ PORT COST (DWT) |
| ✓ B | ✓ HANDLING RATE |
| ✓ D | ✓ MISCELLANEOUS DWT (DWT, SEA DAYS) |
| ✓ T | ✓ FUEL CARRIED (DAILY CONSUMPTION, SEA DAYS) |
| ✓ CB | ✓ CARGO DWT (DWT, FUEL CARRIED, MISCELLANEOUS DWT) |
| ✓ VKN | ✓ PORT DAYS (CARGO DWT, HANDLING RATE) |
| ✓ DISPLACEMENT (L, B, T, CB) | ✓ ROUND TRIP PER YEAR (SEA DAYS, PORTDAYS) |
| ✓ STEEL WEIGHT (L, B, D, CB) | ✓ ANNUAL CARGO (CARGO DWT, ROUND TRIP PER YEAR) |
| ✓ OUTFIT WEIGHT (L, B) | ✓ VOYAGE COST (FUEL COST, PORT COST, ROUND TRIP PER YEAR) |
| ✓ POWER (VKN, DWT) | ✓ ANNUAL COST (CAPITAL COST, RUNNING COSTS, VOYAGE COST) |
| ✓ MACHINERY WEIGHT (POWER) | ✓ TRANSPORTATION COST (ANNUAL COST, ANNUAL CARGO) |
| ✓ LIGHT SHIP (STEEL WEIGHT, OUTFIT WEIGHT, MACHINERY WEIGHT) | ✓ LOAN INTEREST |
| ✓ DWT (DISPLACEMENT, LIGHT SHIP) | ✓ BANK INTEREST |
| ✓ SHIPCOST (STEEL WEIGHT, OUTFIT WEIGHT, POWER) | ✓ INFLATION |
| ✓ CAPITAL COST (SHIPCOST) | ✓ SHIP VALUE IN THE END (SHIPCOST) |
| ✓ RUNNING COSTS (DWT) | ✓ RFR |
| ✓ ROUND TRIP MILES | |
| ✓ FUEL PRICE | |
| ✓ SEA DAYS (ROUND TRIP MILES, VKN) | |
| ✓ AUXILIARY ENGINES POWER (POWER) | |
| ✓ DAILY CONSUMPTION (POWER, AUXILIARY ENGINES POWER) | |
| ✓ FUEL COST (DAILY CONSUMPTION, SEA DAYS, FUEL PRICE) | |

Συνοψίζοντας:

ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΕΣ

- ✓ STEEL WEIGHT
- ✓ OUTFIT WEIGHT
- ✓ POWER
- ✓ MACHINERY WEIGHT
- ✓ AUXILARY ENGINES POWER
- ✓ MISCELLANEOUS DWT

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΕΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΕΣ

- ✓ ROUND TRIP MILES
- ✓ DAILY CONSUMPTION
- ✓ HANDLING RATE

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΕΣ

- ✓ SHIPCOST
- ✓ CAPITAL COST
- ✓ RUNNING COSTS
- ✓ FUEL PRICE
- ✓ PORT COST
- ✓ LOAN INTEREST
- ✓ BANK INTEREST
- ✓ INFLATION
- ✓ SHIP VALUE IN THE END

6.3 ΜΕΛΕΤΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΙΣ ΑΒΕΒΑΙΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ

Στη συνέχεια γίνεται μια μελέτη ευαισθησίας ως προς τις αβέβαιες μεταβλητές στο πλοίο που προέκυψε από την ντετερμινιστική βελτιστοποίηση, προκειμένου να δούμε ποιες από αυτές επηρεάζουν περισσότερο το μοντέλο του πλοίου και ποιες λιγότερο. Αυτό θα γίνει μεταβάλλοντας κάθε μεταβλητή από την αρχική τιμή συν-πλην κάποιο ποσοστό (στο συγκεκριμένο παράδειγμα 2%) από αυτή, και ελέγχοντας πως επηρεάζεται η αντικειμενική συνάρτηση, που στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι ο ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος.

Για τον καθορισμό των μεταβλητών στις οποίες υπάρχει μεγαλύτερη ευαισθησία χρησιμοποιείται η κλίση της ευθείας με άκρα της την τιμή της καθαρής παρούσας αξίας για μείον 2% της αβέβαιης μεταβλητής, με αυτήν που προκύπτει για συν 2% *. Για να μπορέσει να γίνει σύγκριση των μεγεθών, δεδομένου ότι κάθε μέγεθος έχει διαφορετικές μονάδες, η κλίση της ευθείας πολλαπλασιάζεται με τον λόγο του κάθε μεγέθους προς την καθαρή παρούσα αξία, με χρήση των αρχικών τιμών τους, δηλαδή:

$$\text{κλίση} = \left(\frac{|y_{-2\%} - y_{+2\%}|}{|x_{-2\%} - x_{+2\%}|} \right) \cdot \frac{x_0}{y_0} \quad (6.1)$$

Στην επόμενη σελίδα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης ευαισθησίας, κατανεμημένα από την μεταβλητή με την μεγαλύτερη επιρροή προς την μεταβλητή με την μικρότερη κάθε κατηγορίας.

Σημείωση: Η επιλογή των αβέβαιων μεταβλητών με βάση την κλίση δεν είναι ο ιδανικότερος τρόπος επιλογής αβέβαιων μεταβλητών, μιας και είναι πιθανό μια μεταβλητή με μικρή κλίση να έχει πολύ μεγαλύτερο εύρος τιμών με αποτέλεσμα η επιρροή της στο μοντέλο να είναι τελικά σημαντικότερη από μία άλλη μεταβλητή με μεγαλύτερη κλίση. Παρόλα αυτά, στην μελέτη που ακολουθεί, ως αβέβαιες θα επιλεγθούν οι μεταβλητές με την μεγαλύτερη κλίση.

* Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, η μεταβολή των μεταβλητών στο διάστημα $[x_0 - 0.02x_0, x_0 + 0.02x_0]$, δίνει μια μονότονη μεταβολή του Ελάχιστου Απαιτούμενου Ναύλου.

ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΕΣ

	Αρχική τιμή	ποσοστό απόκλισης (%)	min	max	MAX RFR	MIN RFR	κλίση
POWER (kW)	11556	2	11324,88	11787,12	16,6955	16,4704	0,3394
STELL WEIGHT (ton)	19386	2	18998,28	19773,72	16,6697	16,4961	0,2617
OUTFIT WEIGHT (ton)	1760,9	2	1725,682	1796,118	16,6478	16,5182	0,1954
AUXILARY ANGINES POWER (kW)	538,8993	2	528,12131	549,67729	16,5868	16,5791	0,0116
MACHINERY WEIGHT (ton)	1066,2	2	1044,876	1087,524	16,5839	16,582	0,0029
MISCELLANEOUS DWT (ton)	163,6977	2	160,42375	166,97165	16,5831	16,5828	0,0005

Πίνακας 6.1: Κατασκευαστικές αβεβαιότητες

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΕΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΕΣ

	Αρχική τιμή	ποσοστό απόκλισης (%)	min	max	MAX RFR	MIN RFR	κλίση
ROUND TRIP MILES (nm)	9600	2	9408	9792	16,7462	16,4198	0,4921
HANDLING RATE (ton/day)	6000	2	5880	6120	16,7421	16,43	0,4705
DAILY CONSUMTION (ton)	49,6057	2	48,6136	50,5978	16,6609	16,5051	0,2349

Πίνακας 6.2: Λειτουργικές αβεβαιότητες

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΕΣ

	Αρχική τιμή	ποσοστό απόκλισης (%)	min	max	MAX RFR	MIN RFR	κλίση
SHIPCOST (£)	25028000	2	24527440	25528560	16,7829	16,3831	0,6027
CAPITAL COST (£)	5005500	2	4905390	5105610	16,7322	16,4337	0,4500
FUEL PRICE (£/ton)	400	2	392	408	16,659	16,5069	0,2293
RUNNING COSTS (£)	1484600	2	1454908	1514292	16,6272	16,5387	0,1334
BANK INTEREST	0,08	2	0,0784	0,0816	16,607	16,5589	0,0725
PORT COST (£)	96561	2	94629,78	98492,22	16,5944	16,5715	0,0345
INFLATION	0,03	2	0,0294	0,0306	16,5924	16,5735	0,0285
SHIP VALUE IN THE END (£)	5005500	2	4905390	5105610	16,5883	16,5776	0,0161
LOAN INTEREST	0,08	2	0,0784	0,0816	16,5857	16,5802	0,0083

Πίνακας 6.3: Οικονομικές αβεβαιότητες

Συνολικά, η κατάταξη από τις αβεβαιότητες που επηρεάζουν περισσότερο το μοντέλο προς εκείνες που επηρεάζουν λιγότερο:

Κατασκευαστικές Αβεβαιότητες: **κόκκινο** χρώμα

Λειτουργικές Αβεβαιότητες: **μπλε** χρώμα

Οικονομικές Αβεβαιότητες: **πράσινο** χρώμα

		Αρχική τιμή	Ποσ. Απόκλ. (%)	min	max	MAX RFR	MIN RFR	κλίση
1	SHIPCOST (£)	25028000	2	24527440	25528560	16,7829	16,3831	0,6027
2	ROUND TRIP MILES (nm)	9600	2	9408	9792	16,7462	16,4198	0,4921
3	HANDLING RATE (ton/day)	6000	2	5880	6120	16,7421	16,43	0,4705
4	CAPITAL COST (£)	5005500	2	4905390	5105610	16,7322	16,4337	0,4500
5	POWER (kW)	11556	2	11324,88	11787,12	16,6955	16,4704	0,3394
6	STELL WEIGHT (ton)	19386	2	18998,28	19773,72	16,6697	16,4961	0,2617
7	DAILY CONSUMPTION (ton)	49,6057	2	48,6136	50,5978	16,6609	16,5051	0,2349
8	FUEL PRICE (£/ton)	400	2	392	408	16,659	16,5069	0,2293
9	OUTFIT WEIGHT (ton)	1760,9	2	1725,682	1796,118	16,6478	16,5182	0,1954
10	RUNNING COSTS (£)	1484600	2	1454908	1514292	16,6272	16,5387	0,1334
11	BANK INTEREST	0,08	2	0,0784	0,0816	16,607	16,5589	0,0725
12	PORT COST (£)	96561	2	94629,78	98492,22	16,5944	16,5715	0,0345
13	INFLATION	0,03	2	0,0294	0,0306	16,5924	16,5735	0,0285
14	SHIP VALUE IN THE END (£)	5005500	2	4905390	5105610	16,5883	16,5776	0,0161
15	AUXILARY ANGINES POWER (kW)	538,8993	2	528,1213	549,6773	16,5868	16,5791	0,0116
16	LOAN INTEREST	0,08	2	0,0784	0,0816	16,5857	16,5802	0,0083
17	MACHINERY WEIGHT (ton)	1066,2	2	1044,876	1087,524	16,5839	16,582	0,0029
18	MISCELLANEOUS DWT (ton)	163,6977	2	160,4237	166,9717	16,5831	16,5828	0,0005

Πίνακας 6.4: Συνολική κατάταξη αβέβαιων μεταβλητών με βάση την κλίση του EAN

Επομένως, στην μελέτη που θα ακολουθήσει, οι τρεις πρώτες μεταβλητές με την μεγαλύτερη επιρροή στο μοντέλο θα αντιμετωπιστούν ως αβέβαιες μεταβλητές, ενώ οι υπόλοιπες ως σταθερές.

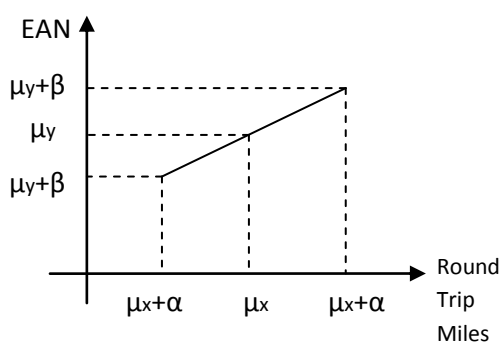
Αβέβαιες μεταβλητές:

1. Ship Cost (Το κόστος του πλοίου [£])
2. Round Trip Miles (Η διαδρομή του πλοίου μετ' επιστροφής [nm])
3. Handling Rate (Η ταχύτητα φορτοεκφόρτωσης των λιμανιών [ton/day])

6.4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

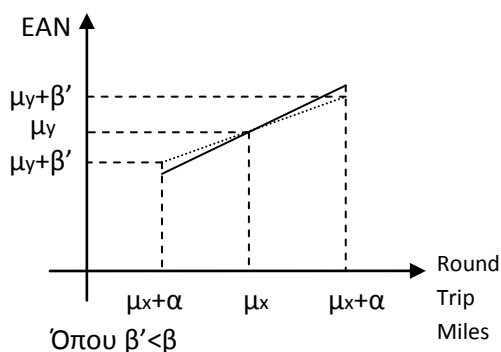
Όταν μια από τις αβέβαιες μεταβλητές λαμβάνει μεγαλύτερη ή μικρότερη τιμή από αυτή που είχε αρχικά εκτιμηθεί, τότε υπάρχει και μία ανάλογη μεταβολή στον ελάχιστο απαιτούμενο ναύλο. Έτσι, για παράδειγμα, αν για ένα συγκεκριμένο πλοίο (αυτό που προέκυψε από την ντετερμινιστική βελτιστοποίηση) θεωρήσουμε ότι η μέση διαδρομή του (round trip miles) είναι μεγαλύτερη από αυτή που είχε εκτιμηθεί, τότε προκύπτει ένας μεγαλύτερος ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος από αυτόν που είχε υπολογιστεί για την αρχική διαδρομή. Δηλαδή, αν θεωρήσουμε ότι μια μεταβολή της αβέβαιης μεταβλητής γύρω από την τιμή που έχει εκτιμηθεί, μέσα στο μέγιστο εύρος που έχουμε ορίσει ($\mu_x + a, \mu_x - a$), δίνει ένα αντίστοιχο εύρος στον ελάχιστο απαιτούμενο ναύλο που προσεγγίζεται από μία ευθεία ($\mu_y + \beta, \mu_y - \beta$):

Σημείωση: Στις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, η μεταβολή του EAN σε σχέση με την μεταβολή της τιμής μίας αβέβαιης μεταβλητής, παρόλο που προσεγγίζεται ικανοποιητικά με μία ευθεία, δεν είναι γραμμική. Η παραδοχή αυτή γίνεται μόνο στο πλαίσιο της επεξήγησης της μεθοδολογίας.



Σχήμα 6.1: Επίδραση μεταβολής διαδρομής μετ' επιστροφής στον EAN

Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η σχεδίαση ενός πλοίου, του οποίου ο ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος είναι λιγότερο επιρρεπής στις μεταβολές των αβέβαιων μεταβλητών όταν αυτές κινούνται προς την δυσμενέστερη περίπτωση, δηλαδή προς την κατεύθυνση που αυξάνει τον ελάχιστο απαιτούμενο ναύλο. Έτσι, γίνεται προσπάθεια να ελαχιστοποιηθεί το β , με δεδομένο το a . Αυτό επιτυγχάνεται με την ελαχιστοποίηση της τυπικής απόκλισης της συνάρτησης. Ιδανικά, θα θέλαμε να ελαχιστοποιήσουμε το β , χωρίς να επηρεαστεί η μέση τιμή μ_y .



Σχήμα 6.2: Επίδραση ελαχιστοποίησης της τυπικής απόκλισης του EAN

Σημείωση: Η μείωση της ποσότητας β υποδηλώνει ότι σε περίπτωση που η αβέβαιη μεταβλητή κινηθεί προς την 'ευνοϊκή' περίπτωση, δηλαδή εκείνη που μειώνει τον ελάχιστο απαιτούμενο ναύλο, το 'εύρωστο' πλοίο θα υστερεί σε σχέση με το ντετερμινιστικό. Δηλαδή, η συγκεκριμένη βελτιστοποίηση δίνει ένα πλοίο που 'υπερτερεί' του ντετερμινιστικού μόνο σε 'κακές' περιπτώσεις, που οι αβέβαιες μεταβλητές παίρνουν τιμές που δίνουν μεγαλύτερο ελάχιστο απαιτούμενο ναύλο από αυτόν που είχε εκτιμηθεί.

Στην πράξη, η μείωση της ποσότητας β δεν μπορεί να επιτευχθεί χωρίς την αύξηση της τιμής $\mu\gamma$. Επομένως πρέπει να γίνει ένας συμβιβασμός, που θα δίνει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μείωση του β , με όσο το δυνατόν μικρότερη αύξηση της τιμής $\mu\gamma$.

Στόχος της εύρωστης σχεδίασης:

Η απαίτηση που έχουμε από το πλοίο της βελτιστοποίησης 'εύρωστου' σχεδιασμού σε σχέση με εκείνο της ντετερμινιστικής βελτιστοποίησης είναι η εξής:

- ✓ Όταν η κάθε αβέβαιη μεταβλητή κινείται προς την δυσμενέστερη κατεύθυνση (η κατεύθυνση που αυξάνει τον ελάχιστο απαιτούμενο ναύλο), από ένα ποσοστό απόκλισης και πάνω (εντός του εύρους που έχουμε ορίσει), ο ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος του 'εύρωστου' πλοίου να είναι μικρότερος από εκείνον του 'ντετερμινιστικού'.

6.5 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΕΥΡΩΣΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Έχουμε τρεις αβέβαιες μεταβλητές, οι οποίες θα συμβολίζονται ως εξής:

x_1 : Ship Cost (£)

x_2 : Round Trip Miles (sm)

x_3 : Handling Rate (ton/day)

Στη συνέχεια πρέπει να καθοριστεί μια μέγιστη απόκλιση για το κάθε μέγεθος. Δηλαδή χρειάζεται μια εκτίμηση του πόσο έξω μπορεί να πέσουν οι προβλέψεις μας. Θεωρούμε τις παρακάτω μέγιστες αποκλίσεις:

$x_1: \pm 2\%$

$x_2: \pm 10\%$

$x_3: \pm 5\%$

Θεωρούμε ότι οι προβλέψεις που έχουμε κάνει για τις αβέβαιες μεταβλητές ακολουθούν κανονική κατανομή. Όπου η μέση τιμή και οι διασπορά της κάθε μεταβλητής υπολογίζεται από τις σχέσεις (4.11) και (4.12):

$$\begin{aligned}\mu_1 &= \bar{x}_1 & , & \quad \sigma_1 = \frac{0,02 \cdot \bar{x}_1}{4} \\ \mu_2 &= \bar{x}_2 & , & \quad \sigma_2 = \frac{0,10 \cdot \bar{x}_2}{4} \\ \mu_3 &= \bar{x}_3 & , & \quad \sigma_3 = \frac{0,05 \cdot \bar{x}_3}{4}\end{aligned}$$

Όπου \bar{x}_i : οι τιμές που προκύπτουν από το μοντέλο, χωρίς να ληφθεί υπ' όψιν η αβεβαιότητα.

