



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

*Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση Μελέτης Δεξαμενοπλοίων
με Οικονομοτεχνικά Κριτήρια και Χρήση Γενετικών
Αλγορίθμων*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΧΟΝΤΖΟΠΟΥΛΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ

Επιβλέπων : Απόστολος Δ. Παπανικολάου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2011

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

*Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση Μελέτης Δεξαμενοπλοίων με
Οικονομοτεχνικά Κριτήρια και Χρήση Γενετικών
Αλγορίθμων*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΧΟΝΤΖΟΠΟΥΛΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ

Επιβλέπων : Απόστολος Δ. Παπανικολάου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Απόστολος Δ. Παπανικολάου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος Ζαραφονίτης
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Αλέξανδρος Γκίνης
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2011

.....

ΧΟΝΤΖΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Διπλωματούχος Ναυπηγός Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π

© 2011 – All rights reserved

Περίληψη

Η συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις για ελάττωση του κόστους κατασκευής με στόχο την ανταγωνιστικότητα σε παγκόσμιο επίπεδο οδήγησε τους μηχανικούς στην αναζήτηση αυστηρών μεθόδων λήψης αποφάσεων, όπως αυτές της βελτιστοποίησης, με σκοπό τον σχεδιασμό και την παραγωγή προϊόντων και συστημάτων συγχρόνως οικονομικών αλλά και αποδοτικών. Η βελτιστοποίηση είναι βασικό στοιχείο κάθε προβλήματος το οποίο περιέχει διαδικασίες λήψης αποφάσεων, τόσο στον τομέα των μηχανικών όσο και στις οικονομίες. Η διαδικασία της λήψης απόφασης εμπεριέχει την επιλογή μέσα από διάφορες εναλλακτικές. Η τελική απόφαση καθοδηγείται από την επιθυμία μας να κάνουμε την «καλύτερη δυνατή» επιλογή. Το μέτρο της καταλληλότητας κάθε εναλλακτικής περιγράφεται από την λεγόμενη αντικειμενική συνάρτηση ή δείκτη απόδοσης. Η θεωρία της βελτιστοποίησης και οι μέθοδοι αυτής ασχολούνται με την επιλογή της καλύτερης δυνατής εναλλακτικής στα πλαίσια της δεδομένης αντικειμενικής συνάρτησης. Ο κλάδος της βελτιστοποίησης έχει τύχει τεράστιας προσοχής τα τελευταία χρόνια, βασικά κυρίως της αλματώδους προόδου στην τεχνολογία των υπολογιστών, περιλαμβανόμενης και της διαθεσιμότητας φιλικών προς τον χρήστη λογισμικών και υψηλών ταχυτήτων παράλληλων επεξεργαστών. Ένα σαφές παράδειγμα αυτού του φαινομένου είναι η ευρεία διαθεσιμότητα των λογισμικών – εργαλείων βελτιστοποίησης όπως το Optimization Tool του Matlab. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων τεσσάρων δεκαετιών έχει παρουσιαστεί ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον σε αλγόριθμους οι οποίοι βασίζονται σε αναλογίες διαδικασιών της φύσης. Η πρόοδος των υπολογιστών παράλληλης τεχνολογίας κατέστησαν τους αλγόριθμους αυτούς πρακτικά ενδιαφέροντες. Στους πιο γνωστούς αλγόριθμους αυτής της κατηγορίας περιλαμβάνονται οι γενετικοί αλγόριθμοι, ο εξελικτικός προγραμματισμός, οι εξελικτικές στρατηγικές, η μέθοδοι τοπικής αναζήτησης, τα συστήματα ταξινόμησης και τα νευρωνικά δίκτυα. Σε αυτή την διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα σε γλώσσα προγραμματισμού MATLAB με σκοπό την επίλυση του πολυκριτηριακού προβλήματος της μελέτης δεξαμενοπλοίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων. Τις τελευταίες δυο δεκαετίες, η έρευνα για την εφαρμογή των γενετικών αλγορίθμων σε προβλήματα του κλάδου των μηχανικών και της βιομηχανίας ήταν ένα θέμα προσέλκυσης ενδιαφέροντος και περιέργειας για πολλούς ερευνητές και επαγγελματίες του κλάδου του management, της διαχείρισης λειτουργίας επιχειρήσεων και της βιομηχανίας. Ένα κύριο αίτιο αυτού του ενδιαφέροντος είναι ότι οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι ένα πολύ ισχυρό και ευρέως εφαρμόσιμο εργαλείο στοχαστικής αναζήτησης και βελτιστοποίησης το οποίο είναι πραγματικά αποτελεσματικό στην επίλυση μεγάλης γκάμας προβλημάτων τα οποία είναι εξαιρετικά δύσκολο να λυθούν με κλασικές υπολογιστικές μεθόδους. Οι ρίζες των εξελικτικών αλγορίθμων (όπως είναι οι γενετικοί αλγόριθμοι) βρίσκονται στις προσπάθειες μίμησης μερικών από τις διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στην εξέλιξη μέσω της φυσικής επιλογής. Αν και οι λεπτομέρειες της βιολογικής εξέλιξης δεν έχουν ακόμα και σήμερα κατανοηθεί πλήρως, υπάρχουν κάποια σημεία τα οποία στηρίζονται από ισχυρά πειραματικά αποδεικτικά στοιχεία :

- Η εξέλιξη είναι μια διαδικασία η οποία ενεργεί στα χρωμοσώματα και όχι στους ίδιους τους οργανισμούς. Τα τελευταία είναι οργανικά εργαλεία κωδικοποίησης της δομής ενός ζώντος οργανισμού
- Η φυσική επιλογή είναι ένας μηχανισμός ο οποίος σχετίζει τα χρωμοσώματα με την αποδοτικότητα του οργανισμού που αυτά εκπροσωπούν, επιτρέποντας έτσι σε αποδοτικούς και καλά προσαρμοσμένους με το περιβάλλον τους οργανισμούς να αναπαράγονται περισσότερο συχνά από τους υπόλοιπους.
- Η διαδικασία της εξέλιξης εκτυλίσσεται κατά το στάδιο της αναπαραγωγής. Στην φύση υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός μηχανισμών αναπαραγωγής. Οι περισσότεροι κοινοί είναι εκείνοι της μετάλλαξης (η οποία προκαλεί την διαφοροποίηση των χρωμοσωμάτων των απογόνων από αυτά των γονέων) και η διασταύρωση (η οποία συνδυάζει τα χρωμοσώματα των γονέων προκειμένου να δημιουργήσει τους απογόνους).

Σε αυτή την εργασία θα δοθούν το θεωρητικό υπόβαθρο της βελτιστοποίησης, των γενετικών αλγορίθμων και των διαδικασιών τους (αναπαραγωγή, διασταύρωση, μετάλλαξη κλπ) καθώς και μια περιγραφή των επιμέρους στοιχείων και του συνολικού αναπτυχθέντος προγράμματος για την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση μελέτης δεξαμενοπλοίων

Λέξεις Κλειδιά: << Βελτιστοποίηση, Γενετικοί Αλγόριθμοι, Μελέτη Πλοίου>>

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Abstract

The ever-increasing demand on engineers to lower production costs to withstand global competition has prompted engineers to look for rigorous methods of decision making, such as optimization methods, to design and produce products and systems both economically and efficiently. Optimization is central to any problem involving decision making, whether in engineering or in economics. The task of decision making entails choosing between various alternatives. This choice is governed by our desire to make the "best" decision. The measure of goodness of the alternatives is described by an objective function or performance index. Optimization theory and methods deal with selecting the best alternative in the sense of the given objective function. The area of optimization has received enormous attention in recent years, primarily because of the rapid progress in computer technology, including the development and availability of user-friendly software, and high-speed and parallel processors. A clear example of this phenomenon is the wide accessibility of optimization software tools such as the Optimization Toolbox of MATLAB and the many other commercial software packages. During the last four decades there has been a growing interest in algorithms which rely on analogies to natural processes. The emergence of massively parallel computers made these algorithms of practical interest. The best known algorithms in this class include evolutionary programming, genetic algorithms, evolution strategies, simulated annealing, classifier systems, and neural networks. In this Diploma thesis a program is written in MATLAB in order to solve the multiobjective optimization problem of tanker ships design using genetic algorithms. In the past two decades, the study of how to apply genetic algorithms to problems in the industrial engineering world has been a subject engaging the curiosity of many researchers and practitioners in the area of management science, operations research, and industrial and systems engineering. A major reason for this interest is that genetic algorithms are powerful and broadly applicable stochastic search and optimization techniques that really work for many problems that are very difficult to solve by computational techniques. The origin of evolutionary algorithms was an attempt to mimic some of the processes taking place in natural evolution. Although the details of biological evolution are not completely understood (even nowadays), there exist some points supported by strong experimental evidence:

- Evolution is a process operating over chromosomes rather than over organisms. The former are organic tools encoding the structure of a living being, i.e., a creature is "built" decoding a set of chromosomes.
- Natural selection is the mechanism that relates chromosomes with the efficiency of the entity they represent, thus allowing that efficient organism which is well adapted to the environment to reproduce more often than those which are not.
- The evolutionary process takes place during the reproduction stage. There exists a large number of reproductive mechanisms in Nature. Most common ones are mutation (that causes the chromosomes of offspring to be different to those of the parents) and recombination (that combines the chromosomes of the parents to produce the offspring).

In this book the theoretical background of optimization, genetic algorithms and their procedures (reproduction, crossover, mutation etc) as well as a description of the various parts and the overall produced program for multiobjective optimization of tanker ships is given.

Keywords: << Optimization, Genetic Algorithms, Ship Design >>

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή.....	1
1.1	Βελτιστοποίηση - Βασική Ιδέα.....	1
1.2	Μέθοδοι Βελτιστοποίησης – Σύντομη αναφορά στην ιστορική εξέλιξη.....	3
1.3	Η βελτιστοποίηση στη μελέτη και σχεδίαση πλοίου – Στόχοι εργασίας.....	6
1.4	Οργάνωση κειμένου.....	9
2	Θεωρητικό Υπόβαθρο	10
2.1	Βασικές αρχές βελτιστοποίησης.....	10
2.2	Κλασική – Μονοκριτηριακή Βελτιστοποίηση (Single Objective Optimization)	12
2.2.1	Ορισμός προβλήματος μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης	13
2.2.2	Διάνυσμα Σχεδίασης (Design Vector).....	14
2.2.3	Περιορισμοί Σχεδίασης (Design Constraints).....	16
2.2.4	Επιφάνειες περιορισμών (Constraint Surfaces).....	17
2.2.5	Αντικειμενική Συνάρτηση (Objective function).....	19
2.2.6	Επιφάνειες αντικειμενικών συναρτήσεων (Objective function Surfaces).....	21
2.3	Διαδικασία Λήψης Απόφασης κατω από Πολλαπλά κριτήρια (Mutliple Criteria Decision Making).....	22
2.4	Η δομή ενός σχεδιαστικού προβλήματος (The structure of a design problem).....	24
2.5	Ιστορικές αναφορές στην εξέλιξη της Πολυκριτηριακής Βελτιστοποίησης	26
2.6	Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση (Multiobjective Optmization).....	28
2.6.1	Βασικοί μαθηματικοί ορισμοί στην βελτιστοποίηση (Basic Mathematical Definitions in Optimization).	30
2.6.2	Διατύπωση και Μαθηματικός ορισμός προβλήματος πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης (Multi Objective Optimization Problem Formulation and Mathematical Definition).	35
2.6.3	Στόχος αλγορίθμων βελτιστοποίησης πολυκριτηριακών προβλημάτων (The goal of multiobjective optimization algorithms).....	37
2.7	Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms).....	38
2.7.1	Γενετικοί Αλγόριθμοι – Βασική Ιδέα	40
2.7.2	Η Δομή ενός Γενετικού Αλγορίθμου	43
2.7.3	Κύρια Χαρακτηριστικά Ενός Γενετικού Αλγορίθμου	48

2.7.4	<i>Βασικά στοιχεία ενός γενετικού αλγορίθμου</i>	50
2.8	Αναφορά στην Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση με Χρήση Γενετικών Αλγορίθμων (Reference to Multiobjective Optimization with Use of Genetic Algorithms).....	85
2.8.1	<i>Χαρακτηριστικά γενετικής αναζήτησης</i>	85
2.8.2	<i>Μηχανισμοί υπολογισμού τιμής απόδοσης κάθε ατόμου σε πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης (Fitness assignment mechanism in multiobjective optimization problems)</i>	86
2.8.3	<i>Διαμοιρασμός Απόδοσης και Ποικιλομορφία Πληθυσμού (Fitness Sharing and Population Diversity)</i>	92
2.9	Η Αρχή της Pareto Βέλτιστης Λύσης στην Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση με Χρήση Γενετικών Αλγορίθμων (The Concept of Pareto Solution in Genetic Multiobjective Optimization)	96
3	Περιγραφή Διαδικασίας Υλοποίησης Πολυκριτηριακής Βελτιστοποίησης Δεξαμενοπλοίων με Χρήση Γενετικών Αλγορίθμων σε Περιβάλλον Matlab (Genetic Multiobjective Optimization for Tankers using Matlab).	98
3.1	Εισαγωγή – Η ιδέα της παραμετροποίησης.....	99
3.1.1	<i>Παραμετροποίηση σχεδίασης πλοίου – Τι είναι ? (Parametric Ship Design Description)</i>	100
3.1.2	<i>Γενική Στρατηγική : Point – Based και Set – Based Σχεδίαση (Overall Strategy : Point – Based vs Set – Based Design)</i>	102
3.2	Διαδικασία Παραμετροποίησης και επεξήγηση υπορουτινών στην παρούσα εργασία. .	103
3.3	Κατάστρωση πολυκριτηριακού προβλήματος, περιγραφή της προς βελτιστοποίηση υπορουτίνας OPTIMIZER.m (Multiobjective Problem Setting, description of optimizing target subroutine OPTIMIZER.m)	167
3.4	Περιγραφή διαδικασίας παραγωγής αρχείου offsets για την δημιουργία του σχεδίου ναυπηγικών γραμμών της γάστρας – Η υπορουτίνα Hull_offsets.m (Offsets file generation description –Hull_offsets.m subroutine)	171
3.5	Αναφορά στις δευτερεύουσες αλλά απαραίτητες υπορουτίνες	183
3.6	Σύνοψη του συνόλου των υπορουτινών του προγράμματος MOGA_Optimization_Tankers	184
4	Τα αρχεία εισόδου, εξόδου και το γραφικό περιβάλλον του προγράμματος MOGA_Optimization_Tankers. (Input, Output files and Graphical User Interface of MOGA_Optimization_Tankers Program).	186
4.1	Το αρχείο εισόδου INPUT_DATA.xls	187
4.2	Το γραφικό περιβάλλον και ο τρόπος χρήσης του προγράμματος MOGA_Optimization_Tankers.	194

4.3 Τα διάφορα αρχεία εξόδου (Output files) που παράγει το πρόγραμμα MOGA_Optimization_Tankers.	242
5 Χρησιμότητα	251
6 Μελλοντικές Κατευθύνσεις – Επεκτάσεις	253
7 Επίλογος	255
8 Βιβλιογραφία.....	256
<u>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α</u>.....	258

1 ***Εισαγωγή***

1.1 Βελτιστοποίηση - Βασική Ιδέα

Με τον όρο «βελτιστοποίηση» εννοείται η πράξη της εύρεσης ή δημιουργίας του «καλύτερου δυνατού» αποτελέσματος ή λύσης (επίτευξη συγκεκριμένου στόχου) ενός προβλήματος, η οποία προκύπτει ως επακόλουθο συγκεκριμένων αποφάσεων-επιλογών, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Μπορεί να σημειωθεί ότι η επιθυμία για συνεχή συνειδητή βελτίωση του αποτελέσματος των διαφόρων επιλογών είναι μια μοναδική ιδιαιτερότητα της ανθρώπινης φύσης ή του ανθρώπινου χαρακτήρα.

Πολλοί υποστηρίζουν πως στην ίδια τη φύση, χλωρίδα και πανίδα υφίστανται ένα είδος βελτιστοποίησης μέσω γενετικών διαδικασιών. Αυτή η ιδέα προκύπτει ως μια ατυχή παρεξήγηση της Δαρβινιστικής θεωρίας : «Εξέλιξη των ειδών μέσω της φυσικής επιλογής». Έξαλλου ποιος μπορεί να ισχυριστεί ότι, η εξέλιξη μέσω της φυσικής επιλογής είναι ένα είδος «φυσικής βελτιστοποίησης» και ότι γνωρίζει πως αυτή έχει κάποιο συγκεκριμένο στόχο και ποιος είναι αυτός ; Επίσης ποιος μπορεί να εξηγήσει γιατί μορφές και οι συμπεριφορές που η φύση έχει αναπτύξει είναι πραγματικά «βέλτιστες» και ευνοούν μόνο την «επιβίωση των ισχυρότερων» ;

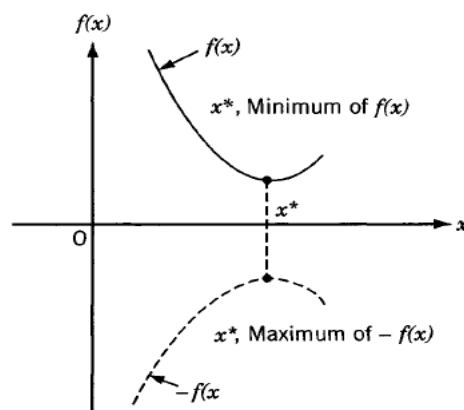
Παρόλα αυτά η επιθυμία και η ικανότητα των ανθρώπων να βελτιώνουν :

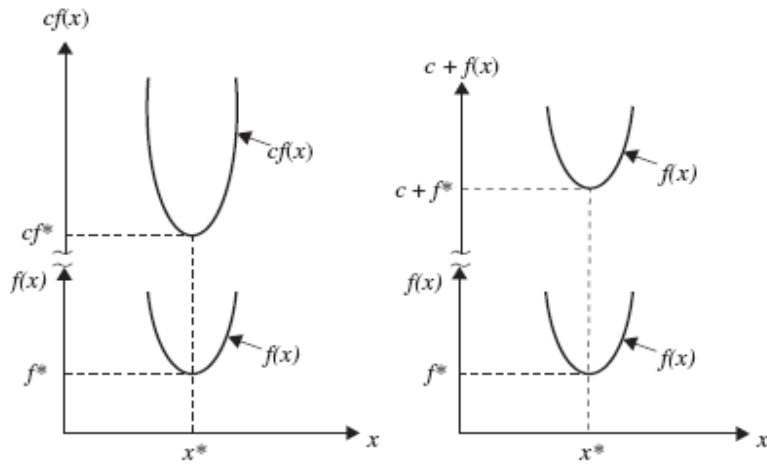
- τις αποφάσεις τους όσον αφορά επιλογές μέσω διαφόρων εναλλακτικών,
- τις μακροπρόθεσμες στρατηγικές όπως επίσης και
- τις μικρό-αποφάσεις της καθημερινότητας

είναι αδιαμφισβήτητη. Η βελτιστοποίηση επομένως είναι μια συνειδητή η όχι ανθρώπινη συμπεριφορά.

Στη σχεδίαση, την κατασκευή και τη συντήρηση οποιουδήποτε μηχανολογικού συστήματος, οι μηχανικοί καλούνται να πάρουν διάφορες τεχνολογικές και διαχειριστικές αποφάσεις σε διάφορα στάδια. Ο απώτερος στόχος όλων αυτών των αποφάσεων είναι ή η ελαχιστοποίηση της απαιτούμενης εργασίας ή η μεγιστοποίηση του επιθυμητού οφέλους. Επομένως εφόσον η απαιτούμενη εργασία ή το επιθυμητό όφελος σε κάθε πρακτικό πρόβλημα μπορούν να εκφραστούν ως μια συνάρτηση ορισμένων μεταβλητών απόφασης (αντικειμενική συνάρτηση), η βελτιστοποίηση μπορεί να οριστεί πλέον ως η διαδικασία της εύρεσης των συνθηκών εκείνων οι οποίες μεγιστοποιούν η ελαχιστοποιούν την συνάρτηση αυτή. Όπως φαίνεται και από το παρακάτω σχήμα, εάν ένα σημείο x^* αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή μιας συνάρτησης $f(x)$, το ίδιο σημείο επίσης, αντιστοιχεί στην μέγιστη τιμή της αντίθετης συνάρτησης $-f(x)$. Επιπροσθέτως, οι επόμενες πράξεις πάνω σε μια συνάρτηση δεν επηρεάζουν την βέλτιστη λύση x^*

1. Πολλαπλασιασμός (ή διαίρεση) της $f(x)$ με μια θετική σταθερά c .
2. Πρόσθεση (ή αφαίρεση) μιας θετικής σταθεράς c σε (ή από) την $f(x)$.





Επομένως, χωρίς βλάβη της γενικότητας, βελτιστοποίηση μπορεί να δεχτούμε ότι σημαίνει ελαχιστοποίηση, αφού η μέγιστη τιμή μιας συνάρτησης μπορεί να βρεθεί απλά αναζητώντας την ελάχιστη τιμή της αντίθετης της. Βέβαια, όπως κάθε ανθρώπινη δραστηριότητα, η βελτιστοποίηση είναι πιθανό να στεφθεί με επιτυχία ή αποτυχία. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται και όχι η βελτιστοποίηση σαν διαδικασία, είναι υπεύθυνη για την επιτυχία. Το πρόβλημα προς επίλυση (βέλτιστη λύση) πρέπει να είναι κατάλληλα και καλά ορισμένο έτσι ώστε μια ή περισσότερες λύσεις να είναι εφικτές. Γι' αυτό το σκοπό έχουν δημιουργηθεί διάφοροι μεθοδικοί κανόνες για την κρίση της ορθότητας της μαθηματικής κατάστρωσης ενός προβλήματος και την ύπαρξη ή μη λύσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει μια συγκεκριμένη μέθοδος για την αποτελεσματική επίλυση όλων των προβλημάτων βελτιστοποίησης, αλλά διάφορες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για την επίλυση διαφορετικών τύπων προβλημάτων βελτιστοποίησης.

1.2 Μέθοδοι Βελτιστοποίησης – Σύντομη αναφορά στην ιστορική εξέλιξη.

Η ύπαρξη διαφόρων μεθόδων βελτιστοποίησης μπορεί να «ανιχνευτεί» πίσω στα χρόνια του Newton, του Lagrange και του Cauchy. Η ανάπτυξη μεθόδων διαφορικής ανάλυσης για βελτιστοποίηση έγινε εφικτή λόγω της συνεισφοράς του Newton και του Leibnitz στη μαθηματική ανάλυση. Η θεμελίωση του «λογισμού των μεταβολών», ο οποίος ασχολείται με την ελαχιστοποίηση των ολοκληρωμάτων, έγινε από τους Bernoulli, Euler, Lagrange και Weirstrass. Η μέθοδος βελτιστοποίησης για προβλήματα με περιορισμούς, η οποία περιλαμβάνει την

πρόσθεση αγνώστων πολλαπλασιαστών, έγινε γνωστή με το όνομα του δημιουργού της, Lagrange. Ο Cauchy εφήρμοσε πρώτος την μέθοδο «Steepest Descent» για την επίλυση προβλημάτων ελαχιστοποίησης χωρίς περιορισμούς. Παρ' όλες αυτές τις αρχικές συνεισφορές, πολύ μικρή πρόοδος είχε γίνει μέχρι τα μέσα του 20^{ου} αιώνα, όταν πλέον ηλεκτρονικοί υπολογιστές, με πολύ υψηλές υπολογιστικές δυνατότητες όσον αφορά τον όγκο των δεδομένων που μπορούσαν να διαχειριστούν και την ταχύτητα εκτέλεσης υπολογισμών, έκαναν την εμφάνισή τους, και έπαιξαν σημαντικότατο ρόλο στην αποτελεσματική υλοποίηση των μεθόδων βελτιστοποίησης δίνοντας έτσι το έναυσμα για περαιτέρω έρευνα πάνω στην δημιουργία νέων μεθόδων βελτιστοποίησης. Αυτή η πρόοδος οδήγησε επίσης στην εμφάνιση διαφόρων νέων, καλά ορισμένων, κλάδων της θεωρίας βελτιστοποίησης.

Εδώ έχει ενδιαφέρον να σημειωθεί πως οι σπουδαιότερες εξελίξεις στον τομέα των αριθμητικών μεθόδων για βελτιστοποίηση χωρίς περιορισμούς έλαβαν χώρα στο Ηνωμένο Βασίλειο μόλις στις αρχές της δεκαετίας του 1960. Η ανάπτυξη της μεθόδου «Simplex» για προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού από τον Dantzig το 1947 και η αναγγελία της αρχής του «βέλτιστου» το 1957 από τον Bellman για προβλήματα δυναμικού προγραμματισμού προετοίμασαν το δρόμο της ανάπτυξης των μεθόδων βελτιστοποίησης για προβλήματα με περιορισμούς. Οι εργασίες των Kuhn και Tucker το 1951 πάνω στις ικανές και αναγκαίες συνθήκες για την ύπαρξη βέλτιστης λύσης σε προβλήματα προγραμματισμού, έθεσαν τα θεμέλια για μια θεαματικά μεγάλη μεταγενέστερη έρευνα σε θέματα μη-γραμμικού προγραμματισμού. Αξίζει επίσης να σημειωθεί και η σπουδαιότητα της συμβολής των Zoutendijk και Rosen στον κλάδο αυτό κατά τα πρώτα χρόνια της δεκαετίας του 1960. Παρά το γεγονός ότι δεν είχε έως τότε δημιουργηθεί καμία συγκεκριμένη μέθοδος καθολικά εφαρμόσιμη για την αντιμετώπιση μη γραμμικών προβλημάτων προγραμματισμού, η εργασία των Carroll, Fiacco και McCormick επέτρεψαν την επιτυχή λύση πολλών προβλημάτων κάνοντας χρήση των πολύ γνωστών πλέον τεχνικών βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς. Ο γεωμετρικός προγραμματισμός αναπτύχθηκε επίσης την δεκαετία του 1960 από τους Duffin, Zener και Peterson. Ο Gomory έκανε πρωτοποριακή δουλειά στον τομέα του ακέραιου προγραμματισμού, έναν από τους πιο εντυπωσιακούς και εξελισσόμενους τομείς της βελτιστοποίησης, δεδομένου ότι τα περισσότερα ρεαλιστικά προβλήματα εκπίπτουν σε αυτή την κατηγορία προβλημάτων. Οι Dantzig, Charnes και Cooper δημιούργησαν τεχνικές στοχαστικού προγραμματισμού και έλυσαν προβλήματα μέσω της υπόθεσης ότι οι διάφορες παράμετροι σχεδίασης είναι ανεξάρτητες και κανονικά κατανοημένες.

Η επιθυμία όμως για βελτιστοποίηση περισσότερων από μια αντικειμενικών συναρτήσεων ή στόχων με ταυτόχρονη ικανοποίηση φυσικών περιορισμών οδήγησε στην ανάπτυξη μεθόδων προγραμματισμού πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Η τεχνική « προγραμματισμού επίτευξης στόχου» (Goal programming technique) είναι μια από τις γνωστότερες μεθόδους για την επίλυση συγκεκριμένων προβλημάτων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Η μέθοδος αυτή είχε αρχικά προταθεί για γραμμικά προβλήματα από τους Charnes και Cooper το 1961. Τα θεμέλια της «θεωρίας των παιγνίων» (game theory) τέθηκαν από τον von Neumann το 1928 και από τότε η τεχνική αυτή έχει εφαρμοστεί στην επίλυση διαφόρων μαθηματικά μοντελοποιημένων οικονομικών και στρατιωτικών προβλημάτων. Μόνο τα τελευταία πρόσφατα χρόνια έγινε εφαρμογή της θεωρίας των παιγνίων στην επίλυση προβλημάτων σχεδίασης διαφόρων κλάδων του τομέα των μηχανικών.

Νέες μοντέρνες μέθοδοι βελτιστοποίησης. Οι μοντέρνες μέθοδοι βελτιστοποίησης, οι οποίες ορισμένες φορές καλούνται και μη κλασσικές μέθοδοι βελτιστοποίησης, έχουν κάνει την εμφάνισή τους σαν ισχυρές και πολύ δημοφιλείς για την επίλυση διαφόρων πολύπλοκων προβλημάτων βελτιστοποίησης του τομέα των μηχανικών τα τελευταία χρόνια. Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν τους γενετικούς αλγορίθμους (genetic algorithms), την προσομοιωμένη απόπτηση (simulated annealing), τη βελτιστοποίηση μοριακών σμηνών (particle swarm optimization), τη βελτιστοποίηση με αποικίες μυρμηγκιών (ant colony optimization), τα νευρωνικά δίκτυα (neural network-based optimization), και την βελτιστοποίηση υπό συνθήκες ασάφειας (fuzzy optimization). Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι αλγόριθμοι αναζήτησης και βελτιστοποίησης χρησιμοποιούμενοι σε υπολογιστές και βασίζονται στην μηχανική της εξέλιξης μέσω φυσικής επιλογής (θεωρία του Δαρβίνου) και στην γενετική. Αρχικά είχαν υποδειχτεί και προταθεί από τον John Holland το 1975. Η «προσημειωμένη απόπτηση» είναι ένα μοντέλο ανάλογο της φυσικής διαδικασίας της σκλήρυνσης των μετάλλων μέσω της απότομης ψύξης τους (βαφή) από την ρευστή υπερθερμασμένη κατάσταση. Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε αρχικά από τους Kirkpatrick, Gelatt, και Vecchi. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης μοριακών σμηνών μιμείται την κοινωνική συμπεριφορά διαφόρων οργανισμών όπως μια αποικία ή ένα σμήνος εντόμων (για παράδειγμα, μυρμηγκία, τερμίτες, μέλισσες, και σφήκες), ένα κοπάδι πτηνών ή ψαριών. Ο αλγόριθμος είχε αρχικά προταθεί από τους Kennedy και Eberhart το 1995. Η βελτιστοποίηση αποικίας μυρμηγκιών βασίζεται στην συνεργατική συμπεριφορά που επιδεικνύουν αυτές οι αποικίες, μέσω της οποίας

καθιστούν δυνατό να βρουν τον συντομότερο δρόμο μεταξύ της φωλιάς τους και μιας πηγής τροφής. Η μέθοδος αναπτύχθηκε αρχικά από τον Marco Dorigo το 1992.

Οι μέθοδοι των νευρωνικών δικτύων είναι βασισμένες στην αποτελεσματική χρήση των μεγάλων δυνατοτήτων των υπολογιστών (όσον αφορά την διαχείριση μεγάλου όγκου πληροφοριών και την μεγάλη ταχύτητα υπολογισμών) μέσω των δικτυακώς αλληλοσυνδεδεμένων «νευρώνων» ή μικροεπεξεργαστών ενός τεχνητού «νευρικού συστήματος». Χρησιμοποιούνται για την επίλυση προβλημάτων αντίληψης, διαίσθησης και πρόβλεψης μελλοντικών εξελίξεων μέσω της ικανότητας της παρουσίας και διαχείρισης τεραστίων ποσοτήτων δεδομένων κάνοντας και χρήση των δυνατοτήτων του παράλληλου προγραμματισμού (παράλληλη επεξεργασία δεδομένων από την χρησιμοποίηση ενός συγκεκριμένου αριθμού επεξεργαστών σε υπολογιστές). Η μέθοδος είχε αρχικά προταθεί και χρησιμοποιηθεί από τους Hopfield και Tank το 1985. Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης υπό συνθήκες ασάφειας δημιουργήθηκαν για την επίλυση προβλημάτων που σχετίζονται με σχεδίαση συστημάτων, μοντελοποιώντας μέσω αντικειμενικών συναρτήσεων, και περιορισμών οι οποίοι δηλώνονται υπό ασαφή-ανακριβή μορφή και περιλαμβάνουν ακαθόριστες και γλωσσολογικές περιγραφές. Οι προσεγγίσεις βελτιστοποίησης υπό ασάφεια για μονοκριτηριακή και πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση στη σχεδίαση συστημάτων του κλάδου των μηχανικών και όχι μόνο παρουσιάστηκαν πρώτα από τον Rao το 1986.

1.3 Η βελτιστοποίηση στη μελέτη και σχεδίαση πλοίου –

Στόχοι εργασίας.

Η Μελέτη Πλοίου είναι αδιαμφισβήτητα μια πολύπλοκη και επίπονη διαδικασία κατά τη διάρκεια της οποίας οι βασικές δυσκολίες προέρχονται από την περιπλοκή διαφόρων τεχνικοοικονομικών απαιτήσεων, οι οποίες κατά μέρος αλληλοσυγκρούονται, και από τις δαιδαλώδεις απαιτήσεις της πληθώρας των ισχυόντων κανονισμών ασφαλείας. Επίσης, η ιδιαιτερότητα πλεύσης ενός πλοίου στην επιφάνεια της θάλασσας, που από πλευράς φυσικής μπορεί να εκφραστεί σαν μια ακανόνιστη διαχωριστική επιφάνεια δυο ρευστών με μεγάλη διαφορά πυκνότητας, δηλαδή του αέρα και του θαλάσσιου νερού, και ορίζει την μορφή των θαλασσιών κυμάτων, έχει σαν αποτέλεσμα τη χρονικά μεταβαλλόμενη (δυναμική) φόρτιση της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου, την κίνηση του σκάφους στο χώρο

σε έξι βαθμούς ελευθερίας, την πολύπλοκη ροή του νερού περί την γάστρα του πλοίου και πολλά άλλα φαινόμενα της υδροδυναμικής και δυναμικής αντοχής μεταλλικών κατασκευών με μοναδικότητα παρουσίας σαν προβλήματα της σύγχρονης επιστήμης και τεχνολογίας. Η αντιμετώπιση των δυσκολιών αυτών και η επίλυση των επιμέρους προβλημάτων απαιτεί προφανώς συλλογική προσπάθεια πολλών μελετητών, και μηχανικών διαφόρων ειδικοτήτων, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για νέες κατασκευές και εφόσον λείπουν εμπειρικά στοιχεία ομοίων πλοίων.

Η Μελέτη Πλοίου μπορεί να διαχωριστεί σε τέσσερις βασικές φάσεις :

- 1) Μελέτη Εφικτότητας ή Αρχικού Σχεδιασμού (Concept Design – Feasibility Study)
- 2) Προμελέτη (Preliminary Design)
- 3) Συμβατική Μελέτη ή Μελέτη Προδιαγραφών Συμβολαίου (Contract Design)
- 4) Μελέτη Λεπτομερούς Σχεδιασμού (Detailed design)

Οι δυο πρώτες φάσεις της μελέτης ενός πλοίου είναι γνωστές και σαν Βασική Μελέτη (Basic Design) αλλά συχνά συγχωνεύονται στο γενικότερο ορισμό της Προμελέτης Πλοίου (Preliminary Design).

Η Προμελέτη Πλοίου είναι το στάδιο εκείνο της διαδικασίας της μελέτης κατά το οποίο, με βάση τις απαιτήσεις του ενδιαφερομένου πλοιοκτήτη ή τις προδιαγραφές της αποστολής του πλοίου (owner's or mission requirements), διερευνώνται και καθορίζονται κατά τον βέλτιστο δυνατό τρόπο τα κύρια τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά του πλοίου και ιδιαίτερα αυτά που επηρεάζουν αποφασιστικά το κόστος ναυπήγησης (και επομένως και το κόστος απόκτησης ή κτήσης), καθώς και το κόστος οικονομικής εκμετάλλευσης (ή λειτουργίας) του υπό μελέτη πλοίου. Γενικότερα επομένως μπορεί να ειπωθεί πως η προμελέτη πλοίου είναι μια τεχνικό-οικονομική πραγματεία – μελέτη του υποσυστήματος / αντικείμενου «πλοίο» σαν κερδοφόρο στοιχείο του ευρύτερου συστήματος των θαλασσιών μεταφορών και της παροχής υπηρεσιών και ειδικότερα σαν προϊόν της ναυπηγικής βιομηχανίας. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τις πρόσφατες εξελίξεις της τεχνολογίας, τους φυσικούς και τεχνικούς περιορισμούς, τις οικονομοτεχνικές προδιαγραφές του πλοιοκτήτη, καθώς και τους διεθνείς κανονισμούς και συμβάσεις περί κατασκευής, ασφάλειας και λειτουργίας, επιχειρείται στην προμελέτη του πλοίου, ο συγκερασμός των διαφόρων

απαιτήσεων και η εξεύρεση της πλέον οικονομικής σχεδιαστικής λύσης για την αποδοτική εκμετάλλευση του διατιθέμενου κεφαλαίου.

Με βάση τα παραπάνω μπορεί εύκολα να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η προμελέτη ενός πλοίου μπορεί να θεωρηθεί ως ένα πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Στην παρούσα εργασία λοιπόν θα ασχοληθούμε με ένα τέτοιο πρόβλημα, το οποίο αφορά την προκαταρκτική μελέτη πλοίων μεταφοράς πετρελαίου και παραγώγων του (oil tankers) και στόχος θα είναι η εύρεση ενός συνόλου βέλτιστων συνδυασμών, κύριων διαστάσεων, σχήματος γάστρας, χαρακτηριστικών προωστήριου εγκατάστασης, βασικών χαρακτηριστικών της/των προπέλας/ων και διαφόρων άλλων λοιπών μεγεθών, που θα εξυπηρετούν τις απαιτήσεις ενός ενδιαφερομένου πλοιοκτήτη. Οι τελευταίες προδιαγράφουν, την επιλογή μεταξύ ενός συγκεκριμένου τύπου κατηγορίας μεγέθους με βάση την μεταφορική ικανότητα (DWT) ή την απαίτηση συγκεκριμένης μεταφορικής ικανότητας, την απαίτηση συγκεκριμένης υπηρεσιακής ταχύτητας και την απαίτηση συγκεκριμένου εύρους υπηρεσίας ναυτικών μιλίων (cruising range) για το υπό μελέτη σκάφος.

Οι απαιτήσεις αυτές ουσιαστικά προκειμένου να διατυπωθούν πρέπει να αποτελούν αποτέλεσμα ενός γενικότερου προβλήματος που θα λαμβάνει υπόψη τις συνθήκες της αγοράς και τη δυναμικότητα του ενδιαφερόμενου πλοιοκτήτη από πλευράς προσφοράς διαθέσιμων πλοίων.

Το παρόν πρόβλημα, δηλαδή η βελτιστοποίηση των κυρίων διαστάσεων και των λοιπών μεγεθών για δεδομένες απαιτήσεις πλοιοκτήτη από την πλευρά ενός ναυπηγείου αντιστοιχεί στο πρόβλημα διατύπωσης μιας «προσφοράς» προς τον πλοιοκτήτη και έχει σαν φυσικό στόχο, στα πλαίσια της ελεύθερης αγοράς, την «ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής» ή το «ελάχιστο κόστος κτήσης» για τον πλοιοκτήτη. Από την πλευρά του πλοιοκτήτη όμως πέραν του προαναφερθέντος συνυπολογισμού του ολικού εκμεταλλεύσιμου δυναμικού σε διαθέσιμα πλοία, το πρόβλημα είναι πλέον σύνθετο. Το ερώτημα για τις κατάλληλες διαστάσεις και λοιπά μεγέθη έστω για δεδομένη μεταφορική ικανότητα, είναι συνυφασμένο με το «λειτουργικό κόστος» του πλοίου (πχ. δαπάνες πληρώματος, συντήρηση, τοκοχρεολύσια, κατανάλωση καύσιμου κτλ) έτσι η σχεδίαση πρέπει να γίνει για τη βέλτιστη οικονομική απόδοση συνυπολογίζοντας και τη διάρκεια της οικονομικής ζωής του πλοίου (χρόνος απόσβεσης επένδυσης).

1.4 Οργάνωση κειμένου

Στο παρόν κείμενο σκοπός είναι η παρουσίαση ενός προγράμματος πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης μελέτης δεξαμενοπλοίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής μου εργασίας στον τομέα *Μελέτης και Σχεδίασης Πλοίου* του τμήματος *Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών* του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου καθώς και η παρουσίαση του θεωρητικού υποβάθρου πίσω από αυτό.

Στο πρώτο κεφάλαιο λοιπόν έγινε μια εισαγωγή με βάση την σημασία του όρου βελτιστοποίηση και δόθηκε εν συντομία η ιστορική της εξέλιξη.

Στο δεύτερο κεφάλαιο θα παρουσιαστεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια το θεωρητικό υπόβαθρο αρχικά της βελτιστοποίησης σε γενικότερο επίπεδο, κάνοντας αναφορά στις δύο μεγάλες κατηγορίες αυτής (μονοκριτηριακή, πολυκριτηριακή) και στη συνέχεια θα παρουσιαστεί μια σχετικά νέα τεχνική υλοποίησης πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης (η οποία χρησιμοποιήθηκε στην εργασία αυτή), αυτή της χρήσης Γενετικών Αλγορίθμων (Genetic Algorithms).

Στο τρίτο κεφάλαιο θα γίνει μια περιγραφή του τρόπου κατάστρωσης του προβλήματος και της μεθοδολογίας η οποία «μεταφράστηκε» σε υπορουτίνες (τμήματα κώδικα σε γλώσσα προγραμματισμού) έτσι ώστε αυτό να καταστεί κατάλληλο για επίλυση μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Στο τέταρτο κεφάλαιο θα δοθεί μια περιγραφή του τρόπου χρήσης του αναπτυχθέντος προγράμματος που θα αφορά τον χειρισμό των αρχείων εισόδου μέσω των οποίων γίνεται η εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων στο πρόγραμμα, εξόδου μέσω των οποίων γίνεται η εξαγωγή των προκίπτοντων αποτελεσμάτων και του γραφικού περιβάλλοντος μέσω του οποίου γίνεται ο γενικός χειρισμός με διαδραστικό τρόπο.

Στα κεφάλαια πέντε, έξι και επτά θα γίνει μια σύνοψη και αναφορά στην χρησιμότητα και σε μερικές από τις πιθανές μελλοντικές κατευθύνσεις – επεκτάσεις του αναπτυχθέντος προγράμματος.

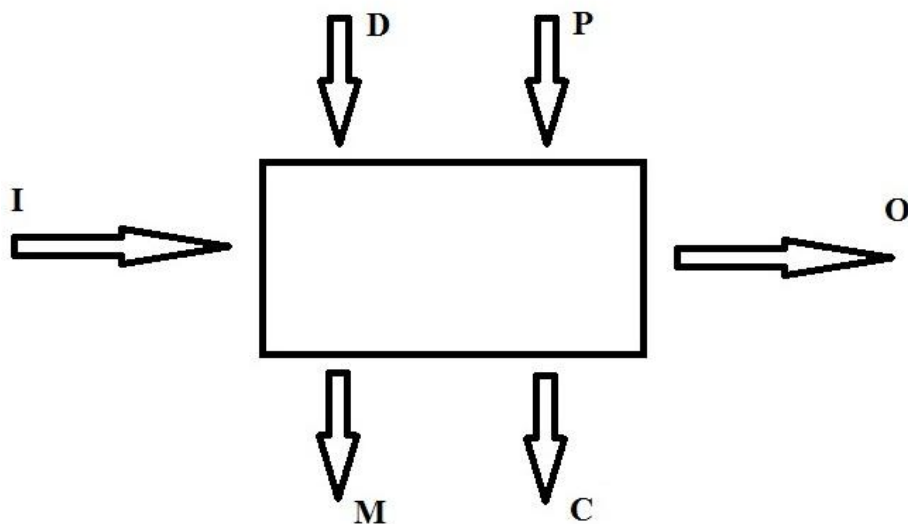
Στο κεφάλαιο οκτώ θα παρατεθεί η χρησιμοποιούμενη βιβλιογραφία και τέλος στο Παράρτημα Α θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης κατηγορίας δεξαμενοπλοίων Aframax καθώς και ενός δεξαμενοπλοίου 115000 DWT.

2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Βασικές αρχές βελτιστοποίησης

Η μαθηματική βελτιστοποίηση αναφέρεται στην βέλτιστη λύση μεταξύ μιας σειράς εναλλακτικών λύσεων με βάση ένα κριτήριο αξιολόγησης. Σε ορισμένες περιπτώσεις η ύπαρξη περισσότερων της μιας βέλτιστων λύσεων είναι δυνατή.

Τα βασικά στοιχεία ενός προβλήματος βελτιστοποίησης ορίζονται τα εξής :



D: Μεταβλητές απόφασης ή Μελέτης (Decision or Design Variables)

P: Παράμετροι (Parameters)

C : Περιορισμοί (Constraints)

M : Μέτρο αξιολόγησης – Αντικειμενική συνάρτηση (Measure of Merit – Objective Function)

I : Είσοδος (Input)

O : Έξοδος (Output)

Τα στοιχεία αυτά χαρακτηρίζονται από ορισμένες ιδιότητες και μπορεί ανάλογα να προσδιορίζουν και ενδεδωμένη μέθοδο βελτιστοποίησης :

Μεταβλητές απόφασης

- Μια ή πολλές μεταβλητές μελέτης (Univariate vs. Multivariate case)
- Διακριτές ή Συνεχείς μεταβλητές μελέτης (Discrete vs. Continuous design variables)
- Παραμετρική ή Συναρτησιακή βελτιστοποίηση (Parameter vs. Function optimization)
- Ανεξάρτητες ή εξαρτημένες μεταβλητές μελέτης (Independent vs. Dependent design variables)

Παράμετροι

- Προσδιοριστικά ή στοχαστικά ή προσαρμόσιμα μοντέλα (Deterministic vs. stochastic vs. Adaptive models)
- Μη ανταγωνιστικά ή ανταγωνιστικά μοντέλα (Non-competitive single decision making vs. competitive models)

Μέτρο αξιολόγησης

- Μονοτροπικές ή πολυτροπικές συναρτήσεις (Unimodal vs. Multimodal functions)
- Μονοφασικά ή πολυφασικά συστήματα (Single-stage vs. Multi-stage Systems)
- Σειριακά ή μη σειριακά συστήματα (Serial vs. Nonserial systems)
- Συστήματα απλών ή πολλαπλών αποστολών (Single-mission vs multi-mission systems)

Περιορισμοί

- Προβλήματα βελτιστοποίησης μπορεί να τίθενται με ή χωρίς περιορισμούς. Οι περιορισμοί μπορεί να είναι ισοτικοί ή ανισοτικοί, γραμμικοί ή μη γραμμικοί.

Τύπος συναρτήσεων

- Γραμμικές ή μη γραμμικές συναρτήσεις (linear vs. Nonlinear functions)

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης εφόσον παραληφτεί η επίδραση των παραμέτρων P , ορίζεται ως εξής :

Ζητείται το σύνολο των μεταβλητών απόφασης D , το οποίο θα βελτιστοποιεί (μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση) το μέτρο της αντικειμενικής συνάρτησης $M(D)$ υπό τους εξής ισοτικούς και ανισοτικούς περιορισμούς :

$h_i(D) = 0$, $i= 1,2, \dots , I$ ισοτικοί περιορισμοί

$g_k(D) \leq 0$, $k= 1,2, \dots , K$ ανισοτικοί περιορισμοί

2.2 Κλασική – Μονοκριτηριακή Βελτιστοποίηση (Single Objective Optimization)

Με τον όρο **βελτιστοποίηση** αναφερόμαστε στην αναζήτηση βέλτιστων παραμέτρων ενός - συνήθως περίπλοκου - συστήματος. Προβλήματα βελτιστοποίησης απαντώνται σε πολλά επιστημονικά πεδία όπως π.χ. στη φυσική, στη χημεία, στην οικονομία κ.α. Στα μαθηματικά διατυπώνεται ένα πρόβλημα **μονοκριτηριακής** βελτιστοποίησης σαν πρόβλημα ελαχιστοποίησης ή μεγιστοποίησης μιας συνάρτησης μίας μεταβλητής ή πολλών μεταβλητών. Ενώ στην ελαχιστοποίηση (ή μεγιστοποίηση) συναρτήσεων μίας μεταβλητής μπορούν να χρησιμοποιηθούν αναλυτικές και αλγεβρικές μέθοδοι για τον ακριβή ορισμό ελάχιστων (ή μέγιστων), στη μελέτη συναρτήσεων πολλών μεταβλητών χρησιμοποιούνται κυρίως αριθμητικές μέθοδοι για έναν προσεγγιστικό ορισμό ελάχιστων (ή μέγιστων) σημείων.

2.2.1 Ορισμός προβλήματος μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης

Ένα πρόβλημα μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης (ή πρόβλημα μαθηματικού προγραμματισμού) μπορεί να οριστεί ως εξής :

$$\text{Εύρεση } X = \left\{ \begin{array}{c} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{array} \right\} \text{ το οποίο ελαχιστοποιεί την } f(X),$$

και υπόκεινται στους περιορισμούς :

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

Όπου :

- X είναι ένα n -διάστατο διάνυσμα το οποίο ονομάζουμε *διάνυσμα σχεδίασης* (*design vector*),
- $f(X)$ είναι η αντικειμενική συνάρτηση ή συνάρτηση στόχος (objective function)
- $g_j(X)$ είναι οι ανισοτικοί περιορισμοί (inequality constraints)
- $l_j(X)$ είναι οι ισοτικοί περιορισμοί (equality constraints).

Ο αριθμός των μεταβλητών n και ο αριθμός των περιορισμών m και/ή p δεν χρειάζεται να σχετίζονται με οποιονδήποτε τρόπο. Το πρόβλημα που περιγράφεται μέσω της παραπάνω εξίσωσης (1) ονομάζεται πρόβλημα μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης με περιορισμούς.

Ορισμένα προβλήματα βελτιστοποίησης δεν εμπεριέχουν καθόλου περιορισμούς και μπορούν να οριστούν ως εξής :

$$\text{Εύρεση } X = \left\{ \begin{array}{c} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{array} \right\} \text{ το οποίο ελαχιστοποιεί την } f(X),$$

Τέτοιου είδους προβλήματα ονομάζονται προβλήματα μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς.

2.2.2 Διάνυσμα Σχεδίασης (Design Vector)

Κάθε μηχανικό – μηχανολογικό σύστημα ή εξάρτημα μπορεί να οριστεί ως ένα σύνολο ποσοτήτων μερικές από αυτές αντιμετωπίζονται ως μεταβλητές κατά τη διάρκεια της σχεδίασης. Γενικά, ορισμένες ποσότητες είναι συνήθως σταθερές κατά τη σχεδίαση και ονομάζονται *σταθερές παράμετροι (preassigned parameters)*. Όλες οι υπόλοιπες ποσότητες αντιμετωπίζονται ως μεταβλητές κατά τη σχεδίαση και ονομάζονται *μεταβλητές σχεδίασης ή απόφασης (design or decision variables)*, x_i , $i = 1, 2, \dots, n$. Οι μεταβλητές σχεδίασης αναπαρίστανται συλλογικά σαν ένα διάνυσμα σχεδίασης,

$$X = \left\{ \begin{array}{c} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{array} \right\}$$

Σαν παράδειγμα, μπορούμε να θεωρήσουμε τη σχεδίαση ενός ζευγαριού οδοντωτών τροχών το οποίο φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Αυτό χαρακτηρίζεται από :

- Το πλάτος κάθε «δοντιού»
- Τον αριθμό των «δοντιών» T_1 και T_2
- Την απόσταση των διαμήκων αξόνων d
- Την γωνία πίεσης ψ

- Το προφίλ των «δοντιών»
- Το υλικό κατασκευής

Εάν τώρα η απόσταση των διαμήκων αξόνων d , η γωνία πίεσης ψ , το προφίλ των δοντιών, και το υλικό κατασκευής θεωρηθούν *a priori* γνωστά και σταθερά, τότε αυτές οι ποσότητες μπορούν να ονομαστούν σταθερές παράμετροι (*preassigned parameters*). Οι υπολειπόμενες ποσότητες μπορούν συνολικά να αναπαρασταθούν από ένα διάνυσμα σχεδίασης

$$X = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} b \\ T_1 \\ T_2 \end{Bmatrix}$$

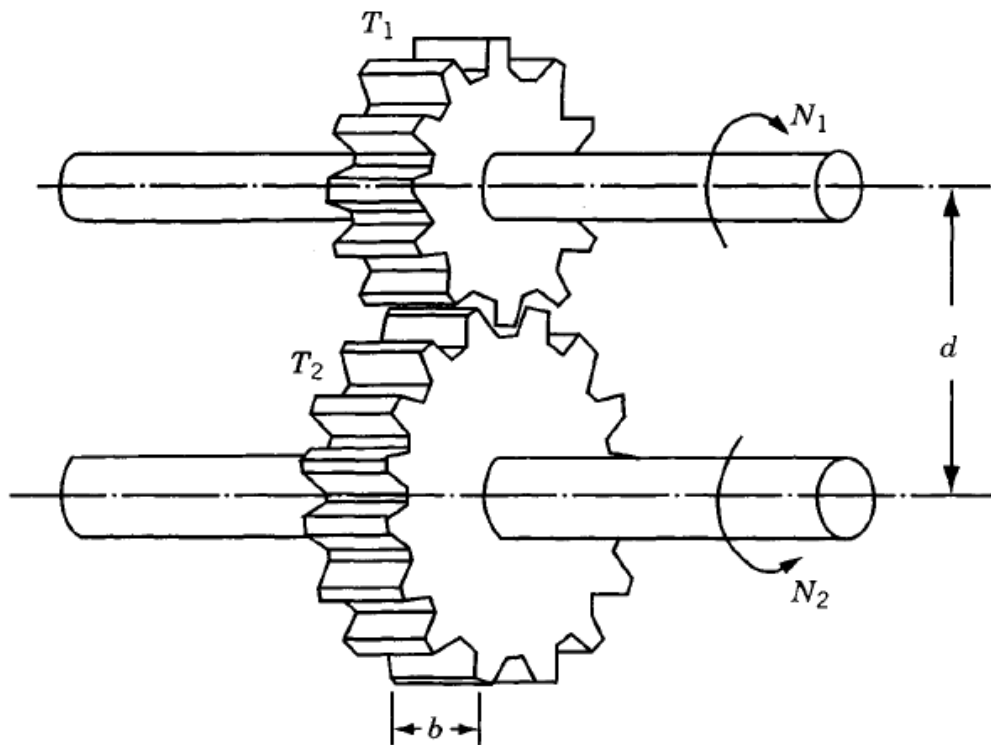
Εάν δεν υπάρχουν περιορισμοί στην εκλογή των b, T_1, T_2 , τότε οποιοδήποτε σύνολο τριών αριθμών (οι οποίοι αναπαριστούν τιμές για τα b, T_1, T_2), θεωρείται μια σχεδίαση ή *design* για το ζευγάρι των οδοντωτών τροχών.

Αν θεωρηθεί ένας n -διάστατος καρτεσιανός χώρος με κάθε άξονα να αναπαριστά μια μεταβλητή σχεδίασης x_i ($i = 1, 2, \dots, n$), τότε ο χώρος αυτός καλείται χώρος μεταβλητών σχεδίασης ή απλά χώρος σχεδίασης. Κάθε σημείο στον n -διάστατο χώρο σχεδίασης ονομάζεται σημείο σχεδίασης και αναπαριστά, είτε μια *εφικτή* (*possible solution or feasible solution*) είτε μια *ανέφικτη* (*impossible solution or infeasible solution*) λύση του εκάστοτε προβλήματος. Στην περίπτωση της σχεδίασης των

οδοντωτών τροχών το σημείο σχεδίασης $\begin{Bmatrix} 1.0 \\ 20 \\ 40 \end{Bmatrix}$ για παράδειγμα, αναπαριστά μια

εφικτή λύση, ενώ το σημείο σχεδίασης $\begin{Bmatrix} 1.0 \\ -20 \\ 40.5 \end{Bmatrix}$ αναπαριστά μια μη εφικτή λύση,

εφόσον δεν είναι δυνατή η ύπαρξη αρνητικής ή δεκαδικής τιμής για τον αριθμό των «δοντιών».



2.2.3 Περιορισμοί Σχεδίασης (Design Constraints)

Σε πολλά πρακτικά προβλήματα, οι μεταβλητές σχεδίασης δεν μπορούν να εκλεγούν με αυθαίρετο τρόπο, αλλά πρέπει να ικανοποιούν συγκεκριμένες λειτουργικές και άλλες απαιτήσεις. Το σύνολο των περιορισμών που πρέπει να ικανοποιούνται για την δημιουργία ενός αποδεκτού και ρεαλιστικού μοντέλου (δηλαδή μαθηματική αναπαράσταση ενός δεδομένου προβλήματος) καλείται *περιορισμοί σχεδίασης (design constraints)*. Περιορισμοί που αναπαριστούν οριακές συνθήκες στην λειτουργία ή την απόδοση ενός συστήματος καλούνται *λειτουργικοί ή περιορισμοί απόδοσης (behavior or functional constraints)*. Περιορισμοί που αναπαριστούν φυσικές οριακές συνθήκες ενός συστήματος όπως διαθεσιμότητα, κατασκευαστική δυνατότητα, μεταφερσιμότητα κτλ είναι γνωστοί ως *γεωμετρικοί περιορισμοί ή οριακοί περιορισμοί (geometric or side constraints)*. Για παράδειγμα για τους οδοντωτούς τροχούς του προηγούμενου σχήματος, το πλάτος κάθε «δοντιού» δεν μπορεί να γίνει μικρότερο από μια συγκεκριμένη τιμή, λόγω περιορισμών αντοχής. Παρομοίως, ο λόγος του αριθμού των δοντιών του τροχού 1 προς τον αριθμό των δοντιών του τροχού 2, T_1/T_2 , καθορίζεται από την ταχύτητα περιστροφής (N_1) του άξονα που θέτει σε κίνηση τον μηχανισμό (εδώ ο T_1) και την απαιτούμενη ταχύτητα

περιστροφής (N_2) του άξονα που θα κινεί ο μηχανισμός (εδώ ο T_2). Αφού αυτοί οι περιορισμοί εξαρτώνται από την απόδοση του συστήματος των οδοντωτών τροχών, καλούνται περιορισμοί απόδοσης (behavior or functional constraints). Επίσης η τιμή των T_1 και T_2 δεν μπορεί να είναι οποιοσδήποτε πραγματικός αριθμός αλλά πρέπει να είναι θετικός και ακέραιος. Ακόμη άνω και κάτω όρια στις τιμές των T_1 και T_2 είναι πολύ πιθανό να υπάρχουν λόγω κατασκευαστικών περιορισμών και περιορισμών μηχανικής αντοχής. Επομένως λοιπόν αυτοί οι περιορισμοί εξαρτώνται από φυσικές οριακές συνθήκες, καλούνται *γεωμετρικοί ή οριακοί περιορισμοί* (geometric or side constraints).