Γνωρίζοντας πλέον την μέση τιμή και την τυπική απόκλιση, έχουμε αναλυτική έκφραση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της κάθε μεταβλητής, η οποία δίνεται από την σχέση (4.10).

Στη συνέχεια υπολογίζεται η μέση τιμή και η διασπορά της αντικειμενικής συνάρτησης (EAN) με χρήση των σχέσεων (4.13), (4.14) και (4.15).

Με χρήση των παραπάνω σχέσεων κάνουμε δύο βελτιστοποιήσεις:

- ✓ Μία ελαχιστοποίηση της μέσης τιμής, χωρίς να ληφθεί υπ' όψιν η τυπική απόκλιση, που ουσιαστικά περιμένουμε να δώσει το αποτέλεσμα της ντετερμινιστικής βελτιστοποίησης.
- ✓ Μία ελαχιστοποίηση της τυπικής απόκλισης, δηλαδή εύρεση του πιο 'εύρωστου' πλοίου, χωρίς να ληφθεί υπ' όψιν η μέση τιμή.

ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΣΗΣ ΤΙΜΗΣ:

L = 286.7510 m
 B = 40.9491 m
 D = 25.9124 m
 T = 18.8387 m
 VKN =13.0000 kn
 CB =0.8500
 DISP =192730 ton
 POW =11555 kW
 LS =22211 ton
 DWT =170520 ton
 SHIPCOST =25026000 £
 EEDI =2.2788
 EEDIreq =2.8479
 TRANSCOST =14.0501 £/ton φορτίου
 ΤΕΛΙΚΙ_ΑΚΣΙΑ = 5005200 £
 EAN=16.5830 £/ton φορτίου
 $\mu_1=16.5804$
 $\sigma_1=0.3423$

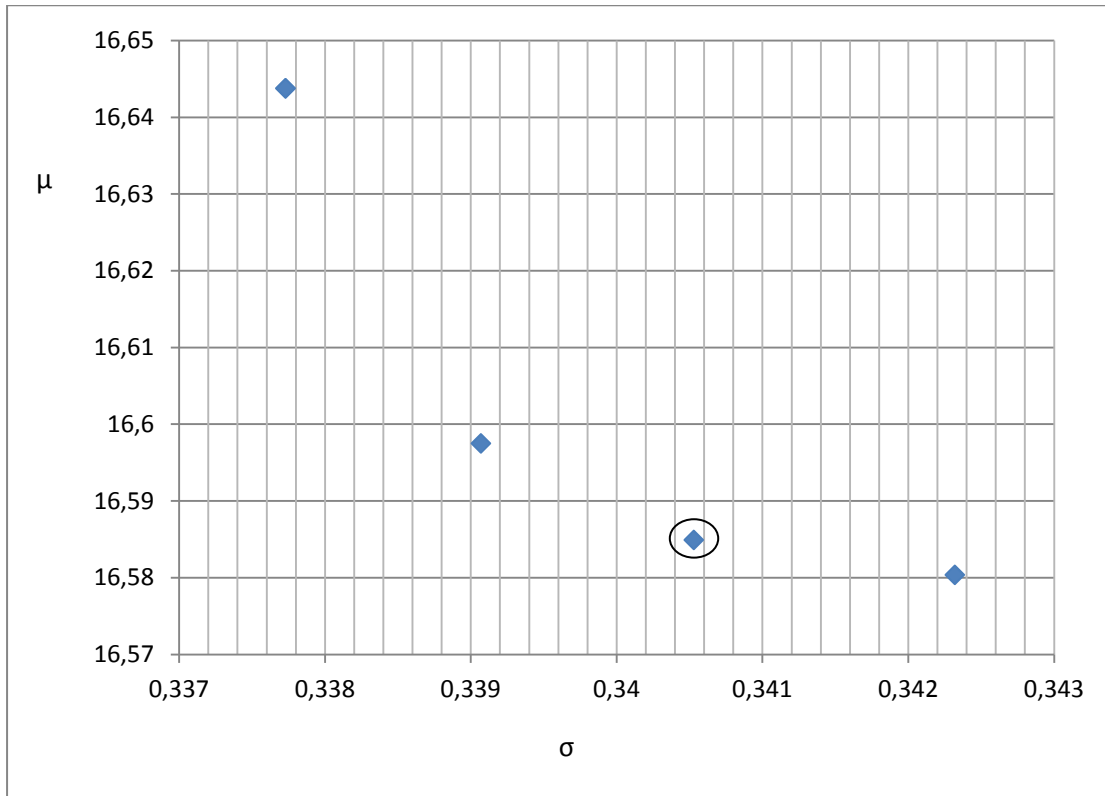
ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΥΠΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ:

L = 300.0000 m
 B = 43.4641 m
 D = 27.5695 m
 T = 19.7939 m
 VKN =13.0000 kn
 CB =0.8500
 DISP =224870 ton
 POW =12913 kW
 LS =24868 ton
 DWT =200000 ton
 SHIPCOST =27201000 £
 EEDI =2.1643
 EEDIreq =2.6247
 TRANSCOST =14.0408 £/ton φορτίου
 ΤΕΛΙΚΙ_ΑΚΣΙΑ =2720100 £
 EAN=16.7149 £/ton φορτίου
 $\mu_2=16.6438$
 $\sigma_2=0.3377$

Ψάχνουμε μία λύση, η οποία θα μειώσει την τυπική απόκλιση (αυξάνοντας παράλληλα και τον ελάχιστο απαιτούμενο ναύλο), με τέτοιο τρόπο ώστε η τελική σχεδίαση ενώ θα έχει υψηλότερο EAN όταν τα αβέβαια μεγέθη παίρνουν τις προβλεπόμενες τιμές τους, θα συμπεριφέρεται καλύτερα όταν αυτά τείνουν σε μια πιο δυσμενή κατάσταση από εκείνη που προβλέφθηκε αρχικά. Με χρήση των παραπάνω αποτελεσμάτων, θα επιχειρήσουμε να βρούμε μία ενδιάμεση λύση, υπολογίζοντας ένα σύνολο πιθανών λύσεων. Για την εμφάνιση των λύσεων (Pareto Optimum Solutions) θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος 'Normed Weighted Sum Optimum'. (σχέσεις (5.3) και (5.4))

Οι λύσεις προέκυψαν για βάρη: $[w_1, w_2] = [1,0]$, $[0.9,0.1]$, $[0.8,0.2]$, ... , $[0,1]$
 Για $[w_1, w_2] = [0.7,0.3]$, $[0.6,0.4]$, ... , $[1,0]$ η λύσεις ταυτίζονται με αυτές της ελαχιστοποίησης της τυπικής απόκλισης. Οι λύσεις φαίνονται στο διάγραμμα της επόμενης σελίδας.

PARETO OPTIMUM SOLUTIONS



Σχήμα 6.3: Pareto Optimum Solutions (Ship cost, Round trip miles, Handling rate)

Επιλέγουμε την λύση που είναι σημειωμένη με κύκλο στο διάγραμμα και αποτελεί την λύση για βάρος 90% στην μέση τιμή και 10% στην τυπική απόκλιση, επειδή θέλουμε όσο το δυνατόν μικρότερη αύξηση του ελάχιστου απαιτούμενου ναύλου.

ΛΥΣΗ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ:

L = 286.7655 m
 B = 40.9508 m
 D = 25.9136 m
 T = 18.8395 m
 VKN =13.0000 kn
 CB =0.8500
 DISP =192750 ton
 POW =11556 kW
 LS =22214 ton
 DWT =170540 ton
 SHIPCOST =25028000 £
 EEDI =2.2787
 EEDIreq =2.8477
 TRANSCOST =14.0500 £/ton φορτίου
 TELIKI_AKSIA = 5005500 £
 EAN=16.5830 £/ton φορτίου
μ=16.5804
σ=0.3424

ΛΥΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΥΡΩΣΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ:

L = 291.8725 m (αύξηση 5.1 m)
 B = 41.5481 m (αύξηση 0.6 m)
 D = 26.3228 m (αύξηση 0.4 m)
 T = 19.1259 m (αύξηση 0.3 m)
 VKN =13.0000 kn
 CB =0.8500
 DISP =202070 ton
 POW =11949 kW
 LS =23049 ton
 DWT =179050 ton (αύξηση 8510 ton)
 SHIPCOST =25664000 £
 EEDI =2.2420
 EEDIreq =2.7777
 TRANSCOST =14.0349 £/ton φορτίου
 TELIKI_AKSIA = 5132700 £
 EAN=16.5875 £/ton φορτίου
μ'=16.5849
σ'=0.3405

Παρατηρούμε ότι η λύση του εύρωστου σχεδιασμού είναι ένα μεγαλύτερο πλοίο σε σχέση με αυτό που προέκυψε από την ντετερμινιστική βελτιστοποίηση. Τα οφέλη του 'εύρωστου' πλοίου όπως προέκυψε από την μεθοδολογία (στο συγκεκριμένο πλοίο και με τις συγκεκριμένες παραδοχές που έγιναν) μπορούν να φανούν όταν οι τιμές των αβέβαιων μεταβλητών κινούνται προς την δυσμενέστερη κατεύθυνση σε σχέση με αυτήν που είχε προβλεφθεί.

Για παράδειγμα, με απόκλιση των αβέβαιων μεγεθών προς την δυσμενέστερη περίπτωση (όχι απαραίτητα στα όριά τους), ο ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος του 'εύρωστου' πλοίου είναι ελαφρώς μικρότερος από αυτόν του πλοίου της ντετερμινιστικής βελτιστοποίησης.

$$dx_1 = +1\% \text{ (SHIP COST)}$$

$$dx_2 = +5\% \text{ (Round trip miles)}$$

$$dx_3 = -2.5\% \text{ (Handling Rate)}$$

$$\left. \begin{array}{l} EAN_{DET} = 16.9011 \text{ €} \\ EAN_{ROB} = 16.8932 \text{ €} \end{array} \right\} dEAN = 0.0079 \text{ €}$$

Και όσο πιο δυσμενής γίνεται η περίπτωση, η διαφορά των δύο λύσεων μεγαλώνει:

$$dx_1 = +1.5\% \text{ (SHIP COST)}$$

$$dx_2 = +6\% \text{ (Round trip miles)}$$

$$dx_3 = -3\% \text{ (Handling Rate)}$$

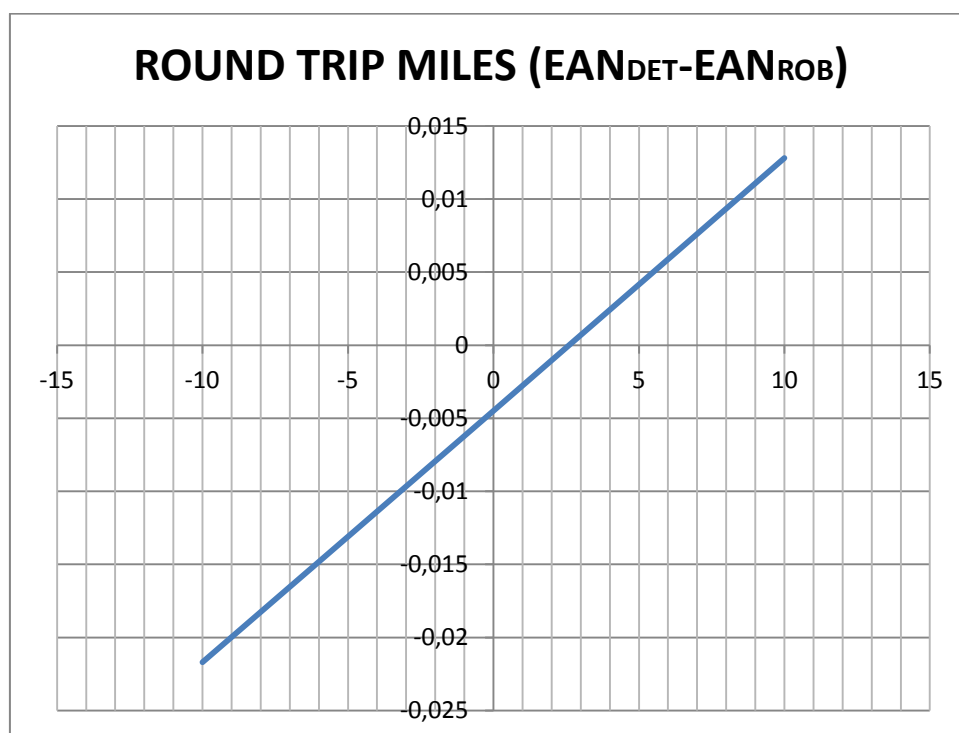
$$\left. \begin{array}{l} EAN_{DET} = 16.9960 \text{ €} \\ EAN_{ROB} = 16.9858 \text{ €} \end{array} \right\} dEAN = 0.0102 \text{ €}$$

6.6 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΣΤΟ ΠΛΟΙΟ ΤΗΣ ΚΑΘΕ ΑΒΕΒΑΙΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΞΕΧΩΡΙΣΤΑ

Η διερεύνηση της επιρροής κάθε μεταβλητής στο πλοίο θα γίνει μεταβάλλοντας την κάθε μεταβλητή από το ένα άκρο της, στο άλλο (πχ. από -10% σε +10%) και υπολογίζοντας σε κάθε απόκλιση τον EAN. Αυτό γίνεται και για τα δύο πλοία (ντετερμινιστική βελτιστοποίησης και βελτιστοποίησης εύρωστου σχεδιασμού) για τα οποία σχεδιάζεται ένα διάγραμμα τις διαφορές των δύο τιμών ($EAN_{DET} - EAN_{ROB}$).

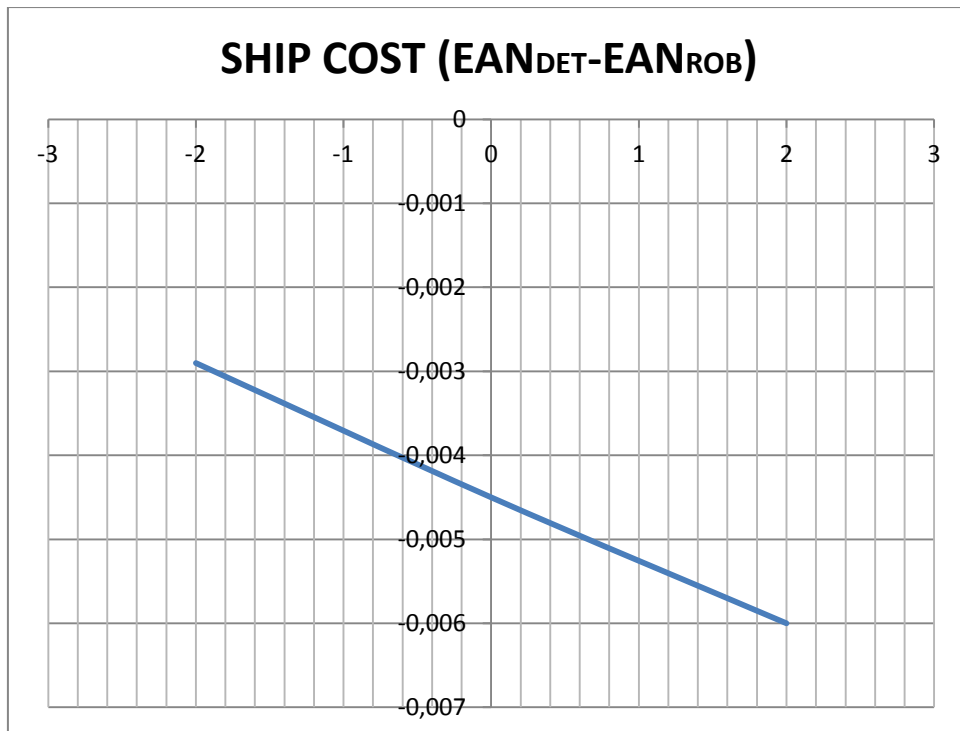
Η παρατήρηση που περιμένουμε να δούμε είναι ότι ενώ για μηδενική απόκλιση των αβέβαιων μεταβλητών, το πλοίο της βελτιστοποίησης εύρωστου σχεδιασμού έχει μεγαλύτερο ελάχιστο απαιτούμενο ναύλο ($EAN_{DET} - EAN_{ROB} < 0$), όταν η μεταβλητές αυτές αποκλίνουν προς την δυσμενέστερη κατεύθυνση, μετά από κάποιο ποσοστό απόκλισης, το 'εύρωστο' πλοίο να υπερτερεί του ντετερμινιστικού ($EAN_{DET} - EAN_{ROB} > 0$).

Ακολουθεί η παρουσίαση των διαγραμμάτων κάθε αβέβαιης μεταβλητής.



Σχήμα 6.4: Διαφορά EAN με μεταβολή του Round trip miles (1^η βελτιστοποίηση)

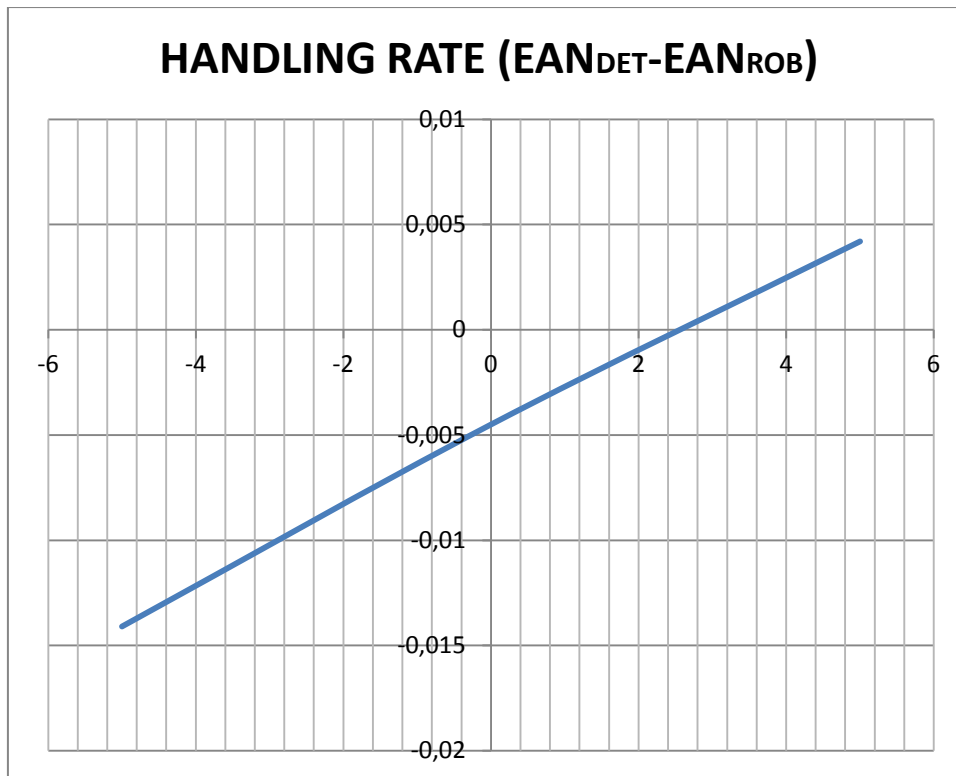
Παρατηρούμε ότι για απόκλιση του μήκους διαδρομής πάνω από 2.5% από αυτήν που αρχικά είχε εκτιμηθεί, το 'εύρωστο' πλοίο έχει μικρότερο EAN από εκείνο της ντετερμινιστικής βελτιστοποίησης, άρα ικανοποιείται η απαίτηση που έχουμε θέσει.



Σχήμα 6.5: Διαφορά EAN με μεταβολή του Ship cost (1^η βελτιστοποίηση)

Παρατηρούμε ότι το ‘εύρωστο’ πλοίο υστερεί σε σχέση με το ‘ντετερμινιστικό’! Η απαίτηση που είχαμε θέσει δεν ικανοποιείται, δηλαδή όταν το κόστος του πλοίου αυξάνει (δυσμενής περίπτωση), ο EAN του ‘εύρωστου’ πλοίου όχι μόνο δεν παίρνει μικρότερη τιμή από αυτήν του ‘ντετερμινιστικού’, αλλά αυξάνεται και η διαφορά τους.

Προφανώς ο αλγόριθμος επέλεξε να βελτιστοποιήσει ως προς τις άλλες αβέβαιες μεταβλητές. Έτσι, έγινε βελτιστοποίηση ως προς το μήκος διαδρομής, το οποίο επηρεάζει περισσότερο το πρόβλημα, δίνοντας ένα πλοίο που είναι ελαφρώς ‘χειρότερο’ όταν αποκλίνει η πρόβλεψή μας για το κόστος του πλοίου, αλλά αρκετά ‘καλύτερο’ όταν αποκλίνει για το μήκος της διαδρομής.



Σχήμα 6.6: Διαφορά EAN με μεταβολή του Handling rate (1^η βελτιστοποίηση)

Οι παρατηρήσεις εδώ είναι παρόμοιες με του Ship Cost. Και εδώ, όταν η μεταβλητή κινείται προς την δυσμενέστερη κατεύθυνση, δηλαδή σε μικρότερες τιμές Handling Rate από αυτές που είχαν εκτιμηθεί, το πλοίο εύρωστου σχεδιασμού 'υστερεί' σε σχέση με εκείνο της ντετερμινιστικής βελτιστοποίησης.

Επομένως, έχουμε δύο από τις τρεις αβέβαιες μεταβλητές που επιλέξαμε, στις οποίες το πλοίο της βελτιστοποίησης εύρωστου σχεδιασμού δεν συμπεριφέρεται καλύτερα όταν αυτές οι μεταβλητές αποκλίνουν προς την δυσμενέστερη περίπτωση. Αυτό που θα είχε ενδιαφέρον είναι χρησιμοποιηθούν ως αβέβαιες μεταβλητές εκείνες για τις οποίες το 'εύρωστο' πλοίο δίνει χειρότερα αποτελέσματα από το 'ντετερμινιστικό'. Δηλαδή, να κάνουμε μία βελτιστοποίηση με αβέβαιες μεταβλητές μόνο το Ship Cost και το Handling Rate.

6.7 ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΑΒΕΒΑΙΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

Οι αβέβαιες μεταβλητές αυτή τη φορά είναι μόνο δύο:

x_1 : Ship Cost (£)

x_2 : Handling Rate (ton/day)

Με μέγιστες αποκλίσεις:

x_1 : $\pm 2\%$

x_2 : $\pm 5\%$

Όπως και πριν, κάνουμε αρχικά δύο βελτιστοποιήσεις:

- ✓ Μία ελαχιστοποίηση της μέσης τιμής, χωρίς να ληφθεί υπ' όψιν η τυπική απόκλιση
- ✓ Μία ελαχιστοποίηση της τυπικής απόκλισης, δηλαδή εύρεση του πιο 'εύρωστου' πλοίου, χωρίς να ληφθεί υπ' όψιν η μέση τιμή.

ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΣΗΣ ΤΙΜΗΣ:

L = 286.7506 m

B = 40.9490 m

D = 25.9124 m

T = 18.8387 m

VKN = 13.0000 kn

CB = 0.8500

DISP = 192730 ton

POW = 11555 kW

LS = 22183 ton

DWT = 170520 ton

SHIPCOST = 25026000 £

EEDI = 2.2788

EEDIreq = 2.8479

TRANSCOST = 14.0501 £/ton φορτίου

TELIKI_AKSIA = 5005100 £

EAN = 16.5830 £/ton φορτίου

$\mu_1 = 16.5820$

$\sigma_1 = 0.2193$

ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΥΠΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ:

L = 250.0244 m

B = 36.6192 m

D = 22.9470 m

T = 16.7629 m

VKN = 13 kn

CB = 0.85

DISP = 133720 ton

POW = 9084.8 kW

LS = 16709 ton

DWT = 117010 ton

SHIPCOST = 20527000 £

EEDI = 2.6233

EEDIreq = 3.4531

TRANSCOST = 14.4424 £/ton φορτίου

TELIKI_AKSIA = 4105400 £

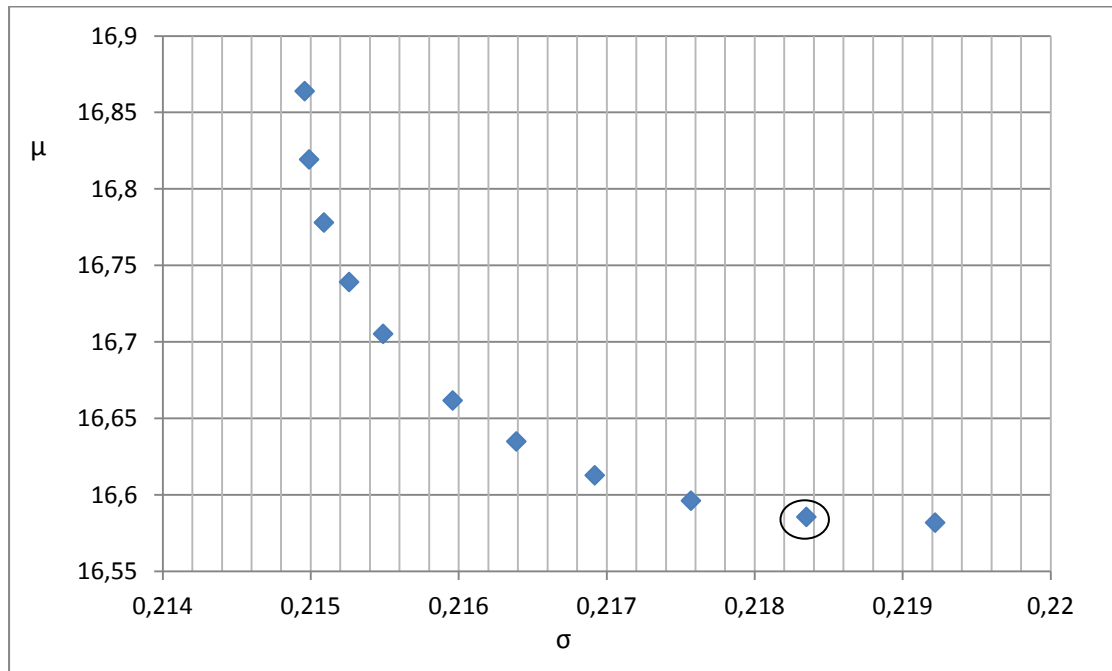
EAN = 16.8652 £/ton φορτίου

$\mu_2 = 16.8640$

$\sigma_2 = 0.2150$

Παρατηρούμε ότι το πλοίο με την ελάχιστη τυπική απόκλιση είναι μικρότερο από εκείνο της ντετερμινιστικής βελτιστοποίησης. Δηλαδή η λύση κινήθηκε προς την αντίθετη κατεύθυνση από αυτήν της προηγούμενης βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια, σχεδιάζεται ένα διάγραμμα πιθανών λύσεων (Pareto Optimum Solutions), με τον ίδιο τρόπο που προέκυψε και το προηγούμενο.

PARETO OPTIMUM SOLUTIONS



Σχήμα 6.7: Pareto Optimum Solutions (Ship cost, Handling rate)

Από τις πιθανές λύσεις, επιλέγεται αυτή που δίνεται με τα βάρη ως εξής: 90% στη μέση τιμή, 10% στην τυπική απόκλιση (η λύση που είναι κυκλωμένη στο διάγραμμα)

ΛΥΣΗ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ:

L = 286.7655 m
 B = 40.9508 m
 D = 25.9136 m
 T = 18.8395 m
 VKN = 13.0000 kn
 CB = 0.8500
 DISP = 192750 ton
 POW = 11556 kW
 LS = 22214 ton
 DWT = 170540 ton
 SHIPCOST = 25028000 £
 EEDI = 2.2787
 EEDIreq = 2.8477
 TRANSCOST = 14.0500 £/ton φορτίου
 TELIKI_AKSIA = 5005500 £
 EAN = 16.5830 £/ton φορτίου
μ = 16.5804
σ = 0.3424

ΛΥΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΥΡΩΣΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ:

L = 282.2281 m (μείωση 4.5 m)
 B = 40.4191 m (μείωση 0.5 m)
 D = 25.5494 m (μείωση 0.4 m)
 T = 18.5846 m (μείωση 0.3 m)
 VKN = 13.0000 kn
 CB = 0.8500
 DISP = 184710 ton
 POW = 11218 kW
 LS = 21499 ton
 DWT = 163210 ton (μείωση 7330 ton)
 SHIPCOST = 24464000 £
 EEDI = 2.3135
 EEDIreq = 2.9125
 TRANSCOST = 14.0705 £/ton φορτίου
 TELIKI_AKSIA = 4892800 £
 EAN = 16.5867 £/ton φορτίου
μ' = 16.5857
σ' = 0.2184

Κάνοντας και πάλι ένα πρόχειρο έλεγχο για την συμπεριφορά των δύο πλοίων προκύπτει ότι, με απόκλιση των αβέβαιων μεγεθών προς την δυσμενέστερη περίπτωση, ο ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος του 'εύρωστο' πλοίου είναι ελαφρώς μικρότερος από αυτόν του πλοίου της ντετερμινιστικής βελτιστοποίησης.

$$dx_1 = +1\% \text{ (Ship Cost)}$$

$$dx_2 = -2.5\% \text{ (Handling Rate)}$$

$$\left. \begin{array}{l} EAN_{DET} = 16.8845 \text{ €} \\ EAN_{ROB} = 16.8834 \text{ €} \end{array} \right\} dEAN = 0.0011 \text{ €}$$

Και όσο πιο δυσμενής γίνεται η περίπτωση, η διαφορά των δύο λύσεων μεγαλώνει:

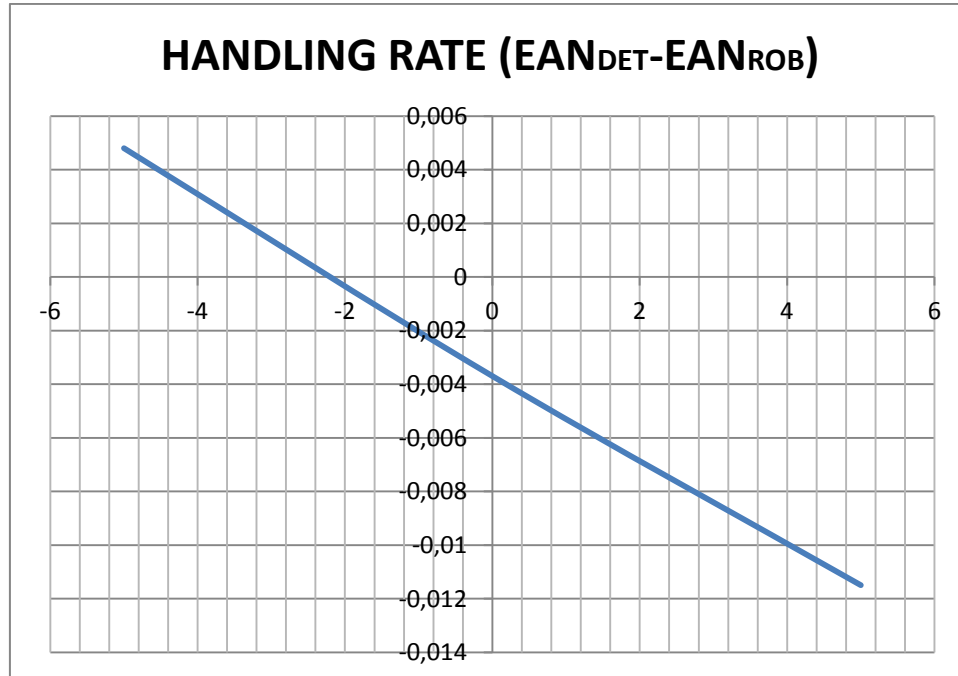
$$dx_1 = +1.5\% \text{ (Ship Cost)}$$

$$dx_2 = -3\% \text{ (Handling Rate)}$$

$$\left. \begin{array}{l} EAN_{DET} = 16.9771 \text{ €} \\ EAN_{ROB} = 16.9747 \text{ €} \end{array} \right\} dEAN = 0.0024 \text{ €}$$

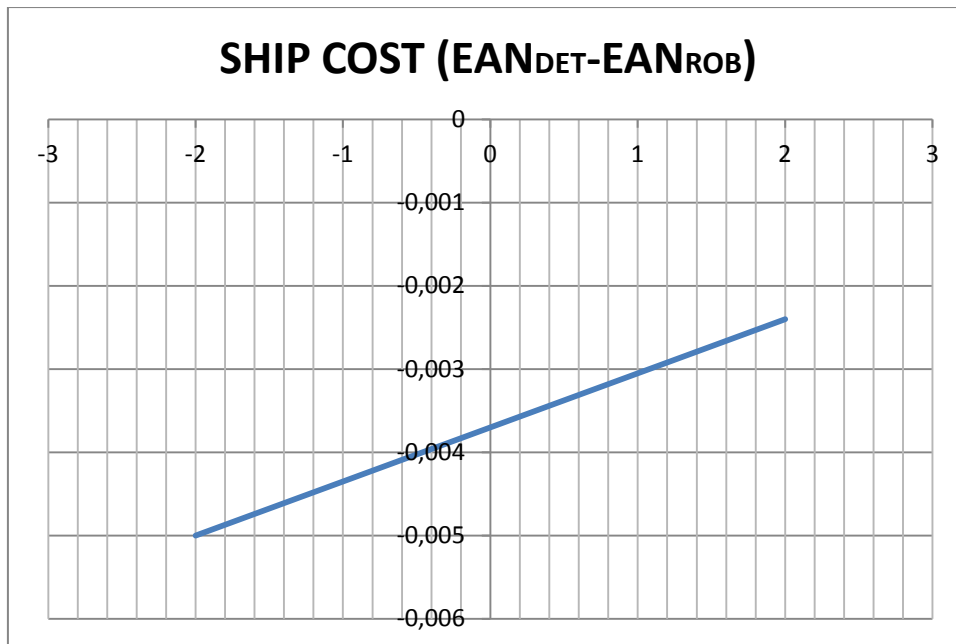
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ($EAN_{DET} - EAN_{ROB}$)

Ελέγχουμε, λοιπόν, και πάλι την επιρροή που έχει κάθε μεταβλητή ξεχωριστά στο νέο 'εύρωστο' πλοίο, με χρήση των διαγραμμάτων ($EAN_{DET} - EAN_{ROB}$)



Σχήμα 6.8: Διαφορά EAN με μεταβολή του Handling rate (2^η βελτιστοποίηση)

Όσον αφορά το Handling Rate παρατηρούμε ότι ικανοποιείται η απαίτηση που είχε τεθεί για το 'εύρωστο' πλοίο, δηλαδή η διαφορά των ελάχιστων απαιτούμενων ναύλων των δύο πλοίων παίρνει θετική τιμή, σε περίπτωση που η μέση ταχύτητα φορτοεκφόρτωσης προκύψει μικρότερη από 2.2% και πάνω από εκείνη που είχε αρχικά εκτιμηθεί.



Σχήμα 6.9: Διαφορά EAN με μεταβολή του Ship cost (2^η βελτιστοποίηση)

Όσον αφορά το Ship Cost, και πάλι δεν προέκυψε κάποια λύση η οποία να 'υπερτερεί' της ντετερμινιστικής, όταν κόστος του πλοίου παίρνει μεγαλύτερες τιμές από εκείνες που εκτιμήθηκαν αρχικά. Παρόλα αυτά, παρατηρούμε ότι η κλίση της ευθεία άλλαξε, και όσο κινούμαστε προς την δυσμενή περίπτωση (αύξηση κόστους πλοίου) η διαφορά του ελάχιστου απαιτούμενου ναύλου των δύο πλοίων μειώνεται.

Και πάλι, ο αλγόριθμος έκανε βελτιστοποίηση ως προς το Handling Rate, το οποίο επηρεάζει περισσότερο το πρόβλημα, δίνοντας ένα πλοίο που είναι ελαφρώς 'χειρότερο' όταν αποκλίνει η πρόβλεψή μας για το κόστος του πλοίου, αλλά αρκετά 'καλύτερο' όταν αποκλίνει για το Handling Rate.

Για να είναι πλήρης η μελέτη, θα γίνει και μία βελτιστοποίηση με αβέβαιη μεταβλητή μόνο το κόστος του πλοίου.