2.2.4 Επιφάνειες περιορισμών (*Constraint Surfaces*)

Ας θεωρήσουμε, για λόγους εύκολης αναπαράστασης, ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης το οποίο θα διέπεται μόνο από ανισοτικούς περιορισμούς $g_j(X) \leq 0$. Το σύνολο των τιμών του X οι οποίες ικανοποιούν την εξίσωση $g_j(X) = 0$ συνθέτουν μια *υπερεπιφάνεια* (hypersurface) στον χώρο σχεδίασης η οποία καλείται *επιφάνεια περιορισμών* (constraint surface). Ας, σημειωθεί ότι αυτή είναι ένας $(n-1)$ -διάστατος υπόχωρος (subspace), όπου n είναι ο αριθμός των μεταβλητών. Η επιφάνεια των περιορισμών διαιρεί τον χώρο σχεδίασης σε δυο πεδία-περιοχές : ένα στο οποίο ισχύει $g_j(X) < 0$ (αποδεκτή ή feasible περιοχή) και έναν στον οποίο ισχύει $g_j(X) > 0$ (μη αποδεκτή ή infeasible περιοχή). Επομένως ισχύει ότι:

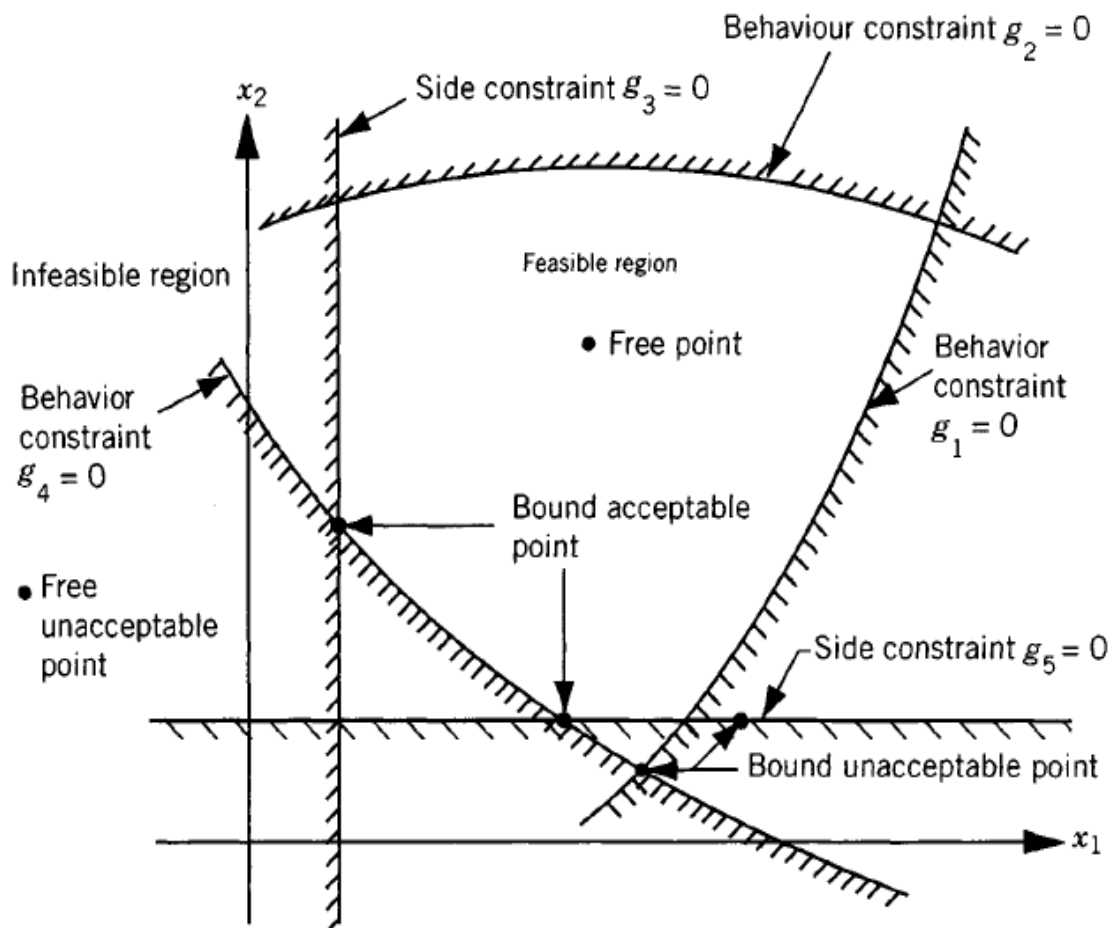
- τα σημεία τα οποία κείνται πάνω στην υπερεπιφάνεια (επιφάνεια περιορισμών) ικανοποιούν τους ισοτικούς περιορισμούς $g_j(X) = 0$
- τα σημεία τα οποία βρίσκονται στην περιοχή όπου ισχύει $g_j(X) > 0$ είναι μη εφικτά ή μη αποδεκτά (infeasible or unacceptable) σημεία.
- τα σημεία τα οποία βρίσκονται στην περιοχή όπου ισχύει $g_j(X) < 0$ είναι εφικτά ή αποδεκτά (feasible or acceptable) σημεία.

Το σύνολο τώρα όλων των επιφανειών περιορισμών οι οποίες ικανοποιούν τις εξισώσεις $g_j(X) = 0, j = 1, 2, \dots, m$ και διαχωρίζουν την αποδεκτή περιοχή σχεδίασης ονομάζεται *σύνθετη επιφάνεια περιορισμών* (composite constraint surface).

Στο επόμενο σχήμα αναπαριστάται ένας υποθετικός δισδιάστατος χώρος σχεδίασης όπου η μη εφικτή περιοχή (infeasible region) επισημαίνεται από γραμμές οι οποίες φέρουν και διαγώνια διαγράμμιση. Ένα σημείο σχεδίασης το οποίο κείται σε μια ή περισσότερες επιφάνειες περιορισμών ονομάζεται σημείο περιορισμού ή bound point και ο εν λόγω περιορισμός που ικανοποιεί ονομάζεται ενεργός περιορισμός ή active constraint. Αναλόγως, ένα σημείο σχεδίασης το οποίο δεν κείται σε μια ή περισσότερες επιφάνειες περιορισμών ονομάζεται ελεύθερο σημείο ή free point. Ανάλογα με το εάν ένα σημείο ανήκει στην εφικτή ή την μη εφικτή περιοχή, μπορεί να διαχωριστεί σε έναν από τους τέσσερις παρακάτω τύπους :

1. Ελεύθερο και αποδεκτό ή εφικτό σημείο (Free and acceptable or feasible point)
2. Ελεύθερο και μη αποδεκτό ή ανέφικτο σημείο (Free and unacceptable or infeasible point)
3. Αποδεκτό ή εφικτό σημείο περιορισμού (Bound and acceptable or feasible point)
4. Μη αποδεκτό ή ανέφικτο σημείο περιορισμού (Bound and unacceptable or infeasible point)

Όλοι οι τέσσερις τύποι φαίνονται στο επόμενο σχήμα.



2.2.5 Αντικειμενική Συνάρτηση (Objective function)

Οι συμβατικές διαδικασίες σχεδίασης σκοπεύουν στην εύρεση ενός αποδεκτού και ικανοποιητικού σχεδιασμού ο οποίος να ανταποκρίνεται μερικώς στις λειτουργικές και άλλες ανάγκες του προβλήματος. Γενικά, σε κάθε σχεδιαστικό πρόβλημα, θα υπάρχουν περισσότεροι από έναν αποδεκτοί σχεδιασμοί (designs) και ο σκοπός της βελτιστοποίησης είναι η σωστή επιλογή του καλύτερου-βέλτιστου από όλους τους πολλούς και αποδεκτούς διαθέσιμους σχεδιασμούς. Γι' αυτό το λόγο πρέπει να οριστεί ένα κριτήριο με βάση το οποίο θα γίνεται η σύγκριση των διαφόρων εναλλακτικών αποδεκτών design και τελικά θα επιλέγεται το καλύτερο-βέλτιστο. Το κριτήριο με βάση το οποίο βελτιστοποιείται η σχεδίαση, όταν εκφράζεται ως μια συνάρτηση των μεταβλητών σχεδίασης, είναι γνωστό και ονομάζεται κριτήριο ή αξία ή αντικειμενική συνάρτηση (the *critterion* or *merit* or *objective function*). Η επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης υπαγορεύεται από την φύση του προβλήματος προς επίλυση.

Σε προβλήματα σχεδιασμού της αεροπορίας ή της αεροδιαστημικής η αντικειμενική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση είναι το συνολικό προκύπτον βάρος της κατασκευής. Σε προβλήματα σχεδίασης του τομέα των πολιτικών μηχανικών και των δομικών έργων η αντικειμενική συνάρτηση της οποίας η ελάχιστη τιμή αναζητείται είναι συνήθως το κόστος κατασκευής. Η μεγιστοποίηση μηχανικού βαθμού απόδοσης είναι η προφανής επιλογή αντικειμενικής συνάρτησης σε προβλήματα σχεδιασμού μηχανολογικών συστημάτων. Έτσι, η επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης φαίνεται να είναι αρκετά άμεση και ακριβής σε πολλά σχεδιαστικά προβλήματα.

Ωστόσο, μπορεί να υπάρχουν περιπτώσεις όπου η βελτιστοποίηση με βάση ένα συγκεκριμένο κριτήριο μπορεί να οδηγεί σε αποτελέσματα τα οποία να μην είναι ικανοποιητικά με βάση κάποιο άλλο κριτήριο. Για παράδειγμα, στον μηχανολογικό σχεδιασμό, ένα κιβώτιο ταχυτήτων το οποίο μεταδίδει την μέγιστη ιπποδύναμη ίσως να μην έχει το ελάχιστο απαιτούμενο βάρος. Ομοίως, στον κατασκευαστικό τομέα, μια κατασκευή με το ελάχιστο βάρος μπορεί να μην ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις για ελάχιστη επιτρεπόμενη καταπόνηση (προκύπτουσες ορθές και διατρητικές τάσεις) και η κατασκευή με την ελάχιστη καταπόνηση και πάλι μπορεί να μην ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις για την μέγιστη επιτρεπόμενη ραδιοσυχνότητα ή συχνότητα συντονισμού. Επομένως, η επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης μπορεί να γίνει ένα ζήτημα μέγιστης σημασίας στην όλη διαδικασία βελτιστοποίησης σχεδιασμού.

Σε μερικές περιπτώσεις, μπορεί να προκύπτει η απαίτηση για ταυτόχρονη ικανοποίηση περισσότερων του ενός κριτηρίων (αυτό είναι ένα πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης και θα παρουσιαστεί και στα επόμενα κεφάλαια).

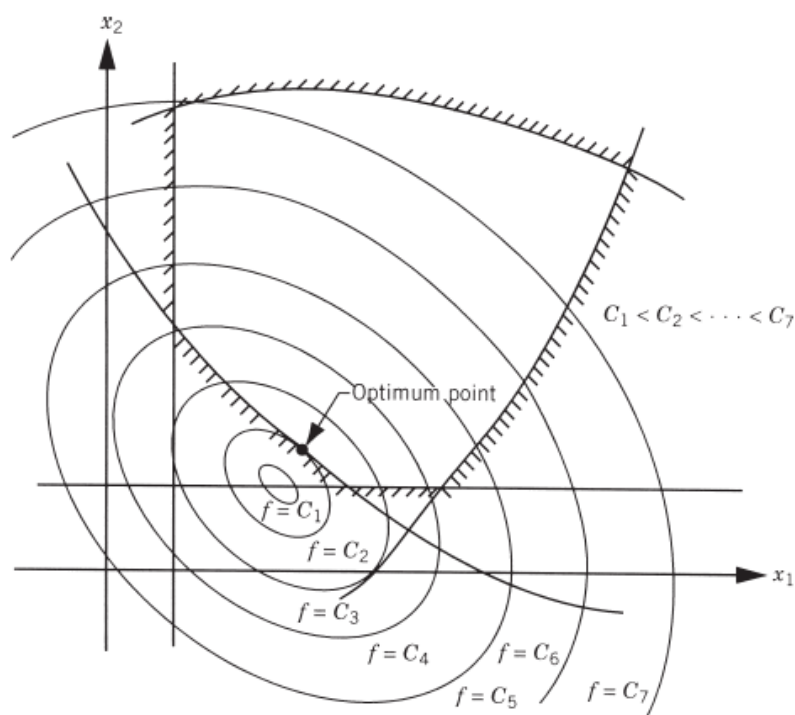
Για παράδειγμα, ένα κιβώτιο ταχυτήτων ίσως χρειάζεται να σχεδιαστεί για ελάχιστο βάρος και μέγιστη απόδοση ενώ θα μεταδίδει μια συγκεκριμένη ιπποδύναμη. Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης το οποίο περιλαμβάνει πολλαπλά κριτήρια είναι γνωστό ως πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης (multiobjective programming problem). Με την παρουσία πολλαπλών κριτηρίων προκύπτει η πιθανότητα ένα ή περισσότερα από αυτά να ανταγωνίζονται (η βελτίωση του ενός αναιρεί την βελτίωση του άλλου) και μια απλή μέθοδος αντιμετώπισης είναι η δημιουργία μιας ολικής αντικειμενικής συνάρτησης η οποία κατασκευάζεται ως γραμμικός συνδυασμός των επιμέρους ανταγωνιζόμενων αντικειμενικών. Έτσι αν $f_1(x)$ και $f_2(x)$ ορίζουν δυο αντικειμενικές συναρτήσεις, κατασκευάζουμε μια καινούρια (ολική) αντικειμενική συνάρτηση προς βελτιστοποίηση ως εξής :

$$f(x) = a_1 f_1(x) + a_2 f_2(x)$$

Όπου a_1 και a_2 είναι σταθερές, οι τιμές των οποίων αντιπροσωπεύουν την σχετική σημασία-βάρους του ενός κριτηρίου σε σχέση με το άλλο.

2.2.6 Επιφάνειες αντικειμενικών συναρτήσεων (Objective function Surfaces)

Ο γεωμετρικός τόπος όλων των σημείων τα οποία ικανοποιούν την εξίσωση της αντικειμενικής συνάρτησης $f(\mathbf{X}) = C = \text{σταθερό}$ είναι μια υπερεπιφάνεια στον χώρο σχεδίασης, και κάθε τιμή του C αντιστοιχεί σε ένα διαφορετικό μέλος μιας οικογενείας επιφανειών. Αυτές οι επιφάνειες, οι οποίες καλούνται επιφάνειες αντικειμενικών συναρτήσεων (objective function surfaces) αναπαρίστανται στο επόμενο σχήμα ενός υποθετικού δισδιάστατου χώρου σχεδίασης.



Όταν οι επιφάνειες των αντικειμενικών συναρτήσεων σχεδιαστούν μαζί με τις επιφάνειες των περιορισμών, το βέλτιστο σημείο μπορεί να προσδιοριστεί χωρίς μεγάλη δυσκολία. Αλλά το βασικό πρόβλημα είναι ότι καθώς ο αριθμός των μεταβλητών σχεδίασης υπερβαίνει τις δυο ή τρεις, τότε οι επιφάνειες των περιορισμών και των αντικειμενικών συναρτήσεων γίνονται πολύπλοκες σε βαθμό που η σχεδίαση και η αποτελεσματική οπτική αναπαράστασή τους δεν είναι εφικτές

και πλέον το πρόβλημα βελτιστοποίησης πρέπει να αντιμετωπιστεί και να επιλυθεί ως ένα καθαρά μαθηματικό πρόβλημα.

2.3 Διαδικασία Λήψης Απόφασης κατω από Πολλαπλά

κριτήρια (Multiple Criteria Decision Making)

Οι περισσότεροι από μας είμαστε εξοικειωμένοι με προβλήματα τα οποία μας οδηγούν στο να πάρουμε μια συγκεκριμένη απόφαση βασιζόμενοι σε δυο η παραπάνω κριτήρια, διότι τέτοιου είδους προβλήματα δημιουργούνται φυσικά σε πάρα πολλές περιπτώσεις της καθημερινής ζωής.

Σε όλους τους κλάδους της ανθρώπινης προσπάθειας για βελτίωση των συνθηκών ζωής, ψάχνουμε λύσεις αντιστοιχίζοντας συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των υποψήφιων ή εξελισσομένων πράξεων μας, με συγκεκριμένες απαιτήσεις απόδοσης για την υπό εξέταση κατάσταση. Έτσι, ένας γιατρός θα εξέταζε τα ευεργετικά και τα επιζήμια αποτελέσματα μιας συγκεκριμένης θεραπείας και θα την σύγκρινε με άλλες πριν αποφασίσει να την θέσει σε εφαρμογή. Παρόμοια μια επιτροπή έγκρισης, για παράδειγμα ενός κατασκευαστικού έργου, θα εξέταζε όλες τις επιδράσεις (οικονομικές, κοινωνικές, περιβαλλοντολογικές κτλ) της εν λόγω κατασκευής πριν αποφασίσει για υλοποίηση ή ακύρωση εκτέλεσης της εν λόγω κατασκευής. Ακόμα και στις προσωπικές μας ζωές ερχόμαστε συνεχώς αντιμέτωποι με καταστάσεις οι οποίες απαιτούν από εμάς να εξετάσουμε διάφορες εναλλακτικές καθεμία από αυτές μπορεί να είναι ελκυστική από μια οπτική γωνία αλλά από μια άλλη να έχει διάφορα μειονεκτήματα. Οι κοινές συνιστώσες που χαρακτηρίζουν όλα τα προβλήματα αυτού του είδους είναι οι εξής :

- Υπάρχει μια ποικιλία δυνατών λύσεων
- Κάθε πράξη χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο επιπτώσεων μερικές από αυτές είναι περισσότερο ευεργετικές και άλλες λιγότερο
- Ο λήπτης της απόφασης καλείται να «ζυγίσει» τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα προτού καταλήξει σε μια συγκεκριμένη πράξη, και για να το κάνει αυτό μπορεί να χρησιμοποιήσει μια ποικιλία κανόνων επιλογής αποφάσεων.

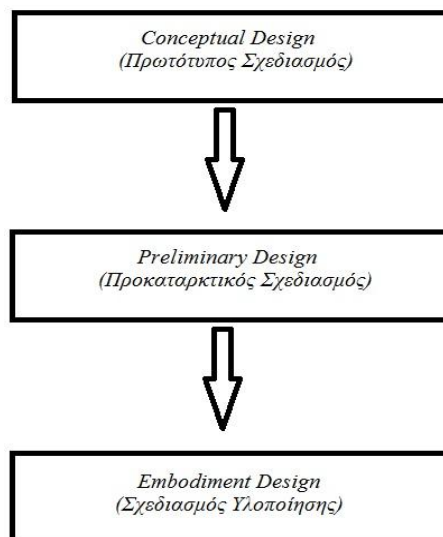
Οι ανωτέρω καταστάσεις μπορούν επομένως να χαρακτηριστούν από την ανάγκη να πάρουμε αποφάσεις ή να κάνουμε επιλογές στην βάση ενός συνόλου πράξεων οι οποίες έχουν πολλαπλά, ίσως αντικρουόμενα κριτήρια απόδοσης συνυφασμένα μαζί τους. Η διαδικασία μέσω της οποίας λαμβάνονται τέτοιου είδους αποφάσεις μπορεί να βασίζεται στην υποκειμενική αντίληψη ή στην αντικειμενική ανάλυση και αποτίμηση, αλλά η ουσιώδης φύση του προβλήματος εξαρτάται κατά πολύ από το πώς οι ενυπάρχουσες αντικρούσεις ή «διαμάχες» αναλύονται. Είναι σαφές ότι διαφορετικοί λήπτες αποφάσεων και διαφορετικές καταστάσεις λήψης αποφάσεων απαιτούν διαφορετικές στρατηγικές ανάλυσης-επίλυσης αντικρούσεων, έτσι ώστε η τελική απόφαση για την υιοθέτηση μιας συγκεκριμένης πράξης, καθορίζεται από έναν συνδυασμό, αφενός της εξέτασης όλων των διαθέσιμων εναλλακτικών και αφετέρου της συμπύκνωσης της διευθέτησης των προτεραιοτήτων του λήπτη της απόφασης. Αυτός ο τελευταίος παράγοντας είναι ειδικά σημαντικός γιατί η διευθέτηση των προτεραιοτήτων είναι μια φυσική μέθοδος εναρμόνισης αντικρουόμενων απαιτήσεων. Όλα αυτά συμβαίνουν γιατί όταν βρισκόμαστε σε μια κατάσταση όπου όλα όσα θα θέλαμε να πετύχουμε δεν είναι εφικτό να γίνουν τότε το λογικό είναι να αναθεωρήσουμε τις προσδοκίες μας, να επαναδιατάξουμε τις προτεραιότητές μας ή να κάνουμε λίγο και από τα δύο. Αυτή είναι η «αρχή της ικανοποίησης» (“satisficing” principle) του Simon όπου ο συμβιβασμός είναι αναγκαίος εάν μια αυστηρή βελτιστοποίηση δεν είναι εφικτή.

Όσο οι προτεραιότητες είναι διαφορετικές από άτομο σε άτομο, είτε από επιχείρηση σε επιχείρηση, τότε η «βέλτιστη» ενέργεια (πράξη, λύση κτλ) εξατομικεύεται. Αυτό διαφέρει από την κλασική – μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση όπου υπάρχει μόνο ένα συγκεκριμένο κριτήριο και ένα σύνολο ικανοποιήσιμων περιορισμών. Στις κλασικές προσεγγίσεις λήψης αποφάσεων, στα πλαίσια του μονοκριτηριακού μοντέλου, η κατάσταση του προβλήματος οδηγεί με φυσικό τρόπο στην λύση. Όταν λοιπόν υπάρχει μια συμφωνία για το κριτήριο με βάση το οποίο βελτιστοποιούμε (μονοκριτηριακά) –το κόστος για παράδειγμα– τότε η επιλογή της βέλτιστης λύσης δεν επιδέχεται υποκειμενικές απόψεις. Οι μόνες διαφωνίες που μπορεί να προκύπτουν είναι στον τρόπο με τον οποίο το κόστος για παράδειγμα υπολογίζεται, αλλά σε κάθε ρεαλιστικό πρόβλημα κάποιας σημασίας η μέθοδος υπολογισμού είναι προφανώς μέρος του ορισμού του ίδιου του κριτηρίου που χρησιμοποιείται. Με άλλα λόγια η επιλογή κριτηρίου οδηγεί κατευθείαν στη λύση ενός μονοκριτηριακού προβλήματος η οποία είναι τέτοια ώστε όλοι οι εμπλεκόμενοι μπορούν να συμφωνήσουν με αυτήν. Τέλος, όπως έχει ήδη παρατηρηθεί, σε ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα κάτι τέτοιο δεν

ισχύει καθότι διαφορετικοί λήπτες αποφάσεων μπορούν και γενικά έχουν διαφορετικά συστήματα αξιολόγησης τα οποία τους οδηγούν σε διαφορετική θέσπιση προτεραιοτήτων όσον αφορά τα πολλαπλά, και ίσως αντικρουόμενα κριτήρια.

2.4 Η δομή ενός σχεδιαστικού προβλήματος (The structure of a design problem)

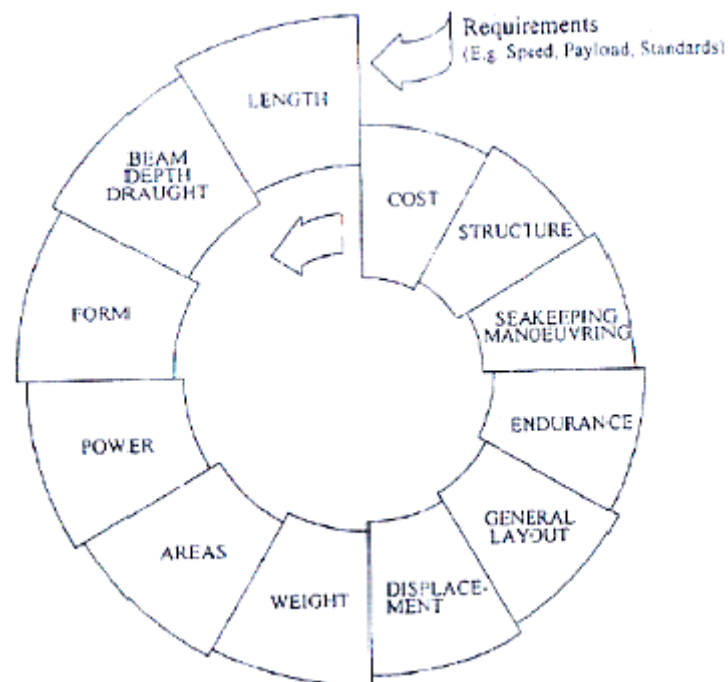
Ο μηχανικός-μηχανολογικός σχεδιασμός είναι η διαδικασία της κατασκευής-σχηματισμού ενός προϊόντος (τελική λύση προβλήματος) του οποίου τα χαρακτηριστικά απόδοσης ικανοποιούν κάποιες λειτουργικές απαιτήσεις. Αυτές οι απαιτήσεις συνήθως υπαγορεύονται από ένα εγχειρίδιο προδιαγραφών ή κάτι παρόμοιο. Αυτό συνήθως οδηγεί στο γραμμικό μοντέλο σχεδιασμού όπου η διαδικασία επίλυσης μοντελοποιείται σαν μια η οποία περνά από διάφορα στάδια μέχρι να παράξει ένα αποδεκτό design (αποδεκτή σχεδιαστική λύση).



Παρ' όλα αυτά, οι περισσότεροι μηχανικοί-σχεδιαστές αναγνωρίζουν ότι πολύ συχνά, αν όχι πάντα, σε πραγματικά-ρεαλιστικά σχεδιαστικά προβλήματα η διαδικασία δεν είναι γραμμική αλλά επαναληπτική με την έννοια ότι πρόοδος σε μια φάση ή επίπεδο σχεδιασμού αλλάζει την δυνατότητα ελεύθερης επέμβασης-σχεδιασμού σε μια άλλη φάση ή επίπεδο. Ακόμα, διάφορες πράξεις κατά την σχεδίαση μπορούν να οδηγήσουν σε μικροαλλαγές των ίδιων των προδιαγραφών. Με άλλα λόγια, οι προδιαγραφές απόδοσης πολύ συχνά επηρεάζονται από την εξέταση του τι είναι τεχνολογικά εφικτό. Αυτό το φαινόμενο μπορεί μερικές φορές να είναι η αιτία μεγάλης διαμάχης και παρεξηγήσεων μεταξύ ενός πελάτη και ενός κατασκευαστή αλλά στα πλαίσια κάθε δεδομένης κατάστασης τέτοια δημιουργική

ανασύνταξη των προδιαγραφών είναι ένα μέσο με βάση το οποίο οι εταιρίες παραμένουν ανταγωνιστικές καθώς τους επιτρέπει να επωφελούνται από την προσαρμογή τους στις ανερχόμενες τεχνολογικές καινοτομίες. Επομένως λοιπόν, αφού οι προδιαγραφές είναι στην ουσία μια περίπλοκη λίστα απαιτήσεων, η αλλαγή τους είναι ισοδύναμη με μια εικονική αναδιάταξη προτεραιοτήτων. Αυτό είναι αδιαμφισβήτητα, μια αναγνώριση της πολυκριτηριακής φύσης του μηχανικού-μηχανολογικού σχεδιασμού.

Μια εναλλακτική προσέγγιση συχνά χρησιμοποιούμενη στην ναυπηγική βιομηχανία, αλλά έχει και γενικότερη εφαρμογή είναι αυτή του σπирάλ (design spiral) όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σε αυτή την προσέγγιση ο σχεδιασμός φαίνεται να προοδεύει ή να εξελίσσεται με τον χρόνο μέσω μιας σειράς συνεχόμενων ρυθμίσεων μέχρι κάποια συγκεκριμένα κριτήρια απόδοσης να ικανοποιηθούν. Με άλλα λόγια μια τέτοια προσέγγιση υποθέτει πως όλες οι σχεδιαστικές απαιτήσεις μπορούν να ικανοποιηθούν. Ωστόσο, αυτό μπορεί να μην είναι πάντα δυνατό αν μερικές τουλάχιστον από τις απαιτήσεις δεν διατυπωθούν σε μια πιο «χαλαρή» μορφή δήλωσης όπως για παράδειγμα «να σχεδιαστεί η ελαφρύτερη δυνατή κατασκευή». Είναι λοιπόν αναμφίβολο ότι ρυθμίσεις στις δηλωμένες απαιτήσεις πρέπει να γίνουν εάν τα ισχύοντα εγγυημένα όρια δεν είναι εφικτά. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οποιαδήποτε ρύθμιση των απαιτήσεων αποτελεί εν δυνάμει μια εικονική αναδιάταξη προτεραιοτήτων. Το παράδειγμα του πολυκριτηριακού σχεδιαστικού προβλήματος πάντως κάνει όλες

αυτές τις εκ των υστέρων απαιτούμενες μεταβολές, πιο διαυγείς και ξεκάθαρες και εντεύθεν πιο δεκτικές σε ρύθμιση.

Γενικά, σε αμφότερες, μονοκριτηριακής και πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης προσεγγίσεις αναγνωρίζεται η ανάγκη ορισμένων συμβιβασμών αλλά αυτοί επιδιώκονται με διαφορετικούς τρόπους. Στην δεύτερη (πολυκριτηριακή) προσέγγιση ο συμβιβασμός είναι ένα ουσιαστικό κομμάτι της όλης διαδικασίας λήψης αποφάσεων και για αυτό παρέχεται ρητά από την ποικιλία των διαθέσιμων μαθηματικών εργαλείων για επίλυση τέτοιων προβλημάτων. Επίσης συνεπάγεται την παρουσία μηχανισμών σύλληψης των προτεραιοτήτων του λήπτη των αποφάσεων.

Εν τέλει, οποιαδήποτε προσέγγιση (μονοκριτηριακή ή πολυκριτηριακή) χρησιμοποιηθεί για την βελτιστοποίηση ενός σχεδιαστικού προβλήματος, υπάρχει ένα κοινό χαρακτηριστικό. Αυτό είναι ότι οι διαφορετικές απαιτήσεις σχεδιασμού λαμβάνονται όλες, συγχρόνως, υπόψη. Από αυτή την άποψη και οι δυο προσεγγίσεις εκκρίπτουν στο πνεύμα της σύμπτωσης.

2.5 Ιστορικές αναφορές στην εξέλιξη της Πολυκριτηριακής

Βελτιστοποίησης

Οι βασικές και σημαντικότερες αρχές της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης θεμελιώθηκαν από τους Edgeworth και Pareto από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα και στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, ενώ μια εξέλιξη της μαθηματικής της βάσης έγινε σχεδόν τη ίδια εποχή από τον Cantor.

Βέβαια, όπως είναι φυσικό η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση δεν έμεινε στάσιμη στις βασικές αρχές και τις ρίζες της στις θεωρίες των Pareto και Edgeworth αλλά με τον καιρό, και ειδικά τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες, ήκμασε και αναπτύχθηκε σε μεγάλο βαθμό. Σήμερα, πολλά συστήματα εκλογής αποφάσεων ενσωματώνουν μεθόδους για την αντιμετώπιση συγκρουόμενων κριτηρίων-στόχων. Το θεμέλιο τέτοιων συστημάτων είναι η μαθηματική θεωρία της βελτιστοποίησης κάτω από πολλαπλά κριτήρια. Το αντικείμενο λοιπόν της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης είναι εν γένει η επιλογή «καλών» αποφάσεων μέσα από ένα σύνολο εναλλακτικών με βάση κάποια πολλαπλά κριτήρια (ή αντικειμενικές συναρτήσεις). Επομένως δεν αποτελεί έκπληξη το ότι αυτή προέρχεται από τον κλάδο της οικονομικής θεωρίας. Οι

πρώτοι προάγγελοι της θεωρίας αυτής χρονολογούνται, όπως έχει ήδη αναφερθεί, τον 19^ο αιώνα όταν η οικονομική ευημερία και η θεωρία της επιχειρηματικότητας πρωτοαπασχόλησαν τον Warlas και άλλους. Ο Edgeworth εισήγαγε τις «utility functions» και «indifference curves» τις οποίες χρησιμοποιήθηκαν από τον Pareto ώστε να ορίσει μια οικονομική ισορροπία. Σήμερα μια τέτοια ισορροπία – κατάσταση θα ονομαζόταν ένα τοπικό Pareto βέλτιστο. Κατά την διάρκεια των πρώιμων εκείνων χρόνων η «utility theory» είχε μελετηθεί και αναπτυχτεί ως κλάδος της οικονομικής θεωρίας. Από μαθηματικής πλευράς τώρα, η πολυκριτηριακή ή διανυσματική βελτιστοποίηση (multicriteria or vector optimization) νοείται ως ο καθορισμός των ελαχίστων (ή μέγιστων) στοιχείων διατεταγμένων συνόλων. Επομένως οι ρίζες της διανυσματικής βελτιστοποίησης μπορούν να εντοπιστούν στις εργασίες των Cantor και Hausdorff. Παρ' όλα αυτά η έρευνα στον τομέα ο οποίος σήμερα νοείται ως πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση είναι πολύ νεότερη. Όπως αποδείχτηκε ήταν «απαραίτητο να περιμένουμε» μέχρι το δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα μέχρι να δούμε μια εντυπωσιακή πρόοδο στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση. Ο όρος «efficient» (αποτελεσματικό, αποδοτικό) πρωτοεμφανίστηκε στις εργασίες του Koopmans. Ο ορισμός ενός προβλήματος διανυσματικής βελτιστοποίησης δόθηκε για πρώτη φορά από τους Kuhn και Tucker. Η μαθηματική έρευνα πάνω σε αυτόν τον τομέα τελικώς επαληθεύτηκε μέσα από τις εργασίες του Hurwicz στην διανυσματική βελτιστοποίηση τοπολογικών διανυσματικών χωρίων. Μια δεκαετία μετά τον ορισμό των προβλημάτων διανυσματικής βελτιστοποίησης (μεγιστοποίησης ή ελαχιστοποίησης) αλγοριθμικά στοιχεία ενσωματώθηκαν για πρώτη φορά από τους Charnes και Cooper. Στο τέλος της δεκαετίας του 1960 τέθηκαν τα θεμέλια του «goal programming» (προγραμματισμός επίτευξης στόχου), μια περιοχή έρευνας η οποία μερικές φορές σήμερα θεωρείται ως ένας ξεχωριστός κλάδος. Η πρώτη μονογραφία πάνω στο θέμα αυτό ήταν η εξής : S.M. Lee. *Goal Programming for Decision Analysis*. Auerbach Publications, Philadelphia, PA, 1972. Το 1968 εμφανίστηκε η μέθοδος ELECTRE (outranking notion and the discrete multicriteria decisionaid Method). Μετά από σχεδόν 20 χρόνια η πρώτη μονογραφία δημοσιεύθηκε :

B. Roy. *Methodologie multicritere d'aide a la decision (in French)*. Collection Gestion. Economica, Paris, 1985.

Οι πρώτες διαδραστικές-αλληλεπιδραστικές μέθοδοι, η STEM και η Geoffrion-Dyer-Feinberg, εισήχθησαν την δεκαετία του 1970. Η απουσία κανονικοποιημένων διατάξεων στους διανυσματικούς χώρους οδήγησαν στην έρευνα για την αποδοτικότητα των διατάξεων (efficiency of orders) η οποία ορίστηκε από τον Cones.

Όσον αφορά την πρόοδο σε θέματα αλγορίθμων η ανάπτυξη μεθόδων για την επίλυση πολυκριτηριακών γραμμικών προβλημάτων από τους Zeleny και Isermann πρέπει να αναφερθεί. Η Multi-Attribute Utility Theory – MAUT εισήχθη το 1976 από τους Keeney και Raiffa. Το 1980, ο Saaty δημοσίευσε το βιβλίο του πάνω στην Analytic Hierarchy Process (AHP). Στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και στις αρχές της δεκαετίας του 1980 μονογραφίες και εγχειρίδια στα οποία συνοψίζονταν το έως τότε «υψηλότερο επίπεδο» της επιστήμης της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης έκαναν την εμφάνιση τους. Η δεκαετία του 1980 διακρίθηκε επίσης από τις δυνατότητες που δόθηκαν τότε μέσω της χρήσης μικρό – υπολογιστών στον σχεδιασμό και την εφαρμογή – υλοποίηση των διαφόρων μεθόδων. Η αλληλεπίδραση και η οπτική αναπαράσταση των μεθόδων έγιναν επίσης αντικείμενα έρευνας. Η πρώτη «συμπλοκή» μεταξύ metaheuristic (μετα-ευρετικών) και multiobjective βελτιστοποίησης έχει καταγραφεί το 1984, όταν ο Schaffer παρουσίασε την μέθοδο VEGA, μια επέκταση εφαρμογής των γενετικών αλγορίθμων σε προβλήματα βελτιστοποίησης με πολλαπλά κριτήρια. Σήμερα, έχει επικρατήσει να αναφερόμαστε στην λύση ενός προβλήματος πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης ως μια «Pareto λύση» (Pareto solution). Επίσης χιλιάδες εργασίες είναι το αποδεικτικό στοιχείο της μεγάλης άνθισης που γνωρίζει η έρευνα στον τομέα της διανυσματικής βελτιστοποίησης τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες. Μια έρευνα για τις δραστηριότητες στον τομέα της «Multiple Criteria Decision Making» (MCDM) καταμέτρησε 1216 εργασίες μεταξύ του 1987 και του 1992. Η ίδια έρευνα αναφέρει ένα σύνολο 208 βιβλίων, 31 ειδικά αντικείμενα συζήτησης σε επιστημονικά περιοδικά και 143 συνέδρια τα οποία ασχολήθηκαν με το θέμα αυτό.

2.6 Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση (Multiobjective Optimization)

Σε προβλήματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, τα κριτήρια ή αντικειμενικές συναρτήσεις είναι γενικά αντικρουόμενα πράγμα που εμποδίζει την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση τους. Πολλά, αν όχι τα περισσότερα, πραγματικά προβλήματα του ευρύτερου κλάδου των μηχανικών έχουν πολλαπλά κριτήρια όπως για παράδειγμα, ελαχιστοποίηση του κόστους, μεγιστοποίηση της απόδοσης, μεγιστοποίηση της αξιοπιστίας, κτλ. Όλα αυτά είναι δύσκολα αλλά απολύτως ρεαλιστικά προβλήματα.

Δυο είναι οι γενικές προσεγγίσεις επίλυσης προβλημάτων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης.

Η πρώτη χαρακτηρίζεται από την σύνθεση όλων των επιμέρους αντικειμενικών συναρτήσεων (κριτηρίων) σε μια συνάρτηση ή την μετακίνηση όλων των αντικειμενικών εκτός από μια, στην οικογένεια των περιορισμών.

Στη πρώτη περίπτωση, ο καθορισμός ενός συγκεκριμένου κριτηρίου είναι δυνατός με διάφορες μεθόδους όπως η utility theory, η weighted sum, κτλ. Αλλά η δυσκολία έγκειται στο γεγονός ότι δεν είναι εύκολος ο προσδιορισμός των utility functions ή των επιμέρους συντελεστών βαρύτητας (weights) έτσι ώστε να αναπαριστούν με σαφήνεια και ακρίβεια τις προτιμήσεις του λήπτη των αποφάσεων. Στην πράξη, είναι πάρα πολύ δύσκολο ο ακριβής και σωστός προσδιορισμός των συντελεστών βαρύτητας, ακόμα και για κάποιον με μεγάλη εμπειρία στον τομέα αυτό. Συνοψίζοντας, αυτό το μειονέκτημα απαιτεί την κλιμάκωση (scaling) μεταξύ των αντικειμενικών συναρτήσεων και μικρές διαταραχές ή μικρολοαλλαγές στους συντελεστές βαρών μπορεί μερικές φορές να οδηγούν σε διαφορετικά αποτελέσματα.

Στην δεύτερη περίπτωση, η δυσκολία έγκειται στο γεγονός ότι για την μετακίνηση όλων των αντικειμενικών συναρτήσεων εκτός από μια, στην οικογένεια των περιορισμών, πρέπει να οριστεί μια τιμή περιορισμού για κάθε μια «πρώην» αντικειμενική συνάρτηση. Αυτό μπορεί να είναι μια αρκετά αυθαίρετη ενέργεια.

Και στις δυο όμως περιπτώσεις, μια μέθοδος βελτιστοποίησης θα έδινε μια συγκεκριμένη τιμή ως τελικό αποτέλεσμα - λύση και όχι ένα σύνολο αποδεκτών λύσεων το οποίο θα μπορούσε να εξεταστεί περεταίρω για trade-offs (αναθεωρήσεις και συμβιβασμοί ως προς το αποτέλεσμα). Γι' αυτό το λόγο, οι μελετητές προτιμούν ένα σύνολο αποδεκτών ή «καλών» λύσεων το οποίο θα λαμβάνει υπόψη όλα τα κριτήρια.

Η δεύτερη γενική προσέγγιση είναι ο προσδιορισμός ενός ολόκληρου συνόλου από Pareto βέλτιστες (Pareto optimum) λύσεις ή ένα αντιπροσωπευτικό αυτών υποσύνολο (ο επακριβής μαθηματικός ορισμός του Pareto βέλτιστου θα δοθεί στην επομένη ενότητα). Ένα σύνολο Pareto βέλτιστων λύσεων είναι ένα σύνολο λύσεων από τις οποίες καμία δεν είναι κυρίαρχη σε σχέση με μια άλλη (non dominated). Καθώς λοιπόν κινούμαστε από τη μια Pareto λύση προς την άλλη, πάντα υπάρχει ένα συγκεκριμένο ποσοστό «θυσίας» ή «απώλειας» στην τιμή ενός κριτηρίου(ων) και ένα συγκεκριμένο ποσοστό «κέρδους» στην τιμή ενός άλλου κριτηρίου(ων). Οι Pareto βέλτιστες λύσεις πολύ συχνά προτιμώνται από τις μονοσήμαντες λύσεις γιατί

μπορούν και έχουν πρακτική και ρεαλιστική σημασία όταν η βελτιστοποίηση αφορά σε πραγματικά ζητήματα και προβλήματα σχεδιασμού, αφού η τελική λύση – απόφαση του σχεδιαστή είναι πάντα ένα trade-off. Τα Pareto βέλτιστα σύνολα μπορεί να έχουν διάφορα μεγέθη, αλλά το μέγεθός τους γενικά αυξάνεται, όσο αυξάνεται ο αριθμός των αντικειμενικών συναρτήσεων – κριτηρίων.

2.6.1 Βασικοί μαθηματικοί ορισμοί στην βελτιστοποίηση (Basic Mathematical Definitions in Optimization).

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να παρατεθούν διάφοροι μαθηματικοί ορισμοί οι οποίοι χρησιμοποιούνται κατά κανόνα στην πολυκριτηριακή αλλά και την κλασική μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση.

Ορισμός 1 : Ολικό ελάχιστο (Global Minimum)

Δεδομένης μιας συνάρτησης :

$f : \Omega \subseteq S = \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, $\Omega \neq \emptyset$, για $\vec{x} \in \Omega$, η τιμή : $f^* \triangleq f(\vec{x}^*) > -\infty$ καλείται ολικό ελάχιστο αν και μόνο αν ισχύει :

$$\forall x \in \Omega : f(\vec{x}^*) \leq f(\vec{x}).$$

Τότε το \vec{x}^* , είναι η ολική ελάχιστη λύση(σεις), f είναι η αντικειμενική συνάρτηση και το σύνολο Ω είναι η περιοχή εφικτών λύσεων ($\Omega \subseteq S$). Το πρόβλημα αναζήτησης του ολικού ελάχιστου καλείται **global optimization problem** (πρόβλημα βελτιστοποίησης).

Παρόλο που τα προβλήματα μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης (μιας αντικειμενικής συνάρτησης) έχουν μια μοναδική βέλτιστη λύση, τα προβλήματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης (MultiObjective Problems ή MOPs) συνήθως, έχουν ένα πιθανώς αμέτρητο σύνολο λύσεων, οι οποίες όταν αξιολογηθούν, παράγουν διανύσματα τα στοιχεία των οποίων αναπαριστούν trade-offs στον χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων. Ο λήπτης αποφάσεων (σχεδιαστής) τότε κατά βούληση επιλέγει μια αποδεκτή λύση (ή λύσεις), επιλέγοντας ένα ή περισσότερα από αυτά τα διανύσματα.

Ορισμός 2 : Γενικό Πρόβλημα Πολυκριτηριακής Βελτιστοποίησης (General Multi Objective Problem or MOP)

Γενικά, ένα πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης (MOP) ελαχιστοποιεί :

$F(\vec{x}) = (f_1(\vec{x}), \dots, f_k(\vec{x}))$ υπό τους περιορισμούς $g_i(\vec{x}) \leq 0, i=1, \dots, m, \vec{x} \in \Omega$

Μια λύση ενός τέτοιου προβλήματος ελαχιστοποιεί τα στοιχεία ενός διανύσματος $F(\vec{x})$, όπου \vec{x} είναι μια n-διάστατη μεταβλητή απόφασης ($\vec{x} = x_1, \dots, x_n$) από έναν συγκεκριμένο χώρο Ω .

Σημείωση : Ο ορισμός ενός προβλήματος πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης θα δοθεί εκτενέστερα και στην επόμενη ενότητα.

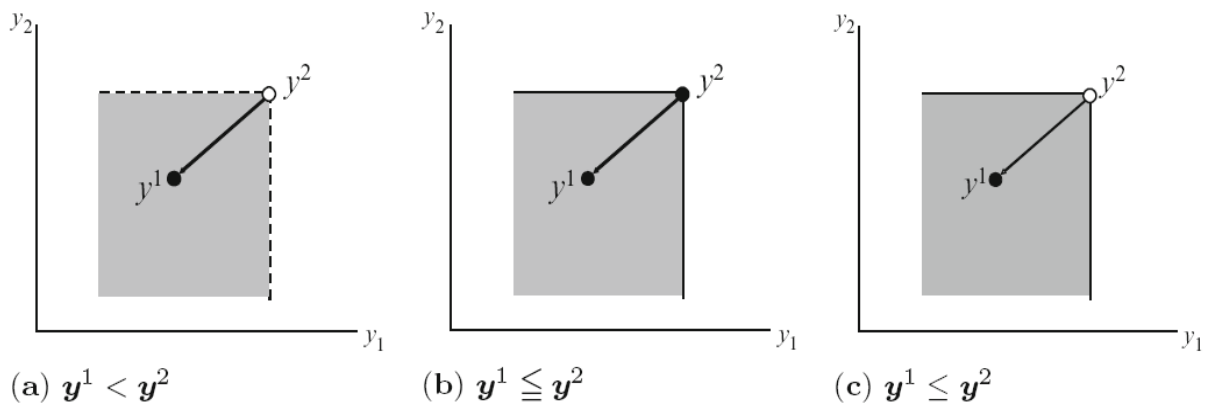
Ορισμός 3 : Ανισότητα διανυσμάτων (Vector Inequality)

Για οποιοδήποτε διάνυσμα $y^1, y^2 \in \mathbb{R}^r$ έχουμε :

$$y^1 < y^2 \Leftrightarrow y_i^1 < y_i^2, \quad \forall i = 1, \dots, r,$$

$$y^1 \leq y^2 \Leftrightarrow y_i^1 \leq y_i^2, \quad \forall i = 1, \dots, r,$$

$$y^1 \leq y^2 \Leftrightarrow y_i^1 \leq y_i^2, \quad y^1 \neq y^2.$$



Ορισμός 4 : Θετικό (αρνητικό) Orthant (Positive (negative) Orthant)

*(orthant= ανάλογο του τεταρτημορίου του διδιάστατου χώρου αλλά σε ν-διαστάσεις)

Έστω το μηδενικό διάνυσμα οποιουδήποτε διανυσματικού χώρου συμβολίζεται με $\mathbf{0}$.

Ένα υποσύνολο $\mathbb{R}_+^r := \{y \in \mathbb{R}^r \mid y \geq \mathbf{0}\}$ καλείται θετικό orthant του \mathbb{R}^r , και $\mathbb{R}_-^r := \{y \in \mathbb{R}^r \mid y \leq \mathbf{0}\}$

αρνητικό orthant του \mathbb{R}^r . Παρόμοια, ορίζουμε το εσωτερικό θετικό orthant ως $\text{int}\mathbb{R}_+^r := \{y \in \mathbb{R}^r \mid y > \mathbf{0}\}$, και το εσωτερικό αρνητικό orthant $\text{int}\mathbb{R}_-^r := \{y \in \mathbb{R}^r \mid y < \mathbf{0}\}$. Τότε :

$$y^1 < y^2 \Leftrightarrow y^1 - y^2 \in \text{int } \mathbb{R}_-^r$$

$$y^1 \leq y^2 \Leftrightarrow y^1 - y^2 \in \text{int } \mathbb{R}_-^r$$

$$y^1 \leq y^2 \Leftrightarrow y^1 - y^2 \in \text{int } \mathbb{R}_-^r \setminus \{\mathbf{0}\}.$$

Εδώ, το σύμβολο $\mathbb{R}_-^r \setminus \{\mathbf{0}\}$ σημαίνει το σύνολο \mathbb{R}_-^r εάν εξαιρεθεί από αυτό το $\{\mathbf{0}\}$.

Ορισμός 5 : Κυριαρχία Pareto (Pareto Dominance)

Ένα διάνυσμα $\vec{u} = (u_1, \dots, u_k)$ λέγεται ότι "κυριαρχεί" του διανύσματος $\vec{v} = (v_1, \dots, v_k)$ (και συμβολίζεται με $\vec{u} \preceq \vec{v}$) αν και μόνο αν το u είναι μερικώς μικρότερο από το v , δηλαδή εάν $\forall i \in \{1, \dots, k\}, u_i \leq v_i \wedge \exists i \in \{1, \dots, k\} : u_i < v_i$

Ορισμός 6 : Pareto Βέλτιστο (Pareto Optimality)

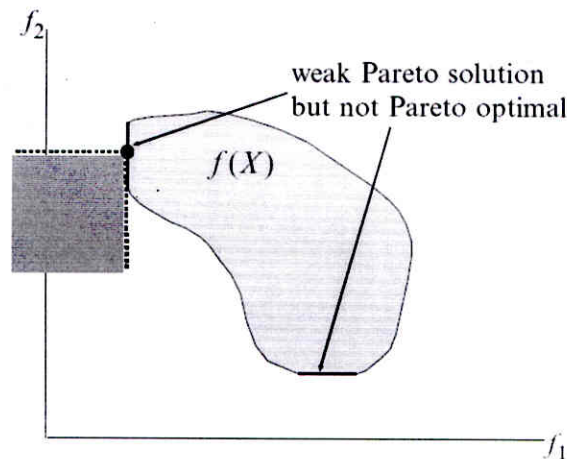
1ος ορισμός : Μία λύση $x \in \Omega$ λέγεται ότι είναι Pareto βέλτιστη στο Ω αν και μόνο αν δεν υπάρχει $x' \in \Omega$ τέτοιο ώστε $\vec{v} = F(x') = (f_1(x'), \dots, f_k(x'))$ να κυριαρχεί το $\vec{u} = F(x) = (f_1(x), \dots, f_k(x))$. Η φράση "Pareto βέλτιστο" ή "Pareto optimal" χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει μια λύση σε ολόκληρο τον χώρο των μεταβλητών σχεδίασης εκτός εάν διαφορετικά ορίζεται.

2ος ορισμός : Εάν δεν υπάρχει $\chi \in X : f(\chi) \leq f(x)$, τότε το x καλείται Pareto βέλτιστο, (Pareto Optimal) ή απλα Pareto λύση (Pareto Solution).

Σε ένα πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης μια Pareto βέλτιστη λύση δεν μπορεί να βελτιώσει την τιμή κάποιας αντικειμενικής συνάρτησης περαιτέρω χωρίς να επιδεινώσει την τιμή τουλάχιστον μιας από τις άλλες αντικειμενικές συναρτήσεις.

Ορισμός 7 : Ασθενές Pareto Βέλτιστο (Weak Pareto Optimality)

Εάν δεν υπάρχει $x \in X : f(x) < f(\hat{x})$, τότε το \hat{x} καλείται ασθενές Pareto βέλτιστο, (Weak Pareto Optimal) ή απλα ασθενής Pareto λύση (Weak Pareto Solution). Το γεγονός ότι το \hat{x} είναι μια ασθενής pareto λύση δηλώνει γεωμετρικά ότι το σύνολο $\hat{y} + \text{int } \mathbb{R}_-^r \cup \{0\}$ και η $f(X)$ δεν έχουν κανένα κοινό σημείο εκτός του $\hat{y}(= f(\hat{x}))$. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα όταν διορθώνουμε ένα κριτήριο στο επίπεδο μιας ασθενούς pareto λύσης, μπορούμε να βελτιώσουμε ένα άλλο κριτήριο, πράγμα που δεν συμβαίνει μια Pareto βέλτιστη λύση. Γι' αυτό το λόγο ασθενείς pareto λύσεις δεν είναι επιθυμητές σε πραγματικά προβλήματα, αλλά συχνά συναντάμε περιπτώσεις όπου μόνο ασθενή pareto βέλτιστα εγγυώνται θεωρητικά.



Ασθενείς Pareto λύσεις στον χώρο αντικειμενικών συναρτήσεων.

Ορισμός 8 : Σύνολο Pareto Βέλτιστων Λύσεων (Pareto Optimal Set)

Για ένα δεδομένο πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης $F(x)$, το σύνολο των Pareto βέλτιστων λύσεων (P^*) ορίζεται ως εξής :

$$P^* := \{x \in \Omega \mid \neg \exists x' \in \Omega \ F(x') \preceq F(x)\}.$$

Ορισμός 9 : Μέτωπο Pareto (Pareto Front)

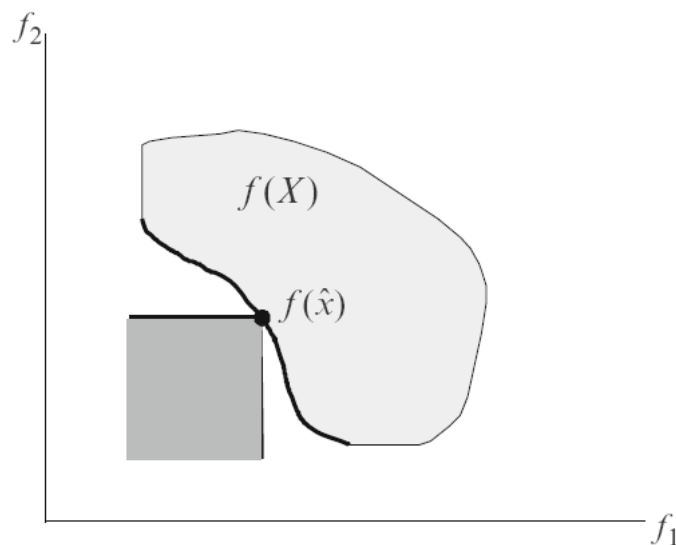
Για ένα δεδομένο πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης $F(x)$ και για ένα σύνολο Pareto βέλτιστων λύσεων P^* , το Μέτωπο Pareto (Pareto Front) (PF^*) ορίζεται ως εξής :

$$PF^* := \{ \bar{u} = F(x) = (f_1(x), \dots, f_k(x)) \mid x \in P^* \}.$$

Το σύνολο των Pareto βέλτιστων λύσεων στον χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων (οι προκύπτουσες δηλαδή τιμές των αντίστοιχων αντικειμενικών

συναρτήσεων εάν σε αυτές αντικαταστήσουμε τις τιμές των στοιχείων των διανυσμάτων σχεδίασης) καλείται και Μέτωπο Pareto (Pareto frontier or Efficient frontier or Pareto front).

Από δω και στο εξής, θα ήταν πιο βολικό να θεωρούμε το βέλτιστο Pareto στον χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων όπως στο επόμενο σχήμα παρά στον χώρο των μεταβλητών σχεδίασης. Τότε το γεγονός ότι ένα σημείο χ είναι Pareto βέλτιστο σημαίνει ότι το σύνολο $y + \mathbb{R}_-^l$ και $f(X)$ δεν έχουν κανένα κοινό σημείο εκτός του $y(= f(\chi))$.



Μέτωπο Pareto (Pareto frontier) (έντονη γραμμή) στον χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων.

Οι Pareto βέλτιστες λύσεις είναι αυτές μέσα στο χώρο σχεδίασης των οποίων τα στοιχεία των αντίστοιχων διανυσμάτων σχεδίασης δεν μπορούν να βελτιωθούν περαιτέρω ταυτόχρονα. Αυτές οι λύσεις είναι επίσης γνωστές και σαν non-inferior (μη κατώτερες), admissible (αποδεκτές), ή efficient (αποτελεσματικές) και με το ολικό σύνολο να αναπαρίστανται ως P^* ή P_{true} ($P_{πραγματικό}$). Τα αντίστοιχα διανύσματα σχεδίασης είναι γνωστά σαν nondominated («μη κυριαρχούμενα»). Επιλέγοντας ένα διάνυσμα ή διανύσματα από αυτό το σύνολο (το Pareto Front set ή PF_{true}), αδιαμφισβήτητα δηλώνει ότι αυτό είναι μια αποδεκτή Pareto βέλτιστη λύση (genotypes). Αυτά (τα genotypes) είναι το σύνολο όλων των λύσεων των οποίων τα αντίστοιχα διανύσματα είναι nondominated. Οι λύσεις κατηγοριοποιούνται με βάση την φαινοτυπική τους έκφραση. Η έκφραση τους (τα «μη κυριαρχούμενα διανύσματα» ή the nondominated vectors), όταν σχεδιαστεί (γραφική αναπαράσταση)

στον χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων ή χώρο κριτηρίων (phenotype space), είναι γνωστή ως μέτωπο Pareto.

Γενικά ,και για πολλά προβλήματα μπορεί να υπάρχουν πολλές Pareto λύσεις, ακόμα και άπειρες. Η τελική επιλογή γίνεται μεταξύ αυτών λαμβάνοντας υπόψη την «ολική επιθυμητή ισορροπία» όλων των κριτηρίων. Αυτό είναι ένα πρόβλημα καθαρά της κρίσης του σχεδιαστή. **Η γενική επιθυμητή ισορροπία μεταξύ των κριτηρίων συνήθως καλείται trade-off.** Πρέπει να τονιστεί ότι σε μερικά πραγματικά προβλήματα υπάρχουν παρά πολλά κριτήρια (αντικειμενικές συναρτήσεις), πολλές φορές και πάνω από εκατό όπως στην κατασκευή μιας κρεμαστής γέφυρας ή ενός φακού μιας κάμερας. Επομένως η ανάπτυξη αποτελεσματικών μεθόδων οι οποίες θα βοηθούν τους σχεδιαστές – λήπτες αποφάσεων να «ζυγίζουν» αυτά τα κριτήρια με ευκολία είναι σημαντική.

2.6.2 Διατύπωση και Μαθηματικός ορισμός προβλήματος

πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης (Multi Objective Optimization Problem Formulation and Mathematical Definition).

Ένα πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης (ή πρόβλημα διανυσματικής βελτιστοποίησης) με ανισοτικούς περιορισμούς μπορεί να οριστεί ως εξής :

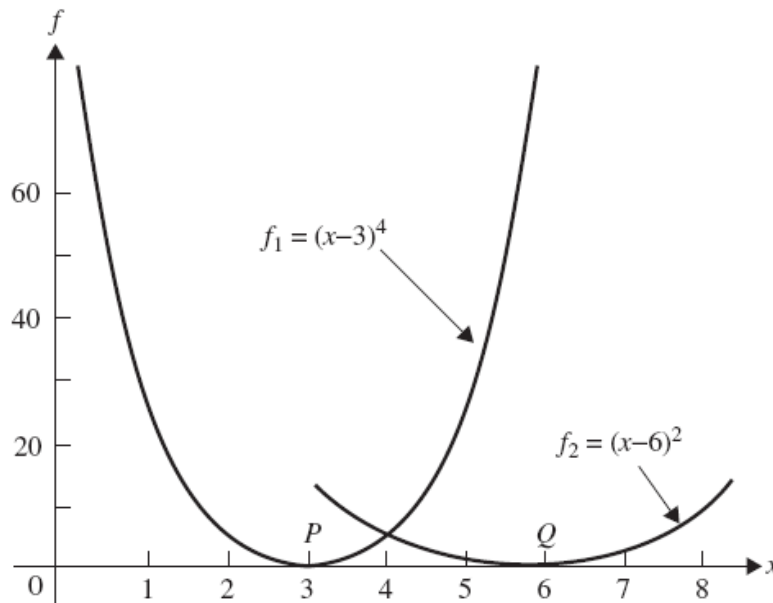
$$\text{Εύρεση } X = \left\{ \begin{array}{c} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{array} \right\} \text{ το οποίο ελαχιστοποιεί ,}$$

$$f_1(X) , f_2(X) , f_3(X) , \dots , f_k(X)$$

και υπόκεινται στους περιορισμούς :

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

Όπου το k δηλώνει τον αριθμό των αντικειμενικών συναρτήσεων προς ελαχιστοποίηση. Οποιοσδήποτε ή όλες οι συναρτήσεις $f_i(X)$, $i=1, \dots, k$, και $g_j(X)$ μπορούν να είναι μη γραμμικές. Το πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι γνωστό ως πρόβλημα διανυσματικής ελαχιστοποίησης.



Σε πολλά πραγματικά προβλήματα, τα υπό μελέτη κριτήρια αντικρούονται μεταξύ τους. Έτσι, βελτιστοποιώντας το X με βάση μόνο ένα κριτήριο οδηγεί πολύ συχνά σε μη αποδεκτά αποτελέσματα με βάση τα υπόλοιπα κριτήρια. Γενικά λοιπόν, είναι σχεδόν απίθανο να υπάρχει ένα διάνυσμα X το οποίο να ελαχιστοποιεί όλες τις k αντικειμενικές συναρτήσεις (κριτήρια) ταυτόχρονα. Μια λογική αντιμετώπιση ενός πολυκριτηριακού προβλήματος είναι η εξέταση ενός συνόλου αποδεκτών λύσεων καθεμία από τις οποίες ικανοποιεί τα κριτήρια μέχρι έναν αποδεκτό βαθμό χωρίς να «κυριαρχείται» (dominated) από καμία άλλη λύση. Γι' αυτό το λόγο η θεωρία του Pareto βέλτιστου έχει ενσωματωθεί στα προβλήματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης.