Ακολουθώντας και πάλι την ίδια διαδικασία:

x_1 : Ship Cost (£)

Με μέγιστη απόκλιση:

x_1 : $\pm 2\%$

Όπως και πριν, κάνουμε αρχικά τις βελτιστοποιήσεις στην μέση τιμή και την τυπική απόκλιση:

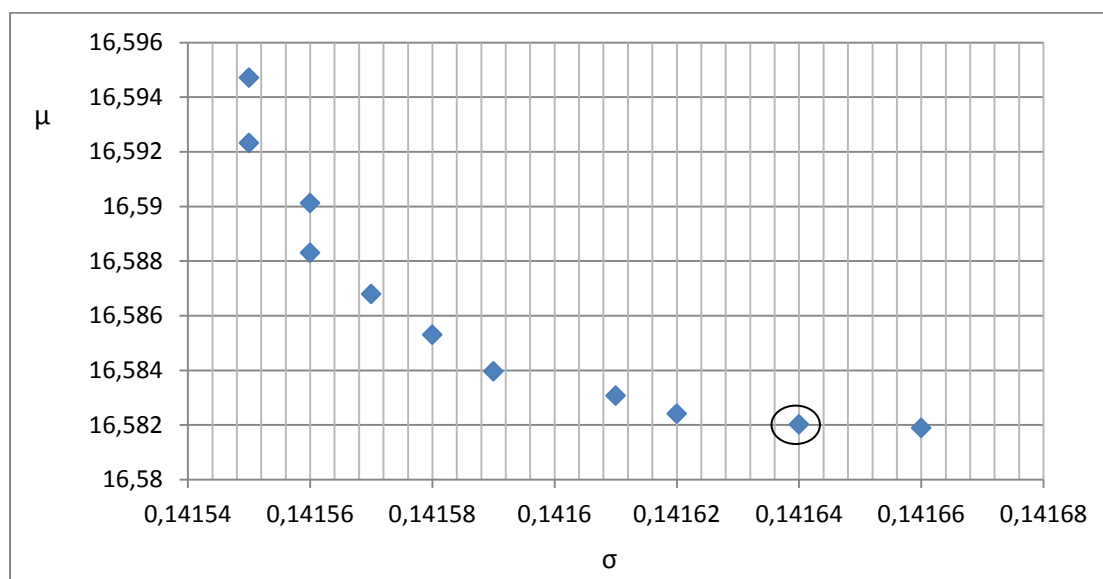
ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΣΗΣ ΤΙΜΗΣ:

L = 286.7661 m
 B = 40.9509 m
 D = 25.9137 m
 T = 18.8396 m
 VKN = 13.0000 kn
 CB = 0.8500
 DISP = 192760 ton
 POW = 11556 kW
 LS = 22214 ton
 DWT = 170540 ton
 SHIPCOST = 25028000 £
 EEDI = 2.2787
 EEDIreq = 2.8477
 TRANSCOST = 14.0500 £/ton φορτίου
 ΤΕΛΙΚΙ_ΑΚΣΙΑ = 5005500 £
 EAN = 16.5830 £/ton φορτίου
 $\mu_1 = 16.58189$
 $\sigma_1 = 0.14166$

ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΥΠΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ:

L = 278.4739 m
 B = 39.9785 m
 D = 25.2476 m
 T = 18.3733 m
 VKN = 13.0000 kn
 CB = 0.8500
 DISP = 178210 ton
 POW = 10945 kW
 LS = 20916 ton
 DWT = 157300 ton
 SHIPCOST = 20527000 £
 EEDI = 2.3438
 EEDIreq = 2.9679
 TRANSCOST = 14.0928 £/ton φορτίου
 ΤΕΛΙΚΙ_ΑΚΣΙΑ = 4799700 £
 EAN = 16.5958 £/ton φορτίου
 $\mu_2 = 16.59471$
 $\sigma_2 = 0.14155$

PARETO OPTIMUM SOLUTIONS



Σχήμα 6.10: Pareto Optimum Solutions (Ship cost)

Επιλέγεται και πάλι η τιμή που αντιστοιχεί σε βάρη: 90% στην μέση τιμή και 10% στην τυπική απόκλιση.

Έτσι προκύπτει η παρακάτω λύση:

ΛΥΣΗ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ:

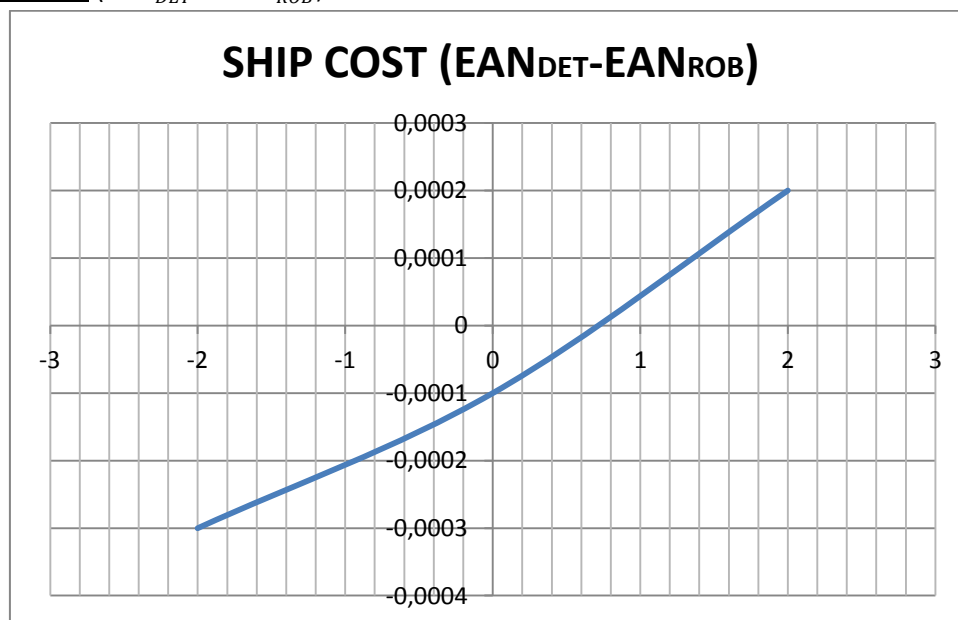
L = 286.7655 m
B = 40.9508 m
D = 25.9136 m
T = 18.8395 m
VKN =13.0000 kn
CB =0.8500
DISP =192750 ton
POW =11556 kW
LS =22214 ton
DWT =170540 ton
SHIPCOST =25028000 £
EEDI =2.2787
EEDIreq =2.8477
TRANSCOST =14.0500 £/ton φορτίου
TELIKI_AKSIA = 5005500 £
EAN=16.5830 £/ton φορτίου
 $\mu=16.58191$
 $\sigma=0.14166$

ΛΥΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΥΡΩΣΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ:

L = 285.9059 m (μείωση 0.9 m)
B = 40.8501 m (μείωση 0.1 m)
D = 25.8447 m (μείωση 0.1 m)
T = 18.7913 m (μείωση 0.05 m)
VKN =13.0000 kn
CB =0.8500
DISP = 191210 ton
POW =11491 kW
LS =22077 ton
DWT =169130 ton (μείωση 1410 ton)
SHIPCOST =24921000 £
EEDI =2.2851
EEDIreq =2.8598
TRANSCOST =14.0534 £/ton φορτίου
TELIKI_AKSIA = 4894100 £
EAN=16.5831 £/ton φορτίου
 $\mu'=16.58202$
 $\sigma'=0.14164$

Η διαφορές των δύο πλοίων είναι ελάχιστες, παρόλα αυτά θα ελεγχθεί το διάγραμμα ($EAN_{DET} - EAN_{ROB}$) για να δούμε εάν ικανοποιήθηκε η απαίτηση που έχουμε θέσει.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ($EAN_{DET} - EAN_{ROB}$)



Σχήμα 6.11: Διαφορά EAN με μεταβολή του Ship cost (3^η βελτιστοποίηση)

Παρατηρούμε ότι η καμπύλη παίρνει θετική τιμή για κόστος πλοίου μεγαλύτερο από 0.8% από την τιμή που είχε προβλεφτεί. Άρα ικανοποιείται η απαίτηση που είχε τεθεί για το 'εύρωστο' πλοίο.

6.8 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Παρατηρήσεις:

- ✓ Με την μεθοδολογία που προηγήθηκε γίνεται αντιληπτό ότι κάθε αβέβαιη μεταβλητή έχει διαφορετική επιρροή στο μοντέλο. Ανάλογα με την επιλογή των μεταβλητών προέκυψαν διάφορες 'εύρωστες' σχεδιάσεις, προς αντίθετες κατευθύνσεις, οι οποίες υπερτερούν έναντι της ντετερμινιστικής βελτιστοποίησης σε κάποιες αβέβαιες μεταβλητές, αλλά υστερούν σε άλλες, όταν οι τιμές τους κινούνται προς την δυσμενέστερη περίπτωση.
- ✓ Στις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, η βελτιστοποίηση 'εύρωστου' σχεδιασμού λειτούργησε μόνο για την μεταβλητή που επηρέαζε περισσότερο το μοντέλο του πλοίου. Δεν υπήρξε λύση που να 'υπερτερεί' της ντετερμινιστικής σε πάνω από μία αβέβαιη μεταβλητή.
- ✓ Σε γενικές γραμμές, το μέγεθος και η κατεύθυνση της μεταβολής των ανεξάρτητων μεταβλητών εξαρτάται από την επιλογή και το εύρος των αβέβαιων μεταβλητών.

Επίσης παρατηρήθηκε ότι:

- ✓ Η ταχύτητα που σε κάθε βελτιστοποίηση είναι πάντα η ελάχιστη δυνατή με βάση τους περιορισμούς που έχουμε θέσει. Αντίθετα, ο συντελεστής γάστρας παίρνει πάντοτε την μέγιστη δυνατή τιμή.
- ✓ Ο δείκτης ενεργειακής απόδοσης ικανοποιείται σε κάθε περίπτωση, χωρίς καν να είναι ενεργοποιημένος ο περιορισμός.

Πρόταση για περαιτέρω έρευνα:

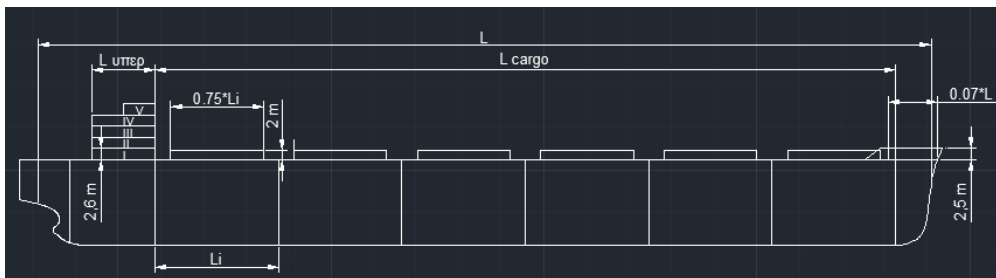
Μια πρόταση για μελλοντική έρευνα θα ήταν η τροποποίηση της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε, έτσι ώστε να λαμβάνεται υπ' όψιν τυχόν εξάρτηση που μπορεί να υπάρχει μεταξύ δύο ή περισσότερων μεταβλητών. Η χρήση, δηλαδή, δεσμευμένων πιθανοτήτων στο πρόβλημα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Το μοντέλο του πλοίου βασίστηκε σε ένα υπάρχον μοντέλο της βιβλιογραφίας (Sen&Yang 1998), στο οποίο έγινε αλλαγή κάποιων εκ των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς.

ΤΟ ΠΛΟΙΟ

Για να είναι εφικτή η χρήση των διαφόρων μεθόδων υπολογισμού των χαρακτηριστικών του πλοίου πρέπει να γίνουν κάποιες παραδοχές ως προς την μορφή του. Το μήκος των υπερκατασκευών και των χώρων φορτίου δίνεται συναρτήσει του μήκους του πλοίου (L). Όλες οι παραδοχές που γίνονται για την μορφή του πλοίου φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



L	L υπερ	L cargo
150 m	10% L	70% L
300 m	6% L	80% L

ΕΚΤΟΠΙΣΜΑ

$$\Delta = 1.025 \cdot L \cdot B \cdot T \cdot C_B$$

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΣΧΥΟΣ

1^η προσέγγιση με χρήση της εμπειρικής σχέσης που υπάρχει στο μοντέλο των Sen και Yang, προκειμένου να βρεθεί το βάρος του μηχανοστασίου και στη συνέχεια το DWT.

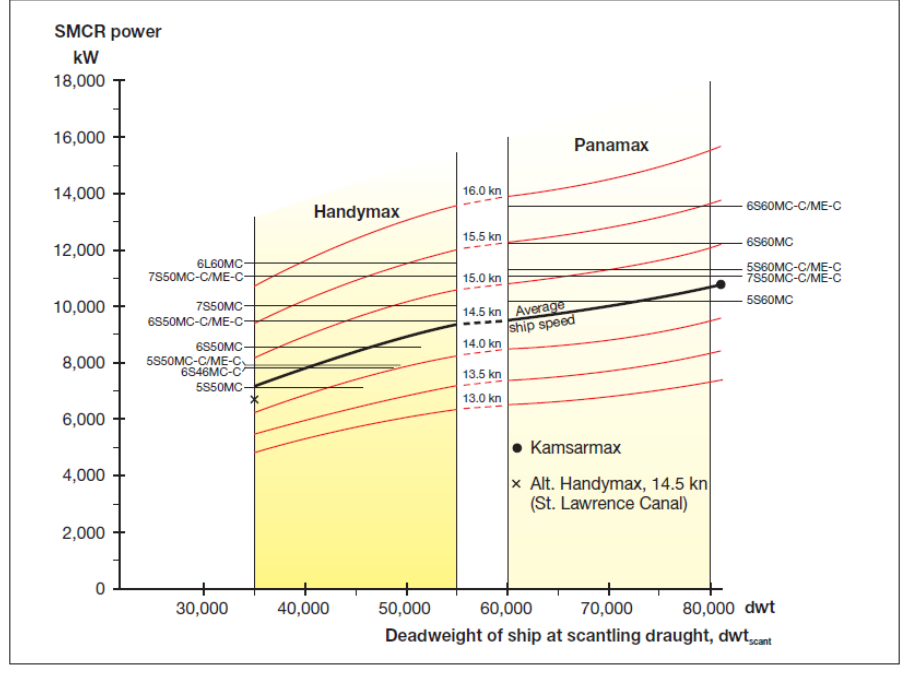
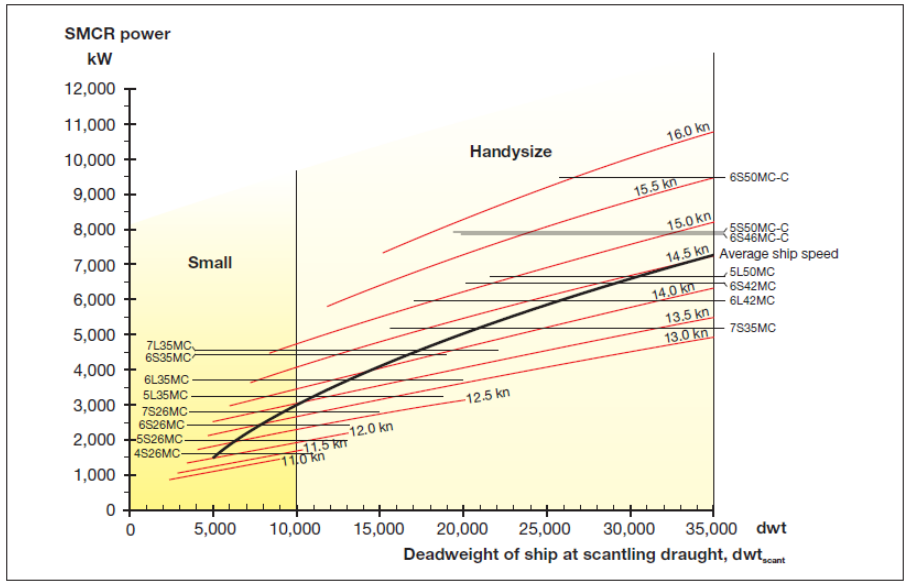
$$A1 = 4977.06 \cdot (CB^2) - 8105.61 \cdot CB + 4456.51;$$

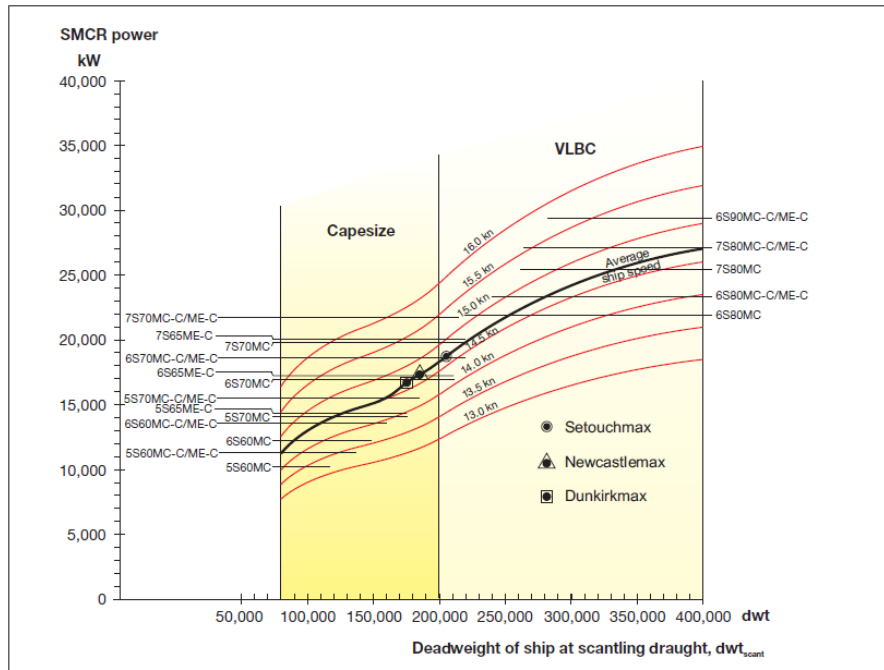
$$B1 = -10847.2 \cdot (CB^2) + 12817 \cdot CB - 6960.32;$$

$$AC1 = A1 + B1 \cdot FN;$$

$$P_1 = \frac{\nabla^{2/3} \cdot V_{kn}^3}{AC1}$$

2^η προσέγγιση με χρήση των διαγραμμάτων της MAN (άρθρο 'Propulsion Trends in Bulk Carriers' 2006), με βάση το DWT. Τα διαγράμματα προσεγγίστηκαν με ευθείες μεταξύ των διαφορετικών κατηγοριών που προκύπτουν ανάλογα με το DWT.





ΒΑΡΟΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Μέθοδος Schneekluth (Δεν περιλαμβάνει υπερκατασκευές)

$$\nabla_U = \nabla_D + \nabla_S + \nabla_b + \nabla_H$$

Όπου

$$\nabla_D = L \cdot B \cdot D \cdot C_{BD} \text{ (όγκος μέχρι το D)}$$

$$\text{με } C_{BD} = C_B(T) + C_1 \cdot \frac{D-T}{T} \cdot (1 - C_B)$$

$$C_1 = 0,25 \text{ (μικρό άνοιγμα νομέων υπεράνω της ισάλου)}$$

$$= 0,40 \text{ (λοιπές περιπτώσεις – μεγάλο άνοιγμα νομέων – flare)}$$

$$\nabla_S = L_S \cdot B \cdot (S_F + S_A) \cdot C_2 \text{ (αύξηση όγκου λόγω σιμότητας)}$$

με L_S : έκταση σιμότητας

$$C_2 = \frac{C_{BD}^{2/3}}{6} \cong \frac{1}{7}$$

Στο μοντέλο του πλοίου θεωρούμε ότι $\nabla_S = 0$ (μηδενική σιμότητα)

$$\nabla_b = L \cdot B \cdot b \cdot C_3 \text{ (αύξηση όγκου λόγω κυρτότητας καταστρώματος)}$$

$$\text{με } C_3 = 0.7 \cdot C_{BD}$$

Στο μοντέλο του πλοίου θεωρούμε $b=0.5$ m για όλα τα μεγέθη των πλοίων.

$$\nabla_H = \sum_1^N l_{Hi} \cdot b_{Hi} \cdot h_{Li} \text{ (αύξηση όγκου λόγω στομίων κυτών)}$$

με l_{Hi} : μήκος στομίου i

b_{Hi} : πλάτος στομίου i

h_{Li} : ύψος στομίου i

N: αριθμός στομίων

Το βάρος του πλοίου χωρίς τις υπερκατασκευές δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$W'_{ST} = \nabla_U \cdot C'_{ST} [1 + 0.033 \cdot ((L/D) - 12)] \cdot [1 + 0.06 \cdot (1 - (D/4))] \cdot [1 + 0.05 \cdot (1.85 - (B/D))] \cdot [1 + 0.2 \cdot ((T/D) - 0.85)] \cdot [0.92 + (1 - CBD)^2] \cdot [1 + 0.75 \cdot CBD \cdot (CM - 0.98)]$$

με $L/D \geq 9$

$$C'_{ST} = 0.108 \text{ έως } 0.117 \cong 0.112 \text{ (για Bulk Carrier } 150 < L < 300 \text{ m)}$$

$$C_M = 0.9 + 0.1 \cdot C_B \text{ (Van Lammeren)}$$

Μέθοδος Muller-Koster (βάρος υπερκατασκευών/υπερστεγασμάτων)

Πρόστεγο:

$$C_{BACK} = 100 \text{ } \kappa\text{p}/\text{m}^3 \text{ (βάρος ανά μονάδα όγκου)}$$

$$h_{BACK} = 2.5 \text{ m}$$

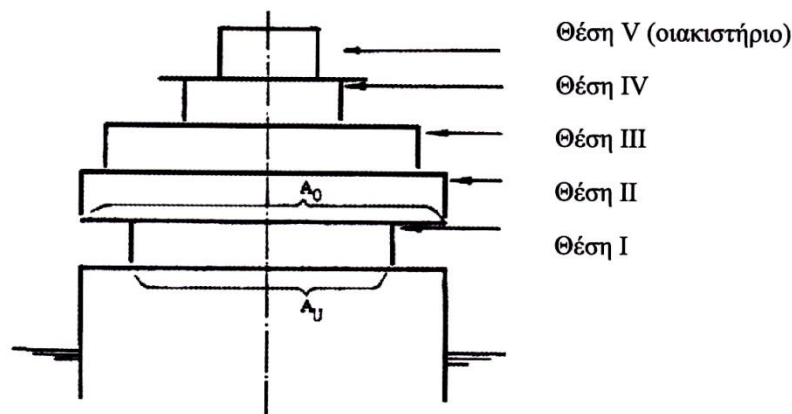
$$l_{BACK} = 0.07 \cdot L$$

Το βάρος του προστέγου υπολογίζεται προσεγγιστικά από την σχέση:

$$W_{BACK} = C_{BACK} \cdot \frac{l_{BACK} \cdot B \cdot h_{BACK}}{1.7} \text{ (επειδή το πρόστεγο δεν έχει τριγωνικό σχήμα δεν}$$

διαίρεται με 2, αλλά με μία ελαφρώς μικρότερη τιμή)

Υπερκατασκευή ενδιάμεσης:



$L_{υπερ} = 6\% \text{ έως } 10\% \cdot L$ (ανάλογα με το μήκος του πλοίου)

L	L υπερ	L cargo
150	10% L	70% L
300	6% L	80% L

$$h_{υπερ} = 2.5 \text{ m}$$

$$B_{υπερ} = 0.9 \cdot B$$

$$A_{υπερ} = L_{υπερ} \cdot B_{υπερ}$$

Το βάρος ενός τμήματος υπερστεγάσματος στη θέση I – V δίνεται από την σχέση:

$$W_{DH} = C_{DH} \cdot A_{υπερ} \cdot h_{υπερ} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$$

με το C_{DH} να δίνεται από τον παρακάτω πίνακα, θεωρώντας $A_0/A_U = 1$

Θέση Ao/Au	I	II	III	IV	Οιακιστήριο
1.0	57	55	52	53	40
1.25	64	63	59	60	45
1.5	71	70	65	66	50
1.75	78	77	72	73	55
2.0	86	84	78	80	60
2.25	93	91	85	86	65
2.5	100	98	91	93	70

Βάρος ανά μονάδα όγκου
υπερστεγασμάτων $C_{DH} [kp/m^3]$
συναρτήσει της θέσης και λόγου Ao/Au
κατά Muller-Koster

$$k_1 = 1 + 0.02 \cdot (h - 2.6) = 1 \text{ (διόρθωση για ύψος στεγάσματος διάφορο του 2.6 m)}$$

$$k_2 = 1 \text{ (διόρθωση για μήκος εσωτερικών τοιχωμάτων διάφορο του κανονισμού)}$$

$$k_3 = 0.95 \text{ για } L = 100 \text{ m}$$

$$= 1.10 \text{ για } L = 230 \text{ m (ενδιάμεσες τιμές με παρεμβολή)}$$

$$\text{Τελικά } W_S = W_{Schneekluth} + W_{Muller/Koster}$$

ΒΑΡΟΣ ΕΝΔΙΑΙΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ

Το βάρος ενδιαίτησης και εξοπλισμού υπολογίζεται προσεγγιστικά από την παρακάτω σχέση:

$$W_{OT} = K_{OT} \cdot L \cdot B$$

$$\text{με } K_{OT} = 0.22 \div 0.25 \text{ (Bulk Carrier, } L = 140 \text{ m)}$$

$$= 0.17 \div 0.18 \text{ (Bulk Carrier, } L = 250 \text{ m)}$$

ΒΑΡΟΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Μία αρχική προσέγγιση γίνεται με χρήση της σχέσης που υπήρχε στο μοντέλο των Sen&Yang:

$$W_M = 0.17 \cdot P^{0.9}$$

Το τελικό βάρος της μηχανολογικής εγκατάστασης υπολογίζεται ως εξής:

$$W_M = W_{MM} + W_{MS} + W_{MR}$$

Όπου W_{MM} : βάρος κύριας μηχανής

W_{MS} : βάρος ελικοφόρου άξονα και έλικας

W_{MR} : βάρος λοιπών μηχανολογικών εξαρτημάτων

Το βάρος της κύριας μηχανής (W_{MM}) υπολογίζεται από τον παρακάτω πίνακα:

Τύπος μηχανής	Power [kW]	Weight [t/kW]	RPM
Slow speed Diesel	2000 - 5000	0.015 - 0.022	250 - 175
	5000 - 10000	0.022 - 0.029	175 - 100
	10000 - 70000	0.029 - 0.039	100 - 80
Medium speed Diesel	600 -17000	0.009 - 0.018	900 - 400
High speed Diesel		0.003 - 0.004	
Gas Turbines		0.001	

Το βάρος του ελικοφόρου άξονα και της έλικας (W_{MS}), και το βάρος των λοιπών μηχανολογικών εξαρτημάτων (W_{MR}) υπολογίζεται από τον πίνακα της επόμενης σελίδας:

Τύπος πλοίου	Φορτηγό	Δεξαμενόπλ.	Ψυγείο	Υπερωκεάνιο ταχύ επιβατηγό	Μικρό ταχύ επιβατηγό
Συντελεστής					
w1 [kr/m ³]	15-10	3-5	20-25	15-25	25-45
w2 [kr/HP]	35-50	25-35	50-70	20-30	30-55
w3 [kr/HP]	5-10	4	8-10	8	5-10
w4 [kr/HP]	Αργόστροφη νητζελομηχ. 30-40	Ατμοτρόβ. 20-25	Αργόστροφη νητζελομηχ. 30-40	Ατμοτρόβ. 20-25	Μεσόστροφη μηχανή με μειωτήρα: 22-30 Νέα τεχνολογία: 12-17
w5 [kr/HP]	85-90	55-60	90-110	50-60	70-80

Συντελεστές ομάδων βαρών μηχανολογικής εγκατάστασης εμπορικών πλοίων κατά Strohbusch.

Επεξηγήσεις:

- 1) Ανάλυση βάρους Μηχανολογικής Εγκατάστασης:

$$W_M = W_{MM} + W_{MS} + W_{MR}$$

W_{MM} : βάρος κύριας μηχανής και μειωτήρα

W_{MS} : βάρος ελικοφόρου άξονα και έλικας (περιλαμβάνει: έδρανα και στορέα)

W_{MR} : βάρος λοιπής μηχανολογικής εγκατάστασης (βοηθητικές μηχανές για τη λειτουργία της κύριας μηχανής: αντλίες καυσίμου, λίπανσης, ψύξης, εξατμιστήρες, κλπ. Σωλήνες μηχανοστασίου και καύσιμα, λιπαντικά, ψύξη, ατμό, κλπ. Αγωγοί εξάτμισης, καπνοδόχοι. Λέβητες. Εξαεριστικοί αγωγοί μηχανοστασίου. Κινητές δεξαμενές μηχανοστασίου, αντλίες ερματισμού, απαντήσης, πυρόσβεσης, γλυκού νερού μηχανοστασίου. Κύρια ηλεκτρογεννητική εγκατάσταση, ηλεκτρογεννήτριες, μετασχηματιστές, πίνακες. Εργαλεία μηχανοστασίου.

- 2) Ορισμοί: $w1=W_{MR}/LBD$, $w2=W_{MR}/SHP$ (Shaft Horse Power) , $w3=W_{MS}/SHP$, $w4=W_{MM}/SHP$, $w5=W_M/SHP$

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΦΟΡΤΟΥ ΣΚΑΦΟΥΣ (LIGHT SHIP) ΚΑΙ DWT

Με χρήση των βαρών που υπολογίστηκαν υπολογίζεται το βάρος του άφορτου σκάφους:

$$LS = W_S + W_O + W_M$$

και του DWT:

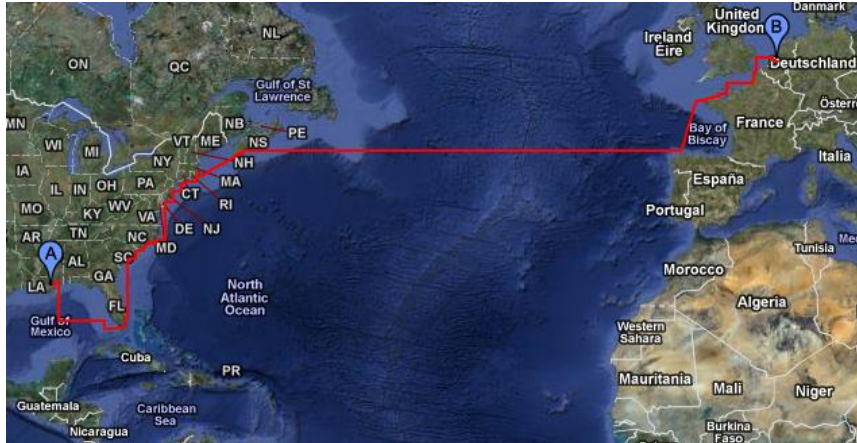
$$DWT = \Delta - LS$$

ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΡΟΣΘΕΤΟΥ ΒΑΡΟΥΣ DWT

Βάρος καυσίμων: (FUEL CARRIED)

Για τον υπολογισμό του βάρους των καυσίμων χρειάζονται τα παρακάτω μεγέθη:

- ✓ Μήκος διαδρομής μετ' επιστροφή: $ROUND\ TRIP\ MILES = 2 \cdot 4800 = 9600\ sm$
θεωρώντας ότι το πλοίο κάνει μια διαδρομή από το λιμάνι της Νέας Ορλεάνης στο λιμάνι του Ρότερνταμ (4800 nm).



- ✓ Ημέρες που το πλοίο βρίσκεται στη θάλασσα: $SEA\ DAYS = \frac{ROUND\ TRIP\ MILES}{24 \cdot V_{kn}}$
- ✓ Ειδική κατανάλωση κύριας μηχανής: $SFC_{ME} = 170\ gr/kWh$
- ✓ Ειδική κατανάλωση γεννητριών: $SFC_{AE} = 190\ gr/kWh$
- ✓ Ημερήσια κατανάλωση (ton):

$$DAILY\ CONSUMPTION = \frac{SFC_{ME}}{1000} \cdot P_{ME} \cdot 24 \cdot \frac{1}{1000} + \frac{SFC_{AE}}{1000} \cdot P_{AE} \cdot 24 \cdot \frac{1}{1000}$$

$$\text{Όπου } P_{AE} = \begin{cases} 0,025 \cdot MCR + 250 & , \text{ για } P \geq 10000 \\ 0,05 \cdot MCR & , \text{ για } P < 10000 \end{cases} \quad (\text{MEPC.1/ Circ.681})$$

Τελικά:

$$FUEL\ CARRIED = DAILY\ CONSUMPTION \cdot (SEA\ DAYS + 5)$$

Πλήρωμα και εφόδια: (MISCELLANEOUS DWT)

Το πλήρωμα καθορίζεται με βάση το DWT του πλοίου ως εξής:

DWT	Crew
15.000	20
500.000	30

(οι ενδιάμεσες τιμές με γραμμική παρεμβολή)

Πόσιμο νερό: 15 kg/ανθρωποημέρα

Καθαριότητας: 200 kg/ανθρωποημέρα

Εφόδια τρόφιμα: 10 kg/ανθρωποημέρα

Βάρος πληρώματος: 75 kg/επιβάτη

Βάρος αποσκευών: 60 kg/επιβάτη

Βάρος ωφέλιμου φορτίου: (CARGO DWT)

$$CARGO\ DWT = DWT - FUEL\ CARRIED - MISCELLANEOUS\ DWT$$

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ

Για να υπολογιστούν τα κόστη χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις που υπάρχουν στο μοντέλο των Sen&Yang.

Κόστος κατασκευής:

$$SHIP COST = 1.3 \cdot (2000 \cdot W_S^{0.85} + 3500 \cdot W_O + 2400 \cdot P^{0.8})$$

Κεφαλαιουχικές δαπάνες:

$$CAPITAL COSTS = 0.2 \cdot SHIP COST$$

Κόστος λειτουργίας: (εκτός από το κόστος καυσίμου και τα κόστη των λιμανιών)

$$RUNNING COSTS = 40000 \cdot DWT^{0.3}$$

Κόστος ταξιδιού: (Κόστος καυσίμου και λιμανιών)

$$VOYAGE COST = (FUEL COST + PORT COST) \cdot ROUND TRIP PER YEAR$$

Όπου για τον υπολογισμό των μεγεθών στο δεξί μέλος της σχέσης χρειάζονται τα παρακάτω μεγέθη:

- ✓ Κόστος ανά τόνο καυσίμου: $FUEL PRICE = 400 \text{ €/ton}$
- ✓ Κόστος καυσίμου:
 $FUEL COST = 1.05 \cdot DAILY CONSUMPTION \cdot SEA DAYS \cdot FUEL PRICE$
- ✓ Κόστος λιμανιών: $PORT COST = 6.3 \cdot DWT^{0.8}$
- ✓ Ταχύτητα φορτοεκφόρτωσης: $HANDLING RATE = 6000 \text{ ton/day}$
- ✓ Ημέρες που το πλοίο βρίσκεται σε λιμάνι:
 $PORT DAYS = 2 * \left(\frac{Cargo DWT}{HANDLING RATE} + 0.5 \right)$
- ✓ Ταξίδια ανά έτος: $ROUND TRIP PER YEAR = \frac{350}{(SEA DAYS + PORT DAYS)}$

Ετήσιο κόστος:

$$ANNUAL COST = CAPITAL COSTS + RUNNING COSTS + VOYAGE COST$$

Κόστος ανά μονάδα φορτίου:

$$TRANSPORTATION COST = \frac{ANNUAL COST}{ANNUAL CARGO}$$

Όπου: $ANNUAL CARGO = CARGO DWT \cdot ROUND TRIP PER YEAR$

Αξία πλοίου στο τέλος της επένδυσης:

$$SHIP VALUE IN THE END = 0.2 \cdot SHIP COST$$

Καθαρή Παρούσα Αξία – ΚΠΑ (Net Present Value – NPV):

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, θεωρούμε ότι ο πλοιοκτήτης παίρνει δάνειο με επιτόκιο t για να καλύψει το 70% του κόστους αγοράς του πλοίου και το ξεχρεώνει μέσα σε Nt χρόνια, και το υπόλοιπο 30% το πληρώνει με μετρητά κατά την παράδοση του πλοίου. Η συνολική επένδυση θα διαρκέσει N χρόνια. Επίσης λαμβάνεται υπ' όψιν και ο χρόνος κατασκευής του πλοίου ($Nc=2$ έτη). Το διάγραμμα των χρηματοροών φαίνεται στο σχήμα (3.1). Επομένως, η καθαρή παρούσα αξία βρίσκεται από την σχέση(3.8):

$$\begin{aligned} \text{ΚΠΑ} &= -30\% \text{ ΚΟΣΤΟΥΣ ΠΛΟΙΟΥ} \cdot \frac{1}{(1+i)^{Nc}} \\ &+ (\text{ΕΙΣΠΡΑΤΤΟΜΕΝΟΙ ΝΑΥΛΟΙ} - \text{ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΕΞΟΔΑ} - \text{ΔΟΣΗ ΔΑΝΕΙΟΥ}) \cdot \text{PWF}(Nt, r) \cdot \frac{1}{(1+i)^{Nc}} \\ &+ (\text{ΕΙΣΠΡΑΤΤΟΜΕΝΟΙ ΝΑΥΛΟΙ} - \text{ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΕΞΟΔΑ}) \cdot \text{PWF}(N', r) \cdot \frac{1}{(1+i)^{Nc+Nt}} \\ &+ \text{ΤΕΛΙΚΗ ΑΞΙΑ ΠΛΟΙΟΥ} \cdot \frac{1}{(1+i)^N} \end{aligned}$$

Όπου:

$$r = \frac{1+i}{1+f} - 1$$

$$\text{PWF}(N, r) = \frac{(1+r)^N - 1}{r \cdot (1+r)^N}$$

$$N' = N - Nt - Nc$$

i : επιτόκιο τράπεζας

f : πληθωρισμός

Ελάχιστος Απαιτούμενος Ναύλος - EAN (Required Freight Rate - RFR):

Ο ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος βρίσκεται από τη σχέση της καθαρής παρούσας αξίας που φαίνεται παραπάνω, και η τιμή του ναύλου που μηδενίζει την καθαρή παρούσα αξία βρίσκεται με χρήση της μεθόδου της διχοτόμησης.

Περιορισμοί:

Οι περιορισμοί που χρησιμοποιήθηκαν είναι εκείνοι που υπήρχαν στο μοντέλο των Sen&Yang.

$$\frac{L}{B} \geq 6$$

$$\frac{L}{D} \leq 15$$

$$\frac{L}{T} \leq 19$$

$$T \leq 0.45 \cdot DWT^{0.31}$$

$$GM_T = KB + BM_T - KG \geq 0.07 \cdot B$$

Όπου

$$KB = 0.53 \cdot T$$

$$BM_T = \frac{(0.085 \cdot C_B - 0.002) \cdot B^2}{T \cdot C_B}$$

$$KG = 1 + 0.52 \cdot D$$

$$T \leq 0.7 \cdot D + 0.7$$

$$80000 \leq DWT \leq 200000$$

$$0.63 \leq C_B \leq 0.85$$

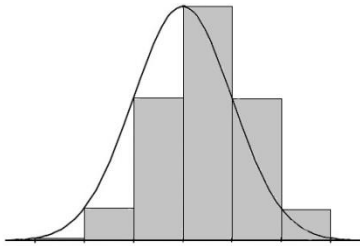
$$13 \leq V_{kn} \leq 16$$

$$F_n \leq 0.32$$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΟΥ ΕΦΑΡΜΟΣΤΗΚΑΝ

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ

Ο υπολογισμός των ολοκληρωμάτων που εμφανίζονται στο πρόβλημα γίνεται αριθμητικά, με χρήση του κανόνα του ορθογωνίου. Για ένα απλό ολοκλήρωμα η σχέση είναι η εξής:



$$Q_f = \sum_{v=0}^{n-1} f(x_v) \cdot (x_{v+1} - x_v)$$

Όπου n : η απαιτούμενη διαμέριση

Όμως το εύρος της κάθε αβέβαιης μεταβλητής διαιρείται με έναν ακέραιο αριθμό, ανάλογα με την διαμέριση που θέλουμε, επομένως στην ολοκλήρωση χρησιμοποιούνται

$$\text{ισοδιαστήματα } (x_{v+1} - x_v) = \frac{(x_{\text{upper}} - x_{\text{lower}})}{n} = h$$

Στο πρόβλημά μας όμως εμφανίζονται μονά, διπλά και τριπλά ολοκληρώματα πιθανοτήτων, επομένως, ο κανόνας του ορθογωνίου στις περιπτώσεις που συναντάμε στο πρόβλημά μας δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$Q_{f1} = \sum_{k=0}^{n-1} p_z(z_k) \cdot h_z \cdot f(z_k)$$

$$Q_{f2} = \sum_{j=0}^{n-1} p_y(y_j) \cdot h_y \left[\sum_{k=0}^{n-1} p_z(z_k) \cdot h_z \cdot f(y_j, z_k) \right]$$

$$Q_{f3} = \sum_{i=0}^{n-1} p_x(x_i) \cdot h_x \left[\sum_{j=0}^{n-1} p_y(y_j) \cdot h_y \left[\sum_{k=0}^{n-1} p_z(z_k) \cdot h_z \cdot f(x_i, y_j, z_k) \right] \right]$$

Όπου

$p_x(x_i), p_y(y_j), p_z(z_k)$: Οι κατανομές των τριών αβέβαιων μεταβλητών

h_x, h_y, h_z : Τα ισοδιαστήματα των τριών αβέβαιων μεταβλητών

$f(x_i, y_j, z_k)$: Η αντικειμενική συνάρτηση

$n=20$: για την βελτιστοποίηση με τρεις αβέβαιες μεταβλητές

$n=50$: για την βελτιστοποίηση με δύο αβέβαιες μεταβλητές

$n=100$: για την βελτιστοποίηση με μία αβέβαιη μεταβλητή

Σημείωση: Το σφάλμα της ολοκλήρωσης στις δύο πρώτες περιπτώσεις δεν είναι μικρό. Επομένως, οι βέλτιστες λύσεις της ελαχιστοποίησης της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης πιθανώς να διαφέρουν λίγο από αυτές που παρουσιάστηκαν στο μοντέλο. Παρόλα αυτά, τα σφάλματα στην ολοκλήρωση δεν επηρεάζουν τις γενικότερες παρατηρήσεις που έγιναν.

Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΔΙΧΟΤΟΜΗΣΗΣ

Στο μοντέλο του πλοίου, ο υπολογισμός του ελάχιστου απαιτούμενου ναύλου (EAN) γίνεται με την χρήση της μεθόδου της διχοτόμησης. Η μέθοδος αυτή αναλύεται παρακάτω.

Η μέθοδος της διχοτόμησης εφαρμόζεται για την εύρεση ριζών μιας εξίσωσης της μορφής:

$$f(x) = 0$$

Όπου η f είναι μία συνεχής συνάρτηση μιας μεταβλητής μόνο, σε ένα διάστημα $[a, b]$ όπου ικανοποιείται η σχέση:

$$f(a) \cdot f(b) \leq 0$$

Αρχικά θέτουμε $a_0 = a$, $b_0 = b$, $x_0 = \frac{a_0+b_0}{2}$

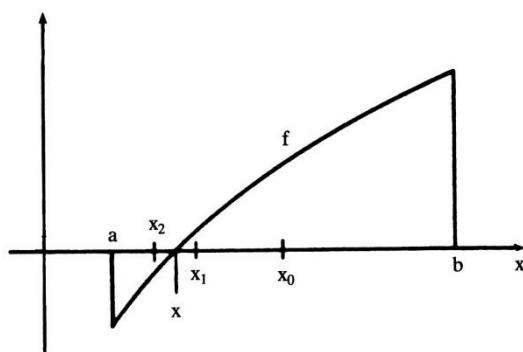
Η ανισότητα δείχνει ότι η f έχει τουλάχιστον μία ρίζα στο διάστημα $[a, b]$, η οποία βρίσκεται σε ένα από τα δύο διαστήματα $[a_0, x_0]$, $[x_0, b_0]$. Εξετάζουμε τότε το γινόμενο $f(a_0) \cdot f(x_0)$.

α) Αν $f(a_0) \cdot f(x_0) \leq 0$, τότε υπάρχει μία ρίζα στο διάστημα $[a_0, x_0]$ το οποίο και διαλέγουμε θέτοντας $a_1 = a_0$, $b_1 = b_0$

β) Αν $f(a_0) \cdot f(x_0) > 0$, τότε το διάστημα $[x_0, b_0]$ περιέχει μία ρίζα και θέτουμε $a_1 = x_0$, $b_1 = b_0$

Έχοντας διαλέξει το διάστημα $[a_1, b_1]$ το επόμενο σημείο είναι το $x_1 = \frac{a_1+b_1}{2}$ (διχοτόμηση)

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται στο νέο διάστημα $[a_1, b_1]$ κ.ο.κ. Κατασκευάζεται έτσι μια ακολουθία διαστημάτων $[a_k, b_k]$ και μια ακολουθία σημείων x_k με $x_k = \frac{a_k+b_k}{2}$ και $f(a_k) \cdot f(b_k) \leq 0$. Η γεωμετρική ερμηνεία της μεθόδου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Στην περίπτωσή μας, επιλέγονται ως αρχικές τιμές για τον ναύλο δύο υπερβολικά ακραίες τιμές: $a_0 = 0 \text{ €/ton}$ και $b_0 = 1000 \text{ €/ton}$, έτσι ώστε η πρώτη σίγουρα να δίνει αρνητική τιμή στην καθαρή παρούσα αξία (ΚΠΑ) και η δεύτερη σίγουρα θετική.

Κριτήριο τερματισμού της μεθόδου είναι όταν $b_k - a_k \leq 10^{-5}$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ - ΔΕΙΚΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ EEDI

Ο δείκτης ενεργειακής απόδοσης EEDI εντάχθηκε τον Ιούλιο του 2011 στους κανονισμούς της MARPOL (Annex VI) και στόχος του είναι η μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, στοιχείο το οποίο σύμφωνα με μελέτες συμβάλλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Ο δείκτης EEDI εκτιμά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα του πλοίου ανά τόνο-μίλι μεταφερόμενου φορτίου. Η ολοκληρωμένη εξίσωση υπολογισμού του δείκτη (MEPC.1/Circ.681) συμπεριλαμβάνει πολλούς διορθωτικούς συντελεστές, προκειμένου να προσαρμόζεται στην κλάση, στις διαφορετικές διατάξεις και στις συνθήκες λειτουργίας του κάθε πλοίου. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται μια απλοποιημένη μορφή του τύπου η οποία είναι η εξής:

$$EEDI = \frac{\text{εκπομπές CO}_2}{\text{μεταφερόμενο φορτίο}} = \frac{P_{ME} \cdot SFC_{ME} \cdot C_{f_{ME}} + P_{AE} \cdot SFC_{AE} \cdot C_{f_{AE}}}{DWT \cdot V_{ref}} \Rightarrow$$

$$EEDI = \frac{0,75 \cdot MCR \cdot SFC_{ME} \cdot C_{f_{ME}} + \left\{ \begin{array}{l} 0,025 \cdot MCR + 250, \text{ για } P \geq 10000 \\ 0,05 \cdot MCR, \text{ για } P < 10000 \end{array} \right\} \cdot SFC_{AE} \cdot C_{f_{AE}}}{DWT \cdot V_{ref}}$$

Όπου

P: ισχύς [kW]

SFC: ειδική κατανάλωση των μηχανών [gr/kWh]

C_f: εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανάλογα με το είδος καυσίμου [ton-CO₂/ton-FUEL]

DWT: το DWT του πλοίου [ton]

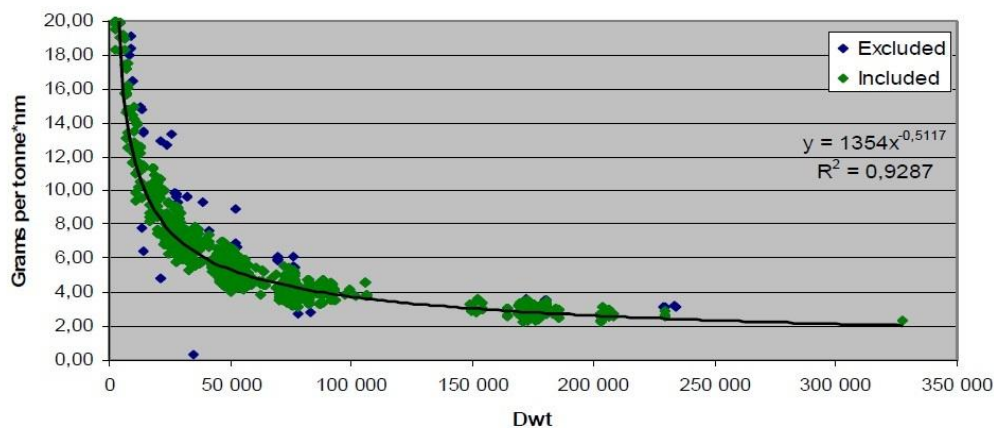
V_{ref}: ταχύτητα [kn]

οι δείκτες ME και AE αναφέρονται στις κύριες μηχανές (Main Engines) και στις βοηθητικές μηχανές (Auxiliary Engines) αντίστοιχα.

Ο υπολογιζόμενος δείκτης EEDI (Attained EEDI) πρέπει να είναι μικρότερος από μια τιμή (Required EEDI) η οποία βασίζεται σε μια παλινδρομική ανάλυση δεικτών EEDI από υπάρχοντα πλοία κατασκευασμένα μεταξύ 1998 και 2007 (Reference Line).

Ο περιορισμός στον δείκτη EEDI εφαρμόζεται σε νέα πλοία μεγαλύτερα από 400 gross tons (GT) και διαφέρει ανάλογα με τον τύπο, το μέγεθος και την λειτουργία του κάθε πλοίου. Παρακάτω παρουσιάζεται ο απαιτούμενος δείκτης EEDI για Bulk Carriers. (GHG-WG 2/2/7)

Bulker
(>=400 gt, built 1998-2007)



Απαιτούμενος δείκτης EEDI για Bulk Carriers (Required EEDI – Reference Line), GHG-WG 2/2/7

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ – ΚΩΔΙΚΕΣ ΜΑΤΛΑΒ

ΔΟΜΗ ΕΝΟΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΟ ΜΑΤΛΑΒ

Για την βελτιστοποίηση γίνεται η χρήση της εντολής 'fmincon'. Η μορφή με την οποία πρέπει να γραφτεί το πρόβλημα είναι η εξής:

[x,fval] = fmincon(ObjFun,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon,options)

όπου

- ObjFun: η αντικειμενική συνάρτηση. Στην μελέτη που έγινε χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις διαφορετικές αντικειμενικές συναρτήσεις: Ελάχιστος Απαιτούμενος Ναύλος (ObjEAN), μέση τιμή EAN (ObjMT), τυπική απόκλιση EAN (ObjSIGMA) και η μέθοδος 'Normed Weighted Sum Optimum' για την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση (ObjMULTI)

- x0: Μια οποιαδήποτε αρχική τιμή για τις ανεξάρτητες μεταβλητές. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές δίνονται με την εξής σειρά
x0=[(μήκος) (πλάτος) (κοίλο) (βύθισμα) (ταχύτητα) (συντελεστής γάστρας)]

- A,b,Aeq,beq: Οι γραμμικοί ισοτικοί (A,b) και ανισοτικοί (Aeq,beq) περιορισμοί. Το πώς ορίζονται οι περιορισμοί φαίνεται στο παρακάτω παράδειγμα:

Ισοτικοί περιορισμοί:

$$a_1 \cdot x_1 + a_3 \cdot x_3 = b_1$$

$$a_2 \cdot x_2 + a_4 \cdot x_4 + a_5 \cdot x_5 = b_2$$

Ανισοτικοί περιορισμοί:

$$a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_6 \cdot x_6 \leq b'_1$$

$$a_2 \cdot x_2 + a_4 \cdot x_4 \leq b'_2$$

Επομένως οι πίνακες ορίζονται ως εξής:

$$Aeq = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & a_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_2 & 0 & a_4 & a_5 & 0 \end{bmatrix}$$

$$beq = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & 0 & 0 & 0 & a_6 \\ 0 & a_2 & 0 & a_4 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} b'_1 \\ b'_2 \end{bmatrix}$$

- lb,ub: Τα όρια των ανεξάρτητων μεταβλητών όπου καθορίζονται με το παρακάτω τρόπο.

κάτω όρια → lb=[(μήκος) (πλάτος) (κοίλο) (βύθισμα) (ταχύτητα) (συντελεστής γάστρας)]

άνω όρια → ub=[(μήκος) (πλάτος) (κοίλο) (βύθισμα) (ταχύτητα) (συντελεστής γάστρας)]

- nonlinear: Οι μη γραμμικοί περιορισμοί, όπου ορίζονται σε ξεχωριστό αρχείο, όπου αφού υπολογιστούν τα διάφορα μεγέθη που μπορεί να εμφανίζονται στους περιορισμούς, το αρχείο αυτό 'επιστρέφει' στο κυρίως πρόγραμμα δύο πίνακες, ένα για τους ισοτικούς μη γραμμικούς περιορισμούς (ceq), και ένα για τους ανισοτικούς (c). Οι πίνακες

Ισοτικοί περιορισμοί:

$$x_4 \cdot x_6 - x_3 + a = 0$$

$$\frac{x_3}{x_2} + b = 0$$

Ανισοτικοί περιορισμοί:

$$-\frac{x_1}{x_2} + 6 \leq 0$$

$$\frac{x_1}{x_3} - 15 \leq 0$$

Επομένως οι πίνακες ορίζονται ως εξής:

$$ceq = [x(4) * x(6) - x(3) + a$$

$$x(3)/x(2) + b]$$

$$c = [-x(1)/x(2) + 6$$

$$x(1)/x(3) - 15]$$

- Options: Διάφορες επιλογές για την λειτουργία του αλγορίθμου. Η μόνη που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή για την επιλογή του αλγορίθμου 'sqp'.
options=optimset('Algorithm','sqp')
- x: Στο τέλος της βελτιστοποίησης επιστρέφεται το βέλτιστο αποτέλεσμα
- fval: η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του βέλτιστου αποτελέσματος

Παρακάτω παρουσιάζονται οι κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν.

Κυρίως Πρόγραμμα:

```
function Bulk_Carrier_Optimization

x=[185.81 30.63 15.24 11.35 14.08 0.74];

lb=[150 20 13 10 13 0.63];
ub=[300.0 50.0 30.0 20.0 16 0.85];

Aeq=[];
beq=[];

A=[0 0 -0.7 1 0 0 ];
b = [0.7];

options=optimset('Algorithm','sqp');

[x,fval]=fmincon(@objEAN,x,A,b,Aeq,beq,lb,ub,@myconstr,options)
% [x,fval]=fmincon(@objMT,x,A,b,Aeq,beq,lb,ub,@myconstr,options)
% [x,fval]=fmincon(@objSIGMA,x,A,b,Aeq,beq,lb,ub,@myconstr,options)
% [x,fval]=fmincon(@objMULTI,x,A,b,Aeq,beq,lb,ub,@myconstr,options)

end
```

Μη γραμμικοί περιορισμοί:

Στον κώδικα των μη γραμμικών περιορισμών εμπεριέχεται και μέρος του μοντέλου του πλοίου, για τον υπολογισμό των απαραίτητων μεγεθών που εμφανίζονται στους περιορισμούς. Επειδή το μοντέλο του πλοίου παρουσιάζεται παρακάτω, παρουσιάζονται μόνο οι πίνακες που επιστρέφει ο κώδικας στο κυρίως πρόγραμμα.

```
function [c, ceq] = myconstr(x)

[...ΜΕΡΟΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ...]

c=[6-x(1)/x(2)
   x(1)/x(3)-15
   x(1)/x(4)-19
   x(4)-0.45*(DWT^0.31)
   80000-DWT
   DWT-200000
   FN-0.32
   0.07*x(2)-GM];

% Ο ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΤΟΝ ΔΕΙΚΤΗ EEDI ΔΕΝ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ
% EEDI-EEDIreq];

%-----

% ΔΕΝ ΕΧΟΥΜΕ ΙΣΟΤΙΚΟΥΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ
ceq = [];

end
```

Οι αντικειμενικές συναρτήσεις:

Οι αντικειμενικές συναρτήσεις 'καλούν' το μοντέλο του πλοίου με δεδομένα το διάνυσμα x (τιμές ανεξάρτητων μεταβλητών) συν έξι επιπλέον τιμές, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την ολοκλήρωση, προκειμένου να βρεθεί η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση. Αυτές οι έξι τιμές είναι σχετίζονται με τις αβέβαιες μεταβλητές. Επομένως, στην περίπτωση των τριών αβέβαιων μεταβλητών, οι τιμές που πρέπει να οριστούν είναι οι mr, dr, mt, dt, mv, dv .