Με άλλα λόγια, μια εφικτή λύση X καλείται Pareto βέλτιστη εάν δεν υπάρχει άλλη εφικτή λύση Y η οποία θα ελάττωνε την τιμή κάποιας από τις k αντικειμενικές συναρτήσεις, χωρίς με αυτό να προκαλέσει μια ταυτόχρονη αύξηση στην τιμή τουλάχιστον μιας άλλης εκ των k αντικειμενικής συνάρτησης. Για παράδειγμα, έστω

ότι οι αντικειμενικές συναρτήσεις δίνονται από $f_1 = (x - 3)^4$ και $f_2 = (x - 6)^2$ των οποίων οι γραφικές παραστάσεις φαίνονται στο παραπάνω σχήμα. Γι' αυτό το πρόβλημα όλες οι τιμές του x μεταξύ του 3 και του 6 (σημεία πάνω στη γραμμή PQ) δηλώνουν Pareto βέλτιστες λύσεις.

2.6.3 Στόχος αλγορίθμων βελτιστοποίησης πολυκριτηριακών προβλημάτων (*The goal of multiobjective optimization algorithms*)

Ο απόλυτος – μέγιστος στόχος ενός αλγορίθμου βελτιστοποίησης πολυκριτηριακών προβλημάτων είναι να αναγνωρίζει και να υπολογίζει αποτελεσματικά λύσεις μέσα στο σύνολο των Pareto βέλτιστων. Ωστόσο, η αναγνώριση ολοκλήρου του συνόλου των Pareto βέλτιστων, για πολλά πολυκριτηριακά προβλήματα είναι πρακτικά ακατόρθωτη λόγω του τεραστίου του μεγέθους. Επιπροσθέτως για πολλά προβλήματα και ειδικά για συνδυαστικά πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης, μια απόδειξη της ύπαρξης βέλτιστης λύσης είναι υπολογιστικά ανέφικτη. Επομένως μια λογική και πρακτική προσέγγιση στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση είναι η εξέταση ενός συνόλου λύσεων (του πασίγνωστου συνόλου Pareto) που αντιπροσωπεύει το σύνολο των Pareto βέλτιστων όσο το δυνατόν καλύτερα μπορούμε. Με αυτά τα στοιχεία υπόψη , μια πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση θα πρέπει να επιτυχαίνει τους επομένους τρεις αντικρουόμενους στόχους :

- 1) Το καλύτερο δυνατό προκύπτον μέτωπο Pareto θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο «κοντά» στο πραγματικό μέτωπο Pareto (true Pareto front). Ιδανικά, το καλύτερο δυνατό προκύπτον σύνολο Pareto λύσεων θα πρέπει να είναι ένα υποσύνολο των πραγματικών βέλτιστων Pareto λύσεων.
- 2) Οι λύσεις μέσα στο καλύτερο δυνατό προκύπτον σύνολο λύσεων Pareto θα πρέπει να είναι ομαλά – ομοιόμορφα – κανονικά κατανεμημένες και ποικίλες πάνω στο μέτωπο Pareto με σκοπό να παρέχουν στον σχεδιαστή – λήπτη των αποφάσεων μια πραγματική εικόνα των trade-offs.

- 3) Το καλύτερο δυνατό προκύπτον μέτωπο Pareto πρέπει να συλλαμβάνει ολόκληρο το φάσμα του πραγματικού Pareto μετώπου (Pareto frontier). Αυτό απαιτεί την εξέταση λύσεων στα απολύτως ακραία σημεία του χώρου των αντικειμενικών συναρτήσεων.

Για ένα δεδομένο υπολογιστικό χρόνο, ο πρώτος στόχος επιτυγχάνεται καλύτερα εστιάζοντας (εντείνοντας) την έρευνα σε μια συγκεκριμένη περιοχή του μετώπου Pareto. Αντιθέτως, ο δεύτερος στόχος απαιτεί η όλη προσπάθεια της έρευνας να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη σε όλο το μέτωπο Pareto. Ο τρίτος στόχος σκοπεύει στην επέκταση του μετώπου Pareto και προς τις δυο κατευθύνσεις, ώστε να γίνει μια εξερεύνηση νέων ακραίων λύσεων.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι τους οποίους θα δούμε και στις επόμενες ενότητες είναι μια σχετικά νέα μέθοδος η οποία προσπαθεί να επιτύχει αυτούς τους τρεις αντικρουόμενους στόχους ενώ επιλύει προβλήματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης.

2.7 Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms)

Κατά τη διάρκεια των τριών τελευταίων δεκαετιών υπάρχει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον σε αλγορίθμους, οι οποίοι βασίζονται σε αναλογίες με τις φυσικές διαδικασίες. Η εμφάνιση των μαζικά παράλληλων ηλεκτρονικών υπολογιστών έκανε αυτούς τους αλγορίθμους να αποκτήσουν πρακτικό ενδιαφέρον. Στους πιο γνωστούς αλγορίθμους αυτής της κατηγορίας περιλαμβάνονται οι **γενετικοί αλγόριθμοι**, ο εξελικτικός προγραμματισμός, οι εξελικτικές στρατηγικές, η μέθοδοι τοπικής αναζήτησης, τα συστήματα ταξινόμησης και τα νευρωνικά δίκτυα. Οι παραπάνω αλγόριθμοι, αν και έγιναν γνωστοί ως τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στην Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence) και πιο συγκεκριμένα στη Μάθηση Μηχανής (Machine Learning), πρόσφατα αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία ως αλγόριθμοι Υπολογιστικής Νοημοσύνης (Computational Intelligence).

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήσα μία κλάση αυτών των αλγορίθμων, και συγκεκριμένα αυτούς που βασίζονται στην αρχή της εξέλιξης (επιβίωση του

καταλληλότερου). Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί αλγόριθμοι σε αυτή την κατηγορία. Για να υπογραμμίσουμε τις ομοιότητές τους χρησιμοποιούμε τον κοινό όρο «εξελικτικά προγράμματα». Σε αυτούς τους αλγορίθμους ένας πληθυσμός από άτομα (δυναμικές λύσεις) υποβάλλεται σε μια ακολουθία από μοναδιαίους (τύπου μετάλλαξης) και υψηλότερης τάξης (τύπου διασταύρωσης) μετασχηματισμούς. Αυτά τα άτομα ανταγωνίζονται για επιβίωση: ένα σχήμα επιλογής προκατειλημμένο υπέρ των καταλληλότερων ατόμων, επιλέγει την επόμενη γενιά. Μετά από ένα αριθμό επαναλήψεων, το πρόγραμμα συγκλίνει, ελπίζοντας ότι το καλύτερο άτομο αναπαριστά τη βέλτιστη λύση. Τα εξελικτικά προγράμματα μπορούν να θεωρηθούν σαν γενίκευση των Γενετικών Αλγορίθμων. Οι κλασικοί Γενετικοί Αλγόριθμοι λειτουργούν με σταθερού μήκους δυαδικές συμβολοσειρές, οι οποίες δεν είναι απαραίτητες για τα εξελικτικά προγράμματα. Επίσης, τα εξελικτικά προγράμματα συνήθως ενσωματώνουν μία ποικιλία από «γενετικούς» τελεστές, ενώ οι Γενετικοί Αλγόριθμοι χρησιμοποιούν δυαδική κωδικοποίηση, δηλαδή συμβολοσειρές δυαδικών ψηφίων στις οποίες εφαρμόζονται οι κατάλληλοι τελεστές για τη διασταύρωση και τη μετάλλαξη των ατόμων του πληθυσμού.

Τελικά, οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms) (ΓΑ ή GA) είναι αλγόριθμοι υλοποίησης τεχνικών αναζήτησης και βελτιστοποίησης, βασισμένοι στην επιστήμη της γενετικής και στην φυσική επιλογή. Ένας γενετικός αλγόριθμος επιτρέπει σε έναν «πληθυσμό» αποτελούμενο από πολλά «άτομα» να εξελιχτεί κάτω από συγκεκριμένους κανόνες επιλογής σε μια κατάσταση μεγιστοποίησης της «υγείας» (fitness) (πχ. ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης κόστους).

Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε αρχικά από τον John Holland (1975) (University of Michigan) κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1960 και 1970 και τελικά κατέστη δημοφιλής από έναν από τους μαθητές του, τον David Goldberg ο οποίος κατάφερε να λύσει ένα δύσκολο πρόβλημα που περιελάμβανε την διαχείριση – έλεγχο της ροής ενός συστήματος σωληνώσεων μεταφοράς υγραερίου και πάνω στο οποίο έκανε την διατριβή του (Goldberg,1989). Η αρχική πρωτότυπη δουλειά του Holland είχε περιληφθεί και δημοσιευτεί στο βιβλίο του. Ήταν ο πρώτος που επιχείρησε να αναπτύξει μια θεωρητική βάση για τους Γενετικούς Αλγορίθμους (GAs) μέσω της θεωρίας των «Σχημάτων-Προτύπων» (Schema Theorem). Η δουλειά του De Jong (1975) έδειξε την μεγάλη χρησιμότητα των γενετικών αλγορίθμων στον τομέα της βελτιστοποίησης συναρτήσεων και έκανε την πρώτη συνολική και κοινά αποδεκτή προσπάθεια να βρει βέλτιστες παραμέτρους Γενετικών Αλγορίθμων. Ο Goldberg ήταν εκείνος που συνέβαλε τα μέγιστα για την εξέλιξη των Γενετικών Αλγορίθμων με

τις εξαιρετικές εφαρμογές που έκανε με χρήση των γενετικών αλγορίθμων και βεβαίως το βιβλίο του, που εξέδωσε το 1989. Από τότε, πολλές παραλλαγές εξελικτικού προγραμματισμού (evolutionary programming) έχουν αναπτυχθεί, με διάφορους βαθμούς επιτυχίας.

2.7.1 Γενετικοί Αλγόριθμοι – Βασική Ιδέα

Η βασική ιδέα που κρύβεται πίσω από τους Γενετικούς Αλγόριθμους (ΓΑ) είναι η μίμηση των μηχανισμών της φύσης. Για να γίνει κατανοητή η λειτουργία ενός Γενετικού Αλγορίθμου, είναι σκόπιμο να δοθούν, σε αυτή την ενότητα, ορισμένα στοιχεία από τη Θεωρία της Εξέλιξης των Ειδών, από την οποία δανείζονται στοιχεία οι αλγόριθμοι αυτοί, και στη συνέχεια θα δούμε πώς στοιχεία αυτής της θεωρίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δομηθεί ένας αλγόριθμος αναζήτησης και βελτιστοποίησης. Επίσης, θα παρουσιαστούν τα βασικά πλεονεκτήματα αυτών των αλγορίθμων.

Εισαγωγικές Παρατηρήσεις

Τα τελευταία τριάντα χρόνια, έχει παρατηρηθεί ένα συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για ανάπτυξη μεθόδων επίλυσης προβλημάτων βασισμένων στις αρχές της Γενετικής Εξέλιξης και της Κληρονομικότητας. Τα μειονεκτήματα των κλασικών μεθόδων αναζήτησης και βελτιστοποίησης, καθώς και η συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για παραγωγή λογισμικού που να μπορεί να εκμεταλλεύεται πιο αποδοτικά τις τεράστιες δυνατότητες του υλικού, ήταν η βασική αιτία που ώθησε τους επιστήμονες σ' αυτήν την αναζήτηση. Αυτού του είδους οι μέθοδοι λειτουργούν διατηρώντας έναν πληθυσμό κωδικοποιημένων πιθανών λύσεων και εφαρμόζοντας πάνω σε αυτόν διάφορες διαδικασίες επιλογής του καλύτερου ατόμου, καθώς και διάφορους γενετικούς τελεστές. Οι τελεστές αυτοί αντιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο αναπαράγονται και μεταλλάσσονται τα χρωμοσώματα των κυττάρων των ζωντανών οργανισμών. Έτσι, περνώντας από γενιά σε γενιά, τα συστήματα αυτά δημιουργούν συνεχώς νέους πληθυσμούς πιθανών λύσεων χρησιμοποιώντας, τόσο κομμάτια και στοιχεία από την προηγούμενη γενιά, όσο και εντελώς καινούρια κομμάτια που δοκιμάζονται για τυχόν καλή απόδοσή τους.

Επανελημμένες δοκιμές και πειράματα έχουν δείξει ότι μια «φυσική» αναπαράσταση των πιθανών λύσεων για ένα δεδομένο πρόβλημα, σε συνδυασμό με την εφαρμογή σε

αυτή μιας οικογένειας γενετικών τελεστών, αποτελεί πολύ χρήσιμο εργαλείο στην προσπάθεια προσέγγισης των πραγματικών λύσεων σε μια πολύ μεγάλη ποικιλία προβλημάτων και εφαρμογών. Αυτό το γεγονός μετατρέπει αυτή την προσέγγιση «φυσικού μοντέλου» σε μια πολλά υποσχόμενη κατεύθυνση, όσον αφορά την επίλυση προβλημάτων γενικότερα. Η πρώτη εμφάνιση των Γενετικών Αλγορίθμων χρονολογείται στις αρχές του 1950, όταν διάφοροι βιολόγοι επιστήμονες αποφάσισαν να χρησιμοποιήσουν υπολογιστές στην προσπάθειά τους να προσομοιώσουν πολύπλοκα βιολογικά συστήματα. Η συστηματική τους ανάπτυξη, όμως, που οδήγησε στη μορφή με την οποία είναι γνωστοί και σήμερα, όπως έχει ήδη αναφερθεί πραγματοποιήθηκε στις αρχές του 1970 από τον John Holland και τους συνεργάτες του στο Πανεπιστήμιο του Michigan.

2.7.1.1 Σύντομη Αναφορά στην Θεωρία της Εξέλιξης των Ειδών

(Θεωρία του Δαρβίνου)

Η θεωρία της Εξέλιξης των Ειδών (Evolution of Species) που αναπτύχθηκε από τον Δαρβίνο στα μέσα του περασμένου αιώνα, προκάλεσε μεγάλη αναστάτωση, αφού ερχόταν σε σύγκρουση με τις επικρατούσες θρησκευτικές αντιλήψεις περί προέλευσης της ζωής. Με την πάροδο ενός και πλέον αιώνα, ο θόρυβος αυτός δεν έχει κοπάσει πλήρως, όμως η θεωρία έχει γίνει αποδεκτή από το σύνολο των επιστημόνων, γιατί κατόρθωσε να πείσει και να δώσει ικανοποιητικές απαντήσεις σε θεμελιώδη ερωτήματα. Σκοπός της θεωρίας αυτής είναι να δώσει μια εξήγηση για το φαινόμενο της ζωής, την προέλευσή της και τις βασικές λειτουργίες της. Τα κυριότερα σημεία της, που σχετίζονται και ερμηνεύουν τον τρόπο λειτουργίας των Γενετικών Αλγορίθμων, είναι τα εξής:

- Δεν υπάρχει αντικειμενική βάση διαχωρισμού των ζωντανών οργανισμών σε ανώτερους και κατώτερους (εννοείται στο ίδιο βιολογικό είδος, λ.χ. των ανθρώπων). Σε κάθε βιολογικό είδος, μερικά άτομα αφήνουν περισσότερους απογόνους σε σύγκριση με τα υπόλοιπα και έτσι τα κληροδοτούμενα χαρακτηριστικά των αναπαραγωγικά επιτυχημένων ατόμων γίνονται περισσότερα στην επόμενη γενιά. Οι δυσκολίες, τα εμπόδια και οι αντιξοότητες που παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια της ζωής των οργανισμών είναι οι παράγοντες, που καθορίζουν ποιοι από αυτούς θα κατορθώσουν να

ζήσουν και να πολλαπλασιαστούν. Έτσι, με την αλλαγή του περιβάλλοντος και των συνθηκών διαβίωσης, αλλάζουν και τα χαρακτηριστικά τους προσπαθώντας να προσαρμοστούν κάθε φορά, με στόχο την εξασφάλιση της επιβιώσής τους.

- Αυτή η αλλαγή, όμως, που συμβαίνει στα χαρακτηριστικά των ατόμων είναι αλλαγή στα **χρωμοσώματά** τους (**chromosomes**), που είναι πολύπλοκα οργανικά μόρια τα οποία κωδικοποιούν τη δομή και τα χαρακτηριστικά τους.

Τα χρωμοσώματα αποτελούνται από μικρότερα μέρη, γνωστά ως **γονίδια** (**genes**). Το σύνολο της γενετικής πληροφορίας που είναι κωδικοποιημένο στα γονίδια ονομάζεται **γονότυπος** (**genotype**). Η δημιουργία ενός νέου οργανισμού περιλαμβάνει την αποκωδικοποίηση των χρωμοσωμάτων. Το σύνολο των «ορατών» χαρακτηριστικών του και της συμπεριφοράς του, που καθορίζονται από τις πληροφορίες των γονιδίων, συνιστούν το **φαινότυπο** (**phenotype**).

- Κυρίαρχες λειτουργίες του φαινομένου της εξέλιξης είναι η **αναπαραγωγή** (**reproduction**) και η **μετάλλαξη** (**mutation**). Κατά τη μετάλλαξη γίνεται με τυχαίο τρόπο η αλλαγή της δομής των χρωμοσωμάτων, συνήθως από λανθασμένη αντιγραφή βιολογικών μορίων ή από εξωγενείς παράγοντες (π.χ. ακτινοβολία), έχοντας ως άμεσο αποτέλεσμα την αλλαγή σε κάποιο χαρακτηριστικό. Η μετάλλαξη, μερικές φορές, μπορεί να προκαλέσει βελτιώσεις και, χωρίς αμφιβολία, μερικά λάθη που έγιναν αποτέλεσαν σημαντικό παράγοντα για την προοδευτική εξέλιξη της ζωής.
- Προϊόν της αναπαραγωγής είναι ένας νέος οργανισμός, τα χρωμοσώματα του οποίου αποτελούνται από γονίδια που προέρχονται τα μισά από τον πατέρα και τα μισά από τη μητέρα. Έτσι, για κάθε χαρακτηριστικό, το νέο άτομο έχει πάρει ένα γονίδιο από κάθε γονέα. Μερικές φορές, τα δύο αυτά γονίδια συμφωνούν μεταξύ τους, όσον αφορά την «τιμή» που θα δώσουν στο χαρακτηριστικό, π.χ. γαλάζιο χρώμα ματιών, ενώ άλλες φορές δεν συμφωνούν, π.χ. το ένα υποδεικνύει καστανό χρώμα ματιών και το άλλο γαλάζιο. Στη δεύτερη περίπτωση, κυριαρχεί η «τιμή» ενός γονιδίου (π.χ. του καστανού) και αγνοείται η «τιμή» του άλλου, μολονότι το δεύτερο μπορεί να περάσει σε επόμενες γενιές. Το γονίδιο που τελικά καθορίζει το χαρακτηριστικό λέγεται **κυρίαρχο** ή **επικρατές** (**dominant**) και το άλλο **υπολειπόμενο** (**recessive**). Γονίδια που διεκδικούν την ίδια θέση σε ένα

χρωμόσωμα (δηλαδή που είναι υπεύθυνα για το ίδιο χαρακτηριστικό), λέγονται **αλληλόμορφα (alleles)**.

Όλος αυτός ο μηχανισμός της φυσικής επιλογής φάνηκε ιδιαίτερα ελκυστικός στον John Holland, πρωτοπόρο των Γενετικών Αλγορίθμων, στις αρχές της δεκαετίας του '70. Ο Holland φαντάστηκε ότι κάποιες ιδέες και λειτουργίες που εφαρμόζει η φύση στα συστήματά της θα μπορούσαν να έχουν αποτελέσματα, αν ενσωματώνονταν σε αλγόριθμους για υπολογιστές, ώστε να προκύψουν αποδοτικές τεχνικές επίλυσης δύσκολων προβλημάτων. Αποτέλεσμα αυτής της εργασίας του Holland ήταν οι Γενετικοί Αλγόριθμοι, μια καινούργια εξελισσόμενη και πολλά υποσχόμενη τεχνική αναζήτησης και βελτιστοποίησης.

2.7.2 Η Δομή ενός Γενετικού Αλγορίθμου

Όπως ήδη αναφέραμε, οι ΓΑ χρησιμοποιούν ορολογία δανεισμένη από το χώρο της φυσικής Γενετικής. Κατ' αναλογία με τα έμβια όντα, αναφέρονται σε **άτομα** ή **γονότυπα** μέσα σε έναν πληθυσμό. Πολύ συχνά αυτά τα άτομα καλούνται επίσης **χρωμοσώματα**. Αυτό μπορεί να οδηγήσει μερικούς σε λάθος συμπεράσματα, αν γίνει παραλληλισμός με τους φυσικούς οργανισμούς, όπου κάθε κύτταρο κάθε συγκεκριμένου είδους περιέχει έναν συγκεκριμένο αριθμό χρωμοσωμάτων (τα ανθρώπινα κύτταρα για παράδειγμα περιέχουν 46 χρωμοσώματα). Στους ΓΑ αναφερόμαστε σχεδόν πάντα σε άτομα με ένα μόνο χρωμόσωμα. Τα χρωμοσώματα αποτελούνται από διάφορα στοιχεία που ονομάζονται **γονίδια** και είναι διατεταγμένα σε γραμμική ακολουθία. Κάθε γονίδιο επηρεάζει την κληρονομικότητα ενός ή περισσότερων χαρακτηριστικών. Τα γονίδια που επηρεάζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του ατόμου βρίσκονται και σε συγκεκριμένες θέσεις του χρωματοσώματος που καλούνται **τόποι (loci)**. Κάθε χαρακτηριστικό γνώρισμα του ατόμου (όπως για παράδειγμα το χρώμα μαλλιών) έχει την δυνατότητα να εμφανιστεί με διάφορες μορφές, ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το αντίστοιχο γονίδιο που το επηρεάζει. Οι διαφορετικές αυτές καταστάσεις, που μπορεί να πάρει το γονίδιο, καλούνται **αλληλόμορφα** (τιμές χαρακτηριστικού γνωρίσματος).

Κάθε γονότυπος (που στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ένα μόνο χρωμόσωμα) αναπαριστά μια πιθανή λύση σε ένα πρόβλημα. Το μεταφρασμένο περιεχόμενο ενός συγκεκριμένου χρωμοσώματος καλείται **φαινότυπος** και καθορίζεται από τον χρήστη,

ανάλογα με τις ανάγκες και τις απαιτήσεις του. Μια διαδικασία εξέλιξης που εφαρμόζεται πάνω σε έναν πληθυσμό χρωμοσωμάτων αντιστοιχεί σε ένα εκτενές ψάξιμο μέσα σε ένα χώρο από πιθανές λύσεις. Απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχημένη έκβαση ενός τέτοιου ψαξίματος αποτελεί η εξισορρόπηση δύο διαδικασιών που είναι προφανώς αντικρουόμενες, της εκμετάλλευσης και διατήρησης των καλύτερων λύσεων και της όσο το δυνατόν καλύτερης εξερεύνησης όλου του διαστήματος.

Η εκτενής χρησιμοποίηση των ΓΑ ως εργαλείο βελτιστοποίησης είναι εύκολο να δώσει σε κάποιον την εντύπωση ότι οι ΓΑ είναι αποκλειστικά αλγόριθμοι βελτιστοποίησης. Αυτό, όμως, δεν ευσταθεί, διότι υπάρχουν πολλές περιπτώσεις, όπου οι ΓΑ αποτυγχάνουν να βρουν μια προφανή βέλτιστη λύση μέσα σε ένα συγκεκριμένο χώρο ψαξίματος. Βέβαια, αυτό μπορεί να οφείλεται σε ακατάλληλη κωδικοποίηση του προβλήματος. Για την αποφυγή δημιουργίας αυτής της λανθασμένης εντύπωσης, οι ΓΑ πρέπει να αντιμετωπίζονται και ως μια ιδεατή προσομοίωση μιας φυσικής διαδικασίας, τέτοια ώστε να ενσωματώνει τους στόχους και τους σκοπούς της διαδικασίας αυτής. Παρόλα αυτά, δεν πρέπει να παραγνωρίζουμε ότι η βελτιστοποίηση αποτελεί ένα πολύ σημαντικό κομμάτι των εφαρμογών των ΓΑ.

Κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, το ενδιαφέρον για τις διαδικασίες βελτιστοποίησης έχει αυξηθεί τόσο πολύ, ώστε να υπάρχουν πολύπλοκα και με πολύ αυστηρούς περιορισμούς προβλήματα, που να μπορούν να λυθούν μόνο προσεγγιστικά από τους σημερινούς υπολογιστές. Οι ΓΑ αποσκοπούν στην εξυπηρέτηση τέτοιου είδους προβλημάτων. Εάν και ανήκουν στην κατηγορία των στοχαστικών αλγορίθμων, διαφέρουν σε πολύ μεγάλο βαθμό από τους αλγόριθμους που εφαρμόζουν τυχαίες μεθόδους αναζήτησης και βελτιστοποίησης, αφού είναι σε θέση να συνδυάζουν στοιχεία και από άμεσες και από στοχαστικές τεχνικές αναζήτησης. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος για τον οποίο οι ΓΑ θεωρούνται πιο εύρωστοι από τις υπάρχουσες μεθόδους άμεσης αναζήτησης. Ένα άλλο εξίσου σημαντικό χαρακτηριστικό τους είναι ότι διατηρούν έναν πληθυσμό πιθανών λύσεων πάνω στον οποίο πειραματίζονται, σε αντίθεση με όλες τις άλλες μεθόδους αναζήτησης που επεξεργάζονται ένα μόνο σημείο του διαστήματος αναζήτησης.

Ένας ΓΑ πραγματοποιεί αναζήτηση σε πολλές κατευθύνσεις με το να διατηρεί έναν πληθυσμό από πιθανές λύσεις και να υποστηρίζει καταγραφή και ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ αυτών των κατευθύνσεων. Ο πληθυσμός υφίσταται μια προσομοιωμένη γενετική εξέλιξη. Σε κάθε γενιά, οι σχετικά «καλές» λύσεις

αναπαράγονται, ενώ οι σχετικά «κακές» αφαιρούνται. Ο διαχωρισμός και η αξιολόγηση των διαφόρων λύσεων γίνεται με την βοήθεια μιας *αντικειμενικής συνάρτησης* ή *συνάρτησης ικανότητας* (*objective ή fitness function*), η οποία παίζει το ρόλο του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο εξελίσσεται ο πληθυσμός. Επίσης στη βιβλιογραφία αναφέρεται και ως συνάρτηση αξιολόγησης και συνάρτηση καταλληλότητας.

Η δομή ενός απλού γενετικού αλγορίθμου έχει σε γενικές γραμμές ως εξής:

Κατά την διάρκεια της επαναληπτικής εκτέλεσης t , ο ΓΑ διατηρεί ένα πληθυσμό από πιθανές λύσεις:

$$P(t) = \{x_1^t, \dots, x_n^t\}.$$

Κάθε λύση x_i^t αξιολογείται και δίνει ένα μέτρο της καταλληλότητας και ορθότητάς της. Αφού ολοκληρωθεί η αξιολόγηση όλων των στοιχείων του πληθυσμού, δημιουργείται ένας νέος πληθυσμός (επαναληπτική εκτέλεση $t+1$) που προκύπτει από την επιλογή των πιο κατάλληλων στοιχείων του πληθυσμού της προηγούμενης γενιάς. Μερικά μέλη από τον καινούριο αυτό πληθυσμό υφίστανται μετατροπές με τη βοήθεια των διαδικασιών της *μετάλλαξης* (*mutation*) και της *διασταύρωσης* (*crossover ή mating*) σχηματίζοντας νέες πιθανές λύσεις. Η διασταύρωση συνδυάζει τα στοιχεία δύο χρωμοσωμάτων γονέων για να δημιουργήσει δύο νέους απογόνους ανταλλάσσοντας αντίστοιχα κομμάτια από τους γονείς.

Για παράδειγμα, έστω ότι οι γονείς αναπαριστώνται με διανύσματα πέντε διαστάσεων $(a_1, b_1, c_1, d_1, e_1)$ και $(a_2, b_2, c_2, d_2, e_2)$, τότε οι απόγονοι (με *σημείο διασταύρωσης* — *crossover point = 2*) είναι οι $(a_1, b_1, c_2, d_2, e_2)$ και $(a_2, b_2, c_1, d_1, e_1)$. Διαισθητικά μπορούμε να πούμε ότι η διασταύρωση εξυπηρετεί την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ διαφορετικών πιθανών λύσεων. Εδώ πρέπει να γίνει η εξής παρατήρηση. Αν οι μεταβλητές στα παραπάνω διανύσματα είναι δυαδικές, τότε κάθε διάνυσμα αναπαριστά την τιμή μιας μεταβλητής, δηλαδή ένα χρωμόσωμα. Στην περίπτωση που είναι πραγματικές, τότε καθεμία είναι ένα χρωμόσωμα, δηλαδή κάθε διάνυσμα αναπαριστά τις τιμές πολλών μεταβλητών, δηλαδή αποτελεί ένα γονότυπο. Για παράδειγμα, η βελτιστοποίηση μίας συνάρτησης πολλών μεταβλητών, απαιτεί την κωδικοποίηση της λύσης με ένα γονότυπο.

Η διαδικασία της μετάλλαξης αλλάζει αυθαίρετα ένα ή περισσότερα γονίδια ενός συγκεκριμένου χρωμοσώματος. Πραγματοποιείται με τυχαία αλλαγή γονιδίων και με πιθανότητα ίση με το *ρυθμό μετάλλαξης* (*mutation rate*). Διαισθητικά μπορούμε να

πούμε ότι η μετάλλαξη εξυπηρετεί την εισαγωγή νέων πιθανών λύσεων, διαφορετικών από τις υπάρχουσες, στον ήδη υπάρχοντα πληθυσμό.

Ένας ΓΑ για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα πρέπει να αποτελείται από τα παρακάτω πέντε τμήματα :

1. Μια γενετική αναπαράσταση των πιθανών λύσεων του προβλήματος.
2. Ένα τρόπο δημιουργίας ενός αρχικού πληθυσμού των πιθανών λύσεων.
3. Μια αντικειμενική συνάρτηση αξιολόγησης που παίζει το ρόλο του περιβάλλοντος, κατατάσσοντας τις λύσεις με βάση την καταλληλότητά τους.
4. Γενετικούς τελεστές που μετατρέπουν τη σύνθεση των παιδιών.
5. Τιμές για διάφορες παραμέτρους που χρησιμοποιεί ο γενετικός αλγόριθμος (μέγεθος πληθυσμού, πιθανότητες εφαρμογής των γενετικών τελεστών, κ.λπ.).

Στο σημείο αυτό πρέπει να γίνει η εξής παρατήρηση. Για να γίνει η αναπαράσταση μιας μεταβλητής, που παίρνει τιμές στο διάστημα $[a, b]$ σε δυαδική μορφή, απαιτείται ο καθορισμός του μήκους της συμβολοσειράς. Αυτό υπολογίζεται εύκολα, αν μετατρέψουμε το άνω όριο σε δυαδικό αριθμό, και μετρήσουμε το μήκος της συμβολοσειράς που προκύπτει.

2.7.2.1 Πλεονεκτήματα Γενετικών Αλγορίθμων

Η χρήση των ΓΑ σε διάφορες εφαρμογές είναι ελκυστική για αρκετούς λόγους. Οι κυριότεροι, ίσως, είναι οι εξής :

1. **Μπορούν να λύσουν δύσκολα προβλήματα γρήγορα και αξιόπιστα.** Ένας από τους σημαντικούς λόγους χρήσης των ΓΑ είναι η μεγάλη τους αποδοτικότητα. Τόσο η θεωρία, όσο και η πράξη έχουν δείξει ότι προβλήματα που έχουν πολλές, δύσκολα προσδιορισμένες, λύσεις μπορούν να αντιμετωπιστούν καλύτερα από ΓΑ. Είναι δε αξιοσημείωτο ότι συναρτήσεις που παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις και καθιστούν ανεπαρκείς άλλες μεθόδους στην εύρεση των ακροτάτων τους, για τους ΓΑ αυτές οι διακυμάνσεις δεν αποτελούν σημεία δυσχέρειας.
2. **Μπορούν εύκολα να συνεργαστούν με τα υπάρχοντα μοντέλα και συστήματα.** Οι ΓΑ προσφέρουν το σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης τους με προσθετικό τρόπο στα μοντέλα που χρησιμοποιούνται σήμερα, μη απαιτώντας την επανασχεδιάσή τους.

Μπορούν εύκολα να συνεργαστούν με τον υπάρχοντα κώδικα, χωρίς μεγάλο κόπο. Αυτό συμβαίνει, διότι χρησιμοποιούν μόνο πληροφορίες της διαδικασίας ή συνάρτησης που πρόκειται να βελτιστοποιήσουν, δίχως να ενδιαφέρει άμεσα ο ρόλος της μέσα στο σύστημα ή η όλη δομή του συστήματος.

3. Είναι εύκολα επεκτάσιμοι και εξελίξιμοι. Όπως θα γίνει σαφές στα επόμενα κεφάλαια, οι ΓΑ δεν αντιστέκονται σε αλλαγές, επεκτάσεις και μετεξελίξεις, ανάλογα με την κρίση του σχεδιαστή. Σε πολλές εφαρμογές, έχουν αναφερθεί λειτουργίες των ΓΑ, που δεν είναι αντιγραμμένες από τη φύση ή που έχουν υποστεί σημαντικές αλλαγές, πάντα προς όφελος της απόδοσης. Παραλλαγές στο βασικό σχήμα δεν είναι απλά ανεκτές, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις επιβάλλονται.

4. Μπορούν να συμμετέχουν σε υβριδικές μορφές με άλλες μεθόδους. Αν και η ισχύς των ΓΑ είναι μεγάλη, σε μερικές ειδικές περιπτώσεις προβλημάτων, όπου άλλες μέθοδοι συμβαίνει να έχουν πολύ υψηλή αποδοτικότητα, λόγω εξειδίκευσης, υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης ενός υβριδικού σχήματος ΓΑ με άλλη μέθοδο. Αυτό είναι αποτέλεσμα της μεγάλης ευελιξίας των ΓΑ

5. Εφαρμόζονται σε πολύ περισσότερα πεδία από κάθε άλλη μέθοδο. Το χαρακτηριστικό, που τους εξασφαλίζει αυτό το πλεονέκτημα, είναι η ελευθερία επιλογής των κριτηρίων που καθορίζουν την επιλογή μέσα στο τεχνικό περιβάλλον. Έτσι, ΓΑ μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην οικονομία, στο σχεδιασμό μηχανών, στην επίλυση μαθηματικών εξισώσεων, στην εκπαίδευση Νευρωνικών Δικτύων και σε πολλούς άλλους τομείς.

6. Δεν απαιτούν περιορισμούς στις συναρτήσεις που επεξεργάζονται. Ο κύριος λόγος που καθιστά τις παραδοσιακές μεθόδους δύσκαμπτες και ακατάλληλες για πολλά προβλήματα είναι η απαίτησή τους για ύπαρξη περιορισμών, όπως ύπαρξη παραγώγων, συνέχεια, όχι «θορυβώδεις» συναρτήσεις κτλ. Τέτοιου είδους ιδιότητες είναι αδιάφορες για τους ΓΑ πράγμα που τους κάνει κατάλληλους για μεγάλο φάσμα προβλημάτων.

7. Δεν ενδιαφέρει η σημασία της υπό εξέταση πληροφορίας. Η μόνη «επικοινωνία» του ΓΑ με το περιβάλλον του είναι η αντικειμενική συνάρτηση. Αυτό εγγυάται την επιτυχία του ανεξάρτητα από τη σημασία του προβλήματος. Βέβαια αυτό δε σημαίνει ότι δεν υπάρχουν άλυστα προβλήματα για τους ΓΑ Όπου όμως, δεν τα καταφέρνουν, η αιτία είναι η φύση του χώρου που ερευνούν και όχι το πληροφοριακό περιεχόμενο του προβλήματος.

8. Έχουν από τη φύση τους το στοιχείο του παραλληλισμού. Οι ΓΑ σε κάθε τους βήμα επεξεργάζονται μεγάλες ποσότητες πληροφορίας, αφού κάθε άτομο θεωρείται αντιπρόσωπος πολλών άλλων. Έχει υπολογιστεί ότι η αναλογία αυτή είναι της τάξεως $O(n^3)$, δηλαδή 10 άτομα αντιπροσωπεύουν περίπου 1000. Είναι, λοιπόν, προφανές ότι μπορούν να καλύψουν με αποδοτικό ψάξιμο μεγάλους χώρους σε μικρούς χρόνους.

9. Είναι η μόνη μέθοδος που κάνει ταυτόχρονα εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης και εκμετάλλευση της ήδη επεξεργασμένης πληροφορίας. Ο συνδυασμός αυτός σπάνια συναντάται σε οποιαδήποτε άλλη μέθοδο. Με το τυχαίο ψάξιμο γίνεται καλή εξερεύνηση του χώρου, αλλά δεν γίνεται εκμετάλλευση της πληροφορίας. Αντίθετα, με την αναζήτηση με μικρά άλματα στη συνάρτηση (hillclimbing) γίνεται καλή εκμετάλλευση της πληροφορίας, αλλά όχι καλή εξερεύνηση. Συνήθως τα δύο αυτά χαρακτηριστικά είναι ανταγωνιστικά και το επιθυμητό είναι να συνυπάρχουν και τα δύο προς όφελος της όλης διαδικασίας. Οι ΓΑ επιτυγχάνουν το βέλτιστο συνδυασμό εξερεύνησης και εκμετάλλευσης, πράγμα που τους κάνει ιδιαίτερα αποδοτικούς και ελκυστικούς.

10. *Επιδέχονται παράλληλη υλοποίηση.* Οι ΓΑ μπορούν να εκμεταλλευτούν τα πλεονεκτήματα των παράλληλων μηχανών, αφού λόγω της φύσης τους, εύκολα μπορούν να δεχτούν παράλληλη υλοποίηση. Το χαρακτηριστικό αυτό αυξάνει ακόμη περισσότερο την απόδοσή τους, ενώ σπάνια συναντάται σε ανταγωνιστικές μεθόδους.

2.7.3 Κύρια Χαρακτηριστικά Ενός Γενετικού Αλγορίθμου

Οι ΓΑ πλεονεκτούν αισθητά στη λύση προβλημάτων αναζήτησης και βελτιστοποίησης από τις παραδοσιακές μεθόδους. Αυτό συμβαίνει, διότι διαφέρουν θεμελιωδώς από αυτές. Τα κυριότερα νέα χαρακτηριστικά που τους διαφοροποιούν, αλλά και τους δίνουν υπεροχή είναι, σύμφωνα με τον D. Goldberg, τα εξής:

1. **Οι ΓΑ δουλεύουν με μια κωδικοποίηση ενός συνόλου τιμών που μπορούν να λάβουν οι μεταβλητές (οι οποίες αντιστοιχούν στα χρωμοσώματα της επιστήμης της γενετικής) και όχι με τις ίδιες τις μεταβλητές του προβλήματος:** Οι ΓΑ απαιτούν το σύνολο των φυσικών παραμέτρων της βελτιστοποίησης, να κωδικοποιηθεί σε συμβολοσειρές πεπερασμένου μήκους, κάνοντας χρήση ενός πεπερασμένου αλφάβητου. Επομένως, επιτρέπουν την επίλυση προβλημάτων συνεχών, διακριτών, ακέραιων και πραγματικών

μεταβλητών. Στην περίπτωση δε των συνεχών μεταβλητών το μέγεθος της συμβολοσειράς μπορεί να ποικίλει για την επίτευξη οποιασδήποτε επιθυμητής λύσης. Για παράδειγμα, αναφέρεται το εξής πρόβλημα βελτιστοποίησης: Έστω ένα μαύρο κουτί με πέντε δυαδικούς διακόπτες (on-off). Για κάθε συνδυασμό των διακοπών παράγεται μία έξοδος $f(s)$. Ζητείται ο συνδυασμός των διακοπών που μεγιστοποιεί την έξοδο. Με τις παραδοσιακές μεθόδους, το μέγιστο θα εντοπιζόταν με «παίξιμο» των διακοπών πηγαίνοντας από συνδυασμό σε συνδυασμό με ψάξιμο στα τυφλά, αφού δεν είναι γνωστός ο τύπος της συνάρτησης. Στο ΓΑ, όμως, η πρώτη ενέργεια είναι η κωδικοποίηση των διακοπών ως συμβολοσειρών πεπερασμένου μήκους. Μια απλή κωδικοποίηση θα μπορούσε να γίνει θεωρώντας μια δυαδική συμβολοσειρά μήκους πέντε, όπου η κάθε θέση αναπαριστά ένα διακόπτη. Το 1 αντιστοιχεί στη θέση on και το 0 στη θέση off. Δηλαδή, η συμβολοσειρά 11110 κωδικοποιεί το συνδυασμό κατά τον οποίο οι πρώτοι τέσσερις διακόπτες είναι on και ο τελευταίος off. Η κωδικοποίηση δεν είναι απαραίτητο να είναι πάντα δυαδική. Μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους, αρκετοί από τους οποίους ίσως και να μην είναι προφανείς. Το στοιχείο της κωδικοποίησης, είναι εκείνο που επιτρέπει στους ΓΑ να κάνουν παράλληλη επεξεργασία δεδομένων.

- 2. Οι ΓΑ κάνουν αναζήτηση σε πολλά σημεία ταυτόχρονα και όχι μόνο σε ένα:** Σε πολλές μεθόδους βελτιστοποίησης, η επεξεργασία γίνεται βήμα προς βήμα, πηγαίνοντας προσεκτικά από σημείο σε σημείο του πεδίου ορισμού του προβλήματος. Αυτό, το βήμα προς βήμα, ενέχει αρκετούς κινδύνους, ο κυριότερος από τους οποίους είναι να περιοριστεί η αναζήτηση σε μια περιοχική τοπικού ακρότατου, που δεν είναι ολικό. Οι ΓΑ εξαλείφουν αυτόν τον κίνδυνο ενεργώντας ταυτόχρονα πάνω σε ένα ευρύ σύνολο σημείων (σύνολο από συμβολοσειρές). Έτσι μπορούν να «ανεβαίνουν» πολλούς λόφους (hillclimbing) την ίδια στιγμή, ελαχιστοποιώντας την πιθανότητα να βρουν μια λάθος κορυφή. Γυρίζοντας στο παράδειγμα με το μαύρο κουτί, οι κλασικές μέθοδοι θα ξεκινούσαν το ψάξιμο από ένα συνδυασμό των διακοπών και στη συνέχεια, εφαρμόζοντας κάποιο κανόνα μετάβασης, θα δοκίμαζαν τον επόμενο (ψάξιμο δηλαδή σημείο προς σημείο). Αντιθέτως, ένας ΓΑ αρχίζει το ψάξιμό του από ένα πληθυσμό συνδυασμών συμβολοσειρών και κατόπιν παράγει διαδοχικά καινούριους. Ένας αρχικός πληθυσμός θα μπορούσε να είναι, π.χ. 01101, 11000, 01000 και 10011.

Έπειτα, «τρέχοντας» ο αλγόριθμος δημιουργεί νέους πληθυσμούς, που σιγά σιγά συγκλίνουν προς την επιθυμητή λύση. Διαλέγοντας έναν πληθυσμό που να καλύπτει αντιπροσωπευτικά ένα μεγάλο εύρος τιμών μπορούν να προκύψουν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

- 3. Οι ΓΑ χρησιμοποιούν μόνο την αντικειμενική συνάρτηση και καμία επιπρόσθετη πληροφορία:** Πολλές μέθοδοι αναζήτησης απαιτούν αρκετές βοηθητικές πληροφορίες για τη συνάρτηση που επεξεργάζονται όπως για παράδειγμα οι τιμές των διαφόρων τάξεων παραγώγων της . Τέτοιου είδους πληροφορίες δεν προαπαιτούνται από τους ΓΑ. Το ψάξιμό τους είναι κατά κάποιο τρόπο «τυφλό», με την έννοια ότι αξιοποιούν μόνο όση πληροφορία περιέχεται στην αντικειμενική συνάρτηση. Αυτό προσδίδει μεγάλη ευελιξία, αλλά από την άλλη προκύπτει το ερώτημα αν συμφέρει να αγνοούνται βοηθητικές πληροφορίες. Γι' αυτό έχουν αναπτυχθεί μορφές ΓΑ που αξιοποιούν και τέτοιες πληροφορίες (Knowledge – Based Genetic Algorithms).
- 4. Οι ΓΑ χρησιμοποιούν πιθανοθεωρητικούς κανόνες αναζήτησης και όχι ντετερμινιστικούς:** Σε κάθε νέα «γενιά» ένα νέο σύνολο συμβολοχαρακτήρων δημιουργείται από την παλαιότερη «γενιά» μέσω της επιλογής (selection) «τυχαίων γονέων» και της εφαρμογής σε αυτούς διαδικασιών διασταύρωσης (crossover) και μετάλλαξης (mutation). Η χρήση πιθανοθεωρητικών κανόνων αναζήτησης είναι κυρίαρχο γνώρισμα των ΓΑ, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι η όλη διαδικασία βαδίζει στην τύχη. Δηλαδή, δεν λαμβάνονται αποφάσεις με το «στρίψιμο ενός νομίσματος». Το στοιχείο της τύχης, που εφαρμόζεται μέσω των γενετικών τελεστών, χρησιμοποιείται ως οδηγός για αναζήτηση σε περιοχές που αναμένεται να δώσουν καλά αποτελέσματα.

2.7.4 Βασικά στοιχεία ενός γενετικού αλγορίθμου.

Στην ουσία, ένας τυπικός ΓΑ περιλαμβάνει απλές λειτουργίες, που όμως κρύβουν μέσα τους μεγάλη ισχύ. Αυτός ο συνδυασμός απλοϊκότητας και ισχύος είναι το μεγαλύτερο θέλημα της τεχνικής τους. Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία, που πρέπει να έχει ένας αλγόριθμος, ώστε να θεωρείται γενετικός.

Αρχικά σε έναν ΓΑ πρέπει να υπάρχουν στοιχεία που θα τον συνδέουν με το πρόβλημα που επιλύει. Η κωδικοποίηση και η αντικειμενική συνάρτηση επιτελούν αυτό το σκοπό και είναι απαραίτητα συστατικά για έναν ΓΑ

2.7.4.1 ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ (Representation of design variables)

Η κωδικοποίηση αφορά ένα σύνολο πιθανών λύσεων του προβλήματος. Η αναπαράσταση των λύσεων πρέπει να γίνει με ένα μαθηματικό, φορμαλιστικό τρόπο, ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία από τον υπολογιστή. Εξάλλου, κωδικοποίηση υπάρχει και στο φυσικό μοντέλο (χρωμοσώματα) και μάλιστα όλες οι αλλαγές που παρατηρούνται στους οργανισμούς γίνονται πάνω στα κωδικοποιημένα χαρακτηριστικά των χρωμοσωμάτων. Κύριος στόχος της κωδικοποίησης είναι να αναπαριστά με ικανοποιητικό τρόπο τα επιμέρους χαρακτηριστικά των λύσεων, ώστε να διευκολύνει τις επόμενες λειτουργίες του αλγορίθμου (κυρίως την επιλογή). Αποτέλεσμα της κωδικοποίησης πρέπει να είναι η ύπαρξη ομοιοτήτων ανάμεσα στα άτομα με σκοπό την κατάλληλη εκμετάλλευσή τους, διότι οι ομοιότητες βοηθούν την κατεύθυνση του ψαξίματος.

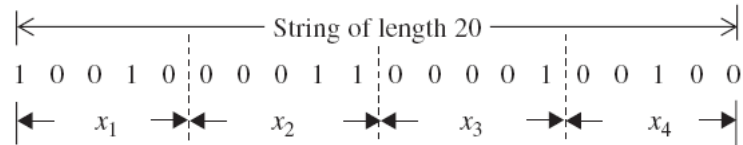
Διάφορα είναι τα είδη της κωδικοποίησης που μπορούν να γίνουν από πρόβλημα σε πρόβλημα. Η πιο απλή είναι η κωδικοποίηση με δυαδικά ψηφία (bits): κάθε λύση αναπαρίσταται από μια δυαδική συμβολοσειρά 0 και 1 (binary string) καθορισμένου μήκους.

Για παράδειγμα αν μια μεταβλητή σχεδίασης x_i είναι δηλωμένη ως μια συμβολοσειρά μήκους 4 (ή four-bit-string) δηλαδή 0 1 0 1, ο αντίστοιχος ακέραιος αριθμός (δεκαδικό ισοδύναμο) που αναπαριστά είναι :

$$(1) \cdot 2^0 + (0) \cdot 2^1 + (1) \cdot 2^2 + (1) \cdot 2^3 = 1 + 0 + 4 + 0 = 5$$

Εάν τώρα κάθε μεταβλητή σχεδίασης x_i , $i = 1, 2, \dots, n$ κωδικοποιηθεί σε μια συμβολοσειρά μήκους q , ένα διάνυσμα σχεδίασης αναπαριστάται χρησιμοποιώντας μια συμβολοσειρά ολικού μήκους $n \cdot q$. Για παράδειγμα, εάν μια συμβολοσειρά μήκους 5 χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση κάθε μεταβλητής σχεδίασης, μια συμβολοσειρά ολικού μήκους 20 αναπαριστά ένα διάνυσμα σχεδίασης με $n = 4$ μεταβλητές σχεδίασης. Η συμβολοσειρά μήκους 20 (20 δυαδικά ψηφία) του επόμενου σχήματος αναπαριστά το διάνυσμα :

$$[x_1=18, x_2=3, x_3=1, x_4=4]$$



Γενικά εάν ένας δυαδικός αριθμός δίνεται από $b_q b_{q-1} \dots b_2 b_1 b_0$, όπου $b_k = 0$ ή 1 και $k = 0, 1, 2, \dots, q$ τότε ο δεκαδικός ισοδύναμος αριθμός y (ακέραιος) δίνεται από την εξής σχέση :

$$y = \sum_{k=0}^q 2^k b_k$$

Αυτό υποδηλώνει ότι μια συνεχής μεταβλητή σχεδίασης x μπορεί να αναπαρασταθεί μόνο από ένα σύνολο διακριτών μεγεθών εάν χρησιμοποιηθεί η δυαδική αναπαράσταση. Εάν μια μεταβλητή x (της οποίας τα άνω και κάτω όρια είναι $x^{(l)}$ και $x^{(u)}$ αντίστοιχα) αναπαρασταθεί από μια συμβολοσειρά q δυαδικών στοιχείων – αριθμών (δηλαδή συμβολοσειρά μήκους q), όπως υπαγορεύεται και από την προηγούμενη εξίσωση ο δεκαδικός ισοδύναμος της μπορεί να υπολογιστεί ως εξής :

$$x = x^{(l)} + \frac{x^{(u)} - x^{(l)}}{2^q - 1} \sum_{k=0}^q 2^k b_k$$

Επομένως εάν μια συνεχής μεταβλητή πρέπει να αναπαρασταθεί με μεγάλη ακρίβεια, πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια μεγάλη τιμή για το q στην δυαδική αναπαράσταση. Στην ουσία, ο αριθμός των απαιτούμενων δυαδικών ψηφίων q για την αναπαράσταση μιας συνεχούς μεταβλητής με βήματα (ακρίβεια) Δx μπορεί να υπολογιστεί από την εξής σχέση :

$$2^q \geq \frac{x^{(u)} - x^{(l)}}{\Delta x} + 1$$

Για παράδειγμα, εάν μια συνεχής μεταβλητή x με όρια 1 και 5 πρέπει να αναπαρασταθεί με ακρίβεια 0.01 πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μια δυαδική αναπαράσταση (συμβολοσειρά) με q ψηφία όπου :

$$2^q \geq \frac{5-1}{0.01} + 1 = 401 \quad \text{ή} \quad q = 9$$

Παράδειγμα 1: Χαλύβδινες πλάκες – ελάσματα είναι διαθέσιμες σε πάχη (ίντσες) των

$$\frac{1}{32}, \frac{1}{16}, \frac{3}{32}, \frac{1}{8}, \frac{5}{32}, \frac{3}{16}, \frac{7}{32}, \frac{1}{4}, \frac{9}{32}, \frac{5}{16}, \frac{11}{32}, \frac{3}{8}, \frac{13}{32}, \frac{7}{16}, \frac{15}{32}, \frac{1}{2}$$

από έναν κατασκευαστή. Εάν λοιπόν το πάχος του χαλύβδινου ελάσματος το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή ενός πλοίου, θεωρηθεί σαν μια διακριτή μεταβλητή σχεδίασης τότε το μέγεθος (q) της δυαδικής συμβολοσειράς που θα χρησιμοποιηθεί για την επιλογή μιας τιμής πάχους από τις διαθέσιμες υπολογίζεται ως εξής :

Το άνω και κάτω όριο του πάχους του ελάσματος (μεταβλητή σχεδίασης x) είναι $\frac{1}{32}$ και $\frac{1}{2}$ ίντσες αντίστοιχα, και η ακρίβεια (ή βήμα) μεταξύ δυο διαθέσιμων παχών είναι $\frac{1}{32}$ ίντσες. Επομένως έχουμε :

$$2^q \geq \frac{x^{(u)} - x^{(l)}}{\Delta x} + 1 = \frac{\frac{1}{2} \text{ in.} - \frac{1}{32} \text{ in.}}{\frac{1}{32} \text{ in.}} + 1 = 15$$

Από την οποία μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι το μήκος ή ο αριθμός των δυαδικών ψηφίων της συμβολοσειράς αναπαράστασης (q) είναι $q = 4$.

Πάντως, έχουν αναφερθεί ποικίλες μορφές κωδικοποιήσεων, που καθεμία εξαρτάται από το υπό εξέταση πρόβλημα. Καμιά δεν είναι αποτελεσματική για όλα τα προβλήματα, ενώ είναι πιθανό ένα πρόβλημα να επιδέχεται περισσότερες από μια κωδικοποιήσεις. Το σίγουρο είναι ότι η κωδικοποίηση είναι ένα κρίσιμο βήμα στην εφαρμογή του ΓΑ και, αν δεν είναι προσεκτική, πιθανότατα θα αποβεί μοιραία για την επιτυχία του. Η καταλληλότητα της κωδικοποίησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διαίσθηση και την πείρα του σχεδιαστή. Συμβαίνει μερικές φορές, μάλιστα, προφανείς τρόποι κωδικοποίησης να μην είναι αρκετά (ή και καθόλου) αποτελεσματικοί. Κατά συνέπεια προκύπτει το κρίσιμο ερώτημα: ποιοι είναι οι παράγοντες οι οποίοι καθορίζουν το είδος της κωδικοποίησης που πρέπει να επιλεγεί για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα; Δεν υπάρχει ξεκάθαρη απάντηση που να καλύπτει όλες τις περιπτώσεις.

2.7.4.2 ANTIKΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

(Representation of Objective Function and Constraints)

Το δεύτερο βασικό στοιχείο σύνδεσης ενός ΓΑ με το πρόβλημα που λύνει είναι η αντικειμενική συνάρτηση. Αυτή παίρνει ως είσοδο μια αποκωδικοποιημένη συμβολοσειρά και επιστρέφει μια τιμή (συνήθως πραγματική), που είναι ανάλογη του πόσο καλά λύνει το πρόβλημα η συγκεκριμένη συμβολοσειρά. Η τιμή αυτή αποτελεί και τον καθοριστικό παράγοντα επιβίωσης και πολλαπλασιασμού ή όχι του ατόμου.

Η αντικειμενική συνάρτηση παίζει το ρόλο του περιβάλλοντος στο τεχνικό μοντέλο. Ουσιαστικά, είναι η μόνη πληροφορία που δέχεται ο αλγόριθμος για το πρόβλημα που λύνει. Είναι σημαντικό αυτή η συνάρτηση να είναι εύκολα υπολογίσιμη, ώστε να μην επιβραδύνει τους ρυθμούς της διαδικασίας.

Η αντικειμενική συνάρτηση ενός προβλήματος μεγιστοποίησης $f(x)$ της $f(x) = x^2, x \in [0, 31]$ και x : ακαίρεος, είναι φανερό ότι πρέπει να είναι η ίδια η f , γιατί ουσιαστικά το ζητούμενο είναι η μεγιστοποίηση αυτής της συνάρτησης. Έτσι, σε κάθε λύση, δηλαδή σε κάθε πιθανή τιμή της μεταβλητής x , αντιστοιχεί μια **τιμή ικανότητας** ή **απόδοσης (fitness ή score)**, μια τιμή που αξιολογεί το πόσο καλή είναι η λύση για τη μεγιστοποίηση της συνάρτησης και που, για αυτή την περίπτωση είναι η ίδια η εικόνα της από τη συνάρτηση f .

Επειδή οι Γενετικοί Αλγόριθμοι βασίζονται, όπως έχει ήδη αναφερθεί στην αρχή της «επιβίωσης του ικανότερου» (survival of the fittest) της φύσης, προσπαθούν να μεγιστοποιήσουν την αντικειμενική συνάρτηση. Επομένως οι ΓΑ είναι εκ φύσεως κατάλληλοι για την επίλυση προβλημάτων μεγιστοποίησης χωρίς περιορισμούς. Ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης μπορεί να μετατραπεί σε πρόβλημα μεγιστοποίησης πριν την εφαρμογή των ΓΑ. Συνήθως η αντικειμενική συνάρτηση ορίζεται έτσι ώστε να είναι μη αρνητική. Για λόγους πληρότητας θα δώσουμε τον πιο συνηθισμένο μετασχηματισμό ενός προβλήματος ελαχιστοποίησης χωρίς περιορισμούς σε πρόβλημα μεγιστοποίησης χωρίς περιορισμούς. Έχουμε :

$$F(x) = \frac{1}{1 + f(x)}$$

Όπως φαίνεται από την παραπάνω εξίσωση δεν επέρχεται αλλαγή στην θέση του ελαχίστου της $f(x)$ αλλά απλώς μετατρέπεται το πρόβλημα ελαχιστοποίησης σε ένα ισοδύναμο πρόβλημα μεγιστοποίησης.

Ένα γενικό πρόβλημα ελαχιστοποίησης με περιορισμούς τώρα, μπορεί να οριστεί ως :

Ελαχιστοποίησε την $f(X)$

Υπό τους περιορισμούς : $g_i(X) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m$

$h_j(X) = 0, j = 1, 2, \dots, p$

Αυτό το πρόβλημα μπορεί να μετατραπεί σε ένα ισοδύναμο πρόβλημα ελαχιστοποίησης χωρίς περιορισμούς χρησιμοποιώντας την αρχή της συνάρτησης ποινής (penalty function) ως εξής :

$$\text{Minimize } \Phi(X) = f(X) + \sum_{i=1}^m r_i \langle g_i(X) \rangle^2 + \sum_{j=1}^p R_j (h_j(X))^2 \quad (\text{I})$$

Όπου r_i και R_j είναι οι παράμετροι ποινής (penalty parameters) συνδεδεμένες με τους περιορισμούς $g_i(X)$ και $h_j(X)$, των οποίων οι τιμές κρατούνται συνήθως σταθερές κατά τη διάρκεια της διαδικασίας επίλυσης. Στην παραπάνω εξίσωση η συνάρτηση $\langle g_i(X) \rangle$ η οποία ονομάζεται συνάρτηση ταξινόμησης (bracket function) ορίζεται ως εξής :

$$\langle g_i(X) \rangle = \begin{cases} g_i(X) & \text{αν } g_i(X) > 0 \\ 0 & \text{αν } g_i(X) \leq 0 \end{cases} \quad (\text{II})$$

Στις περισσότερες περιπτώσεις οι παράμετροι ποινής οι συνδεδεμένες με όλους τους ανισοτικούς και τους ισοτικούς περιορισμούς θεωρούνται ως σταθερές, δηλαδή :

$$R_i = r, i = 1, 2, \dots, m \quad \text{και} \quad R_j = R, j = 1, 2, \dots, p$$

Όπου r και R είναι γνώστες σταθερές. Η αντικειμενική συνάρτηση, $F(X)$, προς μεγιστοποίηση στον ΓΑ μπορεί να οριστεί ως :

$$F(x) = \frac{1}{1 + \Phi(x)}$$

Οι εξισώσεις (I) και (II) δείχνουν ότι η ποινή είναι ανάλογη του τετραγώνου του μεγέθους της παραβίασης των ανισοτικών και ισοτικών περιορισμών για το διάνυσμα σχεδίασης X , ενώ καμία ποινή δεν θα προστίθεται στην $f(X)$ στην περίπτωση που όλοι οι περιορισμοί ικανοποιούνται για το διάνυσμα σχεδίασης X .

Με τον καθορισμό της κωδικοποίησης και της αντικειμενικής συνάρτησης, πλέον, ορίζεται το πρόβλημα και ολοκληρώνεται το πρώτο στάδιο εφαρμογής ενός ΓΑ. Αξίζει να σημειωθεί η αυτονομία και ανεξαρτησία αυτού του σταδίου από τα επόμενα μέρη. Οι λειτουργίες που ακολουθούν από εδώ και πέρα δεν εξαρτώνται από το πώς

γίνεται η αναπαράσταση των ατόμων στο τεχνητό περιβάλλον και με ποιο τρόπο αξιολογούνται οι ικανότητές τους. Αυτό είναι σπουδαίο χαρακτηριστικό, διότι επιτρέπει την διαπραγμάτευση πολλών προβλημάτων με μια απλή αλλαγή στην αντικειμενική συνάρτηση, ίσως και στην κωδικοποίηση. Η φάση ορισμού της κωδικοποίησης και της αντικειμενικής συνάρτησης υπάρχουν πάντα σε κάθε ΓΑ, ανεξαρτήτως του προβλήματος.

2.7.4.3 ΓΕΝΕΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΑΚΣΙΕΣ (Genetic Operators)

Η επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης με χρήση γενετικών αλγορίθμων ξεκινά με τη δημιουργία ενός τυχαίου πληθυσμού συμβολοσειρών οι οποίες αντιστοιχούν σε έναν πληθυσμό διανυσμάτων σχεδίασης. Το μέγεθος του πληθυσμού σε έναν γενικό αλγόριθμο είναι συνήθως δεδομένο. Για κάθε συμβολοσειρά (ή διάνυσμα σχεδίασης ή άτομο) αξιολογείται η απόδοσή της (τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που δίνει). Ο πληθυσμός διαχειρίζεται μέσω τριών διαδικασιών,

– αναπαραγωγή (reproduction), διασταύρωση (crossover), μετάλλαξη (mutation) – με σκοπό την δημιουργία ενός νέου πληθυσμού. Ο νέος πληθυσμός επαναξιολογείται για την εύρεση των αποδόσεων των ατόμων του και ελέγχονται τα κριτήρια σύγκλισης της διαδικασίας. Ένας κύκλος αναπαραγωγής, διασταύρωσης, μετάλλαξης και αξιολόγησης της απόδοσης των ατόμων του πληθυσμού είναι γνωστός ως **γενιά (generation)** σε έναν γενετικό αλγόριθμο. Εάν τα κριτήρια σύγκλισης δεν ικανοποιούνται, οι διαδικασίες πάνω στον πληθυσμό λαμβάνουν χωρά επαναληπτικά και νέοι πληθυσμοί δημιουργούνται και αξιολογούνται για μέχρι να επέλθει σύγκλιση, κάτι το οποίο μπορεί να απαιτεί μεγάλο αριθμό γενεών. Όλα αυτά αναπτύσσονται περαιτέρω παρακάτω :

Αδω περιλαμβάνονται λειτουργίες που ανήκουν στη φάση τρεξίματος του ΓΑ. Εδώ γίνεται ο κύριος όγκος της εργασίας και παράγεται το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης. Η δομή ενός ΓΑ αποτελείται από τα παρακάτω βήματα:

1. Αρχικοποίηση (Initialization)
2. Αποκωδικοποίηση (Decoding)
3. Υπολογισμός ικανότητας ή αξιολόγηση (Fitness calculation ή evaluation)
4. Αναπαραγωγή (Reproduction)

I. Επιλογή (Selection)

II. Διασταύρωση (Crossover ή mating)

III. Μετάλλαξη (Mutation)

5. Επανάληψη από το βήμα (2) μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού του ΓΑ

Η **αρχικοποίηση (initialization)** είναι το βήμα στο οποίο ορίζεται ο αρχικός πληθυσμός, πάνω στον οποίο θα λάβουν χώρα οι λειτουργίες του ΓΑ. Ο πληθυσμός αυτός διαλέγεται με τυχαίο τρόπο ανάμεσα σε όλες τις δυνατές τιμές των μεταβλητών του προβλήματος, ενώ το μέγεθός του ορίζεται από το χρήστη (συνήθως, όμως, είναι δεδομένο και εξαρτάται από τους πόρους που αυτός έχει στη διάθεσή του). Σε μερικές υλοποιήσεις, η επιλογή των αρχικών σημείων γίνεται με ευρετικές μεθόδους, δίνοντας εξ αρχής ένα πλεονέκτημα στην αναζήτηση. Έστω ότι στη μεγιστοποίηση της $f(x) = x^2, x \in [0, 31]$ και x : ακαίρεος, το μέγεθος του πληθυσμού είναι 4. Μένει να επιλεχθούν τυχαία τέσσερις συμβολοσειρές από τις 32 πιθανές. Αυτό μπορεί να γίνει με 20 διαδοχικές ρίψεις ενός τίμιου νομίσματος, ώστε να προκύψουν 4 συμβολοσειρές μήκους 5 η καθεμία. Ένα πιθανό σενάριο θα μπορούσε να βγάλει τις συμβολοσειρές 01101, 11000, 01000 και 10011.

Αφού προκύψει η πρώτη γενιά, ο ΓΑ εισέρχεται στο επαναληπτικό μέρος του. Ο πληθυσμός πρέπει να αξιολογηθεί, δηλαδή να μετρηθεί η ικανότητα επιβίωσης του κάθε ατόμου χωριστά. Για να συμβεί αυτό πρέπει να γίνει αποκωδικοποίηση χαρακτηριστικών και έπειτα υπολογισμός της απόδοσης των ατόμων. Ο παραλληλισμός με το φυσικό μοντέλο, ίσως βοηθά στην κατανόηση αυτής της διαδικασίας: Στη φύση τα χρωμοσώματα ενός οργανισμού έχουν στα γονίδια τους κωδικοποιημένα τα χαρακτηριστικά τους. Το σύνολο αυτής της κωδικοποιημένης γενετικής πληροφορίας ονομάζεται, όπως είπαμε, γονότυπος. Ο γονότυπος δεν είναι αντιληπτός με τις φυσικές αισθήσεις των έμβιων όντων. Αντίθετα, αντιληπτή γίνεται η αλληλεπίδραση του με το περιβάλλον, που έχει ως αποτέλεσμα την ορατή εμφάνιση των χαρακτηριστικών αυτών.

Ανάλογος είναι ο ρόλος της **αποκωδικοποίησης** στο τεχνητό μοντέλο. Εδώ το ρόλο του γονότυπου παίζει η δομή της συμβολοσειράς με τα δυαδικά ψηφία ως αντίστοιχα των γονιδίων. Ο φαινότυπος αναφέρεται στην παρατηρήσιμη εμφάνιση μιας συμβολοσειράς, στο πώς φαίνεται στο περιβάλλον της. Περιβάλλον, όμως, θεωρείται η αντικειμενική συνάρτηση, άρα ο φαινότυπος μιας συμβολοσειράς αντιστοιχεί στην αποκωδικοποιημένη τιμή της, που ανήκει στο σύνολο ορισμού της αντικειμενικής συνάρτησης.

Σκοπός της λειτουργίας **αξιολόγησης** είναι να υπολογιστεί για κάθε άτομο του πληθυσμού η ικανότητα του για επιβίωση. Στη φύση οι ικανότητες των ατόμων δεν είναι προσδιορισμένες με αυστηρό τρόπο. Είναι, όμως, καθορισμένες από το γενετικό υλικό των χρωμοσωμάτων τους. Εύκολα, πάντως, θα μπορούσε κανείς να ισχυριστεί, π.χ. για τα ζώα ότι μεγαλύτερη τύχη για επιβίωση έχουν όσα μπορούν να ξεφεύγουν από άρπαγες, να αντέχουν σε αρρώστιες και γενικά να αντιπαρέρχονται τις όποιες αντιξοότητες παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια της ζωής τους. Συνεπώς, ο υπολογισμός της ικανότητας είναι θεμελιώδης λειτουργία για το ΓΑ. Η εφαρμογή της είναι πολύ απλή (τουλάχιστον για απλά προβλήματα): για κάθε συμβολοσειρά του τρέχοντος πληθυσμού υπολογίζεται η απόδοσή της από την ήδη γνωστή αντικειμενική συνάρτηση. Σε πιο σύνθετα προβλήματα, ο υπολογισμός ικανότητας μπορεί να ισοδυναμεί με την εκτέλεση μιας εργαστηριακής προσομοίωσης.

Η ΑΝΑΠΑΡΑΓΩΓΗ (Reproduction)

Τη σκυτάλη στη συνέχεια παίρνει η σημαντικότερη λειτουργία του ΓΑ, η αναπαραγωγή. Εδώ λαμβάνει χώρα ο κύριος όγκος της εργασίας του αλγορίθμου. Η δομή της αναπαραγωγικής διαδικασίας είναι σύνθετη. Περιλαμβάνει τα εξής μέρη: διασταύρωση και μετάλλαξη. Πριν την αναπαραγωγή, εκτελείται η διαδικασία της επιλογής.

Με την επιλογή, βρίσκει εφαρμογή στα πλαίσια του αλγορίθμου, ο νόμος της επιβίωσης του ικανότερου. Είναι η πρώτη διαδικασία που εφαρμόζεται στον πληθυσμό με σκοπό την επιλογή των «καλύτερων» συμβολοσειρών (ατόμων) οι οποίες θα δημιουργήσουν μια «δεξαμενή ζευγαρώματος» (**mating pool**). Η διαδικασία της αναπαραγωγής και της επιλογής στη βιβλιογραφία συνήθως ταυτίζονται λόγω του ότι η πρώτη εξαρτάται από τη δεύτερη και επομένως λαμβάνουν χώρα πάντα και οι δυο συγχρόνως. Μέσω αυτής της διαδικασίας, καθορίζεται ποια άτομα από τον υπάρχοντα πληθυσμό θα έχουν την ευκαιρία να λάβουν μέρος στην αναπαραγωγή και να κληροδοτήσουν στην επόμενη γενιά μέρος ή το σύνολο των χαρακτηριστικών τους. Έτσι επιλέγονται άτομα με απόδοση μεγαλύτερη της μέσης απόδοσης ολόκληρου του πληθυσμού και τα πολλαπλά «αντίγραφα» τους τοποθετούνται στην «δεξαμενή ζευγαρώματος» μέσω μιας πιθανοθεωρητικής διαδικασίας. Στόχος της λειτουργίας της επιλογής είναι να επιτρέπει εκθετική αύξηση των ικανοτέρων ατόμων και τελικά, μετά από

αναπαραγωγή αρκετών γενεών, την επικράτησή τους. ΓΑ χωρίς επιλογή στην αναπαραγωγική του διαδικασία ισοδυναμεί με τυχαίο ψάξιμο.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι υλοποίησης της επιλογής στα πλαίσια ενός ΓΑ. Δεδομένου, όμως, ότι στη βασική μορφή του αλγορίθμου το μέγεθος του πληθυσμού από γενιά σε γενιά δεν αλλάζει, κάθε τεχνική επιλογής, για να δικαιώνει τον τίτλο της, οφείλει να δίνει με κάποιο τρόπο, μεγαλύτερες πιθανότητες αναπαραγωγής σε άτομα που αξιολογούνται μέσα στο τεχνητό περιβάλλον ως τα πιο ικανά. Σε μια συνήθη διεργασία αναπαραγωγής, μια συμβολοσειρά επιλέγεται από την δεξαμενή ζευγαρώματος με πιθανότητα ανάλογη της απόδοσής της.

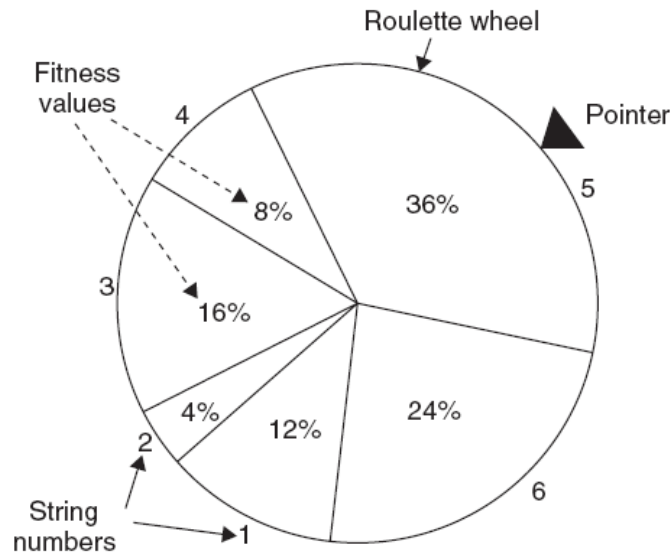
Επομένως εάν F_i είναι η απόδοση της i -οστής συμβολοσειράς σε έναν πληθυσμό μεγέθους n , η πιθανότητα επιλογής της (p_i) για τοποθέτηση σε μια δεξαμενή ζευγαρώματος δίνεται από τον τύπο :

$$p_i = \frac{F_i}{\sum_{j=1}^n F_j} , i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{III})$$

Ας σημειωθεί ότι η παραπάνω εξίσωση υποδηλώνει ότι το άθροισμα των πιθανοτήτων όλων των επιλεγμένων για την δεξαμενή ζευγαρώματος συμβολοσειρών είναι 1. Ο τελεστής επιλογής μπορεί να εκφραστεί σε αλγοριθμική βάση, με πολλούς τρόπους.

Επιλογή με εξαναγκασμένη περιστρεφόμενη ρουλέτα (Roulette – wheel selection)

Ίσως ο ευκολότερος από τους τρόπους επιλογής είναι η έκφραση μέσω μιας **εξαναγκασμένης ρουλέτας**, στην οποία κάθε συμβολοσειρά ενός πληθυσμού αντιπροσωπεύεται σε ένα μέρος της ρουλέτας, σε αναλογία με την απόδοσή της. Αυτό μπορεί να κατανοηθεί εάν θεωρήσουμε μια φανταστική ρουλέτα η περιφέρεια της οποίας χωρίζεται σε κυκλικά τμήματα , ένα για κάθε συμβολοσειρά του πληθυσμού με το κυκλικό μήκος κάθε κυκλικού τμήματος να είναι ανάλογο της απόδοσης κάθε συμβολοσειράς όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Γυρίζοντας τώρα την ρουλέτα n φορές (όπου n είναι το μέγεθος του πληθυσμού) και επιλέγοντας, κάθε φορά, την συμβολοσειρά η οποία υποδεικνύεται μέσω του δείκτη (pointer) της ρουλέτας, δημιουργούμε μια δεξαμενή ζευγαρώματος μεγέθους n . Εφόσον τα μήκη των κυκλικών τμημάτων της περιφέρειας της ρουλέτας έχουν δημιουργηθεί με βάση την απόδοση των διαφόρων συμβολοσειρών του αρχικού πληθυσμού, η όλη διαδικασία της ρουλέτας αναμένεται να επιλέξει F_i / \bar{F} αντίγραφα της i -οστής συμβολοσειράς για τοποθέτηση στην δεξαμενή αναπαραγωγής, όπου \bar{F} δηλώνει τον μέσο όρο των αποδόσεων ολόκληρου του

πληθυσμού :

$$\bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n F_j$$

Στο παραπάνω σχήμα το μέγεθος του πληθυσμού υποτέθηκε ίσο με $n = 6$ με αποδόσεις των συμβολοσειρών 1,2,3,4,5,6 ίσες με 12,4,16,8,36 και 24 αντίστοιχα. Εφόσον το πέμπτο άτομο (συμβολοσειρά) έχει την υψηλότερη απόδοση, αναμένεται να επιλεγεί τις περισσότερες φορές (36% του συνόλου των φορών στρέψης της ρουλέτας, πιθανοθεωρητικά) όταν η ρουλέτα στραφεί $n=6$ φορές. Το πλάνο της επιλογής μέσω της στρεφόμενης ρουλέτας μπορεί να υλοποιηθεί αριθμητικά κατά την διάρκεια των υπολογισμών ως εξής :

Οι πιθανότητες επιλογής των διαφόρων ατόμων βασισμένες στην απόδοσή τους υπολογίζονται μέσω της εξίσωσης (III) . Αυτές οι πιθανότητες χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της αθροιστικής πιθανότητας (P_i) του ατόμου i να αντιγραφεί και τοποθετηθεί στην δεξαμενή αναπαραγωγής, προσθέτοντας τις «ατομικές» πιθανότητες των ατόμων 1 έως n ως εξής :

$$P_i = \sum_{j=1}^i P_j$$

Έτσι η διαδικασία επιλογής της περιστρεφόμενης ρουλέτας μπορεί να υλοποιηθεί συνδέοντας το εύρος της αθροιστικής πιθανότητας ($P_{i-1} - P_i$) στο i -στο άτομο. Για την δημιουργία της δεξαμενής ζευγαρώματος μεγέθους n κατά την διάρκεια των

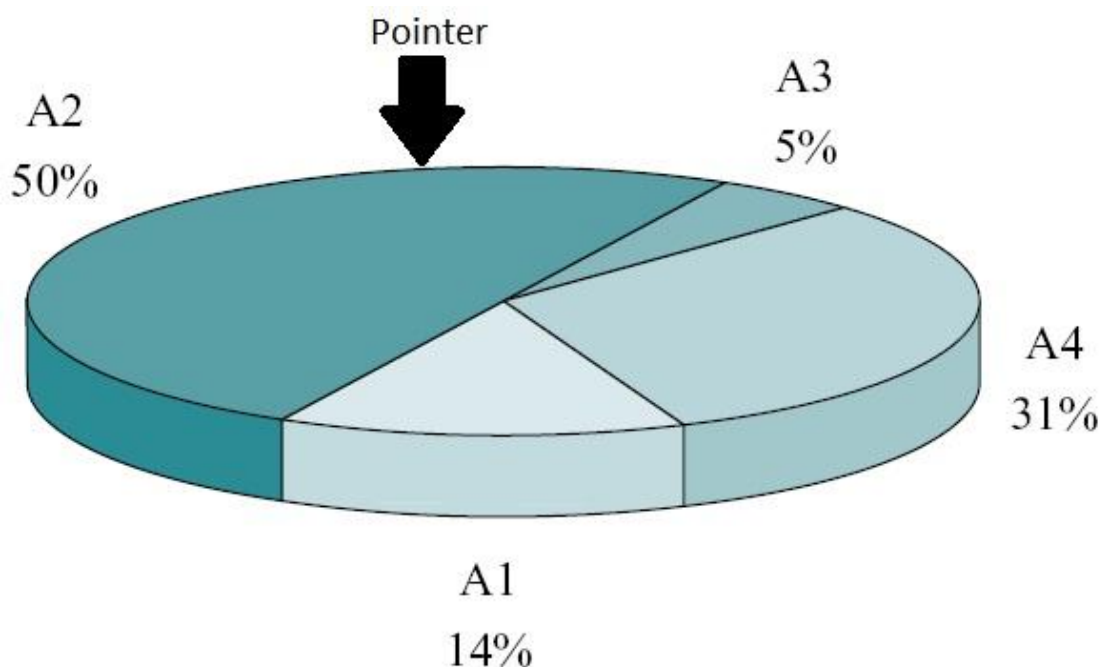
Αριθμός συμβολοσειράς i	Απόδοσή F_i συμβολοσειράς i	Πιθανότητα επιλογής p_i συμβολοσειράς i για τοποθέτηση στην δεξαμενή αναπαραγωγής	Τιμή αθροιστικής πιθανότητας της συμβολοσειράς i , $P_i = \sum_{j=1}^i p_j$	Εύρος αθροιστικής πιθανότητας της συμβολοσειράς i , ($P_{i-1} - P_i$)
1	12	0.12	0.12	0.00 – 0.12
2	4	0.04	0.16	0.12 – 0.16
3	16	0.16	0.32	0.16 – 0.32
4	8	0.08	0.40	0.32 – 0.40
5	36	0.36	0.76	0.40 – 0.76
6	24	0.24	1.00	0.76 – 1.00

αριθμητικών υπολογισμών, n τυχαίοι αριθμοί, καθένας με εύρος από 0 έως 1, δημιουργούνται (ή επιλέγονται). Θεωρώντας τώρα, κάθε τυχαίο αριθμό ως την αθροιστική πιθανότητα του ατόμου προς αντιγραφή και τοποθέτηση στην δεξαμενή ζευγαρώματος, n άτομα τα οποία αντιστοιχούν στους n τυχαίους δημιουργηθέντες αριθμούς επιλέγονται σαν μέλη της δεξαμενής. Μέσω αυτής της διαδικασίας, τα άτομα με την μεγαλύτερη (μικρότερη) απόδοση θα επιλεγούν προς τοποθέτηση στην δεξαμενή περισσότερο (λιγότερο) συχνά γιατί θα έχουν μεγαλύτερο (μικρότερο) εύρος αθροιστικής πιθανότητας. Έτσι άτομα με καλύτερη απόδοση μέσα στον πληθυσμό, πιθανοθεωρητικά, επιτυχαίνουν περισσότερα αντίγραφα προς τοποθέτηση στην δεξαμενή αναπαραγωγής. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι κανένα καινούριο άτομο δεν δημιουργείται κατά την διάρκεια του σταδίου της αναπαραγωγής. Μόνο τα υπάρχοντα άτομα του πληθυσμού αντιγράφονται και τοποθετούνται στην δεξαμενή. Το στάδιο της αναπαραγωγής εγγυάται ότι υψηλής απόδοσης άτομα (συμβολοσειρές) επιβιώνουν και αναπαράγονται, ενώ χαμηλότερης απόδοσης άτομα «πεθαίνουν». Έτσι οι ΓΑ εξομοιώνουν την αρχή της «επιβίωσης του ικανότερου» του φυσικού περιβάλλοντος.

Για να εξηγήσουμε περαιτέρω τη χρήση της εξαναγκασμένης ρουλέτας με ένα ακόμη παράδειγμα, θεωρούμε τον πληθυσμό των τεσσάρων συμβολοσειρών, που έχουμε δημιουργήσει με τη ρίψη ενός νομίσματος 20 φορές. Έστω, ότι έχουμε μετρήσει την απόδοση (δηλαδή την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης), για κάθε συμβολοσειρά, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα :

Αριθμός Συμβολοσειράς	Συμβολοσειρά	Απόδοση	Απόδοση %
1	0 1 1 0 1	169	14.4
2	1 1 0 0 0	576	49.2
3	0 1 0 0 0	64	5.5
4	1 0 0 1 1	361	30.9
Σύνολο		1170	100

Αθροίζοντας την απόδοση των τεσσάρων συμβολοσειρών παίρνουμε άθροισμα 1170. Το ποσοστό κάθε συμβολοσειράς στην συνολική απόδοση του πληθυσμού φαίνεται στην τελευταία στήλη του πίνακα. Αυτή η αντιστοιχία στην εξαναγκασμένη ρουλέτα γι' αυτή τη γενιά αναπαραγωγής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Για να γίνει τώρα η αναπαραγωγή, στρίβουμε τη ρουλέτα τέσσερις φορές. Για το συγκεκριμένο πρόβλημα, η συμβολοσειρά No 1 έχει απόδοση 169, η οποία αντιπροσωπεύει το 14.4% της συνολικής απόδοσης. Σαν αποτέλεσμα η συμβολοσειρά

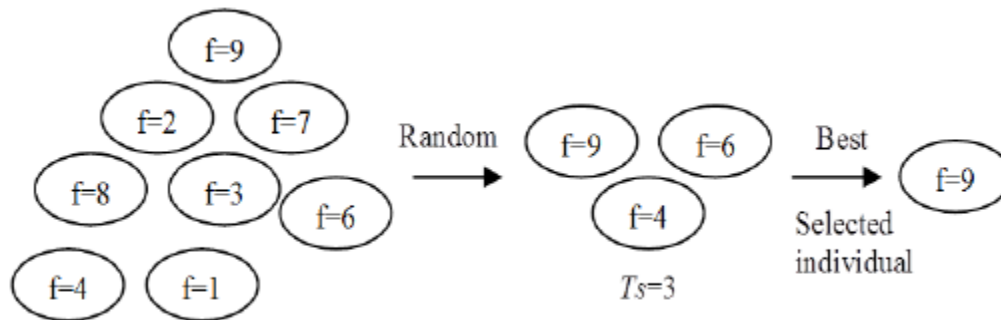
Νο 1 αντιστοιχεί στο 14,4% της επιφάνειας της ρουλέτας και σε κάθε στρίψιμο της ρουλέτας θα δώσει σαν αποτέλεσμα αυτή τη συμβολοσειρά, με πιθανότητα 0,144. Με αυτό τον τρόπο οι συμβολοσειρές που έχουν τη μεγαλύτερη απόδοση, θα έχουν μεγαλύτερο πλήθος αντιγράφων (απογόνων) στην επόμενη γενιά, ενώ αυτές που έχουν χαμηλή απόδοση δεν θα υπάρχουν. Όταν μία συμβολοσειρά επιλεγεί, δημιουργείται ένα ακριβές αντίγραφο της και μαζί με τα αντίγραφα άλλων συμβολοσειρών, που παράγονται με τον ίδιο τρόπο, δημιουργείται ένας νέος δοκιμαστικός πληθυσμός, ο οποίος θα υποστεί περισσότερες γενετικές διαδικασίες. Αυτός ο νέος πληθυσμός ονομάζεται στη διεθνή βιβλιογραφία, όπως έχει ήδη αναφερθεί, και σαν *δεξαμενή ζευγαρώματος (mating pool)*.

Επιλογή με τουρνουά (Tournament selection)

Η επιλογή με τη μέθοδο του τουρνουά είναι ίσως η πιο δημοφιλής μέθοδος τελεστή επιλογής στους γενετικούς αλγορίθμους κυρίως λόγω της αποδοτικότητας της και της σχετικά απλής εφαρμογής της. Στην μέθοδο του τουρνουά, T_s άτομα επιλέγονται τυχαία από τον ευρύτερο πληθυσμό, και τα επιλεγθέντα άτομα ανταγωνίζονται μεταξύ τους. Το άτομο με την μεγαλύτερη απόδοση «κερδίζει» το τουρνουά και επομένως την δυνατότητα να τοποθετηθεί στην δεξαμενή ζευγαρώματος και άρα τα χαρακτηριστικά του να περάσουν στην επομένη γενιά. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται n φορές (όπου n = μέγεθος πληθυσμού). Ο αριθμός των ανταγωνιζόμενων ατόμων σε κάθε τουρνουά χαρακτηρίζεται ως *το μέγεθος του τουρνουά (tournament size)* και συνήθως είναι ίσος με δυο (2) οπότε και το τουρνουά τότε καλείται *binary tournament (δυναδικό-διπλό τουρνουά)*. Η επιλογή με τουρνουά δίνει την δυνατότητα σε όλα τα άτομα να επιλεγούν προς τοποθέτηση στην δεξαμενή ζευγαρώματος και επομένως διατηρεί την ποικιλία – ποικιλομορφία του κάθε πληθυσμού. Ένα πιθανό μειονέκτημα όμως αυτής της διατηρούμενης ποικιλίας είναι ότι ίσως και να επιβραδύνει την ταχύτητα σύγκλισης. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται ο μηχανισμός της επιλογής με τουρνουά.

Η επιλογή με τουρνουά όμως έχει πολλά πλεονεκτήματα τα οποία περιλαμβάνουν, την πολυπλοκότητα αποδοτικού χρόνου, ειδικά στην περίπτωση υλοποίησής της σε παράλληλο υπολογιστικό περιβάλλον, μικρή ευαισθησία της απόλυτης και γρήγορης επικράτησης ατόμων εξαιρετικά μεγάλης απόδοσης (πράγμα καλό διότι στην περίπτωση για παράδειγμα της ρουλέτας εάν ένα άτομο από την πρώτη γενιά έχει απόδοση $p \approx 85\%$ τότε ελαττώνει δραματικά την πιθανότητα άλλα άτομα να περάσουν

στις επόμενες γενιές και χάνεται έτσι η ποικιλομορφία των πληθυσμών), και καμία απαίτηση για ταξινόμηση των αποδόσεων ή για επαναπροσδιορισμό τους υπό κλίμακα.



Στο παραπάνω παράδειγμα, το μέγεθος του τουρνουά, T_s , έχει επιλεγεί να είναι 3, το οποίο σημαίνει ότι τρία άτομα θα ανταγωνίζονται μεταξύ τους κάθε φορά. Μόνο το καλύτερο άτομο μεταξύ τους επιλέγεται για την δεξαμενή ζευγαρώματος. Βέβαια, στην επιλογή με τουρνουά μεγαλύτερες τιμές του μεγέθους του τουρνουά, οδηγούν σε μεγαλύτερη αναμενόμενη απώλεια ποικιλομορφίας (diversity). Μεγάλο μέγεθος τουρνουά σημαίνει ότι μια μικρότερη μερίδα του πληθυσμού ουσιαστικά συμβάλλει στην γενετική ποικιλομορφία, κάνοντας έτσι την αναζήτηση και επιλογή αυξανόμενα «άπληστη» από την φύση της! Μπορεί να υπάρχουν δυο παράγοντες οι οποίοι οδηγούν σε απώλεια ποικιλομορφίας σε μια συνηθισμένη διαδικασία επιλογής με τουρνουά. Μερικά άτομα ίσως να μην επιλεγούν να διαγωνιστούν σε κάποιο τουρνουά καθόλου, ενώ άλλα άτομα μπορεί να μην έχουν ποτέ την ευκαιρία να επιλεγούν για τοποθέτηση στην δεξαμενή ζευγαρώματος επειδή έχασαν σε ένα τουρνουά. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι συνήθως στην επιλογή με τουρνουά υπάρχει **επανατοποθέτηση** των επιλεχθέντων για τουρνουά ατόμων στον αρχικό πληθυσμό έτσι ώστε να τους δίνεται η δυνατότητα να επιλεγούν πάλι σε κάποιο άλλο τουρνουά έως ότου διεξαχθούν τελικά n τουρνουά, η δεξαμενή ζευγαρώματος συμπληρωθεί, οι επόμενοι τελεστές (διασταύρωση και μετάλλαξη) αναλάβουν δράση και περάσουμε σε μια νέα γενιά ατόμων.

Παρακάτω θα ακολουθήσει μια μαθηματική ανάλυση της μεθόδου επιλογής με τουρνουά.

Μαθηματική ανάλυση της μεθόδου επιλογής με τουρνουά (Mathematical Analysis of Tournament Selection)

Στην ενότητα αυτή θα χρησιμοποιήσουμε τους παρακάτω συμβολισμούς :

N : Συνολικός αριθμός πιθανών λύσεων (μέγεθος πληθυσμού)

J_i : Άτομα – συμβολοσειρές του πληθυσμού (Individuals) , $i=1,2,\dots,N$

J : Χώρος πιθανών ατόμων – λύσεων

$P : P = \{J_1, J_2, \dots, J_N\} \in J^N$, ο πληθυσμός.

$P(t)$: Ο πληθυσμός της γενιάς t .

Συνάρτηση $f : J \rightarrow \mathbb{R}$ είναι η αντικειμενική συνάρτηση.

Παρατήρηση : Σκόπιμο είναι να δοθούν κάποιοι βασικοί ορισμοί απαραίτητοι για την κατανόηση της παρούσης ενότητας.

Περιγραφή του πλαισίου των τελεστών της επιλογής

Γενικά, η συμπεριφορά ενός τελεστή επιλογής εξαρτάται μόνο από την απόδοση (τιμές αντικειμενικής συνάρτησης) κάθε ατόμου μέσα στον πληθυσμό. Σε αυτή την ενότητα, θα περιγράψουμε έναν τελεστή επιλογής χρησιμοποιώντας την κατανομή της απόδοσης πριν και μετά την επιλογή. Έτσι θεωρείται ότι η επιλογή και η αναπαραγωγή λαμβάνουν χωρά διαδοχικά : αρχικά η φάση της επιλογής δημιουργεί έναν ενδιάμεσο πληθυσμό (δεξαμενή ζευγαρώματος) και μετά η αναπαραγωγή λαμβάνει χωρά με συγκεκριμένη πιθανότητα των ατόμων του ενδιάμεσου πληθυσμού να μεταβούν στον πληθυσμό της επόμενης γενιάς.

Ορισμός 1 (Κατανομή απόδοσης – Fitness Distribution) :

Η συνάρτηση $s : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{Z}_0^+$ αντιστοιχίζει σε κάθε τιμή απόδοσης $f \in \mathbb{R}$ τον αριθμό (πλήθος) των ατόμων ενός πληθυσμού $P \in J^N$ οι οποίοι έχουν αυτή την τιμή απόδοσης. Η s καλείται κατανομή απόδοσης του πληθυσμού P .

Ορισμός 2 (Αθροιστική Κατανομή απόδοσης – Cumulative

Fitness Distribution) :

Θεωρούμε ότι n είναι ο αριθμός των ξεχωριστών τιμών απόδοσης, $f_1 < \dots < f_{n-1} < f_n$ ($n \leq N$) είναι η διάταξη των τιμών απόδοσης με f_1 την χειρότερη απόδοση σε ολόκληρο τον πληθυσμό και f_n την καλύτερη απόδοση σε όλο τον πληθυσμό επίσης.

Η $S(f_i)$ αναπαριστά τον αριθμό (πλήθος) των ατόμων με απόδοση f_i ή χειρότερη και καλείται αθροιστική κατανομή απόδοσης, δηλαδή :

$$S(f_i) = \begin{cases} 0 & : i < 1 \\ \sum_{j=1}^{j=i} s(f_j) & : 0 \leq i \leq n \quad (1) \\ N & : i > n \end{cases}$$

Λαμβάνοντας υπόψη αυτούς τους δυο ορισμούς μια μέθοδος – τελεστής επιλογής μπορεί να περιγραφεί ως μια συνάρτηση η οποία μετατρέπει μια κατανομή απόδοσης σε μια άλλη.

Ορισμός 3 (Μέθοδος ή Τελεστής Επιλογής – Selection Method) :

Μια μέθοδος ή τελεστής επιλογής Ω είναι μια συνάρτηση η οποία μετατρέπει μια κατανομή απόδοσης s σε μια άλλη κατανομή απόδοσης s' :

$$s' = \Omega(s, par_list) \quad (2)$$

Όπου par_list είναι μια προαιρετική λίστα παραμέτρων της μεθόδου επιλογής.

Εφόσον οι μέθοδοι επιλογής είναι πιθανοθεωρητικές συχνά μπορεί να κάνουμε χρήση του όρου *αναμενόμενη κατανομή απόδοσης*.

Ορισμός 4 (Αναμενόμενη Κατανομή απόδοσης – Expected Fitness

Distribution) :

Ω^* δηλώνει την αναμενόμενη κατανομή απόδοσης μετά την εφαρμογή της μεθόδου επιλογής Ω στην κατανομή απόδοσης s , δηλαδή :

$$\Omega^*(s, par_list) := E(\Omega(s, par_list))$$

$s^* = \Omega^*(s, par_list)$ χρησιμοποιείται σαν συντομογραφία.

Με αυτό το σύστημα χαρακτήρων και συμβολισμών μπορεί να περιγραφεί όχι μόνο η συμπεριφορά του καλύτερου ατόμου στον πληθυσμό ή στην μέση τιμή των αποδόσεων αλλά και όλες οι πτυχές ενός πλαισίου επιλογής. Σκοπός μας είναι να εξάγουμε το $s^*(f)$ από μια δεδομένη κατανομή απόδοσης $s(f)$. Τώρα μπορούμε να συνεχίσουμε προς αυτή την κατεύθυνση για την μέθοδο επιλογής μέσω τουρνουά.

Επιλογή με τουρνουά

Όπως έχει ήδη περιγραφεί η επιλογή με τουρνουά λειτουργεί ως εξής : Διαλέγει έναν αριθμό t ατόμων τυχαία μέσα από τον συνολικό πληθυσμό και αντιγράφει το καλύτερο από αυτά στον ενδιάμεσο πληθυσμό (δεξαμενή ζευγαρώματος) και επαναλαμβάνει N φορές. Συχνά τα τουρνουά διεξάγονται μόνο μεταξύ δυο ατόμων (binary tournament) αλλά η γενικοποίηση είναι εφικτή σε μια αυθαίρετη ομάδα μεγέθους t η οποία καλείται *μέγεθος του τουρνουά*. Στους επόμενους υπολογισμούς κάνουμε τη θεώρηση ότι η επιλογή μέσω τουρνουά γίνεται με επανατοποθέτηση.

Θεώρημα 1 : Η αναμενόμενη κατανομή απόδοσης $\Omega_T^*(s, t)$ μετά την διεξαγωγή επιλογής με τουρνουά με μέγεθος t στην κατανομή s είναι :

$$s^*(f_i) = \Omega_T^*(s, t)(f_i) = N \cdot \left(\left(\frac{S(f_i)}{N} \right)^t - \left(\frac{S(f_{i-1})}{N} \right)^t \right) \quad (4)$$

Απόδειξη : Πρώτα υπολογίζουμε τον αναμενόμενο αριθμό των ατόμων με απόδοση f_i ή χειρότερη, δηλαδή $S^*(f_i)$. Ένα άτομο με απόδοση f_i ή χειρότερη μπορεί να κερδίσει το τουρνουά μόνο εάν όλα τα άλλα άτομα που λαμβάνουν μέρος στο

τουρνουά έχουν απόδοση f_i ή χειρότερη. Εφόσον η πιθανότητα να επιλεγεί ένα άτομο με απόδοση f_i ή χειρότερη δίνεται από τη σχέση $\frac{S(f_i)}{N}$ έχουμε :

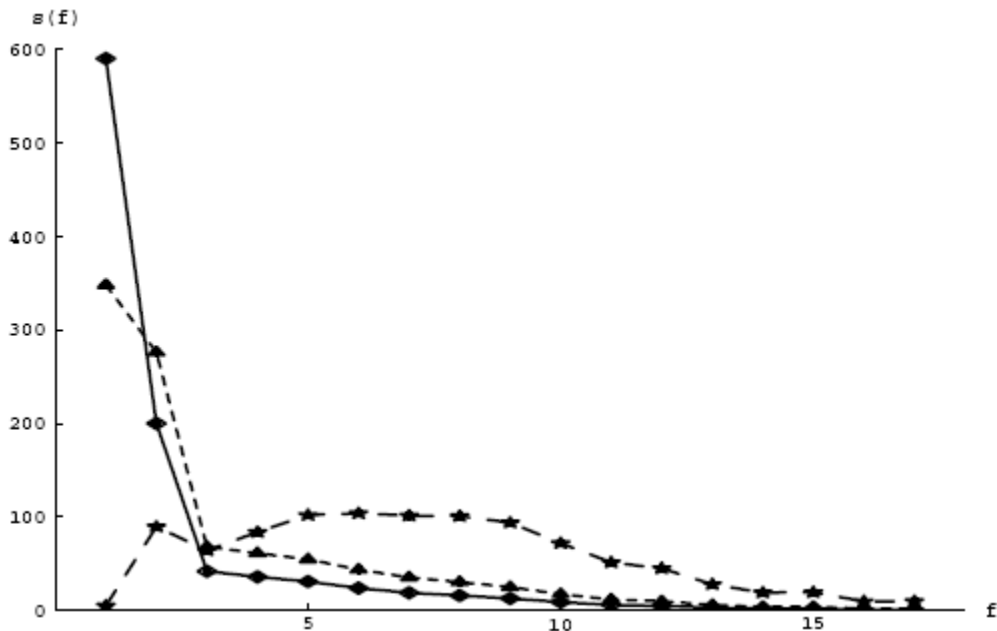
$$S^*(f_i) = N \cdot \left(\frac{S(f_i)}{N} \right)^t \quad (5)$$

Χρησιμοποιώντας αυτή την εξίσωση και την σχέση $s^*(f_i) = S^*(f_i) - S^*(f_{i-1})$ (βλ. και Ορισμό 2) παίρνουμε την (4).

Η σχέση (4) δείχνει την ισχυρή επίδραση του μεγέθους του τουρνουά t στην συμπεριφορά της μεθόδου επιλογής. Προφανώς για $t = 1$ παίρνουμε (κατά μέσο όρο) την αμετάβλητη αρχική κατανομή

$$s^*(f_i) = \Omega_T^*(s, 1)(f_i) = N \cdot \left(\frac{S(f_i)}{N} - \frac{S(f_{i-1})}{N} \right) = S(f_i) - S(f_{i-1}) = s(f_i)$$

Σαν παράδειγμα μιας διακριτής κατανομής απόδοσης θα χρησιμοποιήσουμε την αρχική κατανομή απόδοσης του προβλήματος «wall-following-robot» του Koza [Koza,1992]. Αυτή η κατανομή είναι αντιπροσωπευτική και τυπική για προβλήματα τα οποία επιλύονται με γενετικούς αλγορίθμους : πολλά κακής απόδοσης (τιμή απόδοσης 1) και πολύ λίγα καλής απόδοσης (τιμή απόδοσης 17) άτομα υπάρχουν. Το επόμενο σχήμα δείχνει την αρχική κατανομή απόδοσης και την προκύπτουσα κατανομή απόδοσης για διαφορετικά μεγέθη τουρνουά. Η μεγάλη συμφωνία μεταξύ θεωρητικώς εξαγόμενων αποτελεσμάτων και μιας προσομοίωσης επαληθεύεται στο δεύτερο σχήμα. Εδώ δίνονται οι κατανομές με βάση την εξίσωση (4) και η μέση τιμή 20 προσομοιώσεων.



Κατανομή απόδοσης πριν (—, συνεχής γραμμή), και μετά την επιλογή με τουρνουά μεγέθους $t=2$ (---, διακεκομμένη γραμμή) και μεγέθους $t=10$ (- - -, διακεκομμένη γραμμή). Μέγεθος πληθυσμού $N=1000$.

Στο βιβλίο [Bäck, 1994] η πιθανότητα ένα άτομο με αριθμό i (αύξοντας αριθμός στο σύνολο του πληθυσμού) να επιλεγεί μέσω της επιλογής με τουρνουά δίνεται από τον τύπο :

$$p_i = N^{-t} \cdot ((N-i+1)^t - (N-i)^t)$$

Κάτω από την υπόθεση ότι τα άτομα είναι διατεταγμένα με βάση την τιμή της απόδοσης τους $f(J_1) \leq f(J_2) \leq \dots \leq f(J_N)$. Ας σημειωθεί ότι ο Bäck χρησιμοποιεί μια «ανεστραμμένη» αντικειμενική συνάρτηση όπου το καλύτερο άτομο έχει τον χαμηλότερο αριθμοδείκτη. Για σύγκριση με τα δικά μας αποτελέσματα μετατρέπουμε το πρόβλημα σε ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης χρησιμοποιώντας τη σχέση

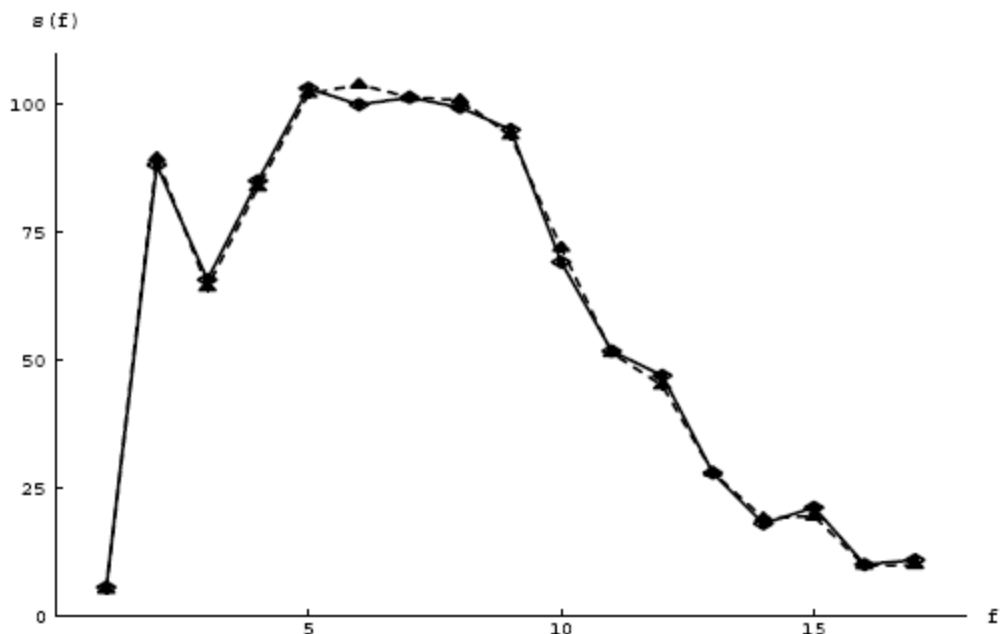
$$j = N - i + 1 :$$

$$p_j = N^{-t} (j^t - (j-1)^t) , \quad 1 \leq j \leq N \quad (6)$$

Αυτή η εξίσωση είναι μια ειδική περίπτωση της (4) μόνο που όλα τα άτομα έχουν διαφορετική τιμή απόδοσης. Έτσι $s(f_i) = 1$ για όλα τα $i \in [1, N]$ και η $S(f_i) = i$ και η

$$p_i = \frac{s^*(f_i)}{N}$$

αυτή η εξίσωση δεν ισχύει εάν μερικά άτομα έχουν την ίδια τιμή απόδοσης.



Σύγκριση μεταξύ θεωρητικής εξαγόμενης κατανομής (—, συνεχής γραμμή) και προσομοίωσης (- - -, διακεκομμένη γραμμή) (Μέγεθος τουρνουά $t = 10$).

Περιγραφή χρησιμοποιώντας συνεχή κατανομή.

Τώρα θα περιγράψουμε την κατανομή $s(f)$ σαν μια συνεχή κατανομή $\bar{s}(f)$ δίνοντας την ευκαιρία στις επόμενες ιδιότητες να εξαρθούν με ευκολία. Για το λόγο αυτό, θεωρούμε συνεχώς κατανεμημένες τιμές απόδοσης. Το εύρος της συνάρτησης $\bar{s}(f)$ είναι $f_0 < f \leq f_n$, χρησιμοποιώντας το ίδιο σύστημα χαρακτήρων και συμβόλων όπως στην διακριτή περίπτωση.

Θα δηλώνουμε όλες τις συναρτήσεις της συνεχούς περίπτωσης με μια άνω παύλα, δηλαδή, θα γράφουμε πχ $\bar{s}(f)$ αντί του $s(f)$. Ομοίως, τα αθροίσματα αντικαθίστανται από ολοκληρώματα, επομένως :

$$\bar{S}(f) = \int_{f_0}^f \bar{s}(x)dx \quad (7)$$

Δηλώνει την συνεχή αθροιστική κατανομή απόδοσης.

Θεώρημα 2 : Έστω \bar{s} η συνεχής κατανομή απόδοσης ολόκληρου του πληθυσμού. Τότε η αναμενόμενη κατανομή απόδοσης $\bar{\Omega}_T^* \bar{s}, t$ μετά την εφαρμογή της επιλογής με τουρνουά με μέγεθος t είναι :

$$\bar{s}^*(f) = \bar{\Omega}_T \bar{s}, t(f) = t \bar{s}(f) \left(\frac{\bar{S}(f)}{N} \right)^{t-1} \quad (8)$$

Απόδειξη: Αναλογικά με την απόδειξη της διακριτής περίπτωσης η πιθανότητα ενός ατόμου με απόδοση f ή χειρότερη να κερδίσει το τουρνουά δίνεται από την :

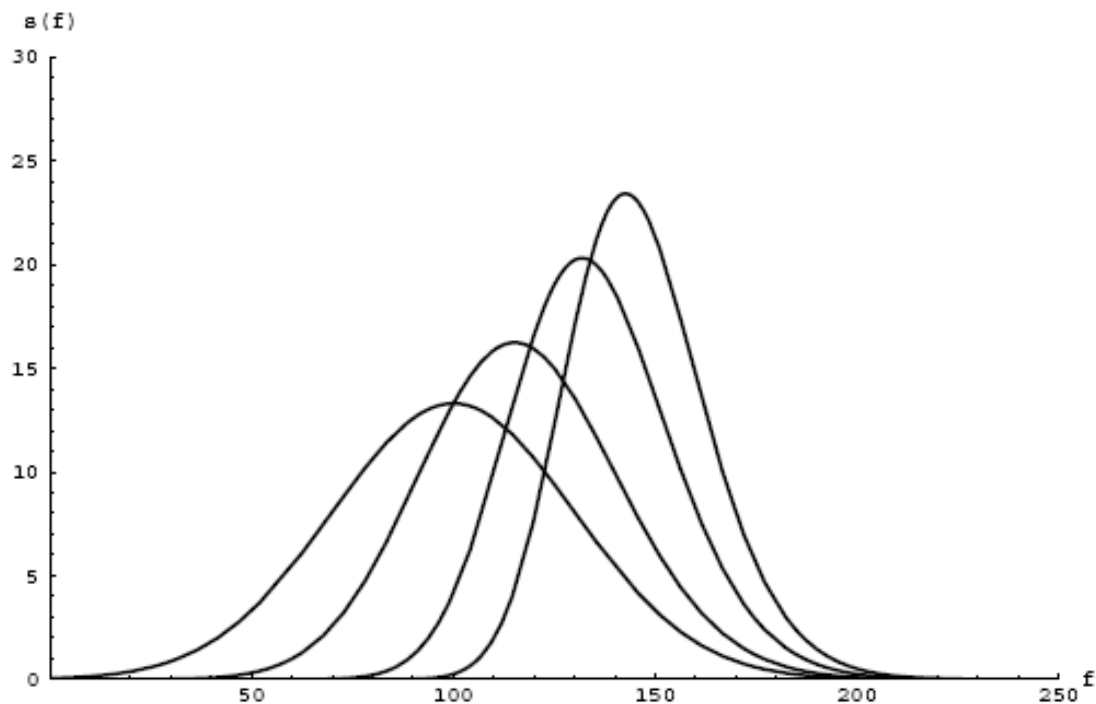
$$\bar{S}^*(f) = N \cdot \left(\frac{\bar{S}(f)}{N} \right)^t \quad (9)$$

Και εφόσον $\bar{s}^*(f) = \frac{d\bar{S}^*(f)}{df}$ οδηγούμαστε στην (8).

Το επόμενο σχήμα δείχνει τα αποτελέσματα των κατανομών μετά την επιλογή με τουρνουά εάν η αρχική κατανομή είναι μια κατανομή Gauss, $G(\mu, \sigma)$ με

$$G(\mu, \sigma)(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x-\mu^2}{2\sigma^2}}. \text{ Η κατανομή } \bar{s}_G(f) = NG(\mu, \sigma)(f) \text{ με } \sigma=30, \mu=100,$$

$N=1000$ και $f_0 = -\infty$, $f_n = +\infty$ και οι προκύπτουσες κατανομές μετά την επιλογή με τουρνουά μεγέθους 2, 5 και 10 δίνονται στην ενδιαφέρουσα περιοχή $f \in [0, 200]$.



Η κατανομή Gauss προσεγγιστικά οδηγεί ξανά σε κατανομές Gauss μετά την εφαρμογή της επιλογής με τουρνουά (από αριστερά προς τα δεξιά : αρχική κατανομή, κατανομή μετά από επιλογή με τουρνουά μεγέθους $t = 2$, $t = 5$, $t = 10$).

Ιδιότητες της επιλογής με τουρνουά

Αλληλουχία των φάσεων επιλογής με τουρνουά

Μια ενδιαφέρουσα ιδιότητα της επιλογής με τουρνουά είναι η αλληλουχία των διαφόρων φάσεων της επιλογής. Θεωρείστε έναν αυθαίρετο πληθυσμό με κατανομή απόδοσης \bar{s} . Εφαρμόζουμε αρχικά επιλογή με τουρνουά μεγέθους t_1 και στη συνέχεια επιλογή με τουρνουά μεγέθους t_2 (χωρίς ενδιάμεση αναπαραγωγή). Η προκύπτουσα κατανομή είναι η ίδια με αυτήν που θα προέκυπτε εάν είχε γίνει μόνο μια επιλογή με τουρνουά μεγέθους $t_1 \cdot t_2$ στην αρχική κατανομή \bar{s} .

Θεώρημα 3: Έστω \bar{s} μια κατανομή απόδοσης και $t_1, t_2 \geq 1$ δυο μεγέθη τουρνουά.

Τότε ισχύει η επομένη εξίσωση :

$$\bar{\Omega}_T^* \bar{\Omega}_T^* \bar{s}, t_1, t_2 = \bar{\Omega}_T^* \bar{s}, t_1 t_2 \quad (10)$$

Απόδειξη:

$$\bar{\Omega}_T^* \bar{\Omega}_T^* \bar{s}, t_1, t_2 =$$

$$t_2 \bar{\Omega}_T^* \bar{s}, t_1 (f) \left(\frac{1}{N} \int_{f_0}^f \bar{\Omega}_T^* \bar{s}, t_1 (x) dx \right)^{t_2-1} = t_2 t_1 \bar{s}(f) \left(\frac{1}{N} \int_{f_0}^f \bar{s}(x) dx \right)^{t_1-1}.$$

$$\cdot \left(\frac{1}{N} \int_{f_0}^f t_1 \bar{s}(x) \left(\frac{1}{N} \int_{f_0}^x \bar{s}(y) dy \right)^{t_1-1} dx \right)^{t_2-1} \text{ και αφού : } \int_{f_0}^f t_1 \bar{s}(x) \left(\frac{1}{N} \int_{f_0}^x \bar{s}(y) dy \right)^{t_1-1} dx = N \left(\frac{1}{N} \int_{f_0}^f \bar{s}(x) dx \right)^{t_1}$$

Μπορούμε να γράψουμε :

$$\bar{\Omega}_T^* \bar{\Omega}_T^* \bar{s}, t_1, f, t_2, f = t_2 t_1 \bar{s}(f) \left(\frac{1}{N} \int_{f_0}^f \bar{s}(x) dx \right)^{t_1-1} \cdot \left(\left(\frac{1}{N} \int_{f_0}^f \bar{s}(x) dx \right)^{t_1} \right)^{t_2-1} =$$

$$t_2 t_1 \bar{s}(f) \left(\frac{1}{N} \int_{f_0}^f \bar{s}(x) dx \right)^{t_1 t_2 - 1} = \bar{\Omega}_T^* \bar{s}, t_1 t_2, f.$$

Στο βιβλίο [Goldberg and Deb, 1991] η αναλογία P_τ των ατόμων με την καλύτερη απόδοση μετά από τ διαδικασίες επιλογής με τουρνουά μεγέθους t (χωρίς αναπαραγωγή) δίνεται από την:

$$P_\tau = 1 - (1 - P_0)^{t^\tau} \quad (11)$$

Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως μια ειδική περίπτωση του θεωρήματος 3.

Πόρισμα 1 :

Έστω $\bar{s} f$ μια κατανομή απόδοσης αναπαριστώμενη ως εξής :

$$\bar{s} f = \beta g f \left(\frac{\int_{f_0}^f g(x) dx}{N} \right)^{\beta-1} \quad (12)$$

Με $\beta \geq 1$ και $\int_{f_0}^f g(x) dx = N$. Τότε η αναμενόμενη κατανομή μετά από επιλογή με τουρνουά μεγέθους t είναι :

$$\bar{s}^* f = \beta t g f \left(\frac{\int_{f_0}^f g(x) dx}{N} \right)^{\beta t-1} \quad (13)$$

Απόδειξη: Εάν υποθέσουμε ότι $\bar{s} f$ είναι το αποτέλεσμα της εφαρμογής επιλογής με τουρνουά μεγέθους β σε μια κατανομή $g(f)$, η (13) μπορεί να παρόχθιε απευθείας μέσω του θεωρήματος 3.

Ρυθμός αναπαραγωγής (Reproduction Rate)

Ορισμός 5 (Ρυθμός αναπαραγωγής – Reproduction Rate) :

Ο ρυθμός αναπαραγωγής $\bar{R} f$ δηλώνει τον λόγο του αριθμού των ατόμων με μια συγκεκριμένη τιμή απόδοσης f μετά και πριν την εφαρμογή της επιλογής :

$$\bar{R} f = \begin{cases} \frac{\bar{s}^* f}{\bar{s} f} & : \bar{s} f > 0 \\ 0 & : \bar{s} f = 0 \end{cases} \quad (14)$$

Μια λογική μέθοδος επιλογής πρέπει να επιβραβεύει – ευνοεί τα άτομα καλής απόδοσης ορίζοντάς τους έναν ρυθμό αναπαραγωγής $\bar{R} f > 1$ και να επιβάλλει ποινή στα άτομα κακής απόδοσης ορίζοντάς τους ρυθμό αναπαραγωγής $\bar{R} f < 1$. Ο ρυθμός αναπαραγωγής της επιλογής με τουρνουά είναι :

$$\bar{R} f = t \cdot \left(\frac{\bar{S} f}{N} \right)^{t-1} \quad (15)$$

Αυτό σημαίνει ότι άτομα με τη χαμηλότερη απόδοση έχουν το χαμηλότερο ρυθμό αναπαραγωγής ενώ άτομα με την υψηλότερη απόδοση έχουν ρυθμό αναπαραγωγής t . Στο ενδιάμεσο ο ρυθμός αναπαραγωγής αυξάνεται μονότονα.

Απώλεια ποικιλίας – ποικιλομορφίας :

Κατά την διάρκεια κάθε φάσης της επιλογής, κακής απόδοσης άτομα θα χαθούν και θα αντικατασταθούν από αντίγραφα καλύτερης απόδοσης ατόμων. Επομένως μια συγκεκριμένη ποσότητα «γενετικού υλικού», αυτή δηλαδή που εμπεριέχεται στα κακής απόδοσης άτομα, χάνεται. Ο αριθμός των ατόμων τα οποία αντικαθίστανται αντιστοιχεί στην ένταση της *απώλειας ποικιλομορφίας - ποικιλότητας*. Αυτό οδηγεί στον επόμενο νέο ορισμό :

Ορισμός 6 (Απώλεια ποικιλομορφίας – Loss of diversity) :

Η απώλεια ποικιλομορφίας p_d είναι η αναλογία των ατόμων ενός πληθυσμού τα οποία δεν επιλέγονται κατά την διάρκεια της διαδικασίας επιλογής.

Θεώρημα 4 :

Η απώλεια ποικιλίας – ποικιλομορφίας της διαδικασίας επιλογής με τουρνουά είναι :

$$p_d = t^{-\frac{1}{t-1}} - t^{-\frac{t}{t-1}} \quad (16)$$

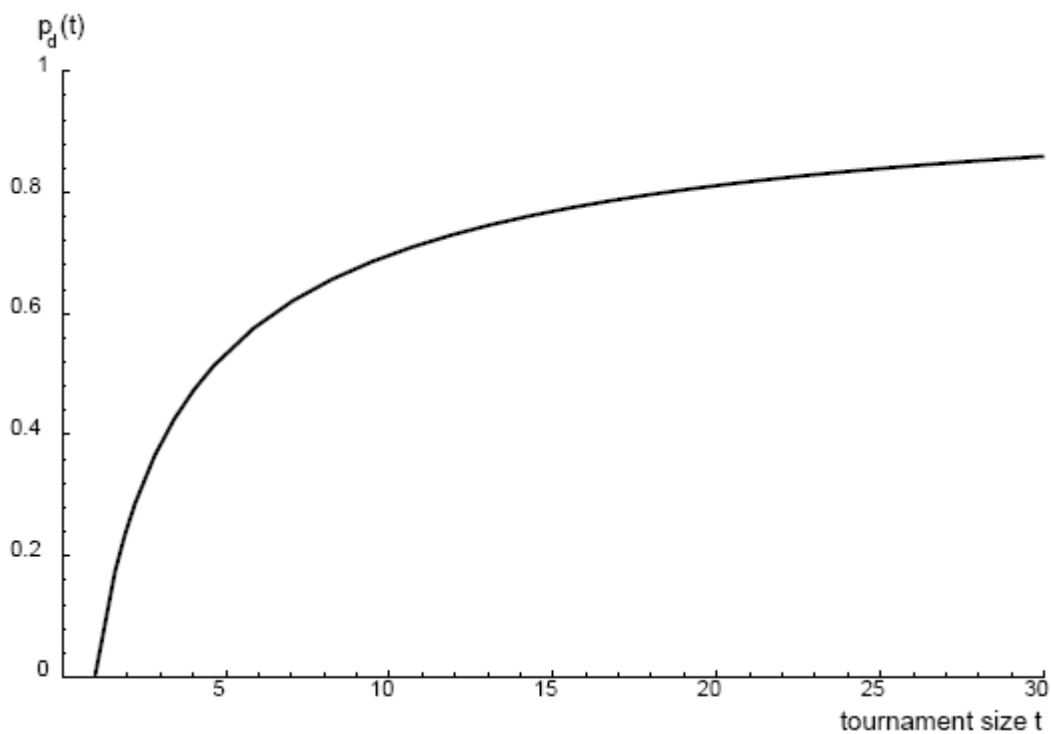
Απόδειξη:

Έστω f_z μια τιμή απόδοσης τέτοια ώστε $\bar{R}_{f_z} = 1$. Για όλες τις τιμές απόδοσης $f \in [f_0, f_z]$ ο ρυθμός αναπαραγωγής είναι μικρότερος του 1. Επομένως ο αριθμός των ατόμων τα οποία δεν επιλέχτηκαν κατά την διάρκεια της διαδικασίας επιλογής δίνεται από την $\int_{f_0}^{f_z} \bar{s}(x) - \bar{s}^*(x) dx$. Επακόλουθο είναι ότι :

$$\begin{aligned} p_d &= \frac{1}{N} \int_{f_0}^{f_z} \bar{s}(x) - \bar{s}^*(x) dx = \frac{1}{N} \int_{f_0}^{f_z} \bar{s}(x) dx - \int_{f_0}^{f_z} \bar{s}^*(x) dx \\ &= \frac{1}{N} \bar{S}_{f_z} - \bar{S}^*_{f_z} \end{aligned}$$

Από την απαίτηση ότι $\bar{R} f_z = 1$ επακόλουθο είναι ότι $\bar{S} f_z = N \cdot t^{-\frac{1}{t-1}}$ και επομένως $p_d = t^{-\frac{1}{t-1}} - t^{-\frac{t}{t-1}}$.