Στο πρόβλημα, ως αβέβαιες μεταβλητές μπορούν να χρησιμοποιηθούν και μεγέθη με σταθερές τιμές (Round trip mile, Handling rate κτλ.) και μεγέθη τα οποία δεν έχουν σταθερές τιμές και εξαρτώνται από άλλα. Αν η αβέβαιη μεταβλητή παίρνει σταθερή τιμή, τότε οι ποσότητες mr, mt ή mv (ανάλογα σε ποια από τις τρεις αναφέρεται η αβέβαιη μεταβλητή) παίρνουν την τιμή αυτή, διαφορετικά παίρνουν την τιμή μηδέν. Αυτό έγινε για να μπορεί να αλλάξει η τιμή, σε περίπτωση που η αβέβαιη μεταβλητή δεν εξαρτάται από άλλες, χωρίς να χρειάζεται να επέμβουμε στο μοντέλο του πλοίου.

Τα μεγέθη dr, dt και dv παίρνουν πάντα ως αρχική τιμή το μηδέν, και χρησιμοποιούνται από τους κώδικες για τις ολοκληρώσεις που απαιτούνται, όταν οι αντικειμενικές συναρτήσεις είναι η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και η μέθοδος 'normed weighted sum optimum' για την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση. Επίσης, στις προαναφερθείσες συναρτήσεις, ορίζεται επιπλέον και το μέγιστο ποσοστό απόκλισης της κάθε μεταβλητής ($drmax, dtmax, dvmax$) καθώς επίσης και η διαμέριση που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του ολοκληρώματος (diamerisi).

Για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων καλείται μία η συνάρτηση 'norm_distr' η οποία υπολογίζει τις τιμές της κανονικής κατανομής κάθε μεταβλητής.

Ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος

```
function EAN=objEAN(x)

mr=2*4800;%Round Trip Miles (sm)
dr=0;
mt=0;%Ship Cost (£)
dt=0;
mv=6000;%Handling Rate (ton/day)
dv=0;

[SHIPCOST RTM HANDLR EAN]=shipmodel(x,mr,dr,mt,dt,mv,dv);

end
```

Μέση τιμή

```
function mf=objMT(x)

drmax=0.1;
dtmax=0.02;
dvmax=0.05;
diamerisi=20;

mr=2*4800;%Round Trip Miles (sm)
dr=0;
mt=0;%Ship Cost (£)
dt=0;
mv=6000;%Handling Rate (ton/day)
dv=0;

%-----

[SHIPCOST RTM HANDLR EAN]=shipmodel(x,mr,dr,mt,dt,mv,dv);
```



```

mr11=RTM;
mt11=SHIPCOST;
mv11=HANDLR;

%ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ
foursigmar=drmax*mr11;
foursigmat=dtmax*mt11;
foursigmav=dvmax*mv11;

%ΙΣΑΠΟΣΤΑΣΗ ΓΙΑ ΤΙΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΕΙΣ
hr=(2*foursigmar)/diamerisi;
ht=(2*foursigmat)/diamerisi;
hv=(2*foursigmav)/diamerisi;

%ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΘΕ ΜΕΤΑΒΑΗΤΗΣ
for ii=1:diamerisi;
    temp=ii-1;
    dr=-foursigmar+temp*hr;
    tempr=mr11+dr;
    [pithan]=norm_distr(foursigmar,mr11,tempr);
    pr(ii)=pithan;
end

for ii=1:diamerisi;
    temp=ii-1;
    dt=-foursigmat+temp*ht;
    tempt=mt11+dt;
    [pithan]=norm_distr(foursigmat,mt11,tempt);
    pt(ii)=pithan;
end

for ii=1:diamerisi;
    temp=ii-1;
    dv=-foursigmav+temp*hv;
    tempv=mv11+dv;
    [pithan]=norm_distr(foursigmav,mv11,tempv);
    pv(ii)=pithan;
end

%ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΣΗΣ ΤΙΜΗΣ ΕΑΝ
mf=0;

for yy=1:diamerisi;
    temp5=yy-1;
    dt=-foursigmat+temp5*ht;
    athr4=0;

for oo=1:diamerisi;
    temp4=oo-1;
    dv=-foursigmav+temp4*hv;
    athr5=0;

for kk=1:diamerisi;
    temp3=kk-1;
    dr=-foursigmar+temp3*hr;

    [SHIPCOST RTM HANDLR EAN]=shipmodel(x,mr,dr,mt,dt,mv,dv);

    athr5=athr5+EAN*pr(kk)*hr;
end

athr4=athr4+athr5*pv(oo)*hv;
end

mf=mf+athr4*pt(yy)*ht;
end

end

```

Τυπική απόκλιση

Ο κώδικας που υπολογίζει την τυπική απόκλιση είναι ο ίδιος με εκείνον της μέσης τιμής, όμως, όταν υπολογίζεται η μέση τιμή, προστίθεται ένας επιπλέον όρος σε κάθε άθροισμα, για τον υπολογισμό του τετραγώνου του ναύλου.

```
function sigma=objSIGMA(x)

[...Η ΜΟΡΦΗ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ ΕΙΝΑΙ ΙΔΙΑ ΜΕ ΑΥΤΗ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΤΜΗΣ, ΜΕ ΜΟΝΗ ΑΛΛΑΓΗ ΤΗΝ
ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ...]

%ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΣΗΣ ΤΙΜΗΣ ΚΑΙ ΤΥΠΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ ΕΑΝ

mf=0;
sigma2temp=0;

for yy=1:diamerisi;
temp5=yy-1;
dt=-foursigmat+temp5*ht;
athr41=0;
athr42=0;

for oo=1:diamerisi;
temp4=oo-1;
dv=-foursigmav+temp4*hv;
athr51=0;
athr52=0;

for kk=1:diamerisi;
temp3=kk-1;
dr=-foursigmar+temp3*hr;

[SHIPCOST RTM HANDLR EAN]=shipmodel(x,mr,dr,mt,dt,mv,dv);

athr51=athr51+EAN*pr(kk)*hr;

EAN2=EAN^2;
athr52=athr52+EAN2*pr(kk)*hr;
end

athr41=athr41+athr51*pv(oo)*hv;
athr42=athr42+athr52*pv(oo)*hv;
end

mf=mf+athr41*pt(yy)*ht;
sigma2temp=sigma2temp+athr42*pt(yy)*ht;
end

sigma2=sigma2temp-mf^2;
sigma=sigma2^0.5;

end
```

Μέθοδος πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης 'Normed Weighted Sum Optimum'

Ο κώδικας είναι ο ίδιος με της τυπικής απόκλισης, με την μόνη διαφορά ότι στην αρχή ορίζεται η ελάχιστη μέση τιμή (mf0) όπως προέκυψε από την βελτιστοποίηση της μέσης τιμής, και η ελάχιστη τυπική απόκλιση (sigma0) όπως προέκυψε από την βελτιστοποίηση της τυπικής απόκλισης.

```
function multi=objMULTI(x)

mf0=16.5804;
sigma0=0.3377;

[...Ο ΚΩΔΙΚΑΣ ΕΙΝΑΙ Ο ΙΔΙΟΣ ΜΕ ΑΥΤΟΝ ΤΗΣ ΤΥΠΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ, ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ
ΣΤΟ ΤΕΛΟΣ...]

% NORMED WEIGHTED SUM OPTIMUM
z1=mf/mf0;
z2=sigma/sigma0;
w1=0.9;
w2=1-w1;
multi=w1*z1+w2*z2;

end
```

Το μοντέλο του πλοίου:

```
function [SHIPCOST RTM HANDLR EAN]=shipmodel(x,mr,dr,mt,dt,mv,dv)

L=x(1);
B=x(2);
D=x(3);
T=x(4);
VKN=x(5);
CB=x(6);

%ΕΚΤΟΠΙΣΜΑ (TON)
DISP=1.025*L*B*T*CB;

%ΤΑΧΥΤΗΤΑ (M/S)
VMS=0.5144*VKN;

%ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ (M/S^2)
G=9.8065;

%ΑΡΙΘΜΟΣ FROUDE
TEMP1=G*L;
TEMP2=sqrt(TEMP1);
FN=VMS/TEMP2;

%ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ 1ΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
%(ΑΠΟ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΩΝ SEN&YANG)
A1=4977.06*(CB^2)-8105.61*CB+4456.51;
B1=-10847.2*(CB^2)+12817*CB-6960.32;
AC1=A1+B1*FN;

%-----

%ΒΑΡΟΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ (TON)

%ΜΕΘΟΔΟΣ SCHNEEKLUTH
CBD=CB+0.25*((D-T)/T)*(1-CB);
VD=L*B*D*CBD;

b=0.5;
VB=L*B*b*0.7*CBD;

Lc=0.7+((L-150)/(300-150))*(0.8-0.7); %Lcargο/Lbp
lhi=0.75*Lc*L;
bhi=0.75*B;
hli=2;
VH=lhi*bhi*hli;
```

```

VU=VD+VB+VH;

temp1=1+0.033*( (L/D)-12);
temp2=1+0.06*(1-(D/4));
temp3=1+0.05*(1.85-(B/D));
temp4=1+0.2*( (T/D)-0.85);
temp5=0.92+(1-CBD)^2;
CM=0.9+0.1*CB; %Van Lammeren
temp6=1+0.75*CBD*(CM-0.98);
Cst=0.112;

WS1=VU*Cst*temp1*temp2*temp3*temp4*temp5*temp6;

%ΜΕΘΟΔΟΣ MULLER-KOSTER
%ΠΡΟΣΤΕΓΟ
CBACK=100; %kp/m^3
HBACK=2.5; %m
LBACK=0.07*L; %m
WBACK=CBACK*LBACK*B*HBACK*(1/1.7);

%ΥΠΕΡΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ/ΥΠΕΡΣΤΕΓΑΣΜΑΤΑ
Lyper=0.06+((300-L)/(300-150))*(0.1-0.06);
LYP=Lyper*L;
HYP=2.6;
BYP=0.9*B;
AM=LYP*BYP;
k3=0.95+((L-100)/(230-100))*(1.1-0.95);

CDH1=57; %kp/m^3
WDH1=CDH1*AM*HYP*k3;
CDH2=55; %kp/m^3
WDH2=CDH2*AM*HYP*k3;
CDH3=52; %kp/m^3
WDH3=CDH3*AM*HYP*k3;
CDH4=53; %kp/m^3
WDH4=CDH4*AM*HYP*k3;
CDH5=40; %kp/m^3
WDH5=CDH5*AM*HYP*k3/2;

WS2=(WBACK+WDH1+WDH2+WDH3+WDH4+WDH5)/1000;

WS=WS1+WS2;

%-----
% ΒΑΡΟΣ ΕΝΔΙΑΙΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ (TON)
KOT=0.23-((L-140)/(250-140))*(0.23-0.17);
WO=KOT*L*B;

%-----

%1Η ΠΡΟΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ (KW)
%(ΑΠΟ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΩΝ SEN&YANG)
POW=(DISP^(2/3))*(VKN^3)/AC1;

%1Η ΠΡΟΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΒΑΡΟΥΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ (TON)
%(ΑΠΟ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΩΝ SEN&YANG)
WM=0.17*(POW^0.9);

%1Η ΠΡΟΕΚΤΙΜΗΣΗ LIGHT SHIP (TON)
LS=WS+WO+WM;

%1Η ΠΡΟΕΚΤΙΜΗΣΗ DWT (TON)
DWT=DISP-LS;

%-----

%2Η ΠΡΟΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ (KW)
%(ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΤΗΣ MAN)
[POW]=MAN_POWER(VKN,DWT);

%2Η ΠΡΟΕΚΤΙΜΗΣΗ ΒΑΡΟΥΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ (TON)
%(ΑΠΟ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΩΝ SEN&YANG)
WM=0.17*(POW^0.9);

```

```

%2H ΠΡΟΕΚΤΙΜΗΣΗ LIGHT SHIP (TON)
LS=WS+WO+WM;

%2H ΠΡΟΕΚΤΙΜΗΣΗ DWT (TON)
DWT=DISP-LS;

%-----

%ΤΕΛΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΙΣΧΥΟΣ (KW)
%(ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΜΑΝ)
[POW]=MAN_POWER(VKN,DWT);

%ΤΕΛΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΒΑΡΟΥΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ (TON)
if(POW<=5000)
    KMM=0.015+((POW-2000)/(5000-2000))*(0.022-0.015);
elseif(POW>5000)&&(POW<=10000)
    KMM=0.022+((POW-5000)/(10000-5000))*(0.029-0.022);
elseif(POW>10000)
    KMM=0.029+((POW-10000)/(70000-10000))*(0.039-0.029);
end
WMM=KMM*POW;
POWHP=POW/0.746;
WMR=POWHP*0.04;
WMS=POWHP*0.007;
WM=WMM+WMR+WMS;

%ΤΕΛΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ LIGHT SHIP (TON)
LS=WS+WO+WM;

%ΤΕΛΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ DWT (TON)
DWT=DISP-LS;

%-----

%ΚΟΣΤΟΣ ΠΛΟΙΟΥ (£)
SHIPCOST=1.3*(2000*WS^0.85+3500*WO+2400*POW^0.8)+mt+dt;

%ΚΕΦΑΛΑΙΟΥΧΙΚΕΣ ΔΑΠΑΝΕΣ (£)
CAPCOST=0.2*SHIPCOST;

%ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΕΞΟΔΑ (£)
RUNCOST=40000*DWT^0.3;

%ΔΙΑΔΡΟΜΗ ΜΕΤ'ΕΠΙΣΤΡΟΦΗΣ (NM)
RTM=mr+dr;

%ΤΙΜΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (£/T)
FPR=400;

%ΗΜΕΡΕΣ ΤΑΞΙΔΙΟΥ
SDAYS=RTM/(24*VKN);

%ΙΣΧΥΣ ΓΕΝΗΤΡΙΩΝ (kW)
if POW>=10000
    POWAU=0.025*POW+250;
else
    POWAU=0.05*POW;
end

%ΔΕΙΚΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ (EEDI)
CFme=3.206; %tonCO2/tonFUEL
CFae=3.206; %tonCO2/tonFUEL
SFCme=170; %g/kWh
SFCae=190; %g/kWh
EEDI=(0.75*POW*CFme*SFCme+POWAU*CFae*SFCae)/(DWT*VKN);
EEDIreq=1354/(DWT^0.5117); %required (EEDI<=EEDIreq)

%ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (TON)
DAYCON=(SFCme/1000)*POW*24/1000+(SFCae/1000)*POWAU*24/1000;

%ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (£/ΤΑΞΙΔΙ)
FUELCOST=1.05*DAYCON*SDAYS*FPR;

%ΚΟΣΤΟΙ ΛΙΜΕΝΩΝ (£)
PORTCOST=6.3*DWT^0.8;

```

```

%ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΦΟΡΤΟΕΚΦΟΡΤΩΣΗΣ (T/DAY)
HANDLR=mv+dv;

%ΥΠΟΛΟΙΠΑ ΒΑΡΗ ΠΟΥ ΕΤΑΣΣΟΝΤΑΙ ΣΤΟ DWT (MISCELLANEOUS DWT)
CREW=20+((DWT-16000)/(500000-16000))*(30-20);
DRINKW=0.015*CREW*SDAYS;
CLEANW=0.2*CREW*SDAYS;
FOOD=0.01*CREW*SDAYS;
CREWWEIGHT=0.075*CREW;
LUGGAGEWEIGHT=0.06*CREW;
MISCDWT=DRINKW+CLEANW+FOOD+CREWWEIGHT+LUGGAGEWEIGHT;

%ΒΑΡΟΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ
FCAR=DAYCON*(SDAYS+5);

%ΒΑΡΟΣ ΟΦΕΛΙΜΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ
CDWT=DWT-FCAR-MISCDWT;

%ΗΜΕΡΕΣ ΠΟΥ ΤΟ ΠΛΟΙΟ ΒΡΙΣΚΕΤΑΙ ΣΕ ΛΙΜΑΝΙ
PDAYS=2*(CDWT/HANDLR+0.5);

%ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΙΑΔΡΟΜΩΝ ΤΟ ΧΡΟΝΟ
RTPA=350/(SDAYS+PDAYS);

%ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΕΤΗΣΙΟ ΦΟΡΤΙΟ (T/YEAR)
ANNC=CDWT*RTPA;

%ΚΟΣΤΟΣ ΤΑΞΙΔΙΟΥ
VOYCOST=(FUELCOST+PORTCOST)*RTPA;

%ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΕΤΗΣΙΟ ΚΟΣΤΟΣ
ANNCOST=CAPCOST+RUNCOST+VOYCOST;

%ΕΤΗΣΙΟ ΚΟΣΤΟΣ ΑΝΑ ΤΟΝΟ ΕΤΗΣΙΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ (£/T)
TRANSCOST=ANNCOST/ANNC;

%ΕΛΑΧΙΣΤΟΣ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΣ ΝΑΥΛΟΣ
%(ΘΕΩΡΟΥΜΕ ΟΤΙ ΟΛΕΣ ΟΙ ΣΥΝΑΛΛΑΓΕΣ ΣΥΜΒΑΙΝΟΥΝ ΣΤΟ ΤΕΛΟΣ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΕΤΟΥΣ)
t=0.08; %ΕΠΙΤΟΚΙΟ ΔΑΝΕΙΣΜΟΥ
Nt=10; %ΧΡΟΝΟΣ ΑΠΟΠΛΗΡΩΜΗΣ ΔΑΝΕΙΟΥ
N=20.0; %ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ
Nc=2; %ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΠΛΟΙΟΥ
pos1=0.3; %ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ ΠΟΥ ΠΛΗΡΩΝΕΙ ΜΕ ΜΕΤΡΗΤΑ Ο ΠΛΟΙΟΚΤΗΤΗΣ
pos2=0.7; %ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΟΠΟΙΟ ΠΑΙΡΝΕΙ ΔΑΝΕΙΟ
%(pos1+pos2=1)
r=0.08; %ΕΠΙΤΟΚΙΟ ΤΡΑΠΕΖΑΣ
f=0.03; %ΠΛΗΘΩΡΙΣΜΟΣ
i=((1+r)/(1+f))-1; %ΑΠΟΠΛΗΘΩΡΙΣΜΕΝΟ ΕΠΙΤΟΚΙΟ ΑΓΟΡΑΣ

%ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΕΠΙΚΑΙΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΚΑΘΑΡΗΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ ΑΞΙΑΣ
PR1=((1+i)^Nt-1)/(i*(1+i)^Nt);
PR2=((1+i)^(N-Nt-Nc)-1)/(i*(1+i)^(N-Nt-Nc));
PF1=(1/(1+i))^Nc;
PF2=(1/(1+i)^(Nt+Nc));
PF3=(1/(1+i))^N;
DOSI=(pos2*SHIPCOST/Nt)*(1+t);
TELIKI_AKSIA=0.2*SHIPCOST;

%ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΧΟΤΟΜΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΥΡΕΣΗ ΤΟΥ ΕΛΑΧΙΣΤΟΥ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΥ ΝΑΥΛΟΥ
N1=0;
N2=1000;
INCOME=ANNC*N1;
KPA1=-pos1*SHIPCOST*PF1+(INCOME-ANNCOST-DOSI)*PR1*PF1+(INCOME-ANNCOST)*PR2*PF2+TELIKI_AKSIA*PF3;
INCOME=ANNC*N2;
KPA2=-pos1*SHIPCOST*PF1+(INCOME-ANNCOST-DOSI)*PR1*PF1+(INCOME-ANNCOST)*PR2*PF2+TELIKI_AKSIA*PF3;

eps=10e-5;
tmp2=KPA1-KPA2;