Έχει ενδιαφέρον να σημειώσουμε ότι η απώλεια της ποικιλομορφίας είναι ανεξάρτητη από την αρχική κατανομή της απόδοσης. Γίνεται αντιληπτό ότι ο αριθμός των ατόμων τα οποία χάνονται, αυξάνεται με το μέγεθος του τουρνουά (όπως φαίνεται και στο επόμενο σχήμα). Σχεδόν ο μισός πληθυσμός έχει χαθεί σε ένα τουρνουά μεγέθους $t=5$.



Απώλεια ποικιλίας – ποικιλομορφίας p_d της μεθόδου επιλογής με τουρνουά.

Ένταση επιλογής (Selection intensity) :

Ο όρος «selection intensity» (ένταση επιλογής) ή «selection pressure» (πίεση επιλογής) συχνά χρησιμοποιείται για σε διαφορετικά πλαίσια και για διαφορετικές ιδιότητες μιας μεθόδου επιλογής. Οι Goldberg και Deb [Goldberg and Deb , 1991] και ο Bäck [Bäck ,1994] χρησιμοποιούν τον όρο « takeover time» (χρόνος εξαγοράς) για τον ορισμό της selection pressure.

Εδώ χρησιμοποιούμε τον όρο «selection intensity» με τον ίδιο τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιείται στην γενετική [Bulmer, 1980]. Ο Mühlenbein δανείστηκε τον όρο και τον εισήγαγε στους γενετικούς αλγορίθμους. [Mühlenbein and Schlierkamp-Voosen, 1993].

Η αλλαγή στην μέση απόδοση του πληθυσμού είναι μια λογική μονάδα μέτρησης της έντασης της επιλογής (selection intensity) , άλλα αυτή εξαρτάται από την αρχική κατανομή απόδοσης. Χρησιμοποιώντας την κανονική κατανομή Gauss $G(0,1)$ σαν αρχική κατανομή απόδοσης οδηγούμαστε στον επόμενο ορισμό.

Ορισμός 7 (Ένταση Επιλογής – Selection Intensity) :

Η ένταση επιλογής (selection intensity) I είναι η αναμενόμενη μέση τιμή της απόδοσης ολόκληρου του πληθυσμού μετά την εφαρμογή μιας μεθόδου επιλογής Ω

στην κανονική κατανομή Gauss $G(0,1)$ $f := \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^2}{2}}$:

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} f \bar{M}^* G(0,1) f df \quad (17)$$

Η «ενεργός» μέση τιμή απόδοσης \bar{M}^* μιας κατανομής Gauss με μέση τιμή μ και διακύμανση σ^2 , μπορεί εύκολα να υπολογιστεί ότι είναι $\bar{M}^* = \sigma \cdot I + \mu$. Ας σημειωθεί ότι αυτός ο ορισμός της έντασης επιλογής μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε περίπτωση που η μέθοδος επιλογής είναι «scale and translation invariant». Αυτό ισχύει για την μέθοδο επιλογής με τουρνουά όπως δείχνεται και για παράδειγμα στο βιβλίο [de la Maza and Tidor, 1993].

Για τον υπολογισμό της έντασης επιλογής της μεθόδου τουρνουά η επομένη ολοκληρωτική εξίσωση :

$$I_T(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} tx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \left(\int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} dy \right)^{t-1} dx \quad (18)$$

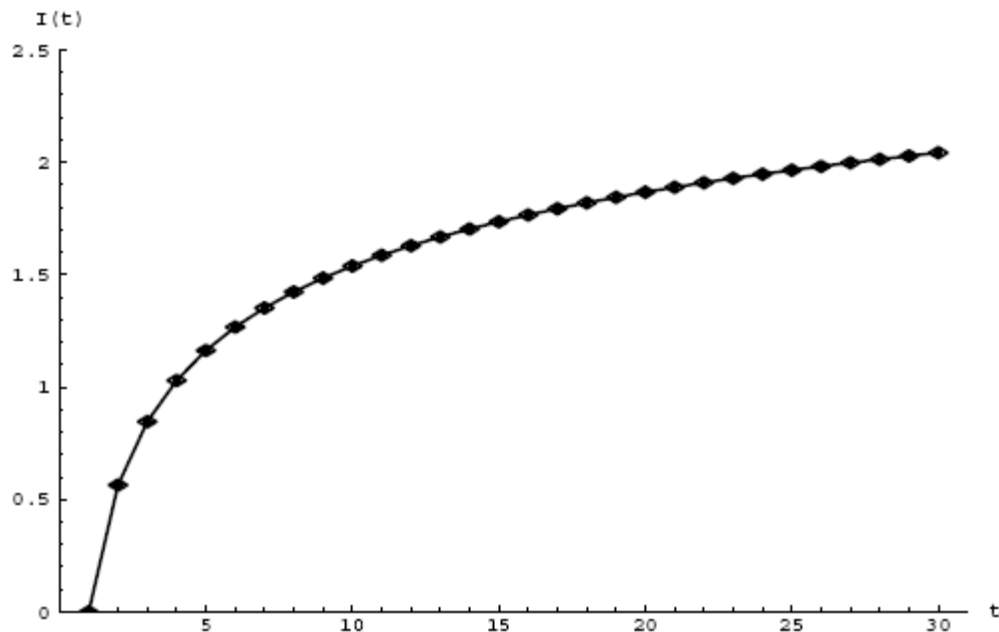
πρέπει να υπολογιστεί.

Αυτό μπορεί να γίνει αναλυτικά για τις περιπτώσεις μεγέθους $t = 2$ και $t = 3$:

$$I_T(2) = \frac{1}{\sqrt{\pi}}$$

$$I_T(3) = \frac{3}{2\sqrt{\pi}}$$

Για μεγαλύτερα μεγέθη τουρνουά η (18) μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια μέσω αριθμητικής παρεμβολής. Το αποτέλεσμα φαίνεται στο επόμενο σχήμα για μεγέθη τουρνουά στην περιοχή 1 έως 30.



Εξάρτηση έντασης επιλογής (selection intensity) από το μέγεθος του τουρνουά t.

Οι Thierens και Goldberg καταλήγουν για ένα μέγεθος τουρνουά 2, στην ίδια μέση τιμή απόδοσης [Thierens and Goldberg, 1994] επιλέγοντας δυο εντελώς διαφορετικούς τρόπους δράσης. Αλλά η τεχνική τους δεν μπορεί να επεκταθεί και για διαφορετικού μεγέθους τουρνουά.

Μια ρητή έκφραση της (18) ίσως να μην υπάρχει. Μέσω της μεθόδου «steepest decent method» (βλ. πχ.[Henrici,1977]) μια προσέγγιση για μεγάλα μεγέθη τουρνουά μπορεί να δοθεί. Αλλά ακόμα και για μικρά μεγέθη αυτή η προσέγγιση δίνει καλά αποτελέσματα.

Οι υπολογισμοί οδήγησαν στην εξής εξίσωση επιστροφής (recursion equation) :

$$I_T(t)^k \approx \sqrt{c_k \ln(t) - \ln I_T(t)^{k-1}} \quad (19)$$

με $I_T(t)^0 = 1$ και k το βάθος επιστροφής (recursion depth). Ο υπολογισμός της σταθεράς c_k είναι εξαιρετικά δύσκολος και ξεφεύγει από τους σκοπούς της παρούσης ενότητας. Παίρνοντας μια πρόχειρη προσέγγιση με $k = 2$ προκύπτει η επομένη εξίσωση η οποία προσεγγίζει τη (18) με ένα σχετικό σφάλμα μικρότερο του 2,4% για $t \in [2, 5]$, για μεγέθη τουρνουά $t > 5$ το σχετικό σφάλμα είναι μικρότερο του 1% :

$$I_T(t) \approx \sqrt{2 \ln(t) - \ln \sqrt{4.14 \ln(t)}} \quad (20)$$

Διακύμανση επιλογής (Selection Variance) :

Επιπροσθέτως της έντασης επιλογής (selection intensity) θα εισάγουμε και τον όρο *διακύμανση επιλογής (selection variance)*

Ορισμός 8 (Διακύμανση Επιλογής – Selection Variance) :

Η διακύμανση επιλογής V είναι η αναμενόμενη διακύμανση της κατανομής απόδοσης ολόκληρου του πληθυσμού μετά την εφαρμογή μιας μεθόδου επιλογής Ω στην κανονική κατανομή Gauss, G(0,1).

$$V = \int_{-\infty}^{+\infty} f - I^2 \bar{\Omega}^* G 0,1 f df \quad (21)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχει διαφορά μεταξύ της διακύμανσης επιλογής και της απώλειας ποικιλομορφίας. Η απώλεια ποικιλομορφίας δίνει την αναλογία των ατόμων τα οποία δεν επιλέχτηκαν, ανεξάρτητα από την τιμή της απόδοσής τους. Έτσι, είναι δυνατό να υπολογίσουμε την απώλεια ποικιλομορφίας ανεξάρτητα από την αρχική κατανομή απόδοσης. Η διακύμανση επιλογής ορίζεται ως η νέα διακύμανση της κατανομής απόδοσης θεωρώντας μια αρχική κατανομή απόδοσης Gauss. Με τον προσδιορισμό των τιμών απόδοσης συγκεκριμένοι ορισμοί για την διακύμανση επιλογής (όπως και για την ένταση επιλογής) μπορούν να δοθούν.

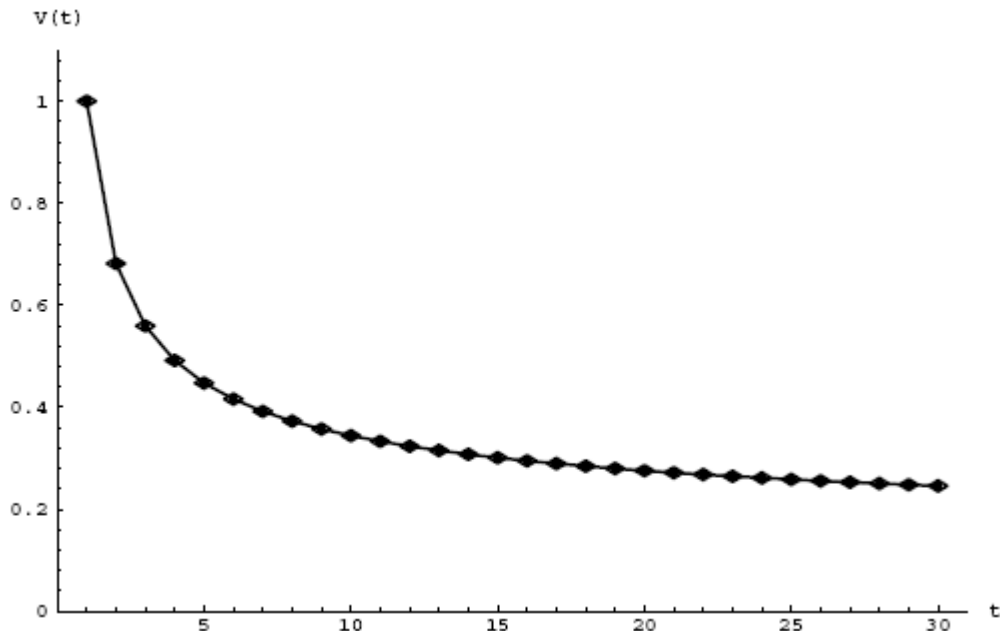
Για τον προσδιορισμό της διακύμανσης επιλογής πρέπει να επιλύσουμε την παρακάτω εξίσωση :

$$V_T(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} t - x - I(t)^2 \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \cdot \left(\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} dy \right)^{t-1} dx \quad (22)$$

Για ένα διπλό – δυαδικό τουρνουά έχουμε :

$$V_T(2) = 1 - \frac{1}{\pi}$$

Εδώ και πάλι μόνο αριθμητικές μέθοδοι και υπολογισμοί μπορούν να μας δώσουν την διακύμανση επιλογής για τουρνουά μεγαλύτερου μεγέθους. Το επόμενο σχήμα δείχνει τη εξάρτηση της διακύμανσης επιλογής από το μέγεθος του τουρνουά.



Η εξάρτηση της Διακύμανσης $V(t)$ Επιλογής από το μέγεθος του Τουρνουά t .

Η ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΗ (Crossover)

Ο προσωρινός πληθυσμός που προέκυψε από τη διαδικασία της επιλογής πρέπει να περάσει από τη διαδικασία ζευγαρώματος για να πραγματοποιηθεί ένα είδος γονιμοποίησης, όπως συμβαίνει και στη φύση. Η νέα, λοιπόν, ομάδα ατόμων που προέκυψε από την επιλογή σχηματίζει με τυχαίο τρόπο ομάδες των δύο. Το ποιος θα ζευγαρώσει με ποιον, από τα άτομα του προσωρινού πληθυσμού, ίσως να επηρεάζει την ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου. Προς το παρόν όμως αυτό αποτελεί αντικείμενο μελέτης και στη βιβλιογραφία σε όλες τις εφαρμογές το ζευγάριωμα γίνεται με τυχαίο τρόπο. Σε κάθε ομάδα, τα δύο μέλη παίρνουν μέρος σε μια απλή λειτουργία ανταλλαγής γενετικού υλικού που ονομάζεται **διασταύρωση**. Ο σκοπός της διασταύρωσης είναι η δημιουργία νέων ατόμων (συμβολοσειρών) μέσω της ανταλλαγής πληροφοριών γενετικού υλικού από τα άτομα που βρίσκονται στην δεξαμενή ζευγαρώματος (mating pool). Η διασταύρωση είναι μια απαραίτητη λειτουργία που συμβάλει αποφασιστικά στην επίδοση ενός ΓΑ. Εξ αιτίας αυτής της σπουδαιότητας, έχει γίνει αρκετή έρευνα και έχουν επινοηθεί πολλοί τρόποι υλοποίησης του (τελεστές διασταύρωσης). Μερικοί μπορούν να εφαρμοστούν σε κάθε τύπο προβλήματος, ενώ άλλοι είναι πιο κατάλληλοι και εξειδικευμένοι για ειδικές περιπτώσεις. Στους περισσότερους τελεστές διασταύρωσης, δυο άτομα – συμβολοσειρές (designs) διαλέγονται τυχαία μέσα από την δεξαμενή ζευγαρώματος η οποία έχει δημιουργηθεί κατά την προηγούμενη φάση της επιλογής και

αναπαραγωγής, και μερικά «κομμάτια» των συμβολοσειρών τους ανταλλάσσονται μεταξύ τους.

Στην πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη διαδικασία, γνωστή και ως διασταύρωση μονού σημείου (single point crossover), επιλέγεται μια θέση διασταύρωσης τυχαία κατά μήκος της συμβολοσειράς δυο ατόμων, και τα δυαδικά ψηφία (alleles) τα οποία βρίσκονται δεξιά της θέσης διασταύρωσης ανταλλάσσονται ή αντιμετατίθενται (swapped or exchanged) μεταξύ των δυο αυτών ατόμων. Τα δυο αυτά επιλεγμένα άτομα για διασταύρωση ονομάζονται γονείς (parent strings) και τα προκύπτοντα άτομα μετά τη διασταύρωση ονομάζονται απόγονοι ή παιδιά (child strings)

Για παράδειγμα, εάν δυο διανύσματα σχεδίασης (συμβολοσειρές ή άτομα ή γονείς) καθένα με μέγεθος συμβολοσειράς 10, δίνονται από :

$$\begin{aligned} \text{(Parent 1 – Γονέας 1)} \quad X_1 &= \{ 0 \ 1 \ 0 \ | \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \} \\ \text{(Parent 2 – Γονέας 2)} \quad X_2 &= \{ 1 \ 0 \ 0 \ | \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \} \end{aligned}$$

Το αποτέλεσμα της διασταύρωσης όταν η θέση διασταύρωσης είναι η 3 δίνεται από :

$$\begin{aligned} \text{(Offspring 1 – Απόγονος 1)} \quad X_3 &= \{ 0 \ 1 \ 0 \ | \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \} \\ \text{(Offspring 2 – Απόγονος 2)} \quad X_4 &= \{ 1 \ 0 \ 0 \ | \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \} \end{aligned}$$

Στόχος της διασταύρωσης είναι επίσης η νέα γενιά που θα προκύψει μετά την εφαρμογή της να περιλαμβάνει άτομα που θα διαφέρουν από τους γονείς τους και θα φέρουν συνδυασμό των καλύτερων χαρακτηριστικών τους. Εφόσον ο τελεστής διασταύρωσης συνδυάζει μέρη – κομμάτια συμβολοσειρών από δυο γονείς (οι οποίοι έχουν καλή απόδοση), η προκύπτουσα (απόγονος) συμβολοσειρά αναμένεται να έχει ακόμη καλύτερη απόδοση δεδομένου ότι μια κατάλληλη θέση διασταύρωσης έχει επιλεγεί. Παρ' όλα αυτά η κατάλληλη θέση διασταύρωσης δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων. Έτσι η θέση διασταύρωσης πολύ συχνά επιλέγεται με τυχαίο τρόπο. Οι απόγονοι που δημιουργούνται μέσω μιας τυχαίας θέσης διασταύρωσης μπορεί να είναι αλλά μπορεί και να μην είναι το ίδιο καλοί ή καλύτεροι από τους γονείς τους με όρους πάντα τιμών της απόδοσής τους. Εάν είναι καλύτεροι από τους γονείς τους, θα συμβάλλουν σε μια γρηγορότερη βελτίωση της μέσης απόδοσής της νέας γενιάς. Από την άλλη, εάν είναι χειρότεροι από τους γονείς τους αυτό δεν μας απασχολεί και πολύ για την επιτυχία του γενετικού αλγορίθμου γιατί χειρότεροι απόγονοι δεν θα επιζήσουν για πολύ καθώς είναι λιγότερο πιθανό, σε μια μελλοντική επανάληψη της διαδικασίας επιλογής, να επιλεγούν ώστε να περάσουν στην δεξαμενή αναπαραγωγής και μέσω αυτής να δώσουν τα παιδιά των επόμενων γενεών (ας μην ξεχνάμε την

βασική στρατηγική «η επιβίωση του ικανότερου» ή «the survival of the fittest» η οποία υιοθετείται στους γενετικούς αλγορίθμους!).

Ερευνητές που ασχολούνται χρόνια με τους ΓΑ υποστηρίζουν ότι, αν αφαιρεθεί η διασταύρωση από έναν ΓΑ, τότε μειώνεται σημαντικά η απόδοσή του, αλλά αυτή δεν είναι μια άποψη με καθολική αποδοχή. Ένα ενδεικτικό της χρησιμότητας της διασταύρωσης είναι η ανακατεύθυνση του ψαξίματος σε νέες «απάτητες» περιοχές του χώρου αναζήτησης. Έτσι διευρύνεται το πεδίο δράσης του αλγορίθμου και αυξάνουν οι πιθανότητες επιτυχίας του. Όπως ειπώθηκε και παραπάνω, το αποτέλεσμα της διασταύρωσης μπορεί να είναι χρήσιμο και εποικοδομητικό αλλά μπορεί και να είναι επιζήμιο για τον αλγόριθμο. Γι' αυτό το λόγο είναι επιθυμητό να μην χρησιμοποιούνται όλα τα άτομα της δεξαμενής ζευγαρώματος για διασταύρωση αλλά απλά να διατηρούνται μερικά άτομα καλής απόδοσης αναλλοίωτα ως μέλη της επόμενης γενιάς (άτομα «ελίτ» ή **elitism** approach). Στην πράξη, η διασταύρωση χρησιμοποιείται με παραμετροποιημένη μορφή, δηλαδή λαμβάνει χώρα με πιθανότητα, την λεγόμενη **πιθανότητα διασταύρωσης (crossover probability) p_c** , που καθορίζεται από το σχεδιαστή του ΓΑ. Επομένως μόνο $(100 \cdot p_c)$ ποσοστό % των ατόμων της δεξαμενής ζευγαρώματος θα χρησιμοποιηθούν για διασταύρωση, ενώ $100 \cdot (1 - p_c)$ ποσοστό % των ατόμων της δεξαμενής ζευγαρώματος θα μεταφερθούν αναλλοίωτα στην επομένη γενιά. Συνήθως, αυτή η πιθανότητα ποικίλει από πρόβλημα σε πρόβλημα, ενώ είναι δυνατό και να αλλάζει κατά τον χρόνο τρεξίματος. Επίσης, πρέπει να αναφέρουμε ότι η τιμή αυτής της πιθανότητας επηρεάζει το χρόνο τρεξίματος του αλγορίθμου, δηλαδή τη σύγκλισή του. Η τιμή $p_c = 1$, σημαίνει συνεχή εφαρμογή του τελεστή διασταύρωσης, άρα το ψάξιμο γίνεται με μικρό βήμα. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα η αναζήτηση να γίνει σε όλο το χώρο, άρα ο αλγόριθμος θα συγκλίνει στο βέλτιστο, αλλά πολύ αργά. Αντίθετα, χρησιμοποιώντας μικρές τιμές της p_c έχει σαν αποτέλεσμα το ψάξιμο να κάνει άλματα, άρα ο αλγόριθμος είναι πιθανόν να συγκλίνει πιο γρήγορα. Χρησιμοποιώντας μεγάλο βήμα, υπάρχει ο κίνδυνος, ο αλγόριθμος να ξεπεράσει το βέλτιστο και έτσι να αποκλίνει. Έτσι, επιλέγουμε συνήθως μεγάλο βήμα στην αρχή του ψαξίματος, και στη συνέχεια, όταν ο αλγόριθμος προσεγγίσει την τιμή του βέλτιστου, χρησιμοποιούμε μικρό βήμα αναζήτησης. Με αυτό τον τρόπο, μπορούμε να αυξήσουμε την ταχύτητα αναζήτησης, χωρίς να κινδυνεύουμε να αποκλίνει ο αλγόριθμος.

Η ΜΕΤΑΛΛΑΞΗ (Mutation)

Τελευταία στον κύκλο αναπαραγωγικής διαδικασίας και, ίσως, λιγότερο σημαντική, αλλά πάντως χρήσιμη, είναι η μετάλλαξη. Είναι μια λειτουργία που όταν συμβαίνει αραιά στη φύση δρα βελτιωτικά για τους οργανισμούς και γενικά για την εξέλιξη της ζωής. Ανάλογος είναι ο ρόλος της και στα τεχνητά περιβάλλοντα. Αρκετές μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση της διαδικασίας της μετάλλαξης. Η λειτουργία της είναι απλή: Ενεργεί σε ένα μόνο οργανισμό κάθε φορά. Καθώς αντιγράφονται δυαδικά ψηφία από τον γονέα στον απόγονο, μια θέση μετάλλαξης κατά μήκος της συμβολοσειράς επιλέγεται τυχαία με μικρή πιθανότητα, τη λεγόμενη **πιθανότητα μετάλλαξης (mutation probability) p_m** , και το δυαδικό ψηφίο της θέσης αυτής αλλάζει από 0 σε 1 ή από 1 σε 0 (αντιστρέφεται) (μετάλλαξη μονού σημείου όπως μόλις περιγράφηκε ή single point mutation. Στην μετάλλαξη ψηφίο προς ψηφίο (bit-wise mutation) κάθε δυαδικό ψηφίο της συμβολοσειράς επιλέγεται διαδοχικά με πιθανότητα p_m και αλλάζει η τιμή του από 0 σε 1 ή το αντίστροφο. Αριθμητικά, η διαδικασία μπορεί να υλοποιηθεί ως εξής : ένας τυχαίος αριθμός μεταξύ του 0 και του 1 δημιουργείται / επιλέγεται. Εάν αυτός είναι μικρότερος από p_m , τότε το εν λόγω δυαδικό ψηφίο αλλάζει, ενώ σε άλλη περίπτωση το δυαδικό ψηφίο παραμένει ως έχει. Είναι πολύ σημαντικό η πιθανότητα να πραγματοποιηθεί η μετάλλαξη να είναι αρκετά μικρή (περίπου μία μετάλλαξη σε κάθε χίλια ψηφία που αντιγράφονται), γιατί σε αντίθετη περίπτωση ο ΓΑ εκφυλίζεται σε τυχαίο ψάξιμο.

Ο σκοπός της μετάλλαξης είναι (1) να δημιουργήσει μια συμβολοσειρά (διάλυμα σχεδίασης ή άτομο) στην «γειτονιά» του τρέχοντος ατόμου εφαρμόζοντας έτσι σε αυτήν μια τοπική αναζήτηση, (2) να λειτουργεί ως δικλίδα ασφάλειας ενάντια σε πρόωμη απώλεια σημαντικής γενετικής πληροφορίας σε μια δεδομένη θέση και (3) να διατηρήσει μια ποικιλία – ποικιλομορφία στον πληθυσμό.

Σαν παράδειγμα, ας θεωρήσουμε τον ακόλουθο πληθυσμό μεγέθους $n = 5$ με μέγεθος συμβολοσειράς (μήκος) 10 :

1 0 0 0 1 0 0 0 1 1

1 0 1 1 1 1 0 1 0 0

1 1 0 0 0 0 1 1 0 1

1 0 1 1 0 1 0 0 1 0

1 1 1 0 0 0 1 0 0 1

Εδώ και τα 5 άτομα (συμβολοσειρές) έχουν το ψηφίο 1 στην πρώτη θέση δυαδικού ψηφίου. Έστω ότι το πραγματικό βέλτιστο του προβλήματος επιβάλει την παρουσία του αριθμού 0 στην πρώτη θέση δυαδικού ψηφίου. Το 0 δεν μπορεί να δημιουργηθεί κατά την διάρκεια ούτε της επιλογή και αναπαραγωγής, αλλά ούτε και της διασταύρωσης. Όμως, όταν χρησιμοποιηθεί ο τελεστής μετάλλαξης το δυαδικό ψηφίο στην πρώτη θέση θα αλλάξει από 1 σε 0 με μια πιθανότητα (p_m).

Αν και υπάρχει κάποια σύγκυση για το ρόλο της μετάλλαξης, τόσο φυσικής όσο και τεχνητής, το σίγουρο είναι πως είναι απαραίτητη. Όπως ήδη αναφέρθηκε λειτουργεί ως ασφαλιστική δικλείδα για τις περιπτώσεις, κατά τις οποίες η επιλογή και η διασταύρωση, ενδεχομένως, χάνουν κάποιες πολύτιμες γενετικές πληροφορίες. Όταν συμβαίνει, επίσης, ανακατευθύνει την αναζήτηση και εξασφαλίζει ότι κανένα σημείο του χώρου αναζήτησης δεν αποκλείεται από τη διαδικασία του ψαξίματος.

Μικρή σύνοψη γενετικών διαδικασιών

Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι οι τρεις γενετικοί τελεστές – αναπαραγωγή, διασταύρωση, μετάλλαξη – (reproduction, crossover, mutation), είναι απλοί στην υλοποίησή τους. Ο *τελεστής επιλογής και αναπαραγωγής* (selection and reproduction operator) επιλέγει υψηλής απόδοσης άτομα για τοποθέτηση στην *δεξαμενή ζευγαρώματος*, στη συνέχεια ο *τελεστής διασταύρωσης* (crossover operator) ανασυνδυάζει γενετικά (διασταυρώνει) κάποια μέρη της γενετικής αλυσίδας (συμβολοσειρά) των ατόμων υψηλής απόδοσης τα οποία βρίσκονται στην δεξαμενή ζευγαρώματος επιλέγοντας τα ανά δυο (parent strings) και έτσι δημιουργεί απογόνους (child strings) οι οποίοι θα αποτελέσουν την επόμενη γενιά, και τέλος ο *τελεστής μετάλλαξης* (mutation operator) επιφέρει τοπικές αλλαγές (μεταλλάξεις) στην συμβολοσειρά κάθε ατόμου προς μετάλλαξη.

Η χρήση των τριών αυτών γενετικών τελεστών αποδίδει με επιτυχία νέες γενιές με βελτιωμένη τιμή μέσης απόδοσης του πληθυσμού. Αν και η βελτίωση της απόδοσης των ατόμων σε επιτυχείς γενεές δεν έχει αποδειχτεί με μαθηματικό, αυστηρό τρόπο, η όλη διαδικασία έχει δείξει ότι συγκλίνει στην βέλτιστη τιμή της εκάστοτε αντικειμενικής συνάρτησης. Ας σημειωθεί επίσης ότι, σε περίπτωση που κάποια άτομα κακής απόδοσης δημιουργηθούν κατά οποιοδήποτε στάδιο της διαδικασίας, θα εξαλειφθούν μέσω του τελεστή επιλογής και αναπαραγωγής στην επομένη γενιά.

Εν τούτοις οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms) έχουν χρησιμοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία στην επίλυση μιας μεγάλης γκάμας προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Εν κατακλείδι , μπορούμε να δώσουμε την δομή ενός Γενετικού Αλγορίθμου (γενική περίπτωση) σαν μία υπολογιστική διαδικασία με τα εξής βήματα για την μεγιστοποίηση μιας συνάρτησης $F(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$:

- 1) Επέλεξε ένα κατάλληλο μήκος συμβολοσειράς $l = n \cdot q$ για την αναπαράσταση των n μεταβλητών σχεδίασης του διανύσματος σχεδίασης X . Θεώρησε κατάλληλες τιμές για τις εξής παραμέτρους : μέγεθος πληθυσμού m , πιθανότητα διασταύρωσης p_c , πιθανότητα μετάλλαξης p_m , αποδεκτή τιμή της τυπικής απόκλισης των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης $(S_f)_{\max}$ για να χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο σύγκλισης, μέγιστος αριθμός γενεών (i_{\max}) ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί σαν δεύτερο κριτήριο σύγκλισης.
- 2) Δημιούργησε έναν τυχαίο πληθυσμό μεγέθους m , κάθε ένας θα περιέχει μια συμβολοσειρά μεγέθους $l = n \cdot q$. Αξιολόγησε τις τιμές απόδοσης F_i , $i = 1, 2, \dots, m$, των m συμβολοσειρών.
- 3) Εκτέλεσε τη διαδικασία της επιλογής και αναπαραγωγής
- 4) Εκτέλεσε τη διαδικασία της διασταύρωσης με πιθανότητα p_c .
- 5) Εκτέλεσε τη διαδικασία της μετάλλαξης με πιθανότητα p_m ώστε να δημιουργηθεί ο νέος πληθυσμός (γενιά) των m συμβολοσειρών
- 6) Αξιολόγησε τις τιμές απόδοσης F_i , $i = 1, 2, \dots, m$, των m συμβολοσειρών του νέου πληθυσμού (γενιάς). Υπολόγισε την τυπική απόκλιση των m τιμών απόδοσης.
- 7) Έλεγχε την σύγκλιση του εν λειτουργία αλγορίθμου. Αν $(S_f) < (S_f)_{\max}$, το κριτήριο σύγκλισης έχει ικανοποιηθεί και ο αλγόριθμος μπορεί να σταματήσει. Σε άλλη περίπτωση ,προχώρα στο βήμα 8.
- 8) Έλεγχε τον αριθμό των γενεών. Εάν $i > i_{\max}$ οι υπολογισμοί έχουν λάβει χώρα για τον μέγιστο επιτρεπόμενο αριθμό γενεών και ο αλγόριθμος μπορεί να σταματήσει. Σε άλλη περίπτωση , θέσε τον αριθμό των γενεών $i = i + 1$ και πήγαινε στο βήμα 3.

2.8 Αναφορά στην Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση με Χρήση

Γενετικών Αλγορίθμων (Reference to Multiobjective

Optimization with Use of Genetic Algorithms)

Κατά την διάρκεια των τελευταίων τριών δεκαετιών, μεγάλη και αξιοσημείωτη προσοχή έχει δοθεί στους γενετικούς αλγορίθμους και αφορά την προοπτική τους ως μια καινοτόμα προσέγγιση στην επίλυση πολυκριτηριακών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Αυτό το θέμα έχει αξιολογηθεί από τους Fonseca και Fleming, Horn και Tamaki, Kita και Kobayashi. Σε αυτή την ενότητα θα αναφερθούμε εν συντομία τις βασικές ιδέες πίσω από τις διάφορες προσεγγίσεις επίλυσης προβλημάτων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης με γενετικούς αλγορίθμους.

2.8.1 Χαρακτηριστικά γενετικής αναζήτησης.

Τα έμφυτα χαρακτηριστικά των γενετικών αλγορίθμων επιδεικνύουν γιατί η γενετική αναζήτηση μπορεί και είναι σε μεγάλο βαθμό κατάλληλη για την επίλυση προβλημάτων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Το βασικό χαρακτηριστικό των γενετικών αλγορίθμων είναι η πολυκατευθυντική και ολική – σφαιρική αναζήτηση. Μέσω της διατήρησης πληθυσμών πιθανών λύσεων από γενιά σε γενιά. Η προσέγγιση από γενιά σε γενιά είναι πολύ χρήσιμη όταν εξερευνώνται Pareto λύσεις. Οι γενετικοί αλγόριθμοι δεν έχουν πολλές μαθηματικές απαιτήσεις και μπορούν να αντιμετωπίσουν όλων των ειδών τις αντικειμενικές συναρτήσεις και τους περιορισμούς. Λόγω του εξελικτικού χαρακτήρα τους, οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναζήτηση λύσεων χωρίς να επηρεάζονται από τις εσωτερικές λεπτομέρειες λειτουργίας ενός προβλήματος. Επομένως, θεωρείται ότι πολύ περισσότερα και πολυπλοκότερα προβλήματα μπορούν να λυθούν μέσω των γενετικών αλγορίθμων παρά με τις συμβατικές μεθόδους.

2.8.2 Μηχανισμοί υπολογισμού τιμής απόδοσης κάθε ατόμου σε

πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης (Fitness

assignment mechanism in multiobjective optimization problems).

Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι ουσιαστικά ένας τύπος μεταστρατηγικής εύρεσης λύσεων. Όταν εφαρμόζουμε γενετικούς αλγορίθμους για την επίλυση ενός δεδομένου προβλήματος, είναι απαραίτητο να ορίσουμε καθένα από τα βασικά «συστατικά» τους, όπως μέθοδοι κωδικοποίησης, τελεστές αναπαραγωγής, υπολογισμοί απόδοσης, τελεστές επιλογής, διαχείριση περιορισμών και ούτω καθεξής, για να πετύχουμε αποτελεσματική αναπαράσταση και υλοποίηση του προβλήματος. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων τριών δεκαετιών πολλές τεχνικές οι οποίες χρησιμοποιούν γενετικούς αλγορίθμους για προβλήματα βελτιστοποίησης με περιορισμούς και για συνδυαστικά προβλήματα βελτιστοποίησης έχουν αναπτυχθεί και είναι εύκολα εφαρμόσιμες. Τα προβλήματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης είναι μια φυσική επέκταση των δυο προαναφερθέντων κατηγοριών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Επομένως όταν προσπαθούμε να προσαρμόσουμε τους γενετικούς αλγορίθμους στην επίλυση ενός προβλήματος πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, το μόνο που πρέπει να κάνουμε είναι να εξετάσουμε μερικά ειδικά θέματα τα οποία αφορούν την πολυκριτηριακή περίπτωση.

Ένα ειδικό πρόβλημα που προκύπτει κατά την επίλυση πολυκριτηριακών προβλημάτων βελτιστοποίησης με χρήση γενετικών αλγορίθμων είναι το πώς θα καθορίσουμε την τιμή της απόδοσης του κάθε ατόμου - υποψήφιας λύσης, με βάση τα πολλαπλά κριτήρια. Ο μηχανισμός υπολογισμού τιμής απόδοσης κάθε ατόμου έχει μελετηθεί σε μεγάλο βαθμό τις τελευταίες δυο δεκαετίες και αρκετές μέθοδοι έχουν προταθεί, δοκιμαστεί και αξιολογηθεί. Εν συντομία, αυτές οι μέθοδοι μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής :

- 1) Vector Evaluation Approach
- 2) Weighted – sum approach
- 3) Pareto – based approach
- 4) Compromise approach
- 5) Goal programming approach

Με βάση το σε ποιο βαθμό οι υποκειμενικές προτιμήσεις του σχεδιαστή για εκπλήρωση ορισμένων κριτηρίων εμπεριέχονται στην συνολική λύση, αυτές οι

μέθοδοι ποικίλουν από τον καθολικό ορισμό a priori των υποκειμενικών προτιμήσεων, όπου τότε όλες οι αντικειμενικές συναρτήσεις συνενώνονται σε μια ή απλά τίθενται σε σειρά βαθμού προτεραιότητας, μέχρι την μηδενική παροχή πληροφορίας σχετικά με τις υποκειμενικές προτιμήσεις, όπου εκεί έχουμε τις Pareto προσεγγίσεις των προβλημάτων. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι εάν απλά δώσουμε μια σύντομη και όχι καλά ορισμένη προτίμηση για κάποια κριτήρια τότε αυτή μπορεί να βελτιωθεί σταδιακά μέσω της εξελικτικής αναζήτησης. Η σταδιακή βελτίωση των προτιμήσεων είναι σαν μια διαδικασία αλληλεπιδράσεων η οποία συχνά χρησιμοποιείται στα πολυκριτηριακά προβλήματα, όπου οι προτιμήσεις ρυθμίζονται σε κάθε επανάληψη από τον σχεδιαστή. Αυτό που την κάνει μοναδική είναι ο μηχανισμός βελτίωσης : Η προτίμηση βελτιώνεται σταδιακά μέσω της εξελικτικής αναζήτησης μέσω ενός προσαρμόσιμου μηχανισμού και χωρίς καμία παρέμβαση από τον ίδιο το σχεδιαστή. Προφανώς μια τέτοια διαδικασία αλληλεπιδράσεων μπορεί να ενσωματωθεί και σε γενετικούς αλγορίθμους για την καθοδήγηση και την σταδιακή βελτίωση όχι καλά ορισμένων προτιμήσεων.

Ίσως η πρώτη αξιολογή δουλειά στην επέκταση των απλών γενετικών αλγορίθμων ώστε να είναι κατάλληλοι για την επίλυση πολυκριτηριακών προβλημάτων, είναι προσέγγιση της **διανυσματικής αξιολόγησης για τον υπολογισμό τιμών απόδοσης (vector evaluation approach)**. Αντί να χρησιμοποιείται μια βαθμωτή τιμή της απόδοσης της αντικειμενικής συνάρτησης για την αξιολόγηση κάθε ατόμου, χρησιμοποιείται ένα διάνυσμα τιμών απόδοσης και από αυτό προκύπτει η επομένη γενιά. **Για ένα δεδομένο πρόβλημα με q κριτήρια – στόχους, το βήμα της επιλογής σε κάθε γενιά γίνεται μια επαναληπτική διαδικασία : Επαναλαμβάνεται ακριβώς q φορές, και κάθε κριτήριο χρησιμοποιείται διαδοχικά σε κάθε μια από αυτές τις q επαναλήψεις με τον περιορισμό κανένα κριτήριο να μην χρησιμοποιηθεί πάνω από μια φορά.** Έτσι σε κάθε επανάληψη αυτής της επαναληπτικής διαδικασίας, μόνο ένα μέρος της δεξαμενής ζευγαρώματος (μέσω της οποίας οδηγούμαστε στην επομένη γενιά) δημιουργείται με βάση ένα από τα q κριτήρια.

Υπάρχουν δυο τύποι **Pareto προσέγγισης για τον υπολογισμό τιμών απόδοσης (Pareto-based approach)**:

- 1) Pareto ranking (κατάταξη Pareto)
- 2) Pareto tournament (τουρνουά Pareto)

Η προσέγγιση Pareto ranking για τον υπολογισμό των τιμών απόδοσης εισήχθη πρώτα από τον Goldberg σαν ένα μέσο προδιαγραφής ίσης αναπαραγωγικής δυναμικότητας για όλα τα Pareto άτομα. Περιλαμβάνει δυο βασικά βήματα :

- 1) Ταξινομεί τον πληθυσμό με βάση την Pareto κατάταξη
- 2) Θέτει πιθανότητες επιλογής σε κάθε άτομο με βάση την κατάταξή του.

Η διαδικασία της ταξινόμησης αποτελείται από την κατάταξη στη θέση 1 των ατόμων τα οποία δεν είναι κυριαρχούμενα από κάποια αλλά (nondominated) και από την αφαίρεσή τους από τον ανταγωνισμό. Στη συνέχεια βρίσκει τα μη κυριαρχούμενα άτομα από τον υπόλοιπο πληθυσμό και τα κατατάσσει στη θέση 2, και ούτω καθεξής. Με αυτό τον τρόπο, η προσέγγιση Pareto ranking θέτει σε όλα τα μη κυριαρχούμενα άτομα την ίδια τιμή απόδοσης (εδώ εννοείται η κατάταξη) και έτσι τους δίνει την ίδια πιθανότητα για επιλογή και αναπαραγωγή. Ας σημειωθεί ότι οι περισσότερες από τις άλλες μεθόδους υπολογισμού τιμών απόδοσης δίνουν στα nondominated άτομα διαφορετικές τιμές απόδοσης κάτι το οποίο έρχεται σε αντίθεση με την ιδέα της μη κυριαρχίας (nondominance).

Η προσέγγιση Pareto Tournament εισήχθη αρχικά από τους Horn, Nafpliotis και Goldberg. Αντί για την επιλογή μέσω ταξινόμησης με βάση την κατάταξη (nondominated sorting and ranking), μια σκέψη ενός «υποπληθυσμού» Pareto (niched Pareto concept) χρησιμοποιείται, όπου μια Pareto λύση με τον ελάχιστο αριθμό ατόμων στην γειτονιά της κερδίζει το τουρνουά.

Η προσέγγιση υπολογισμού τιμών απόδοσης weighted – sum δανείζεται την βασική της προϋπόθεση από τις συμβατικές πολυκριτηριακές βελτιστοποιήσεις. Ορίζει συντελεστές βαρών σε κάθε αντικειμενική συνάρτηση και συνδυάζει τα τροποποιημένα μέσω των συντελεστών αυτών κριτήρια σε μια και μόνο αντικειμενική συνάρτηση. Σε θεμελιώδες επίπεδο, είναι εύκολη στην κατανόηση και στην υλοποίηση. Για να υλοποιηθεί σωστά χρειάζεται απλά μια σωστή εκτίμηση των επιμέρους βαρών. Σε αυτή τη φάση όμως, βρίσκεται και η μεγάλη δυσκολία. Όταν ενσωματωθεί σε έναν γενετικό αλγόριθμο, οι αδυναμίες της μπορούν να αντισταθμιστούν από τις δυνάμεις των πληθυσμιακών και εξελικτικών αναζητήσεων. Πρόσφατα, μερικές τροποποιημένες μέθοδοι βαρών έχουν προταθεί με σκοπό τη πλήρη αξιοποίηση της δύναμης της γενετικής αναζήτησης :

- 1) Fixed – Weight Approach (προσέγγιση δεδομένων βαρών)
- 2) Random – Weights Approach (προσέγγιση τυχαίων βαρών)
- 3) Adaptive Weight Approach (προσέγγιση προσαρμόσιμων βαρών)

Στην προσέγγιση fixed – weight , οι συντελεστές βάρους δεν αλλάζουν καθ' όλη την διάρκεια της εξελικτικής διαδικασίας (εκτέλεση του γενετικού αλγορίθμου). Τα βάρη μπορούν να καθοριστούν από τις γνώσεις που έχουν προκύψει από προηγούμενη εμπόρια σε παρόμοια προβλήματα και πάνω στα επιλεγμένα κριτήρια, ή τυχαία εάν δεν υπάρχει τρόπος εκ των προτέρων διαθεσιμότητας αυτής της γνώσης. Η προσέγγιση αυτή δίνει επιλεκτική προσοχή – πίεση σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση αναζήτησης με βάση τους προκαθορισμένους συντελεστές βαρών.

Η προσέγγιση random – weight προτάθηκε αρχικά από τους Murata, Ishibuchi και Tanaka. Σε αυτήν, οι συντελεστές βαρών επανακαθορίζονται τυχαία σε κάθε βήμα της επιλογής με σκοπό να δώσουν μια ίση πιθανότητα σε όλους τους δυνατούς συνδυασμούς. Στατιστικά αυτή η μέθοδος δίνει μια ομοιόμορφη πίεση στην κατεύθυνση του μετώπου Pareto, αλλά αγνοεί πλήρως τις διαθέσιμες πληροφορίες των Pareto λύσεων σε κάθε γενιά.

Η προσέγγιση adaptive weight προτάθηκε αρχικά από τους Gen και Cheng. Σε αυτήν, οι συντελεστές βαρών ρυθμίζονται προσαρμοστικά με βάση την εν ενεργεία τρέχουσα γενιά με σκοπό την απόδοση μεγαλύτερης πίεσης στην αναζήτηση σε μια κατεύθυνση προς το θεωρητικά βέλτιστο σημείο – λύση. Επειδή, χρήσιμες πληροφορίες χρησιμοποιούνται για την ρύθμιση των συντελεστών βάρους σε κάθε γενιά, η μέθοδος αποδίδει μια πίεση αναζήτησης σε μια κατεύθυνση ενδιάμεση με αυτή της fixed – weight προσέγγισης και αυτή της random – weight προσέγγισης.

Η συμβιβαστική προσέγγιση υπολογισμού τιμών απόδοσης (compromise – based fitness assignment approach) προτάθηκε αρχικά από τους Chang και Gen για την επίλυση προβλημάτων *ελαχίστης διαδρομής* με δυο κριτήρια. Η βασική της ιδέα και τεχνική έχει δανειστεί από τις συμβατικές πολυκριτηριακές βελτιστοποιήσεις. Η συμβιβαστική προσέγγιση αναγνωρίζει λύσεις πλησιέστερα στην θεωρητική βέλτιστη λύση με βάση ένα μετρό σύγκρισης απόστασης. Όπως είναι γνωστό η θεωρητική βέλτιστη λύση είναι συνήθως μη επιτευχθείσα. Παρ' όλα αυτά μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ένα κριτήριο αξιολόγησης των επιτευχθέντων μη κυριαρχούμενων λύσεων (nondominated solutions). Αφού όλοι θα προτιμούσαν την θεωρητική βέλτιστη λύση εάν αυτή ήταν δυνατό να επιτευχθεί, μπορεί να υποστηριχτεί ότι η εύρεση μιας λύσης η οποία βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στην ιδανική (θεωρητική βέλτιστη) είναι μια λογική εναλλακτική. Ένα συχνά χρησιμοποιούμενο μετρό απόστασης είναι μια οικογένεια L_p «ζυγισμένων» μέτρων. Για πολλά πολύπλοκα προβλήματα, η εύρεση μιας ιδανικής λύσης είναι επίσης δύσκολη. Για να ξεπεράσουμε αυτή την δυσκολία, η ιδέα της «πληρεξουσίας»

ιδανικής λύσης προτείνεται για να αντικαταστήσει την ιδανική λύση. Η πληρεξούσια ιδανική λύση είναι η ιδανική λύση η οποία αντιστοιχεί στην εκάστου γενιά αλλά όχι στο δεδομένο πρόβλημα. Με αλλά λόγια, υπολογίζεται με βάση τον μερικό χώρο σχεδίασης και όχι τον ολικό χώρο σχεδίασης. Η πληρεξούσια ιδανική λύση είναι εύκολο να υπολογιστεί σε κάθε γενιά. Παράλληλα με την όλη εξελικτική διαδικασία, η πληρεξούσια ιδανική λύση σταδιακά «πλησιάζει» την πραγματική ιδανική λύση.

Ο προγραμματισμός επίτευξης στόχου (goal programming approach) είναι μια ισχυρή τεχνική για την επίλυση πολυκριτηριακών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Οι Gen και Liu μελέτησαν την εφαρμογή των γενετικών αλγορίθμων στην επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων βελτιστοποίησης μέσω του προγραμματισμού επίτευξης στόχου. Μια μέθοδος υπολογισμού τιμών απόδοσης βασισμένη στην κατάταξη (rank-based) χρησιμοποιείται για την αποτίμηση της αξίας κάθε ατόμου μέσα στον πληθυσμό. Επειδή η λεξικογραφική ταξινόμηση των κριτηρίων (αντικειμενικών συναρτήσεων) προτιμάται στην μέθοδο προγραμματισμού επίτευξης στόχου, τα άτομα ταξινομούνται με βάση την τιμή των αντικειμενικών συναρτήσεων που δίνουν με έναν λεξικογραφικό τρόπο ως εξής : Ταξινομείται ο πληθυσμός με βάση το κριτήριο πρώτης προτεραιότητας, εάν μερικά άτομα έχουν την ίδια απόδοση, ταξινομούνται με βάση το κριτήριο δεύτερης προτεραιότητας και ούτω καθεξής. Έτσι η ισοπαλία διακόπτεται τυχαία. Στη συνέχεια κάθε άτομο παίρνει τη θέση του στη κατάταξη, μέσω εκθετικής παρεμβολής από το καλύτερο στο χειρότερο.

Από την πλευρά της μεθοδολογίας, υπάρχουν δυο βασικές μέθοδοι - προσεγγίσεις της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης : Οι μέθοδοι γενεών και η μέθοδοι προτιμήσεων (generating approaches and preference – based approaches). Οι generating approaches χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση του ολικού συνόλου των Pareto λύσεων ή μιας προσέγγισης του, ενώ οι preference – based approaches επιχειρούν να δημιουργήσουν μια συμβιβαστική ή προτιμώμενη λύση. Θεμελιωδώς, οι μέθοδοι vector evaluation approach, Pareto ranking – based approach και random – weighting approach είναι σχεδιασμένες σαν generating μέθοδοι. Αντίθετα οι μέθοδοι compromise approach, adaptive weighting approach και goal programming approach είναι σχεδιασμένες σαν preference – based μέθοδοι.

Στις πολυκριτηριακές βελτιστοποιήσεις, και οι δυο μέθοδοι, generating και preference – based, έχουν δυνατά και αδύναμα χαρακτηριστικά. Οι μέθοδοι generating, απαιτούν από τους σχεδιαστές να κρίνουν και να επιλέξουν μεταξύ ενός μεγάλου εύρους Pareto λύσεων. Για προβλήματα με περισσότερα από τρία κριτήρια (αντικειμενικές συναρτήσεις) μια τέτοια επιλογή είναι πολύ δύσκολη και πολύπλοκη, και η δυσκολία

της αυξάνεται σχεδόν εκθετικά με την αύξηση του αριθμού των κριτηρίων. Το υπολογιστικό κόστος, επίσης, αυξάνεται εντυπωσιακά όσο αυξάνεται ο αριθμός των κριτηρίων. Αυτή η κατάσταση ουσιαστικά παραμένει και για την περίπτωση των πολυκριτηριακών προβλημάτων με χρήση γενετικών αλγορίθμων. Εν αντιθέσει, οι preference – based μέθοδοι, φαίνεται να μην ρίχνουν τόσο μεγάλο βάρος στους σχεδιαστές όταν πρόκειται για πολυκριτηριακές βελτιστοποιήσεις. Επειδή οι προτιμήσεις μπορούν να βελτιωθούν σταδιακά μέσα στην εξελικτική διαδικασία, μια όχι καλά ορισμένη προτίμηση μπορεί να είναι αποτελεσματική για την εξελικτική αναζήτηση.

Στις συμβατικές πολυκριτηριακές βελτιστοποιήσεις, μια μέθοδος επίλυσης μπορεί να σχεδιαστεί και να εκπίπτει, είτε στην κατηγορία generating και να δημιουργεί ένα σύνολο Pareto λύσεων, είτε στην κατηγορία preference – based και να δημιουργεί μια προτιμώμενη ή συμβιβαστική λύση. Στις πολυκριτηριακές βελτιστοποιήσεις όμως, μπορούμε να σχεδιάσουμε μια μέθοδο επίλυσης η οποία να συνδυάζει και τις δυο βασικές μεθόδους – ιδέες .

Το πώς θα χειριζόμαστε τις ανέφικτες λύσεις είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα στις «γενετικές βελτιστοποιήσεις» γιατί οι γενετικοί τελεστές συνήθως παράγουν ανέφικτες, ακόμη και απολύτως μη αποδεκτές λύσεις. Αυτό το θέμα τυγχάνει λιγότερης συζήτησης στις πολυκριτηριακές γενετικές βελτιστοποιήσεις γιατί έχει δοθεί πολύ προσοχή στον τρόπο με τον οποίο δημιουργούνται οι Pareto λύσεις. Τα περισσότερα προβλήματα επαλήθευσης, είναι μικρές τεχνητές περιπτώσεις χωρίς πολύπλοκους περιορισμούς. Για τα περισσότερα όμως πραγματικά προβλήματα, οι πολύπλοκοι περιορισμοί οι οποίοι είναι η συνήθης περίπτωση, γίνονται ένα πολύ σοβαρό πρόβλημα, καθώς οι ανέφικτες λύσεις επηρεάζουν ένα σχετικά μεγάλο τμήμα του συνολικού πληθυσμού. Οι στρατηγικές επιδιόρθωσης και επιβολής ποινής (repairing and penalizing strategies) είναι δυο βασικές τεχνικές οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλές γενετικές βελτιστοποιήσεις. Οι στρατηγικές επιβολής ποινής μπορούν να χρησιμοποιηθούν μαζί με οποιαδήποτε προσέγγιση κλιμάκωσης, όπως οι compromise και weighted – sum approach, ενώ οι στρατηγικές επιδιόρθωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν μαζί με Pareto ranking–based approaches αν αυτό είναι απαραίτητο.

2.8.3 Διαμοιρασμός Απόδοσης και Ποικιλομορφία Πληθυσμού

(*Fitness Sharing and Population Diversity*)

Ο Διαμοιρασμός απόδοσης (fitness sharing) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για την διατήρηση της ποικιλομορφίας του πληθυσμού. Αρχικά, πρέπει να διαχωρίσουμε τους επομένους δυο τύπους fitness sharing :

- 1) Sharing in multimodal functions
- 2) Sharing along the Pareto frontier

Ο διαμοιρασμός απόδοσης εισήχθη από τους Goldberg και Richardson για βελτιστοποιήσεις multimodal συναρτήσεων (συναρτήσεις με πολλαπλά τοπικά μεγίστα). Μετέπειτα, οι τεχνικές διαμοιρασμού, επεκταθήκαν στον κλάδο της γενετικής πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, για την διατήρηση της ποικιλομορφίας του πληθυσμού καθ' όλο το μήκος του nondominated μετώπου.

Ένα από τα προβλήματα των γενετικών αλγορίθμων στην επίλυση multimodal συναρτήσεων είναι ότι οι πεπερασμένοι πληθυσμοί τελικά θα συγκλίνουν σε ένα μοναδικό βέλτιστο, λόγω των στοχαστικών σφαλμάτων κατά τη διαδικασία της επιλογής. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό και ως *genetic drift* (γενετική παρέκκλιση). Ο στόχος της τεχνικής sharing είναι να αποτρέψει το genetic drift και να προωθήσει ομοιόμορφη δειγματοληψία, με άλλα λόγια να διανέμει τους πληθυσμούς, γύρω από έναν αριθμό διαφορετικών κορυφών σε έναν χώρο σχεδίασης-αναζήτησης, με κάθε κορυφή να είναι ένα κλάσμα του πληθυσμού ανάλογο με το ύψος της κορυφής αυτής. Για να το πετύχουμε αυτό, εισάγεται η αρχή της διάσπασης (concept of degradation). Εάν μια κορυφή έχει παρά πολλά άτομα, η απόδοση όλων των ατόμων της κορυφής αυτής θα διασπαστεί ώστε να μειωθούν οι ικανότητες αναπαραγωγής τους.

Μια συνάρτηση διαμοιρασμού είναι ένας τρόπος καθορισμού της διάσπασης της απόδοσης (ελάττωση τιμής ή κατάπτωσης) ενός ατόμου λόγω της πληθώρας των «γειτόνων» του. Η μονάδα μέτρησης της απόστασης μεταξύ δυο ατόμων μπορεί να οριστεί πάνω σε δυο διαφορετικούς χώρους, οι οποίοι αποδίδουν δυο τύπους διαμοιρασμού απόδοσης : *γονοτυπικός διαμοιρασμός (genotypic sharing)* και *φαινότυπος διαμοιρασμός (phenotypic sharing)*. Στον γονοτυπικό διαμοιρασμό η απόσταση μεταξύ δυο ατόμων μετράται με όρους χώρου κωδικοποίησης ενώ στον φαινοτυπικό διαμοιρασμό η απόσταση μετράται με όρους χώρου αποκωδικοποίησης.

Η δουλειά του Deb έδειξε ότι γενικά, ο φαινοτυπικός διαμοιρασμός είναι ανώτερος του γονοτυπικού.

Έστω s_i μια συμβολοσειρά ή ένα άτομο σε κωδικοποιημένη μορφή. Μπορούμε να έχουμε μια μονάδα μέτρησης μεταξύ των ατόμων απ' ευθείας :

$$d_{ij} = d(s_i, s_j)$$

Με τη χρήση μονάδων μέτρησης μεταξύ συμβολοσειρών, ο διαμοιρασμός απόδοσης καλείται γονοτυπικός διαμοιρασμός.

Έστω x_i μια λύση ή ένα άτομο σε αποκωδικοποιημένη μορφή. Μπορούμε να έχουμε μια μονάδα μέτρησης μεταξύ ατόμων στον χώρο των μεταβλητών σχεδίασης (πχ. στον χώρο των πιθανών λύσεων) :

$$d_{ij} = d(x_i, x_j)$$

Με τη χρήση μονάδων μέτρησης στον χώρο των πιθανών λύσεων, ο διαμοιρασμός απόδοσης καλείται φαινοτυπικός διαμοιρασμός.

Τότε ορίζουμε την συνάρτηση διαμοιρασμού (sharing function) $Sh(\cdot)$ σαν μια συνάρτηση της μονάδας μέτρησης d_{ij} . Τυπικά, η επόμενη συνάρτηση του νόμου της δύναμης (power law) χρησιμοποιείται σαν συνάρτηση διαμοιρασμού :

$$Sh(d_{ij}) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{d_{ij}}{\sigma_{share}} \right)^a, & \text{εαν } d_{ij} < \sigma_{share} \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

Όπου a είναι μια σταθερά και σ_{share} είναι η ακτίνα υποπληθυσμού (niche radius), δεδομένη από τον σχεδιαστή σαν μια εκτίμηση του ελαχίστου επιθυμητού ή αναμενόμενου διαχωρισμού μεταξύ των ατόμων. Τα άτομα μέσα στα όρια μιας απόστασης κοινής ακτίνας μεταξύ τους, διασπών τις αποδόσεις τους (καταπίπτουν μεταξύ τους).

Όταν μια μονάδα μέτρησης και μια συνάρτηση διαμοιρασμού έχουν οριστεί, η κοινή απόδοση (shared fitness) f'_i για ένα άτομο μπορεί να οριστεί απλά διαιρώντας την απόδοση του f_i με τον αριθμός υποπληθυσμού (niche count) m_i ως εξής :

$$f'_i = \frac{f_i}{m_i}$$

Ο γωνιακός αριθμός m_i για ένα άτομο i είναι το άθροισμα όλων των τιμών της συνάρτησης διαμοιρασμού σε ολόκληρο τον πληθυσμό :

$$m_i = \sum_{j=1}^{pop_size} Sh d_{ij}$$

Το άθροισμα περιλαμβάνει και τον ίδιο το άτομο. Επομένως, εάν ένα άτομο είναι μόνο του στην δική του «γωνία» ($m_i = 1$), τότε λαμβάνει όλη την δυνατή απόδοσή του. Αλλιώς, η συνάρτηση διαμοιρασμού, μειώνει την τιμή απόδοσης με βάση τον αριθμό (πλήθος) και το πόσο κοντά βρίσκονται τα γειτονικά άτομα.

Ο διαμοιρασμός απόδοσης είχε αρχικά συνδυαστεί με την αναλογική επιλογή απόδοσης (fitness proportionate selection). Όταν ο διαμοιρασμός συνδυάζεται με επιλογή με τουρνουά, τότε οι γενετικοί αλγόριθμοι παρουσιάζουν χαοτική συμπεριφορά. Μεγάλες διακυμάνσεις σε «γωνιακούς» υποπληθυσμούς μπορούν να αποφευχθούν με *συνεχή διαμοιρασμό* (*continuously updated sharing*) ο οποίος προτάθηκε από τους Oei, Goldberg και Chang. Σε αυτόν οι *αριθμοί υποπληθυσμού* (*niche counts*) υπολογίζονται χρησιμοποιώντας όχι μόνο τον εν ενεργεία πληθυσμό αλλά επίσης και τον μισό-ολοκληρωμένο πληθυσμό της επόμενης γενιάς.

Στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση με χρήση γενετικών αλγορίθμων οι τεχνικές διαμοιρασμού μπορούν να διαχωριστούν σε δυο μεγάλες κατηγορίες :

- 1) Διαμοιρασμός στον χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων (Sharing on the objective space)
- 2) Διαμοιρασμός στον χώρο των πιθανών λύσεων (Sharing on the solution space)

Ο διαμοιρασμός στον χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων επιχειρεί να πετύχει ομοιόμορφη δειγματοληψία του παραδεκτού συνόλου των λύσεων και είχε αρχικά προταθεί από τους Fonseca και Fleming. Στην βελτιστοποίηση multimodal συναρτήσεων, ο διαμοιρασμός συμβαίνει στον χώρο των πιθανών λύσεων. Συνήθως απαιτείται γνώση ενός πεπερασμένου αριθμού κορυφών και ομοιόμορφη κατανομή των «υποπληθυσμών» ή niche στον χώρο των πιθανών λύσεων. Κατά την σύγκλιση, τοπικά ελάχιστα κατέχονται από έναν αριθμό ατόμων αναλογικά με την απόδοσή τους. Αντιθέτως, η κατάσταση είναι αρκετά διαφορετική στην περίπτωση της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Εδώ δεν υπάρχουν πλέον τοπικές κορυφές. Όλες οι λύσεις στο μέτωπο Pareto είναι εξ' ίσου καλές. Ανησυχούμε περισσότερο για την επίτευξη ενός συνόλου ολικών nondominated λύσεων, πιθανώς ομοιόμορφα κατανομημένων και επεξηγηματικών ως προς την ολική επιφάνεια trade-off. Η χρησιμοποίηση κατάταξης (ranking) έτσι και αλλιώς εξαναγκάζει την αναζήτηση στο να επικεντρωθεί αποκλειστικά στο ολικό βέλτιστο. Υλοποιώντας διαμοιρασμό στον χώρο των τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων αντί του χώρου των μεταβλητών

απόφασης, και μόνο μεταξύ ζευγαριών nondominated ατόμων, μπορούμε να αναμένουμε να εξελιχτεί μια ομοιόμορφα κατανεμημένη αναπαράσταση της ολικής επιφάνειας των trade-offs.

Ο διαμοιρασμός στον χώρο των πιθανών λύσεων προτάθηκε από τους Srinivas και Deb. Μια πολύ σημαντική ανησυχία είναι το γεγονός ότι η ποικιλομορφία κατά μήκος του μετώπου Pareto μπορεί να μην αντιστοιχεί στην ποικιλομορφία μέσα στον χώρο των πιθανών λύσεων, πράγμα μεγάλης σημασίας για τον λήπτη των αποφάσεων – σχεδιαστή. Ο διαμοιρασμός επιτυγχάνεται με τον υπολογισμό τιμής της επόμενης συνάρτησης διαμοιρασμού μεταξύ δυο ατόμων :

$$Sh_{d_{ij}} = \begin{cases} 1 - \left(\frac{d_{ij}}{\sigma_{share}} \right)^2, & \text{εαν } d_{ij} < \sigma_{share} \\ 0 & \text{, αλλιώς} \end{cases}$$

Όπου d_{ij} είναι η φαινοτυπική απόσταση μεταξύ των δυο ατόμων και σ_{share} είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη φαινοτυπική απόσταση μεταξύ οποιονδήποτε δυο ατόμων τα οποία θα γίνουν μέλη μιας niche.

Οι απαγορεύσεις ζευγαρώματος είναι ένα άλλο θέμα το οποίο προκύπτει καθώς ο πληθυσμός κατανέμεται γύρω από πολλαπλές περιοχές βέλτιστων λύσεων. Οι απαγορεύσεις ζευγαρώματος, υποθέτουν ότι γειτονικά καλής απόδοσης άτομα είναι γονοτυπικά παρόμοια έτσι ώστε να μπορούν να αποτελέσουν σταθερές «γωνίες» (niches). Στην βελτιστοποίηση multimodal συναρτήσεων είναι εύκολο να κατανοήσει κάποιος ότι διαφορετικές περιοχές τοπικών κορυφών μπορεί γενικά να έχουν πολύ διαφορετικές γενετικές αναπαραστάσεις. Επομένως, απαγορεύσεις ζευγαρώματος μπορεί να βοηθήσουν τους τελεστές διασταύρωσης να λειτουργούν κάνοντας βελτιωτικές ρυθμίσεις γύρω από ένα τοπικό βέλτιστο. Για την περίπτωση της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, δεν είναι τόσο φαινομενικό ότι δυο άτομα μέσα σε μια μικρή περιοχή του συνόλου Pareto θα έχουν παρόμοια γονοτυπική αναπαράσταση. Οι Fonseca και Fleming υλοποίησαν τις απαγορεύσεις ζευγαρώματος βασισμένοι στην απόσταση μεταξύ των ατόμων στον χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων. Παρ' όλα αυτά, η χρησιμοποίηση των απαγορεύσεων ζευγαρώματος στον κλάδο της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης με χρήση γενετικών αλγορίθμων δεν φαίνεται να διαδίδεται εύκολα.

2.9 Η Αρχή της Pareto Βέλτιστης Λύσης στην Πολυκριτηριακή

Βελτιστοποίηση με Χρήση Γενετικών Αλγορίθμων (The Concept of Pareto Solution in Genetic Multiobjective Optimization)

Κατά μια αυστηρή έννοια, ο Όρος *Pareto λύση* όπως χρησιμοποιείται στους γενετικούς αλγορίθμους έχει διαφορετική σημασία απ' ότι όταν χρησιμοποιείται σε άλλες συμβατικές μεθόδους βελτιστοποίησης. Στον πρωταρχικό ορισμό, ένα σημείο θεωρείται ότι είναι μια Pareto λύση αν και μόνο αν είναι ένα μη κυριαρχούμενο σημείο (nondominated point) σε σχέση με όλα τα αλλά σημεία στον χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων Z για ένα δεδομένο πρόβλημα. Σε μερικούς γενετικούς αλγορίθμους (και όχι σε όλους), οι λύσεις Pareto ταυτοποιούνται – αναγνωρίζονται σε κάθε γενιά. Επειδή ο πληθυσμός σε κάθε γενιά εμπεριέχει μόνο ένα μέρος του συνόλου των λύσεων του αρχικού προβλήματος, μια Pareto λύση έχει νόημα μόνο σε σχέση με όλες τις πιθανές λύσεις που έχουν μέχρι μια συγκεκριμένη στιγμή αξιολογηθεί. Μια nondominated λύση σε μια γενιά μπορεί να καταστεί dominated από μια άλλη λύση η οποία προκύπτει σε μια μελλοντική γενιά. Επομένως για μια δεδομένη γενιά των γενετικών αλγορίθμων, μια Pareto λύση η οποία προέρχεται από την εν ενεργεία γενιά μπορεί να είναι αλλά μπορεί και να μην είναι μια πραγματική Pareto λύση (True Pareto Solution). Δεν υπάρχει καμία εγγύηση ότι ένας γενετικός αλγόριθμος θα παράξει Pareto λύσεις για ένα δεδομένο πρόβλημα. Αλλά οι γενετικοί αλγόριθμοι θα παράξουν καλύτερες προσεγγίσεις των πραγματικών Pareto Λύσεων.

Ο τρόπος διατήρησης ενός συνόλου με nondominated άτομα κατά την διάρκεια της εξελικτικής διαδικασίας είναι ένα ειδικό θέμα των προβλημάτων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Βασικά, υπάρχουν δυο διαφορετικοί τρόποι χειρισμού των Pareto λύσεων, οι οποίοι οδηγούν σε δυο τελείως διαφορετικές δομές γενετικών αλγορίθμων:

- 1) Διατήρηση Pareto λύσεων ξεχωριστά από τον κάθε πληθυσμό
- 2) Pareto λύσεις χωρίς μηχανισμούς διατήρησης

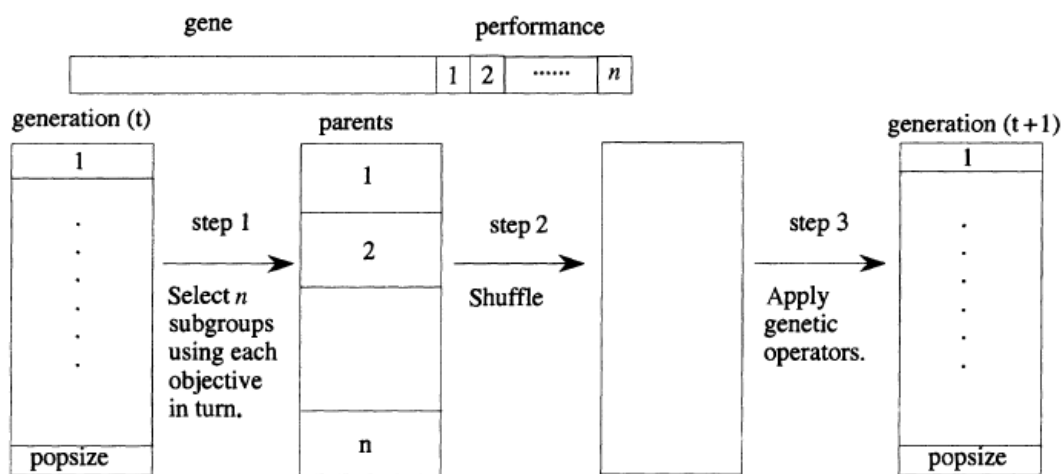
Στις περισσότερες υπάρχουσες μεθόδους, οι Pareto λύσεις αναγνωρίζονται σε κάθε γενιά και χρησιμοποιούνται ώστε να υπολογιστεί η απόδοση ή η κατάταξη κάθε ατόμου (χρωμοσώματος ή συμβολοσειράς). Κανένας μηχανισμός δεν παρέχεται ο οποίος να εγγυάται ότι οι παραγόμενες Pareto λύσεις κατά την διάρκεια της εξελικτικής διαδικασίας εισάγονται και στις επόμενες γενιές. Με αλλά λόγια, μερικές Pareto λύσεις μπορεί να χαθούν κατά την εξελικτική διαδικασία. Για την αποφυγή

τέτοιων σφαλμάτων δειγματοληψίας, ένας μηχανισμός διατήρησης των Pareto λύσεων έχει προταθεί από πολλούς ερευνητές. Μια ειδική δεξαμενή για την διατήρηση αυτών των λύσεων προστίθεται στην βασική δομή των γενετικών αλγορίθμων. Σε κάθε γενιά, το σύνολο των Pareto λύσεων ενημερώνεται διαγράφοντας όλες τις dominated λύσεις και προσθέτοντας όλες τις αναπαραχθείσες Pareto λύσεις. Η ολική δομή αυτής της προσέγγισης είναι η παρακάτω :

```

Procedure: Pareto Genetic Algorithms
begin
   $t \leftarrow 0$ ;
  initialize  $P(t)$ ;
  objectives  $P(t)$ ;
  Pareto  $E(t)$ ;
  fitness  $P(t)$ ;
  while (not termination condition) do
    begin
      crossover  $P(t)$ ;
      mutation  $P(t)$ ;
      objectives  $P(t)$ ;
      update Pareto  $E(t)$ ;
      fitness  $P(t)$ ;
      select  $P(t + 1)$  from  $P(t)$ ;
       $t \leftarrow t + 1$ ;
    end
  end

```



Χωρίς έναν μηχανισμό διατήρησης, οι Pareto λύσεις μπορούν να συγκεντρωθούν μόνο από την τελευταία γενιά. Εάν η μέθοδος έχει μια τάση διαφοροποίησης σε ένα είδος (*speciation*), όπως αναφέρεται και από τον Schaffer, ολόκληρος ο πληθυσμός θα συγκλίνει προς «ατομικές» βέλτιστες περιοχές μετά από έναν μεγάλο αριθμό γενεών. Ο μηχανισμός διατήρησης είναι, κατά ένα βαθμό, βοηθητικός στην εξάλειψη του φαινομένου του *speciation* μέσω μιας διαδικασίας Pareto – διατήρησης σε κάθε γενιά.

3

Περιγραφή Διαδικασίας Υλοποίησης

Πολυκριτηριακής Βελτιστοποίησης

Δεξαμενοπλοίων με Χρήση Γενετικών

Αλγορίθμων σε Περιβάλλον Matlab

(Genetic Multiobjective Optimization for

Tankers using Matlab).

3.1 Εισαγωγή – Η ιδέα της παραμετροποίησης

Κατά την διάρκεια της σχεδίασης μέσω υπολογιστή (Computer Aided Design - CAD) ενός οποιουδήποτε αντικειμένου τα λογισμικά δημιουργούν βασικά γεωμετρικά σχήματα (γραμμές, τόξα, κύκλους κτλ) τα οποία συνδυάζονται με διαστάσεις, σημειώσεις κτλ και παράγεται ένα σχέδιο μηχανολογικό, αρχιτεκτονικό, ναυπηγικό, ηλεκτρολογικό κτλ. Επειδή όλα τα παραδοσιακά λογισμικά βασίζονται σε γεωμετρικά αντικείμενα, η πραγματοποίηση μιας τροποποίησης σε ένα σχέδιο απαιτεί την αλλαγή όλων των συνδεδεμένων με αυτή την τροποποίηση συνθετικών στοιχείων έτσι ώστε να προκύψει ένα σωστό νέο σχέδιο. Τα περισσότερα σύγχρονα λογισμικά CAD/CAM/CAE (Computer Aided Design – Manufacturing – Engineering) χρησιμοποιούν μια σχεδιαστική τεχνική η οποία ονομάζεται παραμετροποίηση. Αυτή είναι μια μέθοδος, «σύνδεσης» όλων των χαρακτηριστικών του σχεδίου μαζί (διαστάσεις, μεταβλητές σχεδίασης κτλ) με τέτοιο τρόπο ώστε όταν πραγματοποιείται μια αλλαγή – ρύθμιση σε μια μεταβλητή, οι επιπτώσεις της στο ίδιο το σχέδιο (ή στο μέρος του σχεδίου στο οποίο αντιστοιχεί η μεταβλητή αυτή) να γίνονται αυτόματα και άμεσα. Μια παράμετρος είναι λοιπόν στην ουσία μια μεταβλητή με την οποία σχετίζονται άλλες «δευτερεύουσες» μεταβλητές, και αυτές οι δευτερεύουσες μεταβλητές μπορούν να παραχθούν μέσω διαφόρων παραμετρικών εξισώσεων. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, τροποποιήσεις σε μια σχεδίαση και δημιουργία μιας «οικογένειας εξαρτημάτων» μπορούν να πραγματοποιούνται σε εντυπωσιακά ταχύτερους χρόνους σε σύγκριση με τις παραδοσιακές σχεδιαστικές τεχνικές. Τα τελευταία πέντε με δέκα χρόνια η παραμετρική σχεδίαση, η οποία μπορεί να υλοποιηθεί με διάφορους τρόπους όπως για παράδειγμα μέσω ενός προγράμματος λογιστικού φύλλου (spreadsheet) ή μέσω κώδικα μιας γλώσσας προγραμματισμού (code script) κτλ, κερδίζει ολοένα και περισσότερο έδαφος σε σύγκριση με τις άλλες παραδοσιακές τεχνικές σχεδίασης.

Βέβαια είναι προφανές ότι όλη αυτή η μεθοδολογία παραμετροποίησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί, και χρησιμοποιείται, και στην πιο γενική περίπτωση του όρου σχεδίαση που δεν περιλαμβάνει την άμεση οπτική αναπαράσταση ενός εξαρτήματος ή μιας κατασκευής στο χαρτί, αλλά την έμμεση σχεδίαση, δηλαδή τον προσδιορισμό – υπολογισμό όλων των απαραίτητων πληροφοριών που θα περιγράψουν πλήρως την γεωμετρία και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του προς κατασκευή προϊόντος.

3.1.1 Παραμετροποίηση σχεδίασης πλοίου – Τι είναι ? (Parametric

Ship Design Description)

Στα αρχικά στάδια ενός θεμελιώδους και προκαταρκτικού σχεδιασμού ενός πλοίου, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη ενός συνεπούς ορισμού για μια υποψήφια σχεδίαση (candidate design) με όρους πρωταρχικών και βασικών στοιχείων του πλοίου όπως οι κύριες διαστάσεις του και άλλες περιγραφικές παράμετροι, για παράδειγμα : L_{BP} , B , D , T , C_B κτλ. Αυτή η σχεδίαση μπορεί στη συνέχεια να βελτιστοποιηθεί με βάση ορισμένα κριτήρια αξιολόγησης (measure(s) of merit) ή με βάση κάποια παραμετρική μελέτη εξισορρόπησης των επιτευχθέντων κριτηρίων τα οποία έχουν τεθεί (tradeoff study) ώστε στη συνέχεια να είναι εφικτή η τελική επιλογή των βασικών θεμελιωδών χαρακτηριστικών της, και να μπορέσει να προχωρήσει στις περαιτέρω λεπτομέρειες. Επειδή ο λεπτομερής σχεδιασμός ενός πλοίου απαιτεί μεγάλη προσπάθεια και πολύ χρόνο, είναι σημαντικό – και απαραίτητο – να μπορούμε να περιγράψουμε και να δώσουμε μια πρώτη εκτίμηση των χαρακτηριστικών μεγεθών με αξιοπιστία σε αυτό το αρχικό παραμετρικό στάδιο.

Είναι βέβαια σημαντικό να σημειωθεί ότι προκειμένου να έχουμε μια αξιόπιστη αρχική παραμετρική αναπαράσταση στη σχεδίαση ενός νέου πλοίου πρέπει να διεξάγουμε μια προσεκτική ανάλυση των ήδη κατασκευασμένων πλοίων για την αποκόμιση γενικών πληροφοριών για τον τύπο πλοίου που μας ενδιαφέρει. Με άλλα λόγια, αυτή η διαδικασία θα μας βοηθήσει ώστε να θέσουμε τα κατάλληλα άνω και κάτω όρια τιμών και τους κατάλληλους περιορισμούς για τις παραμέτρους και τις μεταβλητές που θα χρησιμοποιήσουμε στο παραμετρικό μας μοντέλο.

Σε περίπτωση που ένα παρόμοιο και «επιτυχημένο» πλοίο με αυτό που μας ενδιαφέρει να σχεδιάσουμε υπάρχει, η σχεδίαση μας μπορεί να προχωρήσει χρησιμοποιώντας το σαν *βασικό ή πατρικό πλοίο* από το οποίο θα εξάγουμε τις απαραίτητες πληροφορίες και στη συνέχεια, είτε απλά θα προχωρήσουμε στην αλλαγή των χαρακτηριστικών του υπό κλίμακα ώστε να το προσαρμόσουμε στις απαιτήσεις μας, είτε θα ορίσουμε σωστά όρια και περιορισμούς για τις διάφορες παραμέτρους σχεδίασης μας και θα προχωρήσουμε σε μια βελτιστοποίηση με βάση ένα ή περισσότερα κριτήρια.

Εάν το υπό σχεδίαση πλοίο μας ενδιαφέρει απλά να ανήκει σε μια ευρύτερη κατηγορία πλοίων (πχ Panamax tankers ή 3000 – 10000 TEU Containership) τότε πρέπει να εξετάσουμε το σύνολο των χαρακτηριστικών του παγκοσμίου στόλου ώστε

να εξάγουμε τις κατάλληλες πληροφορίες οι οποίες θα μας δώσουν μια σωστή βάση εκκίνησης των διαστάσεων και των χαρακτηριστικών.

Τέλος εάν το υπό σχεδίαση πλοίο είναι ένα πρωτότυπο πλοίο και δεν είναι εφικτή η άντληση πληροφοριών από ήδη κατασκευασμένα πλοία, τότε δίνεται μεγαλύτερο βάρος στην προσεκτική μελέτη των νόμων της φυσικής και της μηχανικής που διέπουν την κατασκευή μας.

Για κοινές κατηγορίες πλοίων, παραμετρικά μοντέλα υπάρχουν ήδη στην ναυπηγική βιβλιογραφία :

- Watson and Gilfillan για εμπορικά πλοία.
- Eames and Drummond για μικρά στρατιωτικά πλοία
- Nethercote and Schmitke για πλοία SWATH
- Fung για βοηθητικά συστήματα πλοίου
- Chou et για Tension Leg Platforms
- Ανεπίσημες μελέτες της MARAD αλιευτικά σκάφη
- Offshore πλοία ανεφοδιασμών και ρυμουλκά σκάφη, κτλ.

Ολοκληρωμένα μοντέλα σύνθεσης επίσης υπάρχουν για κατηγορίες πλοίων όπως το σχεδιαστικό πρόγραμμα ASSET του Αμερικανικού Ναυτικού.

Γενικές ολοκληρωμένες διαδικασίες σχεδίασης και μελέτες συγκεκριμένων κατηγοριών είναι επίσης διαθέσιμες όπως αυτές των :

- Evans
- Benford
- Miller
- Lamb
- Andrews
- Daidola and Griffin

Τα βιβλία των Schneekluth και Bertram και του Watson για την διαδικασία προκαταρκτικής μελέτης είναι επίσης εξαιρετικά.

Οποιαδήποτε όμως μοντέλα σχεδίασης της βιβλιογραφίας είναι πάντα πιθανό να παρέλθουν σε μη χρησιμοποιήσιμη κατάσταση καθώς, οι πρακτικές των μεταφορών, οι απαιτήσεις σε προδιαγραφές ασφάλειας, νέες τεχνολογίες κατασκευών και άλλοι παράγοντες προοδεύουν χρόνο με τον χρόνο.

Γενικά όμως, μια σχεδίαση ενός οποιουδήποτε προϊόντος συνήθως ξεκάνει με μια προσεκτική ανασκόπηση και αξιολόγηση των ήδη κατασκευασμένων, έτσι ώστε να καταλήξουμε στο τι μπορεί να μάθουμε και να γενικοποιήσουμε από αυτά.

3.1.2 Γενική Στρατηγική : *Point – Based* και *Set – Based Σχεδίαση*

(Overall Strategy : Point – Based vs Set – Based Design).

Η παραδοσιακή τεχνική της ελικοειδούς καμπύλης μελέτης και σχεδιασμού ενός πλοίου (design spiral) εισήχθη αρχικά από τον J. Harvey Evans το 1959. Αυτή η τεχνική δίνει έμφαση στο ότι πολλά χαρακτηριστικά σχεδίασης, αντίσταση, βάρη, όγκοι, ευστάθεια, διαγωγή κτλ αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και έτσι πρέπει να μελετώνται διαδοχικά (σε μια ακολουθία) και με αυξανόμενη βαρύτητα στη λεπτομέρεια όσο προχώρημα σε επομένους, «εσωτερικούς» κύκλους του σπινάλ, μέχρι ένα συγκεκριμένο design, το οποίο θα ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς και θα έχει μια καταφέρει να ισορροπήσει σε αποδεκτό βαθμό όλες τις απαιτήσεις και τα κριτήρια, να επιτευχτεί. Αυτή η προσέγγιση στη σχεδίαση μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σαν **point – based** σχεδίαση γιατί στοχεύει στην επίτευξη ενός συγκεκριμένου σημείου στον ευρύτερο χώρο σχεδίασης. Το αποτέλεσμα είναι ένα βασικό design το οποίο μπορεί να υλοποιηθεί ως έχει άλλα ίσως και να επιδέχεται περεταίρω βελτίωσης. Ένα μειονέκτημα λοιπόν αυτής της προσέγγισης είναι ότι, ενώ παράγει ένα εφικτό design, ίσως να μην παράγει ένα ολικά βέλτιστο design με όρους κάποιου μέτρου αξιολόγησης της σχεδίασης πλοίων όπως για παράδειγμα ο απαιτούμενος ναύλος (RFR – Required Freight Rate).

Μια άλλη διαδικασία παραγωγής «world-class designs» η οποία παράγει designs σε αρκετά γρήγορο χρονικό διάστημα είναι η εξής :

- Ορίζονται ευρέα σύνολα των παραμέτρων σχεδίασης ώστε να επιτραπεί η εκκίνηση παράλληλων διαδικασιών μελέτης και σχεδίασης.
- Αυτά τα σύνολα παραμένουν ανοιχτά για ένα αρκετά μεγαλύτερο διάστημα απ' ό τι σε συμβατικές τεχνικές έτσι ώστε να αποκαλυφθούν πληροφορίες (tradeoff information) οι οποίες βοηθούν στην ικανοποιητική

εξισορρόπηση των διαφόρων απαιτήσεων (υπάρχει δηλαδή μια είδους εξέλιξη)

- Τελικά τα σύνολα αυτά σταδιακά «κλείνουν» – περιορίζονται έτσι ώστε ένα είδους ολικό βέλτιστο design να αποκαλυφθεί και να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω.

Αυτή η προσέγγιση σχεδίασης έχει χαρακτηριστεί από τον Ward σαν **set – based design**. Η set – based προσέγγιση σχεδίασης, είναι ένας παραλληλισμός της Μεθόδου της Ελεγχόμενης Σύγκλισης (Method of Controlled Convergence) που εισήχθη από τον Stuart Pugh και της Μεθόδου Οριοθέτησης Παραμέτρων (Parameter Bounding Approach) που εισήχθη από τον Lamb. Αυτές οι Set – Based προσεγγίσεις δίνουν έμφαση στην *τακτική της ελαχίστης δέσμευσης (Policy of Least Commitment)* η οποία είναι : Κρατάμε όλες τις εναλλακτικές λύσεις διαθέσιμες ή «ανοικτές» για όσο το δυνατόν πιο πολύ, ώστε οι καλύτερες δυνατές πληροφορίες tradeoff να είναι διαθέσιμες την ώρα που πρέπει να παρθούν συγκεκριμένες σημαντικές αποφάσεις για την σχεδίαση.

3.2 Διαδικασία Παραμετροποίησης και επεξήγηση υπορουτινών στην παρούσα εργασία.

Σκοπός όπως έχει ήδη αναφερθεί της παρούσης εργασίας ήταν η εύρεση ενός συνόλου « βέλτιστων design » (Pareto front) για πλοία μεταφοράς πετρελαίου και παραγωγών του (oil tankers) με βάση διάφορα οικονομοτεχνικά κριτήρια και με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων.

Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκε πρόγραμμα (**MOGA_Optimization_Tankers**) σε περιβάλλον προγραμματισμού Matlab (έκδοση : Matlab R2011a).

Για την κατάστρωση του προβλήματος της βελτιστοποίησης έπρεπε πρώτα να γίνει μια *παραμετροποίηση* ώστε να δίνεται η δυνατότητα στον γενετικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης να ορίζει κάποια βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πλοίου σε ένα *διάνυσμα σχεδίασης* και μέσω της δημιουργίας πληθυσμών από διάφορα πιθανά διανύσματα σχεδίασης, να εκτελούνται όλες του οι γενετικές διαδικασίες και να υλοποιείται έτσι η αναζήτηση και αναγνώριση των βέλτιστων δυνατών λύσεων και η παράγωγή των βέλτιστων Pareto συνόλων. Η παραμετροποίηση αυτή του

προβλήματος έγινε με κατασκευή διαφόρων υπορουτίνων, προγραμματισμένες σε περιβάλλον προγραμματισμού Matlab (έκδοση : Matlab R2011a).

Πριν όμως ξεκινήσει ο χρήστης να τρέχει τις υπορουτίνες θα πρέπει να εισάγει κάποια δευτερεύοντα αλλά βασικά δεδομένα, τα οποία κρατώνται σταθερά κατά την διάρκεια της βελτιστοποίησης και αφορούν είτε το ίδιο το πλοίο, είτε άλλους τομείς :

- Φυσικές σταθερές (πυκνότητα νερού, κινηματική συνεκτικότητα, πίεση ατμοποίησης κτλ)
- Γενικές σταθερές, οι τιμές των οποίων καθοδηγούν την εκτέλεση των υπορουτινών και κατ' επέκταση όλου του προγράμματος, προς συγκεκριμένες κατευθύνσεις. Για παράδειγμα η τιμή 0 μιας συγκεκριμένης σταθεράς θα απαγορεύσει στο πρόγραμμα να υπολογίσει από μόνο του τα χαρακτηριστικά των υπερκατασκευών ενώ εάν στην ίδια σταθερά δοθεί η τιμή 1 υπαγορεύει στο πρόγραμμα να «διαβάσει» τα χαρακτηριστικά υπερκατασκευών που ο χρήστης του έχει ορίσει.
- Γενικά δεδομένα του πλοίου (ύπαρξη ή μη πρόστεγου ή επιστέγου και χαρακτηριστικά τους, χαρακτηριστικά βαρέων η μη ανυψωτικών μηχανημάτων και υπερκατασκευών, παραδοχές καταναλώσεων κύριας μηχανής και γεννητριών, βαθμοί απόδοσης ηλεκτρομηχανών, παραδοχές ποσότητας κατανάλωσης νερού από το πλήρωμα, βάρους κάθε ατόμου και αποσκευών του κτλ)
- Δεδομένα που αφορούν κόστη χάλυβα, εργατοωρών, κύριων μηχανών, καύσιμων, λιπαντικών ελαίων, μισθοδοσία, χρονική διάρκεια φορτοεκφορτώσεων, επισκευών κτλ.
- Βασικά δεδομένα που αφορούν τους υπολογισμούς αντίστασης (παρατροπίδια, stabilizers, προεξέχοντες άξονες, παραδοχή βαθμού απόδοσης αξονικού κτλ)
- Οικονομικά δεδομένα που αφορούν παραδοχές για το ύψος δανειοδότησης για την κατασκευή, το κεφάλαιο του πλοιοκτήτη, την διάρκεια ζωής του πλοίου κτλ.

Η εισαγωγή αυτών των δεδομένων γίνεται μέσω ενός αρχείου εισόδου με όνομα INPUT_DATA και σε μορφή υπολογιστικού φύλλου του excel (* .xls). (όλη διαδικασία θα περιγραφεί και στο επόμενο κεφάλαιο).

Χρησιμοποιήθηκαν δώδεκα (12) ανεξάρτητες μεταβλητές – παράμετροι σχεδίασης οι οποίες ήταν οι ακόλουθες :

- 1) Λόγος L_{BP}/B
- 2) Λόγος B/T
- 3) Λόγος L/D
- 4) Λόγος $L/\nabla^{1/3}$
- 5) Συντελεστής γάστρας, C_B
- 6) Πρυμναία σιμότητα, S_A
- 7) Πρωραία σιμότητα, S_F
- 8) Αριθμός κυρίων καταστρωμάτων, b
- 9) Εγκάρσια επιφάνεια βολβού στην FP, A_{BT}
- 10) Κατακόρυφη θέση κέντρου επιφανείας εγκάρσιας επιφάνειας βολβού, h_B
- 11) Βυθισμένη επιφάνεια πρύμνης σε μηδενική ταχύτητα A_T
- 12) Βάρος Deadweight (**DWT**)

Και η βελτιστοποίηση έγινε με βάση τα ακόλουθα έξι (6) οικονομοτεχνικά κριτήρια (αντικειμενικές συναρτήσεις) :

- 1) Ελαχιστοποίηση Ολικής αντίστασης γάστρας (Resistance)
- 2) Ελαχιστοποίηση Βάρους πλήρους εξοπλισμένου αλλά άφορτου σκάφους (Lightship)
- 3) Μεγιστοποίηση Βάρους μεταφερόμενου φορτίου (Payload)
- 4) Ελαχιστοποίηση Κόστους κτίσεως πλοίου (Build Cost)
- 5) Ελαχιστοποίηση Ετήσιου κόστους εκμετάλλευσης πλοίου (Annual Cost)
- 6) Ελαχιστοποίηση Ελάχιστου απαιτούμενου ναύλου (RFR)

Παρακάτω θα γίνει αναφορά στα επιμέρους στοιχεία – υπορουτίνες που παραμετροποιούν το σχεδιαστικό πρόβλημα που μελετάμε και είναι μέρη του συνολικού προγράμματος MOGA_Optimization_Tankers που αναπτύχθηκε.

Επίσης αναπτύχθηκε και γραφικό περιβάλλον (Grafical User Interface) σε γλώσσα προγραμματισμού Matlab με σκοπό την εύκολη και άνετη χρήση του προγράμματος από τρίτους (user – friendly) και θα περιγραφεί στο επόμενο κεφάλαιο.

Η παραμετροποίηση υλοποιείται με 14 υπορουτίνες υπολογισμού όλων των απαιτούμενων στοιχείων για την περιγραφή του βασικού προβλήματος και την πραγματοποίηση της βελτιστοποίησης. Πιο συγκεκριμένα :

- 1) Initial Values Calculation.m : Υπολογισμός κυρίων διαστάσεων με βάση τα δεδομένα των αδιάστατων λόγων οι οποίοι χρησιμοποιούνται ως ανεξάρτητες μεταβλητές, καθώς και διάφοροι άλλοι υπολογισμοί απαραίτητοι για την εκκίνηση του προγράμματος.
- 2) SCHNEEKLUTH_WATSON.m : υπολογισμός βάρους μεταλλικής κατασκευής (χωρίς υπολογισμό βάρους υπερκατασκευών) με τη μέθοδο Schneekluth και τη μέθοδο Watson.
- 3) MullerKoster.m : υπολογισμός βάρους υπερκατασκευών και υπερστεγασμάτων με τη μέθοδο Muller Koster.
- 4) Wm.m : Υπολογισμός βάρους μηχανολογικής εγκατάστασης (μέθοδος συντελεστών και τύπος Watson-Gilfillan).
- 5) Wot.m : Υπολογισμός βάρους ενδιαίτησης και εξοπλισμού (μέθοδος συντελεστών, μέθοδος προσεγγιστικών τύπων).
- 6) HOLTROP.m : Υπολογισμός ολικής αντίστασης γάστρας και συντελεστών προώσης (συντελεστών μείωσης ώσης ,σχετικής περιστροφής και ποσοστού ομόρου) μέσω της μεθόδου Holtrop , υπολογισμός χαρακτηριστικών βέλτιστης προπέλας μέσω των πολυωνύμων Κουρματζή.
- 7) LOADLINE.m : Υπολογισμοί γραμμής φόρτωσης με βάση τους κανονισμούς της διεθνούς συμβάσεως γραμμής φόρτωσης.
- 8) Stability.m : Υπολογισμός αρχικής ευστάθειας άθικτου πλοίου.
- 9) DWTanalysis.m : Υπολογισμοί ανάλυσης πρόσθετου βάρους DWT.
- 10) Volumes.m : Ογκομετρικοί υπολογισμοί γάστρας
- 11) Build Cost.m : Υπολογισμός συνολικού κόστους κτήσεως πλοίου.
- 12) Annual Cost.m : Υπολογισμός συνολικού ετήσιου κόστους εκμετάλλευσης

13) RFR.m: Υπολογισμός ελάχιστου απαιτούμενου ναύλου.

14) Energy Efficiency Design Index.m: Υπολογισμός δείκτη EEDI.

Παρακάτω θα περιγραφεί πιο αναλυτικά καθεμιά από τις ανωτέρω 14 υπορουτίνες παραμετροποίησης :

Initial Values Calculation.m :

Σε αυτή την υπορουτίνα υπολογίζονται οι κύριες διαστάσεις, μέσω παραμετρικών εξισώσεων, με βάση τα δεδομένα των αδιάστατων λόγων οι οποίοι χρησιμοποιούνται ως ανεξάρτητες μεταβλητές - παράμετροι, καθώς και λαμβάνουν χώρα διάφοροι άλλοι υπολογισμοί απαραίτητοι για την εκκίνηση του προγράμματος και της βελτιστοποίησης.

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής :

Διαβάζεται η τιμή της ανεξάρτητης παραμέτρου 12 (DWT) και με βάση την σχέση παλινδρομικής ανάλυσης :

$$\Delta = 4773.95 + 1.1213 \cdot DWT$$

Προκύπτει το συνολικό εκτόπισμα βαρών του πλοίου. Στην συνέχεια υπολογίζεται το γεωμετρικό εκτόπισμα του πλοίου από τη σχέση :

$$\nabla = \frac{\Delta}{\rho \text{ (πυκνότητα θαλασσινού νερού)}}$$

Τώρα με βάση την ανεξάρτητη παράμετρο 4 (λόγος $L/\nabla^{1/3}$) υπολογίζεται το μήκος L μεταξύ καθέτων :

$$L = \left(\left(L / \nabla^{1/3} \right) \cdot \nabla^{1/3} \right)$$

Με βάση την ανεξάρτητη παράμετρο 1 (λόγος L/B) υπολογίζεται το πλάτος B :

$$B = \left(\frac{(L/B)}{L} \right)^{-1}$$

Με βάση την ανεξάρτητη παράμετρο 3 (λόγος L/D) υπολογίζεται το κοίλο D :

$$D = \left(\frac{(L/D)}{L} \right)^{-1}$$

Με βάση την ανεξάρτητη παράμετρο 2 (λόγος B/T) υπολογίζεται το βύθισμα σχεδίασης T :

$$T = \left(\frac{(B/T)}{B} \right)^{-1}$$

Υπολογίζεται το ολικό μήκος L_{WL} με βάση την παραδοχή ότι είναι περίπου 3,5% μεγαλύτερο του μήκους μεταξύ καθέτων L ($\equiv L_{BP}$).

¹Στη συνέχεια διαβάζονται οι τιμές των ανεξάρτητων παραμέτρων 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11.

Υπολογίζεται ο συντελεστής μέσης τομής C_m ως εξής :

$$C_m = 1.006 - 0.0056 \cdot C_B^{-3.56} \quad \text{τύπος H. Kerlen}$$

$$C_m = \frac{1}{1 + (1 - C_B)^{3.5}} \quad \text{τύπος εργαστηρίου HSVA (Hamburg)}$$

Και η τελική τιμή του C_m προκύπτει ως ο μέσος όρος των δύο παραπάνω τιμών.

Υπολογίζεται ο πρισματικός συντελεστής : $C_p = \frac{C_B}{C_m}$

Υπολογίζεται ο συντελεστής ισάλου επιφάνειας C_{WP} ως εξής :

$$C_{WP} = 0.778 \cdot C_B + 0.248$$

$$C_{WP} = 0.95 \cdot C_p + 0.17 \cdot (1 - C_p)^{1/3} \quad \text{τύπος Schneekluth}$$

$$C_{WP} = \frac{1 + 2 \cdot C_B}{3}$$

Και η τελική τιμή του C_{WP} προκύπτει ως ο μέσος όρος των τριών παραπάνω τιμών.

Υπολογίζεται η διάμετρος της προπέλας ως το 60% του βυθίσματος σχεδίασης (μια τιμή λογική για δεξαμενόπλοια).

Υπολογίζονται οι αριθμοί Froude και Reynolds ως εξής :

$$Fn = \frac{V (m/sec)}{\sqrt{g (m/sec^2) \cdot L_{WL} (m)}} = \frac{\text{ταχύτητα υπηρεσίας}}{\sqrt{\text{επιτάχυνση βαρυτητας} \cdot \text{ολικό μήκος}}}$$

$$Re = \frac{V (m/sec) \cdot L_{WL}}{\nu} = \frac{\text{ταχύτητα υπηρεσίας} \cdot \text{ολικό μήκος}}{\text{κινηματική συνεκτικότητα νερού}}$$

Τέλος υπολογίζεται η βέλτιστη θέση του κέντρου ανώσεως της γάστρας ως ποσοστό επί τοις εκατό του μήκους μεταξύ καθέτων του πλοίου πρόωραθεν (+) ή πρύμνηθεν (-) του μέσου νομέα με βάση τη σχέση :

$$lcb = 9.7 - 45 \cdot Fn \quad : \text{τύπος Harvald στο βιβλίο Parametric Design. Michael G. Parsons .}$$

(1. Σε κάθε περίπτωση γίνεται έλεγχος μεταξύ C_b , ∇ , L_{bp} , B, T).

Σε αυτό το στάδιο έχει ολοκληρωθεί η παραμετροποίηση των κυρίων διαστάσεων και των συντελεστών μορφής της γάστρας καθώς και ο υπολογισμός των F_n , Re και της σχετικής θέσης του κέντρου άντωσης.

SCHNEEKLUTH WATSON.m :

Σε αυτή την υπορουτίνα γίνεται ο υπολογισμός του βάρους της μεταλλικής κατασκευής (χωρίς υπολογισμό βάρους υπερκατασκευών) με τη μέθοδο Schneekluth και τη μέθοδο Watson.

Μέθοδος Schneekluth:

Απαιτούμενα Στοιχεία :

L_{BP}	(Μήκος μεταξύ καθέτων)	m
B	(Πλάτος επί νομέων)	m
T_{DESIGN}	(Βύθισμα μελέτης)	m
D	(Κοίλο ανώτατου συνεχούς καταστρώματος)	m
C_B	(Συντελεστής γάστρας στη γραμμή ισάλου (Βύθισμα T_{DESIGN})) (ανεξάρτητη παράμετρος 5)	
C_{BD}	(Συντελεστής γάστρας στο ύψος D)	
C_M	(Συντελεστής Μέσου Νομέα στο Βύθισμα T_{DESING})	
S_F	(Πρωραία σιμότητα στο AP) (ανεξάρτητη παράμετρος 7)	m
S_A	(Πρυμναία Σιμότητα στο FP) (ανεξάρτητη παράμετρος 6)	m
b	(Κυρτότητα καταστρώματος στη μέση τομή) (ανεξάρτητη παράμετρος 8)	m
n	(Αριθμός Κύριων Καταστρωμάτων) (θεωρείται 1)	
∇_U	(Όγκος κάτωθεν ανώτατου συνεχούς καταστρώματος) (υπολογίζεται)	

Υπολογισμός C_{BD}

Ισχύει :

$$C_{BD} = C_B + C_1 \cdot \frac{D - T_{DESING}}{T_{DESING}} \cdot (1 - C_B)$$

$C_1 = 0,25$ (για πλοία με μικρό άνοιγμα νομέων υπεράνω της ισάλου)

0,4 (για όλες τις λοιπές περιπτώσεις)

Υπολογισμός ∇_U :

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

Όγκος έως το D :

$$\nabla_D = L \cdot B \cdot D \cdot C_{BD}$$

Αύξηση όγκου λόγω σιμότητας

$$\nabla_S = L_S \cdot B \cdot (S_F + S_A) \cdot C_2$$

L_S = (έκταση σιμότητας ($\leq L_{BP}$)) = L_{BP} εάν οι ανεξάρτητες παράμετροι 6 και 7 είναι και οι δυο μη μηδενικές αλλιώς θεωρείται ότι $L_S \sim 85\% L_{BP}$ (λογική τιμή για δεξαμενόπλοια)

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

Αύξηση όγκου λόγω κυρτότητας καταστρώματος

$$\nabla_b = L \cdot B \cdot b \cdot C_3$$

$$C_3 = 0.7 \cdot C_{BD}$$

Αύξηση όγκου λόγω στομιών κοιτών

$$\nabla_H = \sum_i^N l_{H_i} \cdot b_{H_i} \cdot h_{L_i}$$

όπου: l_{H_i} : Μήκος στομίου i
 b_{H_i} : Πλάτος στομίου i
 h_{L_i} : Ύψος στομίου i

N = Αριθμός στομιών

Αυτός ο όρος έχει νόημα μόνο για τα πλοία bulk carriers οπότε στην περίπτωση μας μηδενίζεται.

Τελικά το βάρος της μεταλλικής κατασκευής **χωρίς** το βάρος των υπερκατασκευών δίνεται από τον τύπο :

$$W'_{ST} = \nabla_U \cdot C'_{ST} \cdot |1 + 0,33 \cdot (L/D - 12)| \cdot$$

$$|1 + 0,06 \cdot (n - D/D_0)| \cdot$$

$$|1 + 0,05 \cdot (1,85 - B/D)| \cdot$$

$$|1 + 0,2 \cdot (T/D - 0,85)| \cdot$$

$$|0,92 + (1 - C_{BD})^2| \cdot$$

$$|1 + 0,75 \cdot C_{BD} \cdot (C_M - 0,98)|$$

Όπου $D_0 = 4$ και οι τιμές του C'_{ST} [t/m^3] δίνονται από τον παρακάτω πίνακα :

Τύπος πλοίου	Περιοχή μηκών
Κανονικά φορτηγά μεικτού φορτίου $C'_{ST}=0,103 \cdot 1+17 \cdot (L-110m)^2 \cdot 10^{-6} $	60 ~ 180 m
Φορτηγά ψυγεία $C'_{ST}=0,106 \sim 0,116$	100 ~ 150 m
Επιβατηγά $C'_{ST}=0,113 \sim 0,121$	80 ~ 150 m
Φορτηγά φ. χύδην (bulk-carrier) $C'_{ST}=0,108 \sim 0,117$	150 ~ 300 m
Δεξαμενόπλοια $C'_{ST}=[0,112 + L[m] \cdot 10^{-4}] \cdot (0,95 \sim 1,05)$	150 ~ 350 m

Οι παρακάτω διορθώσεις μπορούν να γίνουν :

Διόρθωση για βολβοειδή πλώρα :

Διόρθωση : $+0,4 \sim 0,7 \% W'_{ST}$

Διόρθωση για χρήση γάλυβα υψηλής αντοχής :

Διόρθωση : $- 5 \sim 7 \% W'_{ST2}$

Μέθοδος Watson:

Στη μέθοδο αυτή γίνεται η υπόθεση ότι το βάρος της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου **συμπεριλαμβανομένων** και των υπερκατασκευών μπορεί να υπολογιστεί με βάση τον δείκτη εξοπλισμού EN (Equipment Number) του πλοίου κατά Lloyds Register :

Δείκτης εξοπλισμού EN (Equipment Numerical) κατά Lloyds Register :

$$E_N = L \cdot (B + T) + 0,8 \cdot L \cdot (D - T) + 0,85 \cdot \sum_{i=1}^{N_1} h_{1i} \cdot l_{1i} + 0,75 \cdot \sum_{i=1}^{N_2} h_{2i} \cdot l_{2i}$$

Όπου :

N_1, h_{1i}, l_{1i} : αριθμός, ύψος και μήκος υπερστεγασμάτων

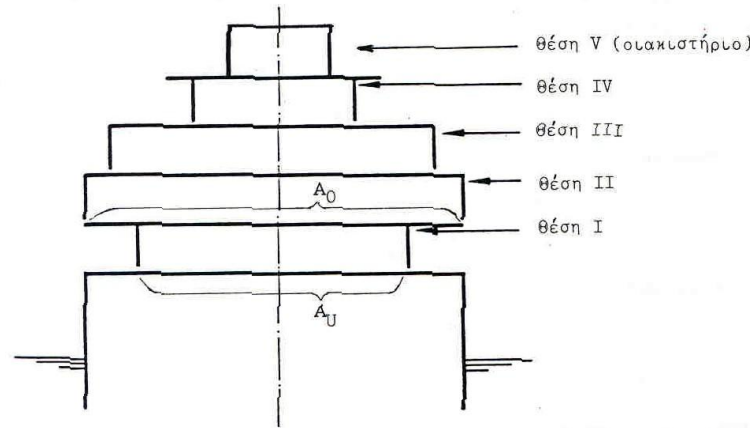
N_2, h_{2i}, l_{2i} : αριθμός, ύψος και μήκος υπερκατασκευών

Υπερκατασκευές (superstructures) :

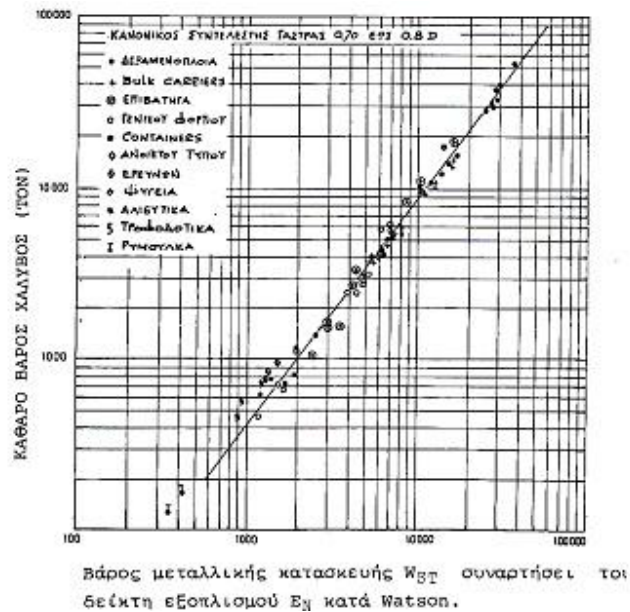
Σύμφωνα με τους κανονισμούς (Γραμμή Φόρτωσης) στην κατηγορία αυτή θεωρούνται κατασκευές επί του κυρίου καταστρώματος με απόσταση των πλαγίων τοιχωμάτων από τα πλευρά του πλοίου μικρότερη ή ίση του 4% του πλάτους B του πλοίου

Υπερστεγάσματα (deckhouses) :

Είναι τα στεγάσματα με ενδαιτήσεις : Στεγάσματα καταστρώματος που περιλαμβάνουν περισσότερα του ενός καταστρώματα δεν υπολογίζονται ως μια ενιαία κατασκευή, αλλά ως αποτελούμενα από επιμέρους τμήματα, τα οποία ταξινομούνται ως προς τη θέση τους υπεράνω του κύριου (ανώτατου συνεχούς) καταστρώματος. Έτσι το μέρος του στεγασματος, που βρίσκεται επί του κύριου καταστρώματος, χαρακτηρίζεται ως έχον τη θέση I, υπεράνω αυτού τη θέση II, κλπ. Βλ. παρακάτω σχήμα :



Στο παρακάτω διάγραμμα δίνεται το βάρος της μεταλλικής κατασκευής W_{ST} συναρτήσει του EN για κανονικό συντελεστή γάστρας C_B^* , στο ύψος $0.8 \cdot D$, ίσον με 0.7 :



Ισχύει :

$$C_{B(0,8D)} = C_{B_0} \cdot \left(\frac{T_1}{T_0} \right)^{\frac{C_{WL_0} - 1}{C_{B_0}}}$$

Όπου : $C_{B_0} = C_B$ (ανεξάρτητη παράμετρος 5)

$$T_1 = 0,85 \cdot D$$

$$T_0 = T$$

$$C_{WP_0} = C_{WP}$$

Εάν $C_{B(0,8D)} \neq 0.7$ τότε πρέπει να γίνει διόρθωση του βάρους της μεταλλικής κατασκευής ως εξής :

$$W_{ST} = W_{ST}^* \cdot 1 + 0.5 \cdot C_{B1}^* - 0.7, \quad C_{B1}^* = \frac{C_{B1} \cdot 1 - C_{B1} \cdot 0.8 \cdot D - T}{3 \cdot T}$$

$$C_{B1} = C_{B1} \quad T = C_B$$

Η μέθοδος αυτή έχει βελτιωθεί από πλέον πρόσφατες μελέτες του Watson (Watson, D. G. M., Practical Ship Design, Elsevier Science Ltd, Oxford, 1998) και πλέον το βάρος της μεταλλικής κατασκευής μπορεί να υπολογιστεί ως εξής :

$$W_{ST}^* = K \cdot E^{1.36}$$

Όπου K από τον ακόλουθο πίνακα :

Τύπος Πλοίου	Μέση τιμή K	Διακύμανση K [±]	Κάτω Όριο E	Άνω Όριο E
Δεξαμενόπλοια	0.032	0.003	1500	40000
Δ/Ξ Χημικών	0.036	0.001	1900	2500
Φ/Γ Χύδην	0.031	0.002	3000	15000
Containers	0.036	0.003	6000	13000
Φ/Γ Γεν. Φορτ.	0.033	0.004	2000	7000
Φ/Γ Ψυγεία	0.034	0.002	4000	6000
Φ/Γ Ακτοπλ.	0.030	0.002	1000	2000
Offshore Suppliers	0.045	0.005	800	1300
Ρυμουλκά	0.044	0.002	350	450
Αλιευτικά Trawlers	0.041	0.001	250	1300
Υδρογραφικά	0.045	0.002	1350	1500
Ε/Γ – Ο/Γ	0.031	0.006	2000	5000
Ε/Γ	0.038	0.001	5000	15000
Φρεγάτες / Κορβέτες	0.023			

Σημείωση : Οι παραπάνω συντελεστές αναφέρονται σε κατασκευές από 100% κανονικό χάλυβα (mild steel). Δεδομένου ότι μια σειρά τύπων πλοίων κατασκευάζεται σήμερα σε κάποιο ποσοστό με χάλυβα υψηλής αντοχής, τα προκύπτοντα βάρη από τους παραπάνω συντελεστές αναμένεται να είναι ελαφρώς υψηλότερα των σημερινών συνθηκών (πχ. Δεξαμενόπλοια, bulkcarriers, containerships).

MullerKoster.m:

Υπολογισμός βάρους μεταλλικής κατασκευής υπερστεγασμάτων/υπερκατασκευών

Υπερκατασκευές (superstructures) :

Σύμφωνα με τους κανονισμούς (Γραμμή Φόρτωσης) στην κατηγορία αυτή θεωρούνται κατασκευές επί του κυρίου καταστρώματος με απόσταση των πλαγίων τοιχωμάτων από τα πλευρά του πλοίου μικρότερη / ίση του 4% του πλάτους B του πλοίου. Τέτοιες υπερκατασκευές πει του πλοίου είναι οι εξής :

α) Πρόστεγο (Roop or Forecastle) :

Το ογκομετρικό βάρος (βάρος ανά μονάδα όγκου) ενός προστέγου είναι :

$$C_{\text{FORECASTLE}} = 100 \text{ Kp} / \text{m}^3 \text{ για } L_{\text{BP}} \geq 140 \text{ m.}$$

$$130 \text{ Kp} / \text{m}^3 \text{ για } L_{\text{BP}} \sim 140 \text{ m.}$$

Υποθέσεις :

$$\text{Ύψος Προστέγου : } h_{\text{FORECASTLE}} = 2.5 \div 3.25 \text{ m}$$

$$\text{Μήκος Προστέγου : } l_{\text{FORECASTLE}} = \div 0.2 \cdot L_{\text{BP}}$$

Διορθώσεις :

$$\delta C_{\text{FORECASTLE}} [\%] \text{ έως } -10 \text{ για } l_{\text{FORECASTLE}} \cong 0.33 \cdot L_{\text{BP}}$$

$$\delta C_{\text{FORECASTLE}} [\%] \cong -5 \text{ έως } -10 , \text{ για } h_{\text{FORECASTLE}} > 3.25 \text{ m}$$

β) Επίστεγο (Back) :

Το ογκομετρικό βάρος (βάρος ανά μονάδα όγκου) ενός επιστέγου είναι :

$$C_{\text{BACK}} = 75 \text{ Kp} / \text{m}^3$$

Υποθέσεις :

Έκταση επιστέγου έως την προραία φράκτη μηχανοστασίου, για μηχανή πρόμνηθεν

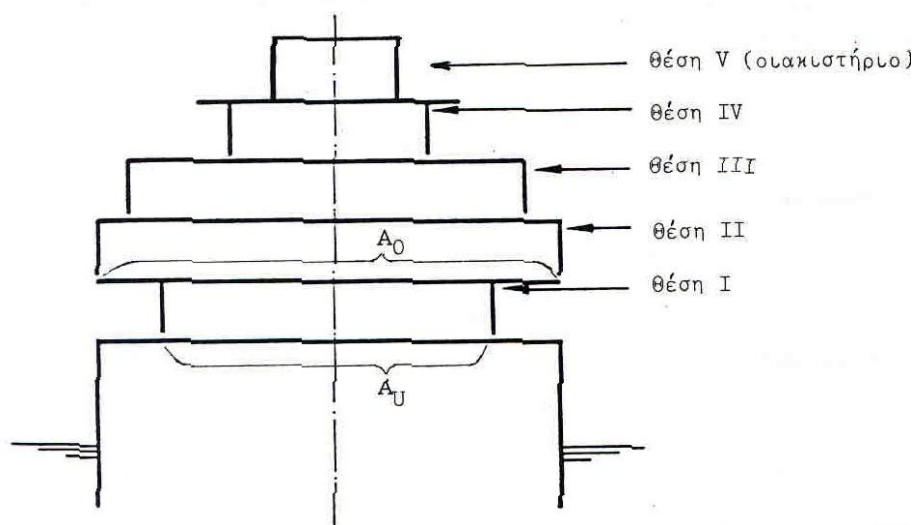
Διορθώσεις :

Εφόσον το επίστεγο εκτείνεται υπεράνω ενός κύτους :

$$\delta C_{\text{ROOP}} [\%] \cong +20 \%$$

Υπερστεγάσματα (deckhouses) :

α) Στεγάσματα με ενδιστοιχίσεις : Στεγάσματα καταστρώματος που περιλαμβάνουν περισσότερα του ενός καταστρώματα δεν υπολογίζονται ως μια ενιαία κατασκευή, αλλά ως αποτελούμενα από επιμέρους τμήματα, τα οποία ταξινομούνται ως προς τη θέση τους υπεράνω του κύριου (ανώτατου συνεχούς) καταστρώματος. Έτσι το μέρος του στεγάσματος, που βρίσκεται επί του κύριου καταστρώματος, χαρακτηρίζεται ως έχον τη θέση I, υπεράνω αυτού τη θέση II, κλπ. Βλ. παρακάτω σχήμα :



Εάν ένα υπερστεγάσμα βρίσκεται επί του προστέγου ή επί του επιστέγου τότε αυτό αρχίζει με τη θέση II.

Το βάρος των στεγασμάτων εξαρτάται από τους εξής παράγοντες :

- Τρόπος κατασκευής
- Μήκος του πλοίου
- Αριθμός υπερκείμενων καταστρώματων
- Ύψος καταστρώματων
- Μήκος εσωτερικών Διαχωριστικών τοιχωμάτων, εφόσον είναι από χάλυβα
- Λόγος επιφάνειας υπερκείμενου καταστρώματος A_0 , συμπεριλαμβανομένης της επιφάνειας αστέγαστων εξωτερικών διαδρομών, προς την πραγματικά στεγασμένη επιφάνεια του εκάστοτε καταστρώματος A_U .