```

```

while (abs (tmp2)>eps)

    INCOME=ANNC*N1;
    KPA1=-pos1*SHIPCOST*PF1+ (INCOME-ANNCOST-DOSI) *PR1*PF1+ (INCOME-
ANNCOST) *PR2*PF2+TELIKI_AKSIA*PF3;

    INCOME=ANNC*N2;
    KPA2=-pos1*SHIPCOST*PF1+ (INCOME-ANNCOST-DOSI) *PR1*PF1+ (INCOME-
ANNCOST) *PR2*PF2+TELIKI_AKSIA*PF3;

    tmp2=KPA1-KPA2;

    NN2=N1+ (N2-N1) /2;
    INCOME=ANNC*NN2;
    KPA22=-pos1*SHIPCOST*PF1+ (INCOME-ANNCOST-DOSI) *PR1*PF1+ (INCOME-
ANNCOST) *PR2*PF2+TELIKI_AKSIA*PF3;

    tmp=KPA1*KPA22;
    if (tmp<0)
        N2=NN2;
    else
        N1=NN2;
    end

end

EAN=N1;

end

```

Υπολογισμός της κανονικής κατανομής

```

function [pithan]=norm_distr (foursigma,m,x)

pi=3.14159265;
sigma=foursigma/4.0;
temp0=abs (x-m);
temp1=- (1/ (2*sigma^2)) *temp0^2;
temp2=sqrt (2*pi);
temp3=1/ (temp2*sigma);
temp4=exp (temp1);
pithan=temp3*temp4;

end

```

Διαγράμματα υπολογισμού ισχύος της MAN

```

function [POW]=MAN_POWER (VKN,DWT)

DWT10K=[2650 3010 3430 4040 4690 5450 6250];
DWT35K=[4850 5470 6280 7200 8210 9510 10820];
DWT55K=[6390 7200 8250 9350 10590 12060 13570];
DWT60K=[6620 7370 8520 9500 10800 12290 13940];
DWT80K=[7370 8380 9500 10720 12170 13740 15600];
DWT200K=[12400 14050 15860 17620 19660 21960 24400];
DWT400K=[18510 21030 23550 26080 29020 31970 35040];

corr1=[500 500 500 500 500 500 500];
corr2=[1600 1600 1600 1600 1600 1600 1600];

DWT200K=DWT200K+corr1;
DWT400K=DWT400K+corr2;

if (VKN<13.5)
    if (DWT<35000)
        P1=(DWT10K (2)-DWT10K (1)) * (VKN-13) / (13.5-13)+DWT10K (1);
        P2=(DWT35K (2)-DWT35K (1)) * (VKN-13) / (13.5-13)+DWT35K (1);
        POW=(P2-P1) * (DWT-10000) / (35000-10000)+P1;
    elseif (DWT>=35000) && (DWT<55000)

```

```

P1=(DWT35K(2)-DWT35K(1))* (VKN-13)/(13.5-13)+DWT35K(1);
P2=(DWT55K(2)-DWT55K(1))* (VKN-13)/(13.5-13)+DWT55K(1);
POW=(P2-P1)* (DWT-35000)/(55000-35000)+P1;
elseif (DWT>=55000) && (DWT<60000)
P1=(DWT55K(2)-DWT55K(1))* (VKN-13)/(13.5-13)+DWT55K(1);
P2=(DWT60K(2)-DWT60K(1))* (VKN-13)/(13.5-13)+DWT60K(1);
POW=(P2-P1)* (DWT-55000)/(60000-55000)+P1;
elseif (DWT>=60000) && (DWT<80000)
P1=(DWT60K(2)-DWT60K(1))* (VKN-13)/(13.5-13)+DWT60K(1);
P2=(DWT80K(2)-DWT80K(1))* (VKN-13)/(13.5-13)+DWT80K(1);
POW=(P2-P1)* (DWT-60000)/(80000-60000)+P1;
elseif (DWT>=80000) && (DWT<200000)
P1=(DWT80K(2)-DWT80K(1))* (VKN-13)/(13.5-13)+DWT80K(1);
P2=(DWT200K(2)-DWT200K(1))* (VKN-13)/(13.5-13)+DWT200K(1);
POW=(P2-P1)* (DWT-80000)/(200000-80000)+P1;
elseif (DWT>=200000)
P1=(DWT200K(2)-DWT200K(1))* (VKN-13)/(13.5-13)+DWT200K(1);
P2=(DWT400K(2)-DWT400K(1))* (VKN-13)/(13.5-13)+DWT400K(1);
POW=(P2-P1)* (DWT-200000)/(400000-200000)+P1;
end
elseif (VKN>=13.5) && (VKN<14.0)
if (DWT<35000)
P1=(DWT10K(3)-DWT10K(2))* (VKN-13.5)/0.5+DWT10K(2);
P2=(DWT35K(3)-DWT35K(2))* (VKN-13.5)/0.5+DWT35K(2);
POW=(P2-P1)* (DWT-10000)/(35000-10000)+P1;
elseif (DWT>=35000) && (DWT<55000)
P1=(DWT35K(3)-DWT35K(2))* (VKN-13.5)/0.5+DWT35K(2);
P2=(DWT55K(3)-DWT55K(2))* (VKN-13.5)/0.5+DWT55K(2);
POW=(P2-P1)* (DWT-35000)/(55000-35000)+P1;
elseif (DWT>=55000) && (DWT<60000)
P1=(DWT55K(3)-DWT55K(2))* (VKN-13.5)/0.5+DWT55K(2);
P2=(DWT60K(3)-DWT60K(2))* (VKN-13.5)/0.5+DWT60K(2);
POW=(P2-P1)* (DWT-55000)/(60000-55000)+P1;
elseif (DWT>=60000) && (DWT<80000)
P1=(DWT60K(3)-DWT60K(2))* (VKN-13.5)/0.5+DWT60K(2);
P2=(DWT80K(3)-DWT80K(2))* (VKN-13.5)/0.5+DWT80K(2);
POW=(P2-P1)* (DWT-60000)/(80000-60000)+P1;
elseif (DWT>=80000) && (DWT<200000)
P1=(DWT80K(3)-DWT80K(2))* (VKN-13.5)/0.5+DWT80K(2);
P2=(DWT200K(3)-DWT200K(2))* (VKN-13.5)/0.5+DWT200K(2);
POW=(P2-P1)* (DWT-80000)/(200000-80000)+P1;
elseif (DWT>=200000)
P1=(DWT200K(3)-DWT200K(2))* (VKN-13.5)/0.5+DWT200K(2);
P2=(DWT400K(3)-DWT400K(2))* (VKN-13.5)/0.5+DWT400K(2);
POW=(P2-P1)* (DWT-200000)/(400000-200000)+P1;
end
elseif (VKN>=14) && (VKN<14.5)
if (DWT<35000)
P1=(DWT10K(4)-DWT10K(3))* (VKN-14)/0.5+DWT10K(3);
P2=(DWT35K(4)-DWT35K(3))* (VKN-14)/0.5+DWT35K(3);
POW=(P2-P1)* (DWT-10000)/(35000-10000)+P1;
elseif (DWT>=35000) && (DWT<55000)
P1=(DWT35K(4)-DWT35K(3))* (VKN-14)/0.5+DWT35K(3);
P2=(DWT55K(4)-DWT55K(3))* (VKN-14)/0.5+DWT55K(3);
POW=(P2-P1)* (DWT-35000)/(55000-35000)+P1;
elseif (DWT>=55000) && (DWT<60000)
P1=(DWT55K(4)-DWT55K(3))* (VKN-14)/0.5+DWT55K(3);
P2=(DWT60K(4)-DWT60K(3))* (VKN-14)/0.5+DWT60K(3);
POW=(P2-P1)* (DWT-55000)/(60000-55000)+P1;
elseif (DWT>=60000) && (DWT<80000)
P1=(DWT60K(4)-DWT60K(3))* (VKN-14)/0.5+DWT60K(3);
P2=(DWT80K(4)-DWT80K(3))* (VKN-14)/0.5+DWT80K(3);
POW=(P2-P1)* (DWT-60000)/(80000-60000)+P1;
elseif (DWT>=80000) && (DWT<200000)
P1=(DWT80K(4)-DWT80K(3))* (VKN-14)/0.5+DWT80K(3);
P2=(DWT200K(4)-DWT200K(3))* (VKN-14)/0.5+DWT200K(3);
POW=(P2-P1)* (DWT-80000)/(200000-80000)+P1;
elseif (DWT>=200000)
P1=(DWT200K(4)-DWT200K(3))* (VKN-14)/0.5+DWT200K(3);
P2=(DWT400K(4)-DWT400K(3))* (VKN-14)/0.5+DWT400K(3);
POW=(P2-P1)* (DWT-200000)/(400000-200000)+P1;
end
elseif (VKN>=14.5) && (VKN<15)
if (DWT<35000)
P1=(DWT10K(5)-DWT10K(4))* (VKN-14.5)/0.5+DWT10K(4);
P2=(DWT35K(5)-DWT35K(4))* (VKN-14.5)/0.5+DWT35K(4);
POW=(P2-P1)* (DWT-10000)/(35000-10000)+P1;

```



```

elseif (DWT>=35000) && (DWT<55000)
    P1=(DWT35K(5)-DWT35K(4))* (VKN-14.5) /0.5+DWT35K(4);
    P2=(DWT55K(5)-DWT55K(4))* (VKN-14.5) /0.5+DWT55K(4);
    POW=(P2-P1)*(DWT-35000)/(55000-35000)+P1;
elseif (DWT>=55000) && (DWT<60000)
    P1=(DWT55K(5)-DWT55K(4))* (VKN-14.5) /0.5+DWT55K(4);
    P2=(DWT60K(5)-DWT60K(4))* (VKN-14.5) /0.5+DWT60K(4);
    POW=(P2-P1)*(DWT-55000)/(60000-55000)+P1;
elseif (DWT>=60000) && (DWT<80000)
    P1=(DWT60K(5)-DWT60K(4))* (VKN-14.5) /0.5+DWT60K(4);
    P2=(DWT80K(5)-DWT80K(4))* (VKN-14.5) /0.5+DWT80K(4);
    POW=(P2-P1)*(DWT-60000)/(80000-60000)+P1;
elseif (DWT>=80000) && (DWT<200000)
    P1=(DWT80K(5)-DWT80K(4))* (VKN-14.5) /0.5+DWT80K(4);
    P2=(DWT200K(5)-DWT200K(4))* (VKN-14.5) /0.5+DWT200K(4);
    POW=(P2-P1)*(DWT-80000)/(200000-80000)+P1;
elseif (DWT>=200000)
    P1=(DWT200K(5)-DWT200K(4))* (VKN-14.5) /0.5+DWT200K(4);
    P2=(DWT400K(5)-DWT400K(4))* (VKN-14.5) /0.5+DWT400K(4);
    POW=(P2-P1)*(DWT-200000)/(400000-200000)+P1;
end
elseif (VKN>=15) && (VKN<15.5)
if (DWT<35000)
    P1=(DWT10K(6)-DWT10K(5))* (VKN-15) /0.5+DWT10K(5);
    P2=(DWT35K(6)-DWT35K(5))* (VKN-15) /0.5+DWT35K(5);
    POW=(P2-P1)*(DWT-10000)/(35000-10000)+P1;
elseif (DWT>=35000) && (DWT<55000)
    P1=(DWT35K(6)-DWT35K(5))* (VKN-15) /0.5+DWT35K(5);
    P2=(DWT55K(6)-DWT55K(5))* (VKN-15) /0.5+DWT55K(5);
    POW=(P2-P1)*(DWT-35000)/(55000-35000)+P1;
elseif (DWT>=55000) && (DWT<60000)
    P1=(DWT55K(6)-DWT55K(5))* (VKN-15) /0.5+DWT55K(5);
    P2=(DWT60K(6)-DWT60K(5))* (VKN-15) /0.5+DWT60K(5);
    POW=(P2-P1)*(DWT-55000)/(60000-55000)+P1;
elseif (DWT>=60000) && (DWT<80000)
    P1=(DWT60K(6)-DWT60K(5))* (VKN-15) /0.5+DWT60K(5);
    P2=(DWT80K(6)-DWT80K(5))* (VKN-15) /0.5+DWT80K(5);
    POW=(P2-P1)*(DWT-60000)/(80000-60000)+P1;
elseif (DWT>=80000) && (DWT<200000)
    P1=(DWT80K(6)-DWT80K(5))* (VKN-15) /0.5+DWT80K(5);
    P2=(DWT200K(6)-DWT200K(5))* (VKN-15) /0.5+DWT200K(5);
    POW=(P2-P1)*(DWT-80000)/(200000-80000)+P1;
elseif (DWT>=200000)
    P1=(DWT200K(6)-DWT200K(5))* (VKN-15) /0.5+DWT200K(5);
    P2=(DWT400K(6)-DWT400K(5))* (VKN-15) /0.5+DWT400K(5);
    POW=(P2-P1)*(DWT-200000)/(400000-200000)+P1;
end
elseif (VKN>=15.5)
if (DWT<35000)
    P1=(DWT10K(7)-DWT10K(6))* (VKN-15.5) /0.5+DWT10K(6);
    P2=(DWT35K(7)-DWT35K(6))* (VKN-15.5) /0.5+DWT35K(6);
    POW=(P2-P1)*(DWT-10000)/(35000-10000)+P1;
elseif (DWT>=35000) && (DWT<55000)
    P1=(DWT35K(7)-DWT35K(6))* (VKN-15.5) /0.5+DWT35K(6);
    P2=(DWT55K(7)-DWT55K(6))* (VKN-15.5) /0.5+DWT55K(6);
    POW=(P2-P1)*(DWT-35000)/(55000-35000)+P1;
elseif (DWT>=55000) && (DWT<60000)
    P1=(DWT55K(7)-DWT55K(6))* (VKN-15.5) /0.5+DWT55K(6);
    P2=(DWT60K(7)-DWT60K(6))* (VKN-15.5) /0.5+DWT60K(6);
    POW=(P2-P1)*(DWT-55000)/(60000-55000)+P1;
elseif (DWT>=60000) && (DWT<80000)
    P1=(DWT60K(7)-DWT60K(6))* (VKN-15.5) /0.5+DWT60K(6);
    P2=(DWT80K(7)-DWT80K(6))* (VKN-15.5) /0.5+DWT80K(6);
    POW=(P2-P1)*(DWT-60000)/(80000-60000)+P1;
elseif (DWT>=80000) && (DWT<200000)
    P1=(DWT80K(7)-DWT80K(6))* (VKN-15.5) /0.5+DWT80K(6);
    P2=(DWT200K(7)-DWT200K(6))* (VKN-15.5) /0.5+DWT200K(6);
    POW=(P2-P1)*(DWT-80000)/(200000-80000)+P1;
elseif (DWT>=200000)
    P1=(DWT200K(7)-DWT200K(6))* (VKN-15.5) /0.5+DWT200K(6);
    P2=(DWT400K(7)-DWT400K(6))* (VKN-15.5) /0.5+DWT400K(6);
    POW=(P2-P1)*(DWT-200000)/(400000-200000)+P1;
end
end
end

```

end

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

BIBLIA:

- [1] Μελέτη Πλοίου – Μεθοδολογίες Προμελέτης' Απόστολος Δ. Παπανικολάου
- [2] Μεθοδολογία Μελέτης Εμπορικών Πλοίων με Η/Υ για την Κατάρτιση Προσφορών από Ελληνικά Ναυπηγεία' Διδακτορική διατριβή, Ηλίας Καρυαμπάς
- [3] 'Engineering Optimization, Theory and Practice', Singiresu S. Rao
- [4] Οικονομική Θαλάσσιων Μεταφορών Ι', Χαρίλαος Ψαραύτης
- [5] 'Engineering Economics and Ship Design', I. L. Buxton
- [6] Ανάλυση και Βελτιστοποίηση Ενεργειακών Συστημάτων', Χρίστος Αθ. Φραγκόπουλος
- [7] Συστημική Μεθοδολογία και Τεχνική Οικονομική', Δημήτριος Χ. Παναγιωτακόπουλος
- [8] Εισαγωγή στις πιθανότητες', Γ. Κοκκολάκης, Ι. Σπηλιώτης
- [9] Εισαγωγή στην Αριθμητική Ανάλυση', Α. Μπακόπουλος, Ι. Χρυσοβέργης
- [10] Στοιχεία Πολυωνυμικής Παρεμβολής, Παρεμβολής με Συναρτήσεις Splines και Αριθμητικής Ολοκλήρωσης', Β. Α. Δουγαλής, Π. Δ. Κακλής
- [11] 'Multiple Criteria Decision Support in Engineering Design', P. Sen, J. Yang

ΑΡΘΡΑ:

- [12] 'Formulation of Multicriterion Design Optimization Problems for Solution with Scalar Numerical Optimization Methods' Michael G. Parsons, Randall L. Scott
- [13] 'Introducing Uncertainty in Multidiscipline Ship Design' Shari Hannapel, Nickolas Vlahopoulos
- [14] 'The Evaluation of Risk in Marine Capital Investments', Robert F. Klausner
- [15] 'Propulsion Trends in Bulk Carriers', MAN B&W Diesel A/S
- [16] MEPC.1/Circ.681: 'Interim Guidelines on the Method of Calculation of the Energy Efficiency Design Index for New Ships', IMO
- [17] GHG-WG 2/27: 'Consideration of the Energy Efficiency Design Index for New Ships'

ΔΙΑΔΥΚΤΙΟ:

- [18] <http://people.rit.edu/pnveme/EMEM820n/index.html> ,Dr. P.Venkataraman's online lectures on 'Advanced Optimal Design'
- [19] www.mathworks.com , MathWorks Website
- [20] www.wikipedia.org (πηγές: MAN Diesel Group 2005, p.4. UNCTAD 2006, p. xii / Lamb 2003 / 2005 CIA World Factbook)