Το βάρος ανά μονάδα όγκου C_{DH} [kr/m³] για υπερστεγάσματα συναρτήσει του λόγου A_0/A_U είναι :

Θέση	I	II	III	IV	Οιακιστήριο
A_0/A_U					
1	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	86	84	78	80	60
2,25	93	91	85	86	65
2,5	100	98	91	93	70

Το βάρος ενός τμήματος υπερστεγάσματος στη θέση I - IV ή του οιακιστηρίου προκύπτει από τον τύπο :

$$W_{DH} = C_{DH} \cdot A_m \cdot h \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$$

Όπου :

C_{DH} [kr/m³] : ογκομετρικός συντελεστής βάρους σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα (ενδιάμεσες τιμές με γραμμική παρεμβολή)

h : Ύψος στεγάσματος

k_1 : διόρθωση για ύψος στεγάσματος διάφορο του 2,6m

k_2 : διόρθωση για μήκος εσωτερικών τοιχωμάτων διάφορο του κανονικού (4,5xμηκος στεγάσματος)

k_3 : διόρθωση για μήκος πλοίου σημαντικά διάφορο του κανονικού $L_{pp}=150m$, δηλ. $\delta L_{pp} > \pm 30m$

A_m : Μ.Ο Επιφανειών = $0,5 \cdot (A_0 + A_U)$

Έχουμε :

$$k_1 = 1 + 0,02 \cdot (h - 2,6m) \quad k_2 = 1 + 0,05 \cdot \left(4,5 - \frac{l_I}{l_{DH}}\right)$$

Όπου :

l_I : Ολικό μήκος εσωτερικών τοιχωμάτων

l_{DH} : Μήκος στεγάσματος

$k_3 = 0,95$ για $L_{pp} = 100$ m

1,1 για $L_{pp} = 230$ m (γραμμική παρεμβολή για ενδιάμεσες τιμές)

β) Οικίσκοι φορτωτήρων (winch houses) :

Το βάρος ανά μονάδα όγκου των οικίσκων φορτωτήρων υπολογίζεται από τον τύπο :

$$C_{WH} [kp / m^3] = 48 + 4 \cdot \frac{A_0}{A_U} \cdot \left(\frac{A_0}{A_U} + 8 \right) + \frac{18 \cdot (150m^3 - \nabla_{WH})}{\nabla_{WH}}$$

Όπου :

$$\nabla_{WH} [m^3] = A_U \cdot h_{WH} (\text{max.} : 150m^3) \quad (\text{όγκος οικίσκου})$$

A_0 , A_U , h : Όπως ορίστηκαν παραπάνω

Για το τελικό βάρος του οικίσκου έχουμε :

$$W_{WH} = C_{WH} \cdot \nabla_{WH} \cdot k_1$$

Όπου :

k_1 : διόρθωση για οικίσκους φορτωτήρων ανυψωτικής ικανότητας άνω των 10 tons

Τιμές συντελεστή k_1 :

Ανυψ. Ικανότητα φορτωτήρα [t]	k_1
10	1
20	1,02
50	1,05
80	1,1
100	1,15
130	1,3
150	1,5

Για φορτωτήρες βαρέων βαρών απαιτούνται ιδιαίτερες ενισχύσεις στην έδραση του οικίσκου καθώς και των βαρούλκων και τα ανωτέρω βάρη πρέπει να αυξηθούν μέχρι και 70% W_{WH} . Τα όρια εφαρμογής της μεθόδου είναι :

$$A_0 / A_U = 1.0 \div 3.0$$

$$h_{WH} = 2.6 \div 3.2$$

$$\nabla_{WH} [m^3] = 50 \div 200$$

Παρατήρηση : Το $\nabla_{WH} [m^3]$ κατά τον υπολογισμό του C_{WH} δεν πρέπει να υπερβαίνει τα $150m^3$ (εάν υπερβαίνει τότε τίθεται $C_{WH} = 150m^3$).

Wm.m :

Σε αυτή την υπορουτίνα υπολογίζεται το βάρος της μηχανολογικής εγκατάστασης.

Ισχύει :

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

Εφόσον βρισκόμαστε στην προκαταρκτική φάση της μελέτης (αρχική μελέτη) οι μέθοδοι υπολογισμού βαρών μηχανολογικής εγκατάστασης W_M που θα χρησιμοποιήσουμε είναι οι εξής :

Προσέγγιση ολικού βάρους W_M ή των υποομάδων W_{MM}, W_{MS}, W_{MR} με βάση εμπειρικούς συντελεστές

Έχουμε τον παρακάτω πίνακα :

Τύπος πλοίου	Φορηγό	Δεξαμενόπλοιο	Ψυγείο	Υπερωκεάνιο ταχύ επιβατηγό	Μικρό ταχύ επιβατηγό
Συντελεστής					
w_1 [κρ/μ ³]	10 ~ 15	3 ~ 5	20 ~ 25	15 ~ 25	14 ~ 15
w_2 [κρ/HP]	35 ~ 50	25 ~ 35	50 ~ 70	20 ~ 30	14 ~ 15
w_3 [κρ/HP]	5 ~ 10	4	8 ~ 10	8	14 ~ 15
w_4 [κρ/HP]	Αργοστρ. Νηξελομηχ 30 ~ 40	Ατμοστροβ. 20 ~ 25	Αργοστρ. Νηξελομηχ 30 ~ 40	Ατμοστροβ. 20 ~ 25	Μεσοστρ.μηχ.με μειωτήρα 22 ~ 30 Νέα τεχνολ. 12~17
w_5 [κρ/HP]	85 ~ 90	55 ~ 60	90 ~ 110	50 ~ 60	14 ~ 15

Επεξηγήσεις :

1) Ανάλυση βάρους Μηχανολογικής Εγκατάστασης : $W_M = W_{MM} + W_{MS} + W_{MR}$

W_{MM} : βάρος κύριας μηχανής και μειωτήρα(για στροβιλομηχανές, στρόβιλος μειωτήρας λέβητες)

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. Αγωγοί εξάτμισης, καπνοδόχοι. Λέβητες. Εξαεριστικοί αγωγοί μηχανοστασίου, αντλίες ερμητισμού, απάντλησης, πυρόσβεσης, γλυκού νερού-μηχανοστάσιο. Κύρια ηλεκτρογεννητική εγκατάσταση, ηλεκτρογεννήτριες, μετασχηματιστές, πίνακες. Εργαλεία μηχανοστασίου.

2) Ορισμοί :

$$w_1 = W_{MR} / LBD \quad \text{όπου : SHP} = \text{Shaft Horse Power} .$$

$$w_2 = W_{MR} / SHP$$

$$w_3 = W_{MS} / SHP$$

$$w_4 = W_{MM} / SHP$$

$$w_5 = W_M / SHP$$

Υπολογισμός με βάση συγκριτικά στοιχεία ομοίων μηχανολογικών εγκαταστάσεων

Θα χρησιμοποιήσουμε τον τύπο των Watson - Gilfillan (για διζελοκίνητα φορτηγά) :

Ισχύει :

$$W_M [t] = C_{MD} \cdot P_B^{0.89}$$

όπου : P_B [KW] : Ισχύς πέδης κύριας μηχανής.

$$C_{MD} = 0,21 \quad (\text{μεσόστροφες Διζελ})$$

$$= 0,3 \div 0,5 \quad (\text{αργόστροφες Διζελ})$$

Η τελική τιμή του βάρους της μηχανολογικής εγκατάστασης προκύπτει ως ο μέσος όρος των δυο παραπάνω μεθόδων.

Wot .m :

Σε αυτή την υπορουτίνα υπολογίζεται το βάρος ενδιαίτησης και εξοπλισμού.

Ορισμός W_{OT} : Το βάρος ενδιαίτησης και εξοπλισμού περιλαμβάνει όλα τα επί του "γυμνού" σκάφους εφαρμοσμένα εξαρτήματα του πλοίου, πλην της μηχανολογικής εγκατάστασης.

Χρήση Συντελεστών

Η ομαδοποίηση των βαρών ενδιαίτησης και εξοπλισμού σύμφωνα με το αντικείμενο εργασίας έχει ως εξής :

- I:** Χονδρές ξυλουργικές εργασίες: ξύλινα καταστρώματα, ξύλινες επενδύσεις χώρων κυτών, ψυκτικών χώρων & διπτυθμένου, ξύλινα καλύμματα στομιών κυτών, ξύλινα διαφράγματα, ξύλινα υπερστεγάσματα, ακόμα: *μη ξύλινες* επενδύσεις χώρων κυτών (αλουμίνιο ή συνθετικά υλικά) – σημερινές τιμές στο κάτω όριο του πίνακα 2.16.
- II₁:** Μονωτικές εργασίες: βάρος μόνωσης συναρτήσει του υλικού και λιγότερο του πάχους της επένδυσης. Συνήθεις τιμές: $V_{Net\ Net}/LBD=0.82-0.35$ ή βάρος μόνωσης/ $V_{Net\ Net}=30-80\text{ kp/m}^3$
- II₂:** Χωματουργικές και αντιδιαβρωτικές εργασίες: χρώματα, πσσαρίσματα, πλακοστρώσεις δαπέδων και τοιχωμάτων
- III:** Μικρές ξυλουργικές εργασίες: ενδιάμεσα τοιχώματα ενδιαίτησης, πόρτες, επιπλώσεις χώρων ενδιαίτησης, επενδύσεις εσωτερικών δαπέδων (μοκέτες), κουρτίνες, ταπετσαρίες, υαλουργικές εργασίες. Σύνηθες βάρος / επιφάνεια χώρων ενδιαίτησης: $60-70\text{ kp/m}^3$
- IV:** Σωληνουργικές εργασίες σκάφους: σωλήνες ερματισμού, απάντλησης, πυρόσβεσης, γλυκού-θαλάσσιου νερού, θέρμανσης, ευδοίαιοι, σωλήνες εξαέρωσης και μετρητικοί. Όλα τα επιστόμια, βαλβίδες, σύρτες, κλπ. Σκεύη υγιεινής, καλοριφέρ-υψηλές τιμές πίνακα για δεξαμενόπλοια και επιβατηγά λόγω εκτεταμένων σωληνώσεων.
- V:** Μηχανουργικές εργασίες: καλύβδινες πόρτες, καλύμματα στομιών κυτών και ανοιγμάτων φρακτών, κλπ. Σκαλωσιές. Μεταλλουργικές εργασίες εσωτερικής διαρρύθμισης, σκεύη κουζίνας χρήσης (φούρνοι, πλυντήρια, κλπ). Αγωγοί φυσικού εξαερισμού και κλιματισμού. Σημερινές τιμές στα άνω όρια του πίνακα λόγω καλύβδινων καλυμμάτων στομιών κυτών, μειωμένη χρήση ξύλου.
- VI:** Φορτοεκφορτωτικά σκεύη: πλην των ιστών (βλ. μεταλλική κατασκευή), των βαρούλκων και γερανών (βλ. VIII₂), όλα τα φορτοεκφορτωτικά εξαρτήματα, δηλαδή βραχίονες φορτωτήρα, σχοινιά, τροχαλίες, άγκιστρα, αλυσίδες, κλπ – επακριβής υπολογισμός μέσω του αριθμού φορτωτήρων και της ανυψωτικής ικανότητας.
- VII:** Σκεύη ρυμούλκησης και όρμησης: πλην των βαρούλκων (βλ. VIII₂), όλα τα σκεύη ρυμούλκησης και όρμησης. Οι τιμές του πίνακα μειώνονται με το απόλυτο μέγεθος του πλοίου.
- VIII₁:** Ψυκτικά μηχανήματα: για χώρους φορτίου
- VIII₂:** Λοιπά βοηθητικά μηχανήματα: μηχανισμός πηδαλίου, βαρούλκα για όλες τις χρήσεις (άγκυρες, φορτωτήρες, λέμβοι), εγκατάσταση κλιματισμού, πυρόσβεσης. Ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις. Εγκαταστάσεις επικοινωνίας. – Υψηλές τιμές πίνακα για φορτηγά με βαρείς φορτωτήρες, ψυκτικούς χώρους. Υψηλές τιμές για επιβατηγά λόγω εκτεταμένων εγκαταστάσεων ηλεκτρολογίας, κλιματισμού, πυρόσβεσης και επικοινωνίας. Μόνο για ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις φορτηγά: $0.8-1.4\text{ kp/m}^3$, δεξαμενόπλοια: $0.7-1.0\text{ kp/m}^3$, ψυγεία: $1.0-1.5\text{ kp/m}^3$, επιβατηγά: $3-4\text{ kp/m}^3$. από τα βάρη αυτά, 50-80% αφορούν τα καλώδια. Βάρος ψυκτικής εγκατάστασης για χώρους φορτίου εξαρτάται από τον καθαρό όγκο του προς ψύξη χώρου: Βάρος / $V_{Net\ Net} = 20 - 30\text{ kp/m}^3$
- IX:** Λοιπός εξοπλισμός: άγκυρες, αλυσίδες, κάβοι, караβόπανα, λέμβοι, όργανα σήμανσης ναυσιπλοΐας, εργαλεία, αναλώσιμα, κουζίνα σκεύη, κινητός εξοπλισμός χώρων ενδιαίτησης και διαμονής – Υψηλές τιμές για επιβατηγά.

Οι τυπικοί συντελεστές ομάδων βαρών ενδιαίτησης και εξοπλισμού συνήθων εμπορικών πλοίων κατά E.Strohbusch είναι :

Τύπος πλοίου	Φορηγό	Δεξαμενόπλοιο	Ψυγείο	Επιβατηγό
Ομάδα				
I	1,5 ~ 6	0,5 ~ 1	1,5 ~ 5	8 ~ 14
II ₁	-	-	10 ~ 26	-
II ₂	4 ~ 7	1 ~ 2	4 ~ 7	4 ~ 10
III	5 ~ 6	1 ~ 2	6 ~ 8	8 ~ 12
IV	1,2 ~ 1,5	2,5 ~ 5	1,2 ~ 1,5	5 ~ 6
V	2 ~ 4	1,5 ~ 2	2 ~ 4	10
VI	2,5 ~ 4	0 ~ 0,1	1	0,5
VII	1 ~ 1,5	0,3 ~ 0,5	1 ~ 1,5	1
VIII ₁	-	-	6,5 ~ 10	-
VIII ₂	4 ~ 7	1,5 ~ 2	4 ~ 7	12 ~ 20
IX	2 ~ 3	1 ~ 1,5	2 ~ 3	3 ~ 4

Ισχύει για το συντελεστή βάρους w :

$$w = \text{Βάρος} / \text{LBD} [\text{kp/m}^3]$$

όπου D : κοίλο καταστρώματος αντοχής

Προσεγγιστικοί τύποι

Ισχύει :

$$W_{OT} = K_{OT} \cdot L_{BP} \cdot B$$

Η τιμή του K_{OT} είναι:

$$0.40 \div 0.45 \text{ t / m}^2 \text{ (μεικτού φορτίου)}$$

$$0.34 \div 0.38 \text{ t / m}^2 \text{ (containerships)}$$

$$0.22 \div 0.25 \text{ t / m}^2 \text{ (bulk carriers, } L_{BP} \text{ περίπου 140m)}$$

$$0.17 \div 0.18 \text{ t / m}^2 \text{ (bulk carriers, } L_{BP} \text{ περίπου 250m)}$$

$$0.28 \text{ t / m}^2 \text{ (δεξαμενόπλοια, } L_{BP} \text{ περίπου 150m)}$$

$$0.17 \text{ t / m}^2 \text{ (δεξαμενόπλοια, } L_{BP} \text{ περίπου 300m)}$$

Για ενδιάμεσα μήκη γραμμική παρεμβολή. Η τελική τιμή του βάρους ενδιαίτησης και εξοπλισμού προκύπτει ως ο μέσος όρος των δυο παραπάνω μεθόδων.

HOLTROP.m :

Σε αυτή την υπορουτίνα γίνονται οι εξής υπολογισμοί :

- Ολικής αντίστασης γάστρας και συντελεστών προώσης (μείωσης ώσης ,σχετικής περιστροφής και ποσοστού ομόρου) μέσω της μεθόδου Holtrop
- Χαρακτηριστικών βέλτιστης προπέλας μέσω των πολυωνύμων Κουρματζή.

Μέθοδος Holtrop

Η ολική αντίσταση του πλοίου μπορεί να διαχωριστεί στις εξής επιμέρους κατηγορίες:

$$R_T = R_F \cdot (1 + k_1) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A$$

Όπου :

R_T : Ολική αντίσταση πλοίου

R_F : Αντίσταση τριβής με βάση τον τύπο της γραμμής της ITTC 1957

$$(R_F = 0.5\rho V^2 SC_F)$$

$(1+k_1)$: Παράγοντας μορφής ο οποίος περιγράφει την αντίσταση μορφής της γάστρας λόγω συνεκτικότητας σε σχέση με την αντίσταση τριβής R_F .

R_{APP} : Αντίσταση των διαφόρων προσαρτημάτων της γάστρας (stabilizers, rudders κτλ)

R_W : Αντίσταση δημιουργίας και «σπασίματος» κυματισμών.

R_B : Πρόσθετη αντίσταση πίεσης κοντά στην επιφάνεια του νερού λόγω βολβοειδούς πλώρας

R_{TR} : Πρόσθετη αντίσταση πίεσης λόγω βυθισμένου άνω μέρους της πρύμνης (συνήθως κατακόρυφο).

R_A : Αντίσταση συσχετισμού μοντέλου και πραγματικού πλοίου.

Ο υπολογισμός του παράγοντα μορφής $(1+k_1)$ υπολογίζεται μέσω του παρακάτω τύπου :

$$1 + k_1 = c_{13} \cdot 0.93 + c_{12} \cdot \frac{B}{L_R}^{0.92497} \\ 0.95 - C_p^{-0.521448} \cdot 1 - C_p + 0.0225 \cdot lcb^{0.6906}$$

Σε αυτόν τον τύπο C_p είναι ο πρισματικός συντελεστής βασισμένος στο ολικό μήκος του πλοίου L_{WL} (θα το συμβολίζουμε L στην παρούσα υποενότητα) και lcb είναι η

διαμήκης θέσης του κέντρου άντωσης πλώραθεν του μέσου νομέα σαν ποσοστό του ολικού μήκους του πλοίου. Ο παράγοντας L_R στον παραπάνω τύπο είναι μια παράμετρος που αντικατοπτρίζει το μήκος ροής του ρευστού και υπολογίζεται από :

$$L_R / L = 1 - C_p + 0.06 \cdot C_p \cdot lcb / 4 \cdot C_p - 1$$

Ο παράγοντας c_{12} ορίζεται ως εξής :

$$c_{12} = T / L^{0.2228446}, \text{ εάν } (T / L) > 0.05$$

$$c_{12} = 48.20 T / L - 0.02^{2.078} + 0.479948, \text{ εάν } 0.02 < (T / L) < 0.05$$

$$c_{12} = 0.479948, \text{ εάν } (T / L) < 0.02$$

Σε αυτόν τον τύπο T είναι το μέσο βύθισμα. Ο παράγοντας c_{13} τίθεται λόγω της συγκεκριμένης μορφής του πρυμναίου τμήματος της γάστρας και σχετίζεται με τον παράγοντα C_{stern} ως εξής :

$$c_{13} = 1 + 0.003 \cdot C_{stern}$$

Για τον παράγοντα C_{stern} έχουμε :

Μορφή Πρυμναίου Τμήματος Γάστρας	C_{stern}
Νομείς V	- 10
Κανονικοί Νομείς	0
Νομείς U με πρύμνη Hogner	+10

Η βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας μπορεί να προσδιοριστεί από τον τύπο :

$$S = L \cdot 2T + B \sqrt{C_M} \cdot 0.453 + 0.4425C_B - 0.2862C_M - 0.003467B/T + 0.3696C_{WP} + 2.38A_{BT} / C_B$$

Σε αυτόν τον τύπο C_M είναι ο συντελεστής μέσης τομής, C_B είναι ο συντελεστής γάστρας με βάση το ολικό μήκος L , C_{WP} είναι ο συντελεστής ισάλου επιφάνειας και A_{BT} είναι η εγκάρσια επιφάνεια του βολβού στην διαμήκη θέση όπου η αδιατάρακτη επιφάνεια του νερού τέμνει το προφίλ της πλώρης του πλοίου.

Η αντίσταση των διαφόρων προσαρτημάτων της γάστρας (stabilizers, rudders κτλ)

R_{APP} μπορεί να υπολογιστεί από :

$$R_{APP} = 0.5 \rho V^2 S_{APP} \cdot 1 + k_{2_{eq}} C_F$$

Όπου ρ είναι η πυκνότητα του νερού, V η ταχύτητα του πλοίου, S_{APP} η βρεχόμενη επιφάνεια των προσαρτημάτων, $1+k_2$ ένας παράγοντας της αντίστασης προσαρτημάτων, C_F ο συντελεστής αντίστασης τριβής του πλοίου σύμφωνα με τον τύπο της ITTC 1957.

$$C_F = \frac{0.075}{\log_{10} Re - 2}$$

$$Re \text{ αριθμος Reynolds} = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu} = \frac{VL}{\nu},$$

όπου ν η κινηματική συνεκτικότητα του νερού.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τιμές του παράγοντα $(1+k_2)$ για υδροδυναμικής μορφής προσαρτήματα. Αυτές οι τιμές προέκυψαν από πειράματα αντίστασης με μοντέλα «γυμνής» γάστρας και γάστρας με προσαρτήματα. Σε μερικά από αυτά τα πειράματα διεγέρτες τύρβης ήταν παρόντες στις πλευρές πρόσπτωσης της ροής στα προσαρτήματα για να προκληθεί τυρβώδης ροή γύρω από τα προσαρτήματα αυτά.

Προσεγγιστικές τιμές του παράγοντα $1+k_2$	
Rudder behind skeg	1.5 ÷ 2.0
Rudder behind Stern	1.3 ÷ 1.5
Twin-screw balance rudders	2.8
Shaft brackets	3.0
Skeg	1.5 ÷ 2.0
Strut bossings	3.0
Hull bossings	2.0
Shafts	2.0 ÷ 4.0
Stabilizer fins	2.8
Dome	2.7
Bilge Keels	1.4

Η ισοδύναμη τιμή $1+k_2$ για έναν συνδυασμό προσαρτημάτων υπολογίζεται από :

$$1+k_{2 \text{ eq}} = \frac{\sum 1+k_2 S_{APP}}{\sum S_{APP}}$$

Η αντίσταση προσαρτημάτων μπορεί να αυξηθεί προσθέτοντας τον παρακάτω όρο λόγω αντίστασης τυχόν υπάρχοντος bow thruster και ανοίγματος τούνελ στο οποίο αυτό τοποθετείται :

$$\rho V^2 \pi d^2 C_{BTO}$$

όπου d είναι η διάμετρος του τούνελ. Ο παράγοντας C_{BTO} κινείται μεταξύ 0.003 και 0.012. Για ανοίγματα (τούνελ) στο σφαιρικό μέρος βολβοειδούς πλήρης παίρνουμε τις χαμηλότερες τιμές του C_{BTO} .

Η αντίσταση δημιουργίας και «σπασίματος» κυματισμών R_W μπορεί να υπολογιστεί από :

$$R_W = c_1 c_2 c_5 \nabla \rho g \exp m_1 F_n^d + m_2 \cos \lambda F_n^{-2}$$

Με :

$$c_1 = 2223105 c_7^{3.78613} T / B^{1.07961} 90 - i_E^{-1.37565}$$

$$c_7 = 0.229577 B / L^{0.33333}, \text{ εάν } B / L < 0.11$$

$$= B / L, \text{ εάν } 0.11 < B / L < 0.25$$

$$= 0.5 - 0.0625 L / B, \text{ εάν } B / L > 0.25$$

$$c_2 = \exp -1.89 \sqrt{c_3}$$

$$c_5 = 1 - 0.48 A_T / BTC_M$$

Σε αυτές τις εξισώσεις c_2 είναι μια παράμετρος που λαμβάνει υπόψη τη μείωση της αντίστασης κυματισμού λόγω της ύπαρξης βολβοειδούς πρόρας. Παρομοίως, η παράμετρος c_5 εκφράζει την επιρροή της πρύμνης στην αντίσταση κυματισμού. Ο παράγοντας A_T είναι η εγκάρσια επιφάνεια του βυθισμένου μέρους της πρύμνης (άνω, συνήθως κάθετο μέρος πρύμνης) σε μηδενική ταχύτητα. Σε αυτή την επιφάνεια πρέπει να προστίθενται και οι εγέρσεις επιφάνειες τυχόν γωνιών του transom stern. Στον τύπο της αντίστασης κυματισμού, F_n είναι ο αριθμός Froude βασισμένος στο ολικό μήκος L . Οι υπόλοιπες παράμετροι μπορούν να υπολογιστούν από :

$$\lambda = 1,446 C_p - 0.03 L / B, \text{ εάν } L / B < 12$$

$$\lambda = 1,446 C_p - 0.36, \text{ εάν } L / B > 12$$

$$m_1 = 0.0140407 \cdot L / T - 1.7525 \cdot \nabla^{1/3} / L - 4.79323 \cdot B / L - c_{16}$$

$$c_{16} = 8.07981 C_p - 13.8673 C_p^2 + 6.984388 C_p^3, \text{ εάν } C_p < 0.80$$

$$c_{16} = 1.73014 - 0.7067 C_p, \text{ εάν } C_p > 0.80$$

$$m_2 = c_5 \cdot C_p^2 \cdot e^{-0.1 \cdot F_n^{-2}}$$

Ο παράγοντας c_{15} είναι ίσος με :

$$\begin{aligned}
 & -1.69385 && , \text{ εαν } L^3 / \nabla < 512 \\
 c_{15} = & -1.69385 + L / \nabla^{1/3} - 8.0 / 2.36 && \left. \vphantom{c_{15}} \right\} , \text{ εαν } 512 < L^3 / \nabla < 1727 \\
 d = & -0.9 && \\
 0 & && , \text{ εαν } L^3 / \nabla > 1727
 \end{aligned}$$

Η γωνία εισόδου i_E είναι η γωνία της ισάλου γραμμής στην πλώρη σε μοίρες σε σχέση με το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας του πλοίου (Center Plane) αλλά αγνοώντας την τοπική γεωμετρία της πρύμνης. Εάν η γωνία αυτή είναι άγνωστη , υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο :

$$\begin{aligned}
 i_E = & 1 + 89 \exp - L / B^{0.80856} 1 - C_{WP}^{0.30484} \\
 & 1 - C_p - 0.0225 \cdot lcb^{0.6367} L_R / B^{0.34574} \\
 & 100 \nabla / L^3^{0.16302}
 \end{aligned}$$

Αυτός ο τύπος , παρήχθη από παλινδρομική ανάλυση περισσότερων από 200 μορφών γάστρας και αποδίδει γωνίες από 0° έως 90° .

Ο παράγοντας ο οποίος προσδιορίζει την επιρροή της βολβοειδούς πλώρης στην αντίσταση κυματισμού υπολογίζεται από :

$$c_3 = 0.56 A_{BT}^{1.5} / BT^{0.31} \sqrt{A_{BT}} + T_F - h_B$$

Όπου h_B είναι η κατακόρυφη θέση πάνω από την τροπίδα του κέντρου επιφάνειας, της επιφάνειας A_{BT} και T_F είναι το προωαίο βύθισμα του πλοίου.(=T για ισοβύθιστο πλοίο).

Η πρόσθετη αντίσταση πίεσης R_B κοντά στην επιφάνεια του νερού λόγω βολβοειδούς πλώρας μπορεί να υπολογιστεί από :

$$R_B = 0.11 \exp -3P_B^{-2} F_{ni}^3 A_{BT}^{1.5} \rho g / 1 + F_{ni}^2$$

Όπου ο παράγοντας P_B είναι ένα μέγεθος μέτρησης της επιρροή τυχόν ανάδυσης της πλώρης και F_{ni} είναι ο αριθμός Froude ο οποίος λαμβάνει υπόψη την βύθιση της πλώρης :

$$P_B = 0.56 \sqrt{A_{BT}} / T_F - 1.5 h_B$$

$$F_{ni} = V / \sqrt{g T_F - h_B - 0.25 \sqrt{A_{BT}} + 0.15 V^2}$$

Η πρόσθετη αντίσταση πίεσης λόγω βυθισμένου άνω μέρους της πρύμνης R_{TR} μπορεί να υπολογιστεί από :

$$R_{TR} = 0.5\rho V^2 A_T c_6$$

Ο παράγοντας c_6 έχει συσχετιστεί με τον αριθμό Froude ο οποίος λαμβάνει υπόψη την βύθιση του άνω μέρους της πρύμνης :

$$c_6 = 0.2 \left(1 - 0.2 F_{nT} \right) \quad , \text{ εάν } F_{nT} < 5$$

$$c_6 = 0 \quad , \text{ εάν } F_{nT} \geq 5$$

$F_{nT} = V / \sqrt{2gA_T / B + B \cdot C_{WP}}$, όπου εδώ C_{WP} είναι ο συντελεστής ισάλου επιφάνειας και g η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Η αντίσταση συσχετισμού μοντέλου και πραγματικού πλοίου R_A μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο :

$$R = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_A$$

Αυτή περιγράφει την επιρροή της τραχύτητας της γάστρας και της αντίστασης σταθερού ανέμου. Από μια ανάλυση αποτελεσμάτων δοκιμών ταχύτητας, τα οποία διορθώθηκαν ώστε να ανταποκρίνονται σε ιδανικές συνθήκες δοκιμών, ο ακόλουθος τύπος για τον συντελεστή συσχέτισης C_A πρόεκυψε :

$$C_A = 0.006 L + 100^{-0.16} - 0.00205 \\ + 0.003 \sqrt{L/7.5} C_B^4 c_2 \quad 0.04 - c_4$$

Όπου : $c_4 = T_F / L$, εάν $T_F / L \leq 0.04$

$c_4 = 0.04$, εάν $T_F / L > 0.04$

Επιπρόσθετα , ο συντελεστής C_A μπορεί να αυξηθεί για να υπολογιστεί και για παράδειγμα η επιρροή μιας αυξημένης τραχύτητας της γάστρας. Για το σκοπό αυτό η μεθοδολογία της ITTC-1957 μπορεί να χρησιμοποιηθεί όπου η αύξηση του C_A προκύπτει για τραχύτητα υψηλότερη της κανονικής ($k_s=150\mu\text{m}$) :

Αύξηση $C_A = (0.105k^{1/3} - 0.05579) / L^{1/3}$ (L και K_s εδώ δίνονται σε m).

Η απαιτούμενη ιπποδύναμη υπολογίζεται : $EHP = (R_T/1000 \text{ [kN]}) \cdot (V[\text{m/s}]) \text{ [kW]}$

Υπολογισμοί συντελεστών πρόωσης :

Ποσοστό ομόρου :

Για μονέλικά πλοία με μια συνηθισμένη (συμβατική) μορφή πρύμνης ο επόμενος τύπος για τον υπολογισμό του ποσοστού ομόρου μπορεί να χρησιμοποιηθεί :

$$w = c_9 C_V \frac{L}{T_A} \left(0.0661875 + 1.21756 c_{11} \frac{C_V}{1 - C_{P1}} \right) + \\ + 0.24558 \sqrt{\frac{B}{L} \frac{1 - C_{P1}}{1 - C_P}} - \frac{0.09726}{0.95 - C_P} + \frac{0.11434}{0.95 - C_B} + \\ + 0.75 C_{stern} C_V + 0.002 C_{stern}$$

Ο παράγοντας c_9 εξαρτάται από τον παράγοντα c_8 ο οποίος ορίζεται ως :

$$c_8 = BS / (LDT_A) \quad , \text{ εάν } B / T_A < 5$$

$$c_8 = S(7 B/T_A - 25) / (LD(B/T_A - 3)) \quad , \text{ εάν } B / T_A > 5$$

$$c_9 = c_8 \quad , \text{ εάν } c_8 < 28$$

$$c_9 = 32 - 16 / (c_8 - 24) \quad , \text{ εάν } c_8 > 28$$

$$c_{11} = T_A / D \quad , \text{ εάν } T_A / D < 2$$

$$c_{11} = 0.0833333(T_A/D)^3 + 1.33333 \quad , \text{ εάν } T_A / D > 2$$

Στον τύπο του ποσοστού ομόρου C_V είναι ο συντελεστής αντίστασης συνεκτικότητας και υπολογίζεται από :

$$C_V = (1+k) C_F + C_A.$$

$$\text{Επίσης, } C_{P1} = 1.45 C_P - 0.315 - 0.0225 lcb$$

Συντελεστής μείωσης ώσης :

Παρομοίως υπολογίζεται και ο συντελεστής μείωσης ώσης για μονέλικά πλοία και συνηθισμένη μορφή πρύμνης :

$$t = 0.0019L / B - BC_{P1} + 1.0585c_{10} - 0.00524 - 0.1418D^2 / BT + \\ + 0.0015C_{stern}$$

Ο συντελεστής c_{10} ορίζεται ως εξής :

$$c_{10} = B / L \quad , \text{ εάν } L/B > 5.2$$

$$c_{10} = 0.25 - 0.003328402/(B/L - 0.134615385) \quad , \text{ εάν } L/B < 5.2$$

Συντελεστής απόδοσης σχετικής περιστροφής :

Ο συντελεστής απόδοσης σχετικής περιστροφής υπολογίζεται από τον τύπο :

$$\eta_R = 0.9922 - 0.05908 (A_E / A_0) + 0.07424 (C_P - 0.0225 lcb)$$

Όπου :

$$A_E / A_0 = K + (1.3 + 0.3Z) T / (D^2 (p_0 + \rho gh - p_v)) \quad : \text{ Τύπος του Keller.}$$

$$K = 0 \div 0.1 \text{ για διπλέλικα πλοία}$$

$$= 0.2 \quad \text{για μονέλικα πλοία}$$

Z = αριθμός πτερυγίων της προπέλας.

$$T = \text{ώση της έλικας} = R_T / (1 - t)$$

$$p_0 = \text{ατμοσφαιρική πίεση}$$

$$\rho = \text{πυκνότητα νερού}$$

$$g = \text{επιτάχυνση της βαρύτητας} = 9.81 \text{ m/s}^2$$

h = απόσταση του άξονα της προπέλας από την επιφάνεια του νερού.

$$p_v = \text{πίεση ατμοποίησης νερού.}$$

Συντελεστής απόδοσης γάστρας :

$$\eta_H = \frac{1-t}{1-w}$$

Υπολογισμός χαρακτηριστικών έλικας μέσω των πολυώνυμων Κουρματζή :

Από τους πίνακες Κουρματζή βέλτιστης διαμέτρου και βέλτιστου αριθμού στροφών για αριθμό πτερυγίων 4 ή 5 έχουμε :

Εάν $Z = 4$ (αριθμός πτερυγίων της έλικας)

Number of blades: $ Z=4 $		Optimum Rpm Coefficients						
$\frac{R}{D}$	$\frac{E}{A}$	$X = \ln[\text{sq}r(\frac{K}{J^2})], (P/D) = a_0 X^0 + a_1 X^1 + a_2 X^2 + a_3 X^3 + a_4 X^4 + a_5 X^5 + a_6 X^6$						
		a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
.40		.799900	-.278700	.694900	-.930500	-.534100	1.403800	-.536300
.45		.794200	-.236100	.542100	-.866800	-.243500	1.060900	-.430700
.50		.792600	-.216000	.456300	-.748500	-.137600	.786400	-.313000
.55		.794100	-.212500	.421300	-.608400	-.133000	.565200	-.202700
.60		.799600	-.227500	.402700	-.437000	-.147700	.357800	-.106900
.65		.811900	-.255700	.351200	-.257900	-.099600	.156700	-.036800
.70		.832500	-.269900	.259000	-.165200	.024100	.012800	-.002800
.75		.853000	-.225200	.236300	-.338900	.099100	.122700	-.056900
.80		.878380	-.382700	.167320	-.261290	.230330	-.055270	-.006100
.85		.906130	-.248000	.103930	-.207570	.385430	-.253690	.053720
.90		.935570	-.252240	.055960	-.209160	.559820	-.422390	.098010
.95		.965770	-.256190	.041740	-.250870	.710200	-.549610	.130750
1.00		.996670	-.275240	.141010	-.420540	.776230	-.520790	.114970
1.05		1.028970	-.275240	.141010	-.420540	.776230	-.520790	.114970

Number of blades: $ Z=4 $		Optimum Rpm Coefficients				
$\frac{R}{D}$	$\frac{E}{A}$	$X = \ln[\text{sq}r(\frac{K}{J^2})], (1/J) = a_0 X^0 + a_1 X^1 + a_2 X^2 + a_3 X^3 + a_4 X^4$				
		a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
.40		2.230300	2.215500	.936800	.286600	.194600
.45		2.246500	2.183900	.932700	.307600	.183000
.50		2.252600	2.146200	.930800	.330400	.167600
.55		2.249800	2.105000	.922600	.350400	.156400
.60		2.241000	2.066400	.894800	.356600	.159600
.65		2.231100	2.056000	.833300	.308400	.195000
.70		2.233400	2.274000	.725100	-.097900	.375500
.75		2.163700	1.920000	.851900	.434300	.106300
.80		2.126000	1.867780	.838900	.471410	.075430
.85		2.092290	1.856580	.766600	.407880	.126180
.90		2.047430	1.809170	.742990	.430770	.107790
.95		2.000430	1.769150	.714840	.436090	.098760
1.00		1.951390	1.734420	.686710	.423910	.098440
1.05		1.900520	1.703120	.663460	.394080	.105750

		Number of blades: $Z=4$		Optimum Rpm Coefficients		
R E A θ	$X = \ln[\text{sq}(K_T/J^2)]$	$n_\theta = a_0 X^0 + a_1 X^1 + a_2 X^2 + a_3 X^3 + a_4 X^4$				
		a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
.40		.528200	-.273500	-.025300	.035000	-.001800
.45		.526900	-.275100	-.024900	.036000	-.002200
.50		.525200	-.276700	-.023100	.037600	-.003700
.55		.522900	-.278400	-.020400	.039800	-.005700
.60		.520200	-.280200	-.017800	.042400	-.007700
.65		.517400	-.281300	-.017000	.044200	-.008500
.70		.515100	-.277900	-.018100	.039300	-.006100
.75		.511800	-.281200	-.016700	.045700	-.009000
.80		.508940	-.280980	-.016920	.046900	-.009350
.85		.506090	-.280950	-.016470	.049180	-.010630
.90		.503570	-.280390	-.016590	.050500	-.011250
.95		.501400	-.279730	-.016840	.051630	-.011750
1.00		.499690	-.279040	-.017210	.052510	-.012110
1.05		.498510	-.278370	-.017670	-.017670	.053030

Εάν $Z = 5$ (αριθμός πτερυγίων της έλικας)

		Number of blades: $Z=5$		Optimum Rpm Coefficients				
R E A θ	$X = \ln[\text{sq}(K_T/J^2)]$	$(P/D) = a_0 X^0 + a_1 X^1 + a_2 X^2 + a_3 X^3 + a_4 X^4 + a_5 X^5 + a_6 X^6$						
		a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
.40		.910660	-.366850	.219140	-.354540	.506020	-.298030	.059510
.45		.897780	-.355340	.174900	-.196210	.305310	-.194750	.040960
.50		.888370	-.345230	.159720	-.113020	.170120	-.112240	.023930
.55		.882830	-.335240	.152210	-.070400	.092050	-.061100	.012850
.60		.881450	-.326190	.142740	-.045550	.054600	-.037520	.007740
.65		.883890	-.324370	.130750	-.003450	.035980	-.037520	.007740
.70		.890360	-.320990	.112740	.107170	.040620	-.062050	.017400
.75		.898560	-.328910	.111250	.080150	.018770	-.113620	.043330
.80		.911210	-.320890	.091500	.059020	.049050	-.098150	.029490
.85		.924000	-.326150	.100400	.095500	.028030	-.133210	.049470
.90		.940940	-.310900	.090090	.031140	.057900	-.082020	.022270
.95		.958230	-.312230	.100040	.038820	.046370	-.089240	.027800
1.00		.977920	-.299260	.107750	-.016720	.046280	-.039550	.008660
1.05		.999010	-.299540	.113610	-.015040	.036930	-.035940	.008620

		Number of blades: $Z=5$		Optimum Rpm Coefficients		
R E A θ	$X = \ln[\text{sq}(K_T/J^2)]$	$(1/J) = a_0 X^0 + a_1 X^1 + a_2 X^2 + a_3 X^3 + a_4 X^4$				
		a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
.40		2.056190	2.071870	.900320	.351490	.155900
.45		2.073160	2.044090	.921920	.347310	.152980
.50		2.085230	2.022540	.931750	.333940	.156870
.55		2.093180	2.005210	.926010	.316000	.166170
.60		2.098170	1.994410	.904210	.289480	.182840
.65		2.085020	1.933410	.952060	.354170	.130270
.70		2.079750	1.914740	.918650	.335370	.147980
.75		2.059950	1.873280	.945570	.361480	.115670
.80		2.046700	1.852770	.901510	.339650	.138350
.85		2.020870	1.813590	.913640	.354570	.115720
.90		2.002130	1.796950	.860920	.318580	.145900
.95		1.971640	1.754640	.864470	.329340	.128980
1.00		1.950680	1.755100	.804370	.257680	.172670
1.05		1.917290	1.705050	.804060	.270750	.157270

Number of blades: $ Z=5 $		Optimum Rpm Coefficients				
R_e / R_θ	$X = \ln[\text{sq}r(K_T / J^2)]$, $\eta_\theta = a_0 X^0 + a_1 X^1 + a_2 X^2 + a_3 X^3 + a_4 X^4$					
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	
.40	.525090	-.274250	-.021180	.043580	-.008260	
.45	.526030	-.276230	-.020580	.043570	-.008240	
.50	.526610	-.278160	-.019900	.043690	-.008290	
.55	.526790	-.279980	-.019210	.043980	-.008420	
.60	.526530	-.281530	-.018670	.044280	-.008500	
.65	.525950	-.282280	-.018950	.043830	-.008030	
.70	.524690	-.283620	-.018020	.045150	-.008810	
.75	.523300	-.283970	-.019010	.045300	-.008320	
.80	.521190	-.284900	-.018030	.047400	-.009630	
.85	.519010	-.284970	-.018800	.048660	-.009870	
.90	.516440	-.285130	-.019020	.050910	-.010860	
.95	.513730	-.284830	-.019720	.053150	-.011780	
1.00	.511180	-.283050	-.022320	.053460	-.011190	
1.05	.508250	-.282330	-.023500	.056330	-.012310	

Κάνουμε τους εξής υπολογισμούς :

$$V_A = V[\text{Knots}] \cdot (1 - w) [\text{Knots}] \text{ (Ταχύτητα Προχώρησης)}$$

$$V_A' = V_A \cdot 0.514444 \text{ [m/s] (Ταχύτητα Προχώρησης)}$$

$$K_T / J^2 = T / (\rho V_A'^2 D_{prop}^2), T = \text{Ώση της έλικας}$$

$$D_{prop} \approx 0.6T, T = \text{βυθισμα σχεδιασης}$$

$$X = \log\left(\sqrt{\frac{K_T}{J^2}}\right)$$

Και αφού ορίσουμε τους κατάλληλους συντελεστές a_i με βάση τους παραπάνω πίνακες και το μέγεθος που θέλουμε να βρούμε κάνουμε τους εξής υπολογισμούς και προκύπτουν οι βέλτιστες τιμές με βάση τα πολυώνυμα Κουρματζή :

$$P / D_{prop} = a_0 X^0 + a_1 X^1 + a_2 X^2 + a_3 X^3 + a_4 X^4 + a_5 X^5 + a_6 X^6$$

$$1 / J = a_0 X^0 + a_1 X^1 + a_2 X^2 + a_3 X^3 + a_4 X^4$$

$$\eta_0 = a_0 X^0 + a_1 X^1 + a_2 X^2 + a_3 X^3 + a_4 X^4$$

Επομένως :

$$P = (P / D) \cdot D_{prop}, J = (1 / J)^{-1}, K_T = (K_T / J^2) \cdot J^2,$$

$$N = (V_A \cdot (1852/3600) \cdot 60) / (J \cdot D_{prop}) \text{ (βέλτιστες στροφές έλικας RPM)}$$

$$PC = \eta_h \cdot \eta_0 \cdot \eta_R \cdot \eta_s$$

Όπου υποθέτουμε βαθμό απόδοσης αξονικού συστήματος $\eta_s = 0,99$.

Και τελικά προκύπτει η απαιτούμενη ιπποδύναμη που «ζητάει» η έλικα και με βάση την οποία γίνεται η επιλογή της κύριας μηχανής :

$$SHP = 1.35 \cdot (EHP / PC)$$

Σημείωση: Πολλαπλασιάσαμε με 1.35 για να ληφθούν υπόψη οι προσαυξήσεις σε απαιτούμενη ισχύ σε καταστάσεις θαλασσοταραχής και ρυπασμένης γάστρας (35% αύξηση).

LOADLINE.m :

Σε αυτή την υπορουτίνα γίνονται υπολογισμοί Γραμμής Φόρτωσης με βάση τους κανονισμούς της διεθνούς συμβάσεως γραμμής φόρτωσης.

Ο υπολογισμός του Ύψους Εξάλων θα γίνει σύμφωνα με την Διεθνή Σύμβαση Γραμμής Φορτώσεως του 1966 (Παράρτημα Δ, Μελέτη και Εξοπλισμός Πλοίου I Μεθοδολογία Προμελέτης Συλλογή Βοηθημάτων).

Όλοι οι κατωτέρω κανονισμοί ισχύουν για πλοία μήκους μεγαλύτερου των 24m.

($L > 24m$).

Πλοία κατηγορίας A : Πλοία που προορίζονται αποκλειστικά για την μεταφορά υγρού φορτίου (tanker,LNG κτλ).

Πλοία κατηγορίας B : Όλα τα πλοία που δεν υπάγονται στην κατηγορία A (bulk carriers , ore carriers κτλ)

ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΛΟΙΟΥ

ΤΥΠΟΣ ΠΛΟΙΟΥ , L_{OA} , L_{BP} , B , D , C_B , C_{WP} , T

Σύμφωνα με τους κανονισμούς της διεθνούς συμβάσεως γραμμής φόρτωσης έχουμε :

- Ως μήκος πλοίου L θεωρείται το 96% του ολικού μήκους της ισάλου στα 85% του πλευρικού ύψους D (κοίλο) του πλοίου.

$$L_{WL 0,85D} = 0,99 \cdot L_{OA}$$

$$L_1 = 0,96 \cdot L_{WL 0,85D}$$

ή

η απόσταση της προωραίας ακμής της πρόρας από το μέσο του άξονα του πηδαλίου στην ίδια ίσαλο (85% του D)

$$L_2 = L_{BP}$$

Τελικά διαλέγω όποιο από τα L_1 και L_2 είναι **μεγαλύτερο**.

$$L_{ΓΦ}$$

- Ως πλάτος πλοίου B παίρνουμε το μέγιστο πλάτος μετρούμενο επί των νομέων στο μέσο του πλοίου.
- Ως πλευρικό ύψος D_F παίρνουμε το κοίλο του πλοίου προσαυξημένο με :

1) Πάχος ελάσματος υδρορροής καταστρώματος εξάλων : t_Y [mm]

2) Πάχος της τυχόν ξύλινης επενδύσεως του καταστρώματος εξάλων : t_E [mm]

$$\text{Όρος προσαύξεσης} : t_E \cdot [(L - S) / L]$$

Όπου S ολικό πραγματικό μήκος των υπερκατασκευών

Τελικά προκύπτει :

$$\text{Πλευρικό ύψος} : D_F = D + t_Y + t_E \cdot [(L - S) / L]$$

Συντελεστής γάστρας

$$T_1 = 0,85 \cdot D_F$$

$$C_{B_{0,85D}} = C_{B_0} \cdot \left(\frac{T_1}{T_0} \right)^{\frac{C_{WL_0} - 1}{C_{B_0}}}$$

Όπου C_{B_0} , C_{WL_0} , T_0 : έχουν προκύψει από υπολογισμούς κυρίων διαστάσεων και συντελεστών πλοίου.

ΥΠΕΡΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ ΠΥΡΓΩΤΑ ΥΠΕΡΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΑΤΑ

Υπερκατασκευή (Superstructure) : Ως υπερκατασκευή ορίζεται κάθε κλειστή κατασκευή πάνω από το κατάστρωμα εξάλων εφόσον η απόσταση της πλευράς της από την πλευρά του πλοίου **δεν** υπερβαίνει το 4% του πλάτους του πλοίου.

Πυργωτό υπερκατασκεύασμα (Trunk) : Ως πυργωτό υπερκατασκεύασμα ορίζεται κάθε κλειστή κατασκευή πάνω από το κατάστρωμα εξάλων της οποίας η απόσταση της πλευράς της από την πλευρά του πλοίου υπερβαίνει το 4% του πλάτους του πλοίου.

Αφού γίνει έλεγχος για να προκύψει σε ποια κατηγορία ανήκει η κάθε υπερκατασκευή που έχει δοθεί στο πρόγραμμα, συμπληρώνονται οι παρακάτω πίνακες και προκύπτουν τα S και E

	Πραγματικό μήκος l (m)	Πραγματικό ύψος h (m)	Κανονικό Ύψος h_s (m)	h/h_s	Πλάτος b	Πλάτος Πλοίου B_s (m)	b / B_s
	(1)	(2)	(3)	(4)=(2)/(3)	(5)	(6)	(7)=(5)/(6)
Πρόστεγο							
Μεσόστεγο							
Επίστεγο							
Πυργωτό υπερκατασκεύασμα I							
Πυργωτό υπερκατασκεύασμα II							
Ενδιάμεσο κατάστρωμα							
Σύνολο	S =	-----	-----	-----	-----	-----	-----

	<u>Δρών</u> μήκος l_E αν (2)<κανονικού ύψους	<u>Δρών</u> μήκος l_E (m) υπερκατασκευής <u>κανονικού</u> ύψους	<u>Δρών</u> μήκος l_E αν (2)>κανονικού ύψους	<u>Δρών</u> μήκος l_E Πυργωτών Υπερκατασκευασμάτων	
	(8) = (1)*(4)	(9) = (1)*(7)	(10) = (1)	(11) = (1)*(4)*(7)	
Πρόστεγο					
Μεσόστεγο					
Επίστεγο					
Πυργωτό υπερκατα σκεύασμα I					
Πυργωτό υπερκατα σκεύασμα II					
Ενδιάμεσο κατάστρωμα					(Ολικό Σύνολο)
Σύνολο					E =

Κανονικό ύψος υπερκατασκευής δίνεται από πίνακα σελ. Δ – 15 βιβλίου μελέτη και Εξοπλισμός πλοίου I (μεθοδολογία προμελέτης, συλλογή βοηθημάτων)''.

Ολικό πραγματικό μήκος Υπερκατασκευών $S = \Sigma I$ [m]

Ολικό δρών μήκος Υπερκατασκευών $E = \Sigma l_E$ [m]

✓ **Προσοχή για Πυργωτά Υπερκατασκευάσματα :**

1) Αν υπάρχουν άλλες υπερκατασκευές εκτός του πυργωτού :

Μόνο αν $b \geq 0,6B$ το πυργωτό λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς της Γ.Φ.

2) Αν δεν υπάρχουν άλλες υπερκατασκευές εκτός του πυργωτού:

Μόνο αν $b \geq 0,6B$ και $l \geq 0,6L$ το πυργωτό λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς της Γ.Φ.

✓ Προσοχή για Πρόστεγο !! :

Μόνο αν $I_{\text{προστ}} > 0,07L$ το πρόστεγο λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς της Γ.Φ.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΥΨΟΥΣ ΕΞΑΛΩΝ

1.) Βασικό ύψος εξάλων :

Το βασικό ύψος εξάλων για πλοία κατηγορίας "Α" και πλοία κατηγορίας "Β" προκύπτει από τους πίνακες I και II σελίδα Δ-14 του βιβλίου "Μελέτη και Εξοπλισμός πλοίου I (μεθοδολογία προμελέτης, συλλογή βοηθημάτων)" για πλοία μέχρι 365m. Για πλοία με μήκος $> 365m$ το βασικό ύψος εξάλων καθορίζει η κρατική αρχή.

Έτσι έχουμε :

$$(1.1) \mathbf{Fb_1 [mm]}$$

(Για ενδιάμεσα μήκη από αυτά των πινάκων γίνεται γραμμική παρεμβολή)

2.) Διόρθωση για πλοία κατηγορίας "B-60" :

Πλοία κατηγορίας "Β" μήκους μεγαλύτερου από 100m μπορούν να έχουν, υπό ορισμένες προϋποθέσεις βασικό ύψος εξάλων μειωμένο μέχρι ποσοστού 60% της διαφοράς μεταξύ των υψών εξάλων πλοίου κατηγορίας "Α" και κατηγορίας "Β" για αντίστοιχο μήκος πλοίου. Από πίνακα σελίδα Δ-14 του βιβλίου "Μελέτη και Εξοπλισμός πλοίου I (μεθοδολογία προμελέτης, συλλογή βοηθημάτων)"

(2.1) Βασικό Ύψος Εξάλων Πλοίου Κατηγορίας "Β"

(2.2) Βασικό Ύψος Εξάλων Πλοίου Κατηγορίας "Α"

(2.3) Μείωση Ύψους Εξάλων = $0,6 \cdot [(2.1) - (2.2)]$

Έτσι έχουμε :

$$\mathbf{Fb_2 [mm]}$$

3.) Διόρθωση για καλύμματα στομίων κυτών :

Αυτή η διόρθωση δεν εφαρμόζεται για δεξαμενόπλοια αλλά μόνο για πλοία κατηγορίας "Β"

Έτσι έχουμε :

$$\mathbf{Fb_3 [mm]}$$

4.) Διόρθωση για πλοία κατηγορίας "B" μήκους κάτω των 100m :

Αυτή η διόρθωση δεν εφαρμόζεται για δεξαμενόπλοια αλλά μόνο για πλοία κατηγορίας "B"

- Αν $E \leq 35\% L$ έχω προσαύξηση ύψους εξάλων :

$$7,5 \cdot (100 - L) \cdot [0,35 - (E / L)] = \quad [mm]$$

- Αν $E > 35\% L$ ουδεμία διόρθωση

Έτσι έχουμε :

$$\mathbf{Fb_4 [mm]}$$

5.) Διόρθωση για τον συντελεστή γάστρας :

- Αν $C_{B,0,85D} > 0,68$ έχω τη διόρθωση

$$\frac{C_{B,0,85D} + 0,68}{1,36}$$

- Αν $C_{B,0,85D} \leq 0,68$ ουδεμία διόρθωση.

Έτσι έχουμε :

$$\mathbf{Fb_5 [mm]}$$

6.) Διόρθωση για το πλευρικό ύψος D_F :

- Αν $D_F > (L / 15)$ έχω προσαύξηση ύψους εξάλων :

$$[D_F - (L / 15)] \cdot R [mm]$$

Όπου : $R = L / 48$ για $L < 120m$

$R = 250$ για $L \geq 120m$

- Αν $D_F \leq (L / 15)$ ουδεμία διόρθωση **εκτός αν** $S \geq 60\%L$ οπότε **μείωση** κατά

$$[D_F - (L / 15)] \cdot R [mm]$$

Όπου : $R = L / 48$ για $L < 120m$

$R = 250$ για $L \geq 120m$

Έτσι έχουμε :

$$\mathbf{Fb_6 [mm]}$$

7.) Διόρθωση για υπερκατασκευές και πυργωτά υπερκατασκευάσματα :

(7.1) Μείωση ύψους εξάλων για $E = 1,0L$ (πίνακας σελ.Δ – 15 βιβλίου “ Μελέτη και Εξοπλισμός πλοίου I (μεθοδολογία προμελέτης, συλλογή βοηθημάτων)” [mm]

(7.2) Ποσοστό εκπτώσεως για $E < 1,0L$ (πίνακας σελ.Δ – 15 βιβλίου “ Μελέτη και Εξοπλισμός πλοίου I (μεθοδολογία προμελέτης, συλλογή βοηθημάτων)”

Μείωση ύψους εξάλων για $E < 1,0L = (7.1) \cdot (7.2)$ [mm]

Έτσι έχουμε :

$$Fb_7 \text{ [mm]}$$

8.) Διόρθωση για τη σιμότητα :

(8.1) Μέσο μέτρο κανονικής σιμότητας :

Για το πρωραίο ήμισυ : $M_{NF} = 16,6750 \cdot [(L / 3) + 10]$

Για το πρυμναίο ήμισυ : $M_{NA} = 8,3375 \cdot [(L / 3) + 10]$

Για όλο το πλοίο : $M_N = (M_{NF} + M_{NA}) / 2$

(8.2)

Θέση	Θέση	Τεταγμένη πραγματικής σιμότητας καταστρώματος εξάλων h_s (mm)	Συντελεστής Simpson k	$h_s \cdot k$
Πρυμναίο Ήμισυ	A.P		1	
	1/6 από A.P		3	
	1/3 από A.P		3	
	Μέσο πλοίου		1	
			$\Sigma (h_{si} \cdot k)_A =$	
Πρωραίο Ήμισυ	Μέσο πλοίου		1	
	1/3 από F.P		3	
	1/6 από F.P		3	
	F.P		1	
			$\Sigma (h_{si} \cdot k)_F = 0$	

Μέσο μέτρο πραγματικής σιμότητας :

Για το πωραίο ήμισυ : $M_{SF} = (1 / 8) \cdot \Sigma (h_{si} \cdot k)_F$

Για το πρυμναίο ήμισυ : $M_{SA} = (1 / 8) \cdot \Sigma (h_{si} \cdot k)_A$

Για όλο το πλοίο : $M_S = (M_{SF} + M_{SA}) / 2$

(8.3)

Διόρθωση ύψους εξάλων :

$$(M_N - M_S) \cdot [0,75 - (S / 2L)] \text{ [mm]}$$

Έτσι έχουμε :

$$\mathbf{Fb_8 \text{ [mm]}}$$

9.) Υπολογισμός ΥΨΟΥΣ ΕΞΑΛΩΝ:

Ύψος Εξάλων Θέρους :

$$Fb = [(1)+(2)+(3)+(4)] \cdot (5) + (6) + (7) + (8) \text{ [mm]}$$

Έτσι έχουμε :

$$\mathbf{Fb \text{ [mm]}}$$

10.) Μέγιστο Έμφορτο Βύθισμα:

$$T_{\max} = D_F - Fb \text{ [mm] } , \quad T_{\max} > T_d$$

11.) Ύψος Πρώρας :

Ελάχιστο απαιτούμενο ύψος πρώρας :

➤ Για $L < 250 \text{ m}$:

$$Fb_{F.P.} = 56 \cdot L \cdot \left(1 - \frac{L}{500}\right) \cdot \frac{1,36}{C_{B_{0,85D}} + 0,68} \text{ [mm]}$$

➤ Για $L \geq 250 \text{ m}$:

$$Fb_{F.P.} = 7000 \cdot \frac{1,36}{C_{B_{0,85D}} + 0,68} \text{ [mm]}$$

Υπάρχον ύψος πλώρας :

$$h_{FP} = Fb + h_{\text{προστ}} + h_{\text{σιμοτ}} \text{ mm}$$

Η απαίτηση είναι τελικά :

$$h_{FP} \geq Fb_{F,P}$$

Stability.m :

Σε αυτή την υπορουτίνα γίνονται υπολογισμοί αρχικής ευστάθειας του άθικτου πλοίου.

Καθ' ύψος θέση κέντρου βάρους μεταλλικής κατασκευής, σε m:

$$KG_{\text{steel}} = (KG_{\text{steel}}/D) \cdot D, \text{ όπου : } KG_{\text{steel}}/D = [0.63 \div 0.65]$$
$$D = \text{κόιλο [m]}$$

Διαμήκης θέση κέντρου βάρους μεταλλικής κατασκευής σε m :

$$LCG_{\text{steel}} = (LCG_{\text{steel}}/L_{BP}) \cdot L_{BP}, \text{ όπου : } LCG_{\text{steel}}/L_{BP} = [0.47 \div 0.48]$$
$$L_{BP} = \text{Μήκος μεταξύ καθέτων [m]}$$

Καθ' ύψος θέση κέντρου βάρους ενδιάιτησης και εξοπλισμού, σε m:

$$KG_{\text{outfitting}, 1} = (KG_{\text{outfitting}}/D) \cdot D, \text{ όπου : } KG_{\text{outfitting}}/D = [0.80 \div 1.00]$$
$$D = \text{κόιλο [m]}$$

$$KG_{\text{outfitting}, 2} = D + 1.25, \text{ , εάν } L_{BP} \leq 125\text{m}$$
$$KG_{\text{outfitting}, 2} = D + 1.25 + 0.01 \cdot (L_{BP} - 125), \text{ , εάν } 125 < L_{BP} \leq 250\text{m}$$
$$KG_{\text{outfitting}, 2} = D + 2.50, \text{ , εάν } L_{BP} \geq 250\text{m}$$
$$\text{όπου : } L_{BP} = \text{Μήκος μεταξύ καθέτων [m]}$$

$$\text{Εάν } KG_{\text{outfitting}, 2} / D \notin [1.00, 1.10] \text{ τότε } KG_{\text{outfitting}, 2} = 1.050 \cdot D$$

Τελικά :

$$KG_{\text{outfitting}} = (KG_{\text{outfitting}, 1} + KG_{\text{outfitting}, 2}) / 2.$$

Διαμήκης θέση κέντρου βάρους ενδιάιτησης και εξοπλισμού σε m :

$$LCG_{\text{outfitting}, 1} = (LCG_{\text{outfitting}}/L_{BP}) \cdot L_{BP}, \text{ όπου : } LCG_{\text{outfitting}}/L_{BP} = [0.45 \div 0.47]$$
$$L_{BP} = \text{Μήκος μεταξύ καθέτων [m]}$$

$$LCG_{\text{outfitting}, 2} = 0.42 \cdot L_{BP}$$

Τελικά :

$$LCG_{\text{outfitting}} = (LCG_{\text{outfitting}, 1} + LCG_{\text{outfitting}, 2}) / 2.$$

Καθ' ύψος θέση κέντρου βάρους μηχανολογικής εγκατάστασης, σε m:

$$KG_{\text{machinery}, 1} = (KG_{\text{machinery}}/D) \cdot D, \text{ όπου : } KG_{\text{machinery}}/D = [0.80 \div 1.00]$$
$$D = \text{κοίλο [m]}$$

$$KG_{\text{machinery}, 2} = 0.17 \cdot T + 0.36 \cdot D$$

$$\text{όπου : } T = \text{Βύθισμα σχεδίασης [m]}$$
$$D = \text{κοίλο [m]}$$

$$\text{Εάν } KG_{\text{machinery}, 2} / D \notin [0.47, 0.53] \text{ τότε } KG_{\text{machinery}, 2} = 0.50 \cdot D$$

Τελικά :

$$KG_{\text{machinery}} = (KG_{\text{machinery}, 1} + KG_{\text{machinery}, 2}) / 2.$$

Διαμήκης θέση κέντρου βάρους μηχανολογικής εγκατάστασης σε m :

$$LCG_{\text{machinery}, 1} = (LCG_{\text{machinery}}/L_{BP}) \cdot L_{BP}, \text{ όπου : } LCG_{\text{machinery}}/L_{BP} = [0.10 \div 0.15]$$
$$L_{BP} = \text{Μήκος μεταξύ καθέτων [m]}$$

$$LCG_{\text{machinery}, 2} = 0.50 \cdot 0.14 \cdot L_{BP}$$

Τελικά :

$$LCG_{\text{machinery}} = (LCG_{\text{machinery}, 1} + LCG_{\text{machinery}, 2}) / 2.$$

Καθ' ύψος θέση κέντρου βάρους κενού σκάφους (Lightship) , σε m:

$$KG_{\text{Lightship}} = (KG_{\text{Lightship}}/D) \cdot D, \text{ όπου : } KG_{\text{Lightship}}/D = [0.63 \div 0.67]$$
$$D = \text{κοίλο [m]}$$

Διαμήκης θέση κέντρου βάρους κενού σκάφους (Lightship) , σε m:

$$LCG_{\text{Lightship}} = (LCG_{\text{Lightship}}/L_{BP}) \cdot L_{BP}, \text{ όπου : } LCG_{\text{Lightship}}/L_{BP} = [0.42 \div 0.44]$$
$$L_{BP} = \text{Μήκος μεταξύ καθέτων [m]}$$

Καθ' ύψος θέση εγκάρσιου κέντρου αντώσεως , σε m:

$$KB_1 = T \cdot \frac{C_{WP}}{C_{WP} + C_B} \text{ όπου : } C_{WP} = \text{Συντελεστής ισάλου επιφάνειας}$$
$$C_B = \text{Συντελεστής γάστρας.}$$

$$KB_2 = T - \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{T}{2} + \frac{\nabla}{A_{WP}} \right), \text{ όπου : } A_{WP} = \frac{\nabla \cdot C_{WP}}{C_B \cdot T}, \nabla = \text{Γεωμετρικό Εκτοπισμα [m}^3]$$

C_{WP} = Συντελεστής ισάλου επιφάνειας

C_B = Συντελεστής γάστρας.

T = Βύθισμα σχεδίασης.

Τελικά :

$$KB = (KB_1 + KB_2) / 2.$$

Εγκάρσια μετακεντρική ακτίνα , σε m:

$$BM_1 = 0.008 + 0.0745 \cdot C_{WP}^2 \cdot \left(\frac{B^2}{C_B \cdot T} \right)$$

$$BM_2 = \frac{C_{WP} \cdot 0.1272 + 0.8724 \cdot C_{WP} \cdot L_{BP} \cdot B^3}{12 \cdot \nabla}$$

όπου : ∇ = Γεωμετρικό Εκτοπισμα [m³]

L_{BP} = Μήκος μεταξύ καθέτων [m]

C_{WP} = Συντελεστής ισάλου επιφάνειας

C_B = Συντελεστής γάστρας.

T = Βύθισμα σχεδίασης.

B = Πλάτος πλοίου στο μέσο νομέα [m].

Τελικά : $BM = (BM_1 + BM_2) / 2 .$

Καθ' ύψος θέση εγκάρσιου μετάκεντρου , σε m:

$$KM = KB + BM$$

Καθ' ύψος θέση κέντρου βάρους του πλοίου σε κατάσταση Full Load Departure (πλήρους φόρτου αναχώρησης) , σε m:

$$\overline{KG}_{Full\ Load\ Departure} = C \cdot D_S$$

Όπου το τροποποιημένο κοίλο D_S ορίζεται ως :

$$D_S = D + \frac{\nabla_{SS}}{L_{BP} \cdot B} , \text{ όπου : } \nabla_{SS} = \text{Όγκος υπερκατασκευών και υπερστεγασμάτων}$$

L_{BP} = Μήκος μεταξύ καθέτων [m]

B = Πλάτος πλοίου στο μέσο νομέα [m].

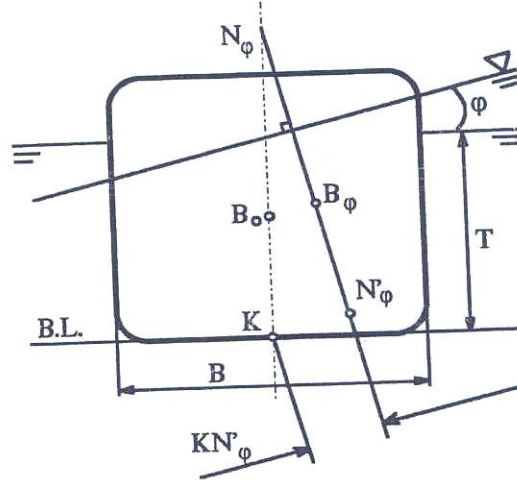
D = κοίλο [m]

$$C = [0.52 \div 0.54] .$$

Εγκάρσιο μετακεντρικό ύψος του πλοίου , σε m:

$$GM_{Full\ Load\ Departure} = KM - \overline{KG}_{Full\ Load\ Departure} \cdot$$

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ $KN - \varphi$ (Βραχίονες KN'_φ):



Χρησιμοποιείται η γενική σχέση :

$$KN'_j = KN_j \cdot \sin \varphi = \left[A_j + B_j \cdot C_B + C_j \cdot \frac{W}{B} + D_j \cdot \frac{D}{B} + E_j \cdot \frac{B}{T} \right] \cdot \frac{B}{20}$$

Όπου : A_j, B_j, C_j, D_j, E_j : Συντελεστές

$$W = \frac{S_A + S_F}{2}$$

Για $(D/B) < 0.58$:

$$KN'_{\varphi=10^\circ} = 0.05125 \cdot B \cdot \left(0.004 + 2.5 \cdot \frac{D}{B} - 0.004 \cdot \frac{B}{T} \right)$$

$$KN'_{\varphi=20^\circ} = 0.05125 \cdot B \cdot \left(-0.305 + 0.1333 \cdot \frac{W}{B} + 5 \cdot \frac{D}{B} + 0.1 \cdot \frac{B}{T} \right)$$

$$KN'_{\varphi=30^\circ} = 0.05125 \cdot B \cdot \left(-1.641 - 0.1 \cdot C_B + 0.6467 \cdot \frac{W}{B} + 7.3 \cdot \frac{D}{B} + 0.65 \cdot \frac{B}{T} \right)$$

$$KN'_{\varphi=40^\circ} = 0.05125 \cdot B \cdot \left(-2.815 - 0.2 \cdot C_B + 1.1333 \cdot \frac{W}{B} + 9.25 \cdot \frac{D}{B} + 1.1 \cdot \frac{B}{T} \right)$$

$$KN'_{\varphi=50^\circ} = 0.05125 \cdot B \cdot \left(-3.0325 - 0.3 \cdot C_B + 1.6 \cdot \frac{W}{B} + 10.375 \cdot \frac{D}{B} + 1.23 \cdot \frac{B}{T} \right)$$

$$KN'_{\varphi=60^\circ} = 0.05125 \cdot B \cdot \left(-2.4045 - 0.5 \cdot C_B + 2 \cdot \frac{W}{B} + 11.125 \cdot \frac{D}{B} + 1.036 \cdot \frac{B}{T} \right)$$

Για $0.58 \leq (D/B) < 0.62$:

$$KN'_{\varphi=10^\circ} = 0.05125 \cdot B \cdot \left(0.671 + 1.35 \cdot \frac{D}{B} - 0.004 \cdot \frac{B}{T} \right)$$

$$KN'_{\varphi=20^\circ} = 0.05125 \cdot B \cdot \left(-0.0876 + 0.1333 \cdot \frac{W}{B} + 4.625 \cdot \frac{D}{B} + 0.1 \cdot \frac{B}{T} \right)$$

$$KN'_{\varphi=30^\circ} = 0.05125 \cdot B \cdot \left(-2.192 - 0.1 \cdot C_B + 0.6467 \cdot \frac{W}{B} + 8.25 \cdot \frac{D}{B} + 0.65 \cdot \frac{B}{T} \right)$$

$$KN'_{\varphi=40^\circ} = 0.05125 \cdot B \cdot \left(-3.83 - 0.2 \cdot C_B + 1.1333 \cdot \frac{W}{B} + 11 \cdot \frac{D}{B} + 1.1 \cdot \frac{B}{T} \right)$$

$$KN'_{\varphi=50^\circ} = 0.05125 \cdot B \cdot \left(-4.1925 - 0.3 \cdot C_B + 1.6 \cdot \frac{W}{B} + 12.375 \cdot \frac{D}{B} + 1.23 \cdot \frac{B}{T} \right)$$

$$KN'_{\varphi=60^\circ} = 0.05125 \cdot B \cdot \left(-3.492 - 0.5 \cdot C_B + 2 \cdot \frac{W}{B} + 13 \cdot \frac{D}{B} + 1.036 \cdot \frac{B}{T} \right)$$

Για $(D/B) \geq 0.62$:

$$KN'_{\varphi=10^\circ} = 0.05125 \cdot B \cdot \left(1.043 + 0.75 \cdot \frac{D}{B} - 0.004 \cdot \frac{B}{T} \right)$$

$$KN'_{\varphi=20^\circ} = 0.05125 \cdot B \cdot \left(-1.3385 + 0.1333 \cdot \frac{W}{B} + 2.325 \cdot \frac{D}{B} + 0.1 \cdot \frac{B}{T} \right)$$

$$KN'_{\varphi=30^\circ} = 0.05125 \cdot B \cdot \left(-0.301 - 0.1 \cdot C_B + 0.6467 \cdot \frac{W}{B} + 5.2 \cdot \frac{D}{B} + 0.65 \cdot \frac{B}{T} \right)$$

$$KN'_{\varphi=40^\circ} = 0.05125 \cdot B \cdot \left(-2.28 - 0.2 \cdot C_B + 1.1333 \cdot \frac{W}{B} + 8.5 \cdot \frac{D}{B} + 1.1 \cdot \frac{B}{T} \right)$$

$$KN'_{\varphi=50^\circ} = 0.05125 \cdot B \cdot \left(-2.9525 - 0.3 \cdot C_B + 1.6 \cdot \frac{W}{B} + 10.375 \cdot \frac{D}{B} + 1.23 \cdot \frac{B}{T} \right)$$

$$KN'_{\varphi=60^\circ} = 0.05125 \cdot B \cdot \left(-2.407 - 0.5 \cdot C_B + 2 \cdot \frac{W}{B} + 11.25 \cdot \frac{D}{B} + 1.036 \cdot \frac{B}{T} \right)$$

Οι μοχλοβραχίονες επαναφοράς (GZ) για τις διάφορες εγκάρσιες κλίσεις του πλοίου, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι ελεύθερες επιφάνειες, υπολογίζονται ως εξής :

$$GZ_{\varphi=10^{\circ}} = KN_{\varphi=10^{\circ}} - KG \cdot \sin\left(\frac{10\pi}{180}\right)$$

$$GZ_{\varphi=20^{\circ}} = KN_{\varphi=20^{\circ}} - KG \cdot \sin\left(\frac{20\pi}{180}\right)$$

$$GZ_{\varphi=30^{\circ}} = KN_{\varphi=30^{\circ}} - KG \cdot \sin\left(\frac{30\pi}{180}\right)$$

$$GZ_{\varphi=40^{\circ}} = KN_{\varphi=40^{\circ}} - KG \cdot \sin\left(\frac{40\pi}{180}\right)$$

$$GZ_{\varphi=50^{\circ}} = KN_{\varphi=50^{\circ}} - KG \cdot \sin\left(\frac{50\pi}{180}\right)$$

$$GZ_{\varphi=60^{\circ}} = KN_{\varphi=60^{\circ}} - KG \cdot \sin\left(\frac{60\pi}{180}\right)$$

DWTanalysis.m :

Σε αυτή την υπορουτίνα γίνονται υπολογισμοί ανάλυσης του πρόσθετου βάρους DWT. Η ανάλυση του DWT είναι η ακόλουθη με τις ομάδες βαρών που φαίνονται στην ακόλουθη σχέση :

$$\mathbf{DWT = W_{PL} + W_F + W_{PR} + W_{FW} + W_{CR} + B}$$

όπου :

W_{PL} = βάρος ωφέλιμου φορτίου

W_F = βάρος καυσίμων και λιπαντικών

W_{PR} = βάρος τροφίμων

W_{FW} = βάρος νερού

W_{CREW} = βάρος πληρώματος και αποσκευών τους

B = Έρμα (Ballast) (εάν απαιτείται !)

Έτσι έχουμε :

Υπολογισμός του βάρους καυσίμων και λιπαντικών W_F :

Ακτίνα ενέργειας : R = Ορίζεται από τον χρήστη μέσω του γραφικού περιβάλλοντος

Ταχύτητα υπηρεσίας : V_S = Ορίζεται από τον χρήστη μέσω του γραφικού περιβάλλοντος

Ισχύει η σχέση :

$$W_F = W_{Fuel\ Oil} + W_{Lub\ Oil} + W_{Diesel\ Oil}$$

1.) $W_{\text{Fuel Oil}}$

$$W_{\text{Fuel Oil}} = (P_b \cdot b_1 \cdot t_1) \cdot C \cdot 10^{-6} \text{ [ton]}$$

P_b : η ισχύς της Κ.Μ. σε kW (στοιχεία από 2^ο ερώτημα)

b_1 : η ειδική κατανάλωση της Κ. Μ. σε gr/kWh

t_1 : ο χρόνος αυτόνομου ταξιδιού του πλοίου = ακτίνα ενέργειας / ταχύτητα υπηρεσίας (= R / V_S)

$C = 1,3$: σταθερά εφεδρείας για υπερκατανάλωση λόγω

αλλαγής πορείας, απρόβλεπτης αναμονής κλπ.(στοιχεία από σελ.142 βιβλίο Παπανικολάου μελέτη πλοίου τόμος Α)

2.) $W_{\text{Diesel oil}}$

Ισχύει : $W_{\text{Diesel Oil}} = W_{\text{Diesel Oil H/M}} + W_{\text{Diesel Oil Maneuvering}}$

Τα απαιτούμενα καύσιμα για τις ηλεκτρογεννήτριες υπολογίζονται βάσει του τύπου (βλ. «Μελέτη Πλοίου, Τόμος Α: Μεθοδολογία Προμελέτης», σελ. 141):

$$W_{\text{Diesel Oil H/M}} = P_{\text{H/M}} \cdot b_{\text{H/M}} \cdot t \cdot C \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{\eta_E}$$

όπου : $P_{\text{H/M}}$: ισχύς ηλεκτρογεννητριών

t : ο χρόνος αυτόνομου ταξιδιού του πλοίου = ακτίνα ενέργειας / ταχύτητα υπηρεσίας (= R / V_S)

$b_{\text{H/M}}$: ειδική κατανάλωση ηλεκτρομηχανών (Δίνεται από τον χρήστη)

η_E : μέσος βαθμός απόδοσης ηλεκτρο/τριας (Δίνεται από τον χρήστη)

C : (σελ.142 βιβλίο Παπανικολάου μελέτη πλοίου τόμος Α) = 1,3

Επιλογή Ισχύος ηλεκτρογεννητριών

$$P_{\text{gen}_1} = 100 + 0,55 * P_b^{0,7}$$

Όπου P_b = Ισχύς κύριας μηχανής σε BHP

2ος Τύπος Επιλογής Ισχύος Γεννητριών

$$P_{gen-2} = HP = \frac{Q(m^3/h) \cdot H_{max}(m) \cdot \gamma(ton/m^3)}{270 \cdot \eta}$$

Όπου :

Q :	παροχή φορτίου	m ³ / h
H _{max} :	μανομετρικό αντλίας	m
γ :	ειδικό βάρος φορτίου	ton / m ³
η :	βαθμός απόδοσης γεννητριών	

Υπολογισμός Q :

$$Q = \frac{\nabla_{cargo}}{h_{φορτοεκφόρτωσης}}$$

Όπου :

h = χρόνος φορτοεκφόρτωσης = 1~3 days. (Δίνεται από τον χρήστη μέσω του αρχείου INPUT_DATA.xls)

∇_{cargo} = όγκος χώρου κοιτών = $(0.6+0.77) / 2 \cdot \nabla_{UD}$, όπου ∇_{UD} : όγκος κάτωθεν κυρίου καταστρώματος και έχει υπολογιστεί στην SCHNEEKLUTH_WATSON.m (τύπος Schneekluth σελίδα 299 "Μελέτη Πλοίου" vol. I Απ. Δ. Παπανικολάου.

Υπολογισμός H_{max} :

$$H_{max} = 12 (\text{crude oil tanks}) \cdot D [\text{m}] (\text{κοίλο}) + 0.10 \cdot L_{BP} \text{ m} (\text{μήκος πλοίου} + \text{μήκος διακλαδώσεων σωληνων})$$

Παρατήρηση : Η τιμή του μήκους διακλαδώσεων σωληνων είναι προσεγγιστική και δόθηκε ως υπόδειξη από τον κ. Αναστασόπουλο. Έγινε η παραδοχή πως έχουμε 12 crude oil tanks (7 εγκάρσιες και μια διαμήκη φράκτη).

Τελικά προκύπτει :

$$P_{H/M} = P_{gen} = \frac{P_{gen-1} + P_{gen-2}}{2}$$

Επίσης έχουμε :

$$W_{\text{Diesel Oil Maneuvering}} = 0.07 \cdot W_{\text{Fuel Oil}}$$

3.) $W_{Lub Oil}$

Το βάρος των λιπαντικών είναι το 3 ÷ 5% του βάρους των καυσίμων, δηλαδή :

$$W_{Lub Oil} = 0.04 \cdot W_{Fuel Oil}$$

Οπότε το ολικό βάρος λιπαντικών και καυσίμων του υπό μελέτη πλοίου είναι :

$$W_F = W_{Fuel Oil} + W_{Lub Oil} + W_{Diesel Oil}$$

Υπολογισμός του βάρους πληρώματος W_{CR} του υπό μελέτη πλοίου :

Σύμφωνα με την σελίδα 145 του βιβλίου «Μελέτη Πλοίου, Τόμος Α : Μεθοδολογία Προμελέτης» τα βάρη επιβατών και αποσκευών είναι :

Αποσκευές : 60 kg / επιβάτης για μακρές πλόες

Το βάρος κάθε επιβάτη λαμβάνεται ίσο προς : 75 kg / επιβάτης

Ο αριθμός πληρώματος υποθέτουμε ότι είναι : 36 άτομα

Σημείωση : Οι τιμές αυτές δίνονται από τον χρήστη μέσω του αρχείου εισόδου INPUT_DATA.

Οπότε προκύπτει :

$$W_{CR} = 0.060 \cdot Crew + 0.075 \cdot Crew \text{ [tons]}$$

Όπου Crew = Αριθμός πληρώματος (Δίνεται από τον χρήστη).

Υπολογισμός του βάρους εφοδίων W_{PR} του υπό μελέτη “VENTURI”

Σύμφωνα με την σελίδα 145 του βιβλίου «Μελέτη Πλοίου, Τόμος Α : Μεθοδολογία Προμελέτης» η απαιτούμενη ποσότητα τροφίμων είναι 7 ÷ 16kg/ανθρωποημέρα οπότε προκύπτει :

$$\text{Ανθρωποημέρες} = (\text{μέλη πληρώματος}) \times (\text{ώρες ταξιδιού}) / 24 = (Crew \cdot 1000) / 24$$

$$\text{Αρ. Πληρώματος} = Crew$$

$$\text{Ωρες ταξιδιού} = \text{ο χρόνος αυτόνομου ταξιδιού του πλοίου} = \text{ακτίνα ενέργειας} / \text{ταχύτητα υπηρεσίας} (= R / V_S)$$

Βάρος εφοδίων = 16 kg / ανθρωποημέρα (Δίνεται από τον χρήστη)

$$W_{PR} = \text{ανθρωποημέρες} \cdot (\text{βάρος εφοδίων σε kg/ανθρωποημέρα}) \cdot 10^{-3} \text{ [tons]}$$

Υπολογισμός του προς κατανάλωση νερού W_{FW} του υπό μελέτη “VENTURI”

Σύμφωνα με την σελίδα 144 του βιβλίου «Μελέτη Πλοίου, Τόμος Α : Μεθοδολογία Προμελέτης» η απαιτούμενη ποσότητα νερού είναι :

$$W_{FW} = (W_{FW(\text{πόσιμο})} + W_{FW(\text{καθαριότητας})})$$

πόσιμο νερό : 20kg/ανθρωπομέρα (Δίνεται από τον χρήστη)

καθαριότητας : 200kg/ ανθρωπομέρα για ενδιαίτηση με τους λουτήρες (Δίνεται από τον χρήστη)

Άρα η συνολική ποσότητα είναι :

$$W_{FW} = \frac{\text{πόσιμο νερό} \cdot \text{ανθρωπομέρες} + \text{νερό καθαριότητας} \cdot \text{ανθρωπομέρες}}{1000} \text{ [tons]}$$

Υπόλοιπα βάρη

Από στοιχεία κατασκευασμένων πλοίων παρατηρώ πως υπάρχουν κάποια σταθερά πρόσθετα βάρη τα οποία θεωρώ πως θα υπάρχουν και στο υπό μελέτη πλοίο.

Constants = Δίνεται από το χρήστη [tons]

Miscellaneous = Δίνεται από το χρήστη [tons]

$$W_{rest} = \text{Constants} + \text{Miscellaneous} \text{ [tons]}$$

Υπολογισμός ωφέλιμου φορτίου W_{PL} του υπό μελέτη πλοίου :

$$\text{Payload} = \text{DWT} - (W_F + W_{PR} + W_{FW} + W_{CR} + \text{Rest})$$

Υπολογισμός ελάχιστου απαιτούμενου έρματος σύμφωνα με τους κανονισμούς της MARPOL :

Το ελάχιστο βάρος έρματος υπολογίζεται από τον τύπο :

$$W_B = \Delta_B - (\text{DWT}_{\text{Ballast_arrival}} + \text{LIGHTSHIP})$$

Όπου :

$$DWT_{Ballast_arrival} = 0.1 \cdot (W_F + W_{PR} + W_{FW}) + Rest + W_{CR}$$

LIGHTSHIP = Βάρος μεταλλικής κατασκευής (W_{Steel}) + Βάρος μηχανολογικής εγκατάστασης (W_m) + Βάρος ενδίαίτησης και εξοπλισμού ($W_{outfitting}$)

$$\Delta_B = \gamma \cdot L_{BP} \cdot B \cdot T_B \cdot C_{BB}$$

γ = ειδικό βάρος νερού (= 1.025 t/m^3 δίνεται από τον χρήστη)

C_{BB} = Συντελεστής γάστρας στην κατάσταση ερματισμού και υπολογίζεται ως εξής :

$$C_{BB_2} = C_B - 0.4 \cdot \frac{T - T_B}{T} \cdot (1 - C_B)$$

$$C_{BB_1} = C_B \cdot \left(\frac{T_B}{T} \right)^{\frac{C_{WP}-1}{C_B}}$$

$$C_{BB} = (C_{BB_1} + C_{BB_2}) / 2$$

T_B = Το μέσο βύθισμα του πλοίου στην κατάσταση ερματισμού , το οποίο προκύπτει ως το μέγιστο μεταξύ δυο βυθισμάτων :

- Το πρώτο προκύπτει από τη απαίτηση ελάχιστου βυθίσματος στο μέσον του πλοίου και είναι :

$$T_m = 2 + 0.02 \cdot L_{BP}$$

- Το δεύτερο προκύπτει από την απαίτηση βυθίσματος στο πρυμναίο τμήμα του σκάφους ώστε να βυθίζεται η έλικα, και από την απαίτηση της μεγίστης τιμής της διαγωγής η οποία πρέπει να είναι μικρότερη από $t = 0.015 \cdot L_{BP}$:

$$T_{trim} = D_P + e - t/2$$

Με D_P συμβολίζουμε την διάμετρο της έλικας ($=0.6 \cdot T$) και e την απόσταση του κάτω άκρου των πτερυγίων της έλικας από την τρόπιδα ($=0.025 \cdot T$). Θεωρούμε ότι η διαγωγή κατανέμεται όμοια στο πρωραίο και στο πρυμναίο τμήμα του σκάφους (έτσι προκύπτει ο συντελεστής $\frac{1}{2}$ για την διαγωγή).

Volumes.m :

Σε αυτή την υπορουτίνα γίνονται ογκομετρικοί υπολογισμοί γάστρας και σκοπός είναι ο υπολογισμός των επιμέρους όγκων του πλοίου (όγκος χώρων φορτίου, μηχανοστασίου, αναλώσιμων, έρματος, δεξαμενών κατακαθίσεις, προραίας και πρυμναίας δεξαμενής ζυγοσταθμίσεως κτλ).

Αρχικά ο επιτυγχανόμενος ολικός όγκος (σε m^3) κάτω από το κύριο κατάστρωμα έχει ήδη υπολογιστεί μέσω της μεθόδου Schneekluth στην υπορουτίνα SCHNEEKLUTH_WATSON.m και είναι :

$$\text{Ολικός επιτυγχανόμενος όγκος} = \nabla_U [m^3]$$

Οι επιμέρους όγκοι υπολογίζονται ως εξής :

Όγκος του μηχανοστασίου :

$$V_{\text{machinery}} = LMA \cdot B \cdot (D - h_{DB}) \cdot C_m$$

Όπου :

LMA : Μήκος μηχανοστασίου έσο με 14% L_{BP} .

h_{DB} : Ύψος διπυθμένου σε m ίσο με το ελάχιστο των τιμών 2m και $B / 15$ m αλλά ποτέ μικρότερο του 1m .

Όγκος των δεξαμενών για το ελάχιστο απαιτούμενο άρμα στην κατάσταση ερματισμού :

Λαμβάνοντας προσαύξηση 2% λόγω της ύπαρξης ενισχυτικών στο εσωτερικό των δεξαμενών έρματος έχουμε :

$$V_{\text{Ballast}} = W_B / 0.98 [m^3]$$

Όγκος των δεξαμενών για τα καύσιμα και τα λιπαντικά :

$$V_{\text{Fuel Oil}} = W_{\text{Fuel Oil}} / \text{Fuel Oil S.G} / 0.98 / 0.98$$

Λήφθηκε προσαύξηση 2% λόγω ύπαρξης ενισχυτικών στο εσωτερικό των δεξαμενών και 2% λόγω μη ολικής πλήρωσης των δεξαμενών για λόγους ασφαλείας.

Όπου :

Fuel Oil S.G : Ειδικό βάρος Fuel Oil δίνεται από τον χρήστη

$$V_{\text{Lub Oil}} = W_{\text{Lub Oil}} / \text{Lub Oil S.G} / 0.98 / 0.98$$

Λήφθηκε προσαύξηση 2% λόγω ύπαρξης ενισχυτικών στο εσωτερικό των δεξαμενών και 2% λόγω μη ολικής πλήρωσης των δεξαμενών για λόγους ασφαλείας.

Όπου :

Lub Oil S.G : Ειδικό βάρος Lub Oil δίνεται από τον χρήστη

$$V_{\text{Diesel Oil}} = W_{\text{Diesel Oil}} / \text{Diesel Oil S.G} / 0.98 / 0.98$$

Λήφθηκε προσαύξηση 2% λόγω ύπαρξης ενισχυτικών στο εσωτερικό των δεξαμενών και 2% λόγω μη ολικής πλήρωσης των δεξαμενών για λόγους ασφαλείας.

Όπου :

Diesel Oil S.G : Ειδικό βάρος Diesel Oil δίνεται από τον χρήστη

Όγκος των δεξαμενών νερού :

$$V_{\text{FW}} = W_{\text{FW}}$$

(Όγκος δεξαμενών ίσος με το απαιτούμενο βάρος του νερού αφού το ειδικό βάρος του γλυκού νερού είναι 1t/m^3)

Όγκος των δεξαμενών φορτίου :

Ο όγκος των δεξαμενών φορτίου είναι (λαμβάνοντας προσαύξηση 2% λόγω της ύπαρξης ενισχυτικών στο εσωτερικό των δεξαμενών και θεωρώντας ότι για λόγους ασφαλείας γίνεται πλήρωση των δεξαμενών στο 98% της χωρητικότητας τους) :

$$V_{\text{Payload}} = \text{Payload} / \text{Cargo S.G} / 0.98 / 0.98$$

Όπου :

Cargo S.G : Απαιτούμενο Ειδικό βάρος φορτίου το οποίο δίνεται από τον χρήστη

Όγκος των δεξαμενών κατακαθίσεως (Slop Tanks) :

$$V_{\text{SLOP}} = 0.02 \cdot V_{\text{Payload}}$$

Όγκος πρυμναίας και πρωραίας δεξαμενής ζυγοσταθμίσεως :

$$V_{FPAP} = 0.01 \cdot V_{Ballast}$$

Τέλος υπολογίζεται και ο μεικτός ολικός όγκος του πλοίου (Gross Tonnage) από την εξής σχέση :

$$\text{Gross Tonnage} = (0.2 + 0.002 \cdot \log_{10}(\text{TOTAL Volume})) \cdot \text{TOTAL Volume}$$

$$\text{TOTAL Volume} = \nabla_U + \text{Volume of Superstructures} + \text{Volume of Winch Houses}$$

Σημείωση : Ο όγκος των υπερκατασκευών (Volume of Superstructures) υπολογίζεται στην υπορουτίνα LOADLINE.m και ο όγκος των βαρέων φορτωτήρων (Winch Houses) υπολογίζεται στην υπορουτίνα MullerKoster.m

Build Cost.m :

Το συνολικό κόστος κατασκευής του υπό μελέτη πλοίου αναλύεται σε τρεις κατηγορίες:

- Κόστος μεταλλικής κατασκευής
- Κόστος ενδιαίτησεως και εξοπλισμού
- Κόστος μηχανολογικής εγκατάστασης

Κόστος Μεταλλικής Κατασκευής

Το κόστος μεταλλικής κατασκευής αποτελείται από το κόστος των υλικών και το εργατικό κόστος. Το κόστος των υλικών υπολογίζεται για τιμή χάλυβα 1100 \$/ton(δίνεται από τον χρήστη) και φύρα της τάξης 12.5% για Crude Oil Tanker (δίνεται από τον χρήστη)

Επομένως, προκύπτει:

$$C_M = (1 + (\text{φύρα}/100)) \cdot \text{τιμή χάλυβα [\$/ton]} \cdot \text{Βάρος Μεταλλικής Κατασκευής [\$]}$$

Οι εργατοώρες που απαιτούνται για τη μεταλλική κατασκευή ενός δεξαμενόπλοιου, υπολογίζονται προσεγγιστικά από την σχέση Benford:

$$\text{MHR} = 141.2 \cdot \text{Βάρος Μεταλλικής Κατασκευής}^{0.9} \quad [\text{man-hours}]$$

Το εργατικό κόστος, θεωρώντας κατά μέσο όρο κόστος εργατοώρας ίσο με 55\$ (δίνεται από τον χρήστη), προκύπτει:

$$C_W = \text{κόστος εργατοώρας} \cdot \text{MHR} \quad [\$]$$

Κόστος Ενδιαίτησεως & Εξοπλισμού

Το κόστος ενδιαίτησης και εξοπλισμού του πλοίου αποτελείται από το κόστος των υλικών και το εργατικό κόστος.

Το κόστος των υλικών υπολογίζεται προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$C_M = 5000 \cdot \text{Βάρος ενδιαίτησης και εξοπλισμού}^{0.95} [\$]$$

Από εμπειρικές σχέσεις (παράρτημα θ Μελέτη και Εξοπλισμός Πλοίου Ι), προκύπτει ότι το κόστος των υλικών ενδιαίτησεως και εξοπλισμού αποτελεί το 82% του συνολικού κόστους (η τιμή αυτή δίνεται από τον χρήστη). Επομένως, το συνολικό κόστος υπολογίζεται:

$$C_{\text{tot}} = C_M / 0.82 [\$]$$

Άρα, το εργατικό κόστος προκύπτει :

$$C_W = (1 - 0,82) \cdot C_{\text{tot}} [\$]$$

Κόστος Μηχανολογικής Εγκατάστασης

Το κόστος της μηχανολογικής εγκατάστασης του πλοίου αποτελείται από το κόστος των υλικών και το εργατικό κόστος.

Το κόστος των υλικών μιας μηχανολογικής εγκατάστασης είναι κατά κύριο λόγο ανάλογο της συνολικής ισχύος των μηχανών. Με βάση τα στοιχεία της κατασκευάστριας εταιρείας, το κόστος της κύριας μηχανής πρόωσης του πλοίου ανέρχεται σε 500 – 700 \$/kW (η τιμή αυτή δίνεται από το χρήστη). Επίσης, θεωρούμε προσαύξηση της τάξης του 20% (η τιμή αυτή δίνεται από τον χρήστη) για τον υπόλοιπο εξαρτισμό (αντλίες, έλικα, έδρανα, άξονας κτλ).

Επομένως, το κόστος των υλικών προκύπτει:

$$C_M = 1.2 \times (P_B + P_G) \times 600 \text{ \$/kW} [\$]$$

Όπου: $P_B = H$ ισχύς στον άξονα σε kW.

$P_G = H$ συνολική ισχύς των ηλεκτρογεννητριών

Από εμπειρικές σχέσεις (παράρτημα θ Μελέτη και Εξοπλισμός Πλοίου Ι), προκύπτει ότι το κόστος των υλικών της μηχανολογικής εγκατάστασης αποτελεί το 85% (η τιμή αυτή δίνεται από τον χρήστη) του συνολικού κόστους. Επομένως, το συνολικό κόστος υπολογίζεται:

$$C_{tot} = C_M / 0.85 \quad [\$]$$

Άρα, το εργατικό κόστος προκύπτει:

$$C_W = (1 - 0.85) \times C_{tot} \quad [\$]$$

Τελικά το συνολικό κόστος κτήσεως του πλοίου υπολογίζεται ως :

SHIP BUILD COST [\$] = Κόστος Μεταλλικής Κατασκευής + Κόστος
Ενδαιτησεως & Εξοπλισμού + Κόστος Μηχανολογικής Εγκατάστασης .

Annual Cost.m :

Σε αυτή την υπορουτίνα γίνεται ο υπολογισμός του συνολικού ετήσιου κόστους εκμετάλλευσης πλοίου. Το συνολικό κόστος εκμετάλλευσης του υπό σχεδίαση πλοίου αποτελείται από τα εξής επιμέρους κόστη:

- *Κόστος Heavy Fuel Oil*
- *Κόστος Diesel Oil*
- *Κόστος Lubricating Oil*
- *Κόστος Fresh Water*
- *Κόστος Τροφοδοσίας*
- *Κόστος Μισθοδοσίας*
- *Κόστος Συντηρήσεως & Επισκευών*
- *Κόστος Ασφάλισης*
- *Λιμενικά έξοδα*
- *Γενικά έξοδα*

Ο προσεγγιστικός υπολογισμός των παραπάνω μεγεθών, αφορά σε χρονικό διάστημα ενός έτους. Θεωρούμε ότι τα ταξίδια του πλοίου είναι συνεχή και κυκλικά στην ίδια διαδρομή, η οποία έχει μήκος ίσο με δύο φορές την ακτίνα ενέργειας του πλοίου και ότι ο χρόνος πλεύσης παραμένει σταθερός.

Ο χρόνος εισόδου και εξόδου από το λιμάνι είναι 4h. Οπότε για κυκλικό ταξίδι ο χρόνος ελιγμών στο λιμάνι είναι 8h (η τιμή δίνεται από τον χρήστη). Ο συνολικός

χρόνος φορτοεκφόρτωσης είναι 72h (3x24h) (η τιμή δίνεται από τον χρήστη). Οπότε ο συνολικός χρόνος του πλοίου στο λιμάνι θα είναι 80h. Ο αριθμός ημερών ανά κυκλικό ταξίδι θα είναι:

$$D = 2 \times (R / V) + 80 \text{ [days]}$$

Υπό την προϋπόθεση ότι 30 ημέρες (η τιμή δίνεται από τον χρήστη) ανά έτος διατίθενται για επισκευές, ο αριθμός των κυκλικών ταξιδιών ανά έτος είναι:

$$N = (\text{ημέρες υπηρεσίας ανά έτος}) / D \text{ [ταξίδια/έτος] [roundtrips/year]}$$

Ο χρόνος εν πλω ανά έτος είναι:

$$365\text{days} - 30\text{days} - (80\text{h}/24\text{h}) \times N \text{ [days]}$$

Για τον υπολογισμό του ετήσιου κόστους των αναλωσίμων του πλοίου (HFO, DO, LO & FW), πέρα από τα παραπάνω, χρειαζόμαστε και τις ποσότητες που καταναλώνονται ανά ταξίδι. Αυτές υπολογίζονται με βάση την παραδοχή ότι από την κατάσταση αναχώρησης του πλοίου όπου έχουν υπολογιστεί οι απαιτούμενες ποσότητες εφοδίων σε καύσιμα και λιπαντικά και μέχρι την άφιξη στον προορισμό του έχει καταναλωθεί το 90% όλων των εφοδίων του. Όποτε για ένα κυκλικό ταξίδι η συνολική κατανάλωση θα είναι :

$$2 \cdot (\text{ΕΦΟΔΙΑ}_{\text{Full Load Departure}} - 0.1 \cdot \text{ΕΦΟΔΙΑ}_{\text{Full Load Departure}})$$

Με βάση τα παραπάνω και τις ισχύουσες τιμές της αγοράς καυσίμων, προκύπτουν:

Κόστος Heavy Fuel Oil

Για κόστος 400 \$/ton καυσίμου (η τιμή δίνεται από το χρήστη) το συνολικό ετήσιο κόστος θα είναι:

$$C_{F.O} \text{ [$/year]} = \text{Κατανάλωση Fuel Oil [tons/roundtrip]} \cdot 400 \text{ [$/ton]} \cdot N \text{ [roundtrips/year]}$$

Κόστος Diesel Oil

Για κόστος 700\$/ton καυσίμου (η τιμή δίνεται από το χρήστη), το συνολικό ετήσιο κόστος θα είναι:

$$C_{D.O} [\$/year] = \text{Κατανάλωση Diesel Oil [tons/roundtrip]} \cdot 700 [\$/ton] \cdot N [\text{roundtrips/year}]$$

Κόστος Lub Oil

Για κόστος 1000\$/ton λιπαντικού (η τιμή δίνεται από το χρήστη), το συνολικό ετήσιο κόστος θα είναι:

$$C_{L.O} [\$/year] = \text{Κατανάλωση Lubricating Oil [tons/roundtrip]} \cdot 1000 [\$/ton] \cdot N [\text{roundtrips/year}]$$

Κόστος Fresh Water

Για κόστος 1\$/ton νερού (η τιμή δίνεται από το χρήστη), το συνολικό ετήσιο κόστος θα είναι:

$$C_{F.W} [\$/year] = \text{Κατανάλωση Fresh Water [tons/roundtrip]} \cdot 1 [\$/ton] \cdot N [\text{roundtrips/year}]$$

Για τα υπόλοιπα κόστη έχουμε:

Κόστος Τροφοδοσίας

Για πλήρωμα Crew = 25 ατόμων (η τιμή δίνεται από το χρήστη) και κόστος τροφοδοσίας κατά μέσο όρο ίσο με 16 \$/άτομο/ημέρα (η τιμή δίνεται από το χρήστη) και το πλοίο ταξιδεύει 365 ημέρες/έτος (η τιμή δίνεται από το χρήστη) (θεωρείται ότι κατά την διάρκεια των επισκευών παραμένει το πλήρωμα στο πλοίο), το συνολικό ετήσιο κόστος τροφοδοσίας προκύπτει:

$$C_{FS} [\$/year] = \text{Crew [persons]} \cdot \frac{16\$}{\text{person} \cdot \text{day}} \cdot 365 \frac{\text{days}}{\text{year}}$$

Κόστος Μισθοδοσίας

Για πλήρωμα Crew = 25 ατόμων (η τιμή δίνεται από το χρήστη) και κόστος μισθοδοσίας κατά μέσο όρο ίσο με 2000\$/άτομο/μήνα (η τιμή δίνεται από το χρήστη), και για 12+ 2 μηνιαίους μισθούς (+2μήνες είναι δώρο) (η τιμή δίνεται από το χρήστη) το συνολικό ετήσιο κόστος μισθοδοσίας προκύπτει:

$$C_{PR} [\$/year] = Crew [persons] \cdot \frac{2000\$}{person \cdot month} \cdot 14 \frac{months}{year}$$

Κόστος Συντηρήσεως & Επισκευών

Οι δαπάνες συντηρήσεως και επισκευών της μεταλλικής κατασκευής δίνονται από την παρακάτω εμπειρική σχέση:

$$C_{R+M,ST} [\$/year] = 25000 \cdot \left(\frac{L_{BP} \cdot B \cdot D}{10^5} \right)^{2/3}$$

Όπου οι τιμές μήκους μεταξύ καθέτων L_{BP} , πλάτους B και κοίλου D δίνονται σε πόδια και όχι μετρά [feet]

Οι δαπάνες συντηρήσεως & επισκευών της μηχανολογικής εγκατάστασης δίνονται από την παρακάτω εμπειρική σχέση:

$$C_{R+M,M} [\$/year] = 13.6 \cdot SHP$$

όπου : $SHP = H$ ισχύς κυρίας μηχανής στο MCR σε HP .

Συνεπώς οι συνολικές ετήσιες δαπάνες συντηρήσεως & επισκευών θα είναι:

$$C_{R+M} [\$/year] = C_{R+M,ST} + C_{R+M,M}$$

Κόστος Ασφαλίσεως

Το κόστος ασφαλίσεως για $Crew = 25$ ατόμων (η τιμή δίνεται από το χρήστη) και για το υπολογισθέν στην υπορουτίνα $Volumes.m$ Gross Tonnage (GT), δίνεται από τη σχέση:

$$C_{IN} [\$/year] = 1925 + \left(Crew + \frac{GT}{1000} \right)$$

Έξοδα Λιμένων

Τα έξοδα για κάθε προσέγγιση σε λιμένα δίδονται από την εξής σχέση:

$$600 + 50 \cdot \left(\frac{L_{BP} \cdot B \cdot D}{10^5} \right) \quad [\$ / \text{single trip}]$$

Όπου οι τιμές μήκους μεταξύ καθέτων L_{BP} , πλάτους B και κοίλου D δίνονται σε πόδια και όχι μέτρα [feet]

Εφόσον το πλοίο κάνει N κυκλικά ταξίδια/έτος, το συνολικό ετήσιο κόστος για ελλιμενισμό θα είναι:

$$C_{port} [\$/year] = 600 + 50 \cdot \left(\frac{L_{BP} \cdot B \cdot D}{10^5} \right) [\$/\text{single trip}] \cdot 2 \cdot N [\text{trips/year}]$$

Γενικά Έξοδα

Τα γενικά έξοδα ανά έτος δίδονται από τον παρακάτω εμπειρικό τύπο:

$$\text{Rest Costs} = 6500 + 70 \cdot \left(\frac{L_{BP} \cdot B \cdot D}{10^5} \right) [\$/\text{year}]$$

Όπου οι τιμές μήκους μεταξύ καθέτων L_{BP} , πλάτους B και κούλου D δίνονται σε μέτρα [m].

Συνεπώς, το συνολικό κόστος εκμετάλλευσης του πλοίου ανά έτος προκύπτει:

$$\text{ANNUAL SHIP COST} [\$/\text{year}] = C_{F.O} + C_{D.O} + C_{L.O} + C_{F.W} + C_{FS} + C_{PR} + C_{R+M} + C_{IN} + C_{port} + \text{Rest Costs.}$$

RFR.m :

Σε αυτή την υπορουτίνα γίνεται ο υπολογισμός ελάχιστου απαιτούμενου ναύλου ώστε η επένδυση της κτήσεως του υπό μελέτη πλοίου να είναι συμφέρουσα και βιώσιμη. Για τον υπολογισμό του Ελάχιστου Απαιτούμενου Ναύλου που θα καθιστά το υπό σχεδίαση πλοίο οικονομικά βιώσιμο, θεωρούμε τα εξής :

- Ύψος δανείου : 60% (η τιμή δίνεται από το χρήστη) του κόστους κτήσης του πλοίου με επιτόκιο $r = 8\%$ (η τιμή δίνεται από το χρήστη)

$$K_{\Delta} = 60\% \cdot \text{SHIP BUILD COST} [\$]$$

- Κεφάλαιο πλοιοκτήτη : 40% (η τιμή δίνεται από το χρήστη) του κόστους κτήσης του πλοίου

$$K_{\Pi} = 40\% \cdot \text{SHIP BUILD COST} [\$]$$

- Διάρκεια εκμετάλλευσης πλοίου: **20 χρόνια** (η τιμή δίνεται από το χρήστη)
- Προσδοκώμενη απόδοση επενδεδυμένου κεφαλαίου : $i = 12\%$ (η τιμή δίνεται από το χρήστη)
- Αξία πλοίου στο τέλος της διάρκειας ζωής του: 2.5% της αρχικής τιμής (η τιμή δίνεται από το χρήστη)

$$\Pi_{20} = 2.5\% \cdot \text{SHIP BUILD COST}$$

Ο υπολογισμός του ελάχιστου απαιτούμενου ναύλου, F γίνεται με το μηδενισμό της εξίσωσης της Καθαρής Παρούσας Αξίας (Κ.Π.Α.) του πλοίου για την αναμενόμενη διάρκεια ζωής του.

Η Κ.Π.Α. δίνεται από τον γενικό τύπο:

$$\text{Κ.Π.Α} = \sum \left(\frac{E\Sigma_t - E\Xi_t}{1+i^t} \right)$$

Με βάση τα παραπάνω, προκύπτει:

$$\text{Κ.Π.Α} = \frac{-K_{\Pi} + \Pi_{20}}{1+i^{20}} + RFR \cdot \sum \text{Payload} - E_{\Lambda} - \Delta \cdot \sum_{j=1}^{20} 1+i^{-j}$$

Όπου : E_{Λ} τα ετήσια λειτουργικά έξοδα (ANNUAL SHIP COST)

$$\sum \text{Payload} = \text{Payload [tons]} \cdot N \left[\frac{\text{roundtrips}}{\text{year}} \right]$$

το ετήσιο μεταφερόμενο φορτίο ,

$$\Delta = K\Delta \cdot \frac{r(1+r)^N}{1+r^N - 1}, \text{ η σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του πλοίου ετήσια δόση}$$

του δανείου ,

$$\sum_{j=1}^{20} 1+i^{-j} = 7.46944362$$

(Για διάρκεια ζωής του πλοίου = 20 χρόνια)

Αντικαθιστώντας τα παραπάνω και λύνοντας την εξίσωση για Κ.Π.Α. = 0 προκύπτει ο ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος για να είναι το πλοίο οικονομικά βιώσιμο:

$$RFR = [\$ / \text{ton}]$$

Energy Efficiency Design Index.m :

Σε αυτή την υπορουτίνα γίνεται ο υπολογισμός του δείκτη EEDI. Ο δείκτης αυτός είναι ένα μέγεθος μετρήσεως της αποδοτικότητας σε εκπομπές CO₂ των πλοίων και υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο :

$$EEDI = \frac{\left(\prod_{j=1}^M f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}^* + \left(\prod_{j=1}^M f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEff(i)} \right) \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}}{f_i \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w} - \left(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} \right)$$

Όπου :

- 1) C_F είναι ένας αδιάστατος παράγοντας μετατροπής μεταξύ της κατανάλωσης καύσιμου μετρημένη σε g και των εκπομπών CO₂ επίσης μετρούμενων σε g βασισμένα στην περιεκτικότητα σε άνθρακα. Οι δείκτες ME_i και AE_i αναφέρονται στην κυρία και βοηθητική μηχανή(ες) αντίστοιχα. Ο C_F αντιστοιχεί σε καύσιμο το οποίο χρησιμοποιείται κατά τον προσδιορισμό της κατανάλωσης SFC όπως προβλέπεται από το εφαρμοσμένο πιστοποιητικό EIAPP. Η τιμή του C_F καθορίζεται από τον παρακάτω πίνακα :

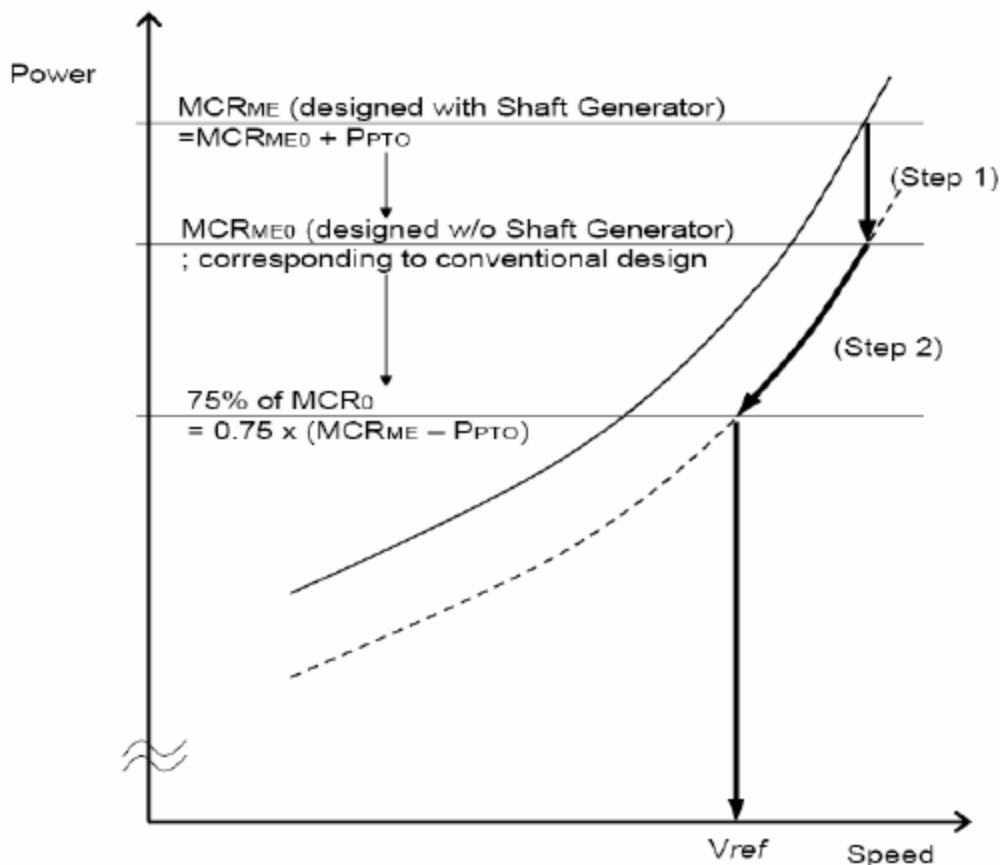
Type of fuel	Reference	Carbon content	C _F (t-CO ₂ /t-Fuel)
1. Diesel/Gas Oil	ISO 8217 Grades DMX through DMC	0.875	3.206000
2. Light Fuel Oil (LFO)	ISO 8217 Grades RMA through RMD	0.86	3.151040
3. Heavy Fuel Oil (HFO)	ISO 8217 Grades RME through RMK	0.85	3.114400
4. Liquified Petroleum Gas (LPG)	Propane	0.819	3.000000
	Butane	0.827	3.030000
5. Liquified Natural Gas (LNG)		0.75	2.750000

- 2) V_{ref} είναι η ταχύτητα του πλοίου μετρούμενη σε ναυτικά μιλιά ανά ώρα (κόμβους – Knots) , σε βαθύ νερό και στην κατάσταση πλήρους φόρτου και υποθέτοντας καλή κατάσταση θάλασσας χωρίς άνεμους και κυματισμούς.
- 3) Capacity για δεξαμενόπλοια είναι το βάρος DWT (Deadweight)
- 4) P είναι η ισχύς της κύριας(ων) και βοηθητικής μηχανής(ων), μετρούμενη σε kW. Οι δείκτες ME και AE αναφέρονται στην κυρία(ες) και βοηθητική(ες) μηχανή αντίστοιχα. Τα αθροίσματα πάνω στον δείκτη i αναφέρονται στον αριθμό όλων των μηχανών (^{nME}).

P_{ME(i)} είναι το 75% του MCR κάθε κύριας μηχανής i μετά την αφαίρεση της ισχύος οποιονδήποτε εγκατεστημένων γεννητριών κινούμενων από το αξονικό σύστημα.

$$P_{ME(i)} = 0.75 \cdot (MCR_{MEi} - P_{PTO(i)})$$

Το επόμενο διάγραμμα δίνει οδηγίες για τον προσδιορισμό του $P_{ME(i)}$:



$P_{PTO(i)}$ είναι το 75% της ονομαστικής ισχύος κάθε γεννήτριας κινούμενης από το αξονικό σύστημα μετά την διαίρεση με τον βαθμό απόδοσής της.

$P_{PTI(i)}$ είναι 75% της ονομαστικής ισχύος που καταναλώνει κάθε τυχόν υπάρχων κινητήρας ο οποίος κινείται από το αξονικό σύστημα μετά την διαίρεση με τον μέσο βαθμό απόδοσης όλων των υπάρχοντων τέτοιων κινητήρων.

$P_{eff(i)}$ είναι το 75% της μείωσης της ισχύος της κύριας μηχανής λόγω αποδοτικής καινοτόμας τεχνολογίας μηχανικής ενεργείας.

$P_{AEff(i)}$ είναι η μείωση ισχύος βοηθητικών μηχανών λόγω αποδοτικής καινοτόμας τεχνολογίας ηλεκτρικής ενεργείας.

P_{AE} είναι η απαιτούμενη ισχύ ηλεκτρογεννητριών – βοηθητικών κινητήρων για την κάλυψη όλων των αναγκών του πλοίου σε κατάσταση κανονικής θάλασσας και πλήρους φόρτου και περιλαμβάνει ισχύ για κάλυψη αναγκών συστημάτων πρόωσης και ενδίαιτησης.

Για εμπορικά πλοία με κυρία μηχανή άνω των 10000kW έχουμε :

$$P_{AE(MCRME>10000kW)} = \left(0.025 \cdot \sum_{i=1}^{nME} MCR_{MEi} \right) + 250$$

Για εμπορικά πλοία με κύρια μηχανή κάτω των 10000kW έχουμε :

$$P_{AE(MCRME<10000kW)} = 0.05 \cdot \sum_{i=1}^{nME} MCR_{MEi}$$

- 5) SFC είναι η εγκεκριμένη από τον κατασκευαστή ειδική κατανάλωση καύσιμου μετρούμενη σε g/kWh των μηχανών. Οι δείκτες ME(i) και AE(i) αναφέρονται στην κύρια(ες) και βοηθητική(ες) μηχανή(ες) αντίστοιχα.

SFC_{AE} είναι ο μέσος όρος των επιμέρους SFC_{AE(i)} .

- 6) f_j είναι ένας παράγοντας διόρθωσης και λαμβάνει υπόψη ειδικά χαρακτηριστικά κατασκευής και σχεδίασης του πλοίου. Για Ice Class πλοία έχουμε τον παρακάτω πίνακα :

Ship type	f_j	Limits depending on the ice class			
		IC	IB	IA	IA Super
Tanker	$\frac{0.516L_{PP}^{1.87}}{\sum_{i=1}^{nME} P_{iME}}$	$\begin{cases} \max 1.0 \\ \min 0.72L_{PP}^{0.06} \end{cases}$	$\begin{cases} \max 1.0 \\ \min 0.61L_{PP}^{0.08} \end{cases}$	$\begin{cases} \max 1.0 \\ \min 0.50L_{PP}^{0.10} \end{cases}$	$\begin{cases} \max 1.0 \\ \min 0.40L_{PP}^{0.12} \end{cases}$
Dry cargo carrier	$\frac{2.150L_{PP}^{1.58}}{\sum_{i=1}^{nME} P_{iME}}$	$\begin{cases} \max 1.0 \\ \min 0.89L_{PP}^{0.02} \end{cases}$	$\begin{cases} \max 1.0 \\ \min 0.78L_{PP}^{0.04} \end{cases}$	$\begin{cases} \max 1.0 \\ \min 0.68L_{PP}^{0.06} \end{cases}$	$\begin{cases} \max 1.0 \\ \min 0.58L_{PP}^{0.08} \end{cases}$
General cargo ship	$\frac{0.0450 \cdot L_{PP}^{2.37}}{\sum_{i=1}^{nME} P_{iME}}$	$\begin{cases} \max 1.0 \\ \min 0.85L_{PP}^{0.03} \end{cases}$	$\begin{cases} \max 1.0 \\ \min 0.70L_{PP}^{0.06} \end{cases}$	$\begin{cases} \max 1.0 \\ \min 0.54L_{PP}^{0.10} \end{cases}$	$\begin{cases} \max 1.0 \\ \min 0.39L_{PP}^{0.15} \end{cases}$

Για αλλά πλοία (όχι Ice Class) ο παράγοντας f_j λαμβάνεται ίσος με 1.

- 7) f_w είναι ένας αδιάστατος συντελεστής που αναπαριστά την ελάττωση ταχύτητας σε πλευση με προκαθορισμένο ύψος κύματος, συχνότητα κύματος και ταχύτητα ανέμου. Λαμβάνεται ίσος με 1 μέχρι τα κατάλληλα διαγράμματα να καθιστούν διαθέσιμα από τον IMO.
- 8) $f_{eff(i)}$ λαμβάνεται ίσο με 1 και είναι ένας παράγοντας διαθεσιμότητας κάθε καινοτόμας τεχνολογίας για καλύτερη ενεργειακή απόδοση.
- 9) f_i είναι ένας παράγοντας διόρθωσης για οποιονδήποτε υπάρχοντα φυσικό ή τεχνικό περιορισμό στο DWT και μπορεί να ληφθεί ίσος με 1 εάν δεν υπάρχουν περιορισμοί αλλιώς (για Ice Class πλοία) καθορίζεται από τον παρακάτω πίνακα :

Ship type	f_i	Limits depending on the ice class			
		IC	IB	IA	IA Super
Tanker	$\frac{0.00115L_{PP}^{3.36}}{capacity}$	$\begin{cases} \max 1.31L_{PP}^{-0.05} \\ \min 1.0 \end{cases}$	$\begin{cases} \max 1.54L_{PP}^{-0.07} \\ \min 1.0 \end{cases}$	$\begin{cases} \max 1.80L_{PP}^{-0.09} \\ \min 1.0 \end{cases}$	$\begin{cases} \max 2.10L_{PP}^{-0.11} \\ \min 1.0 \end{cases}$
Dry cargo carrier	$\frac{0.000665 \cdot L_{PP}^{3.44}}{capacity}$	$\begin{cases} \max 1.31L_{PP}^{-0.05} \\ \min 1.0 \end{cases}$	$\begin{cases} \max 1.54L_{PP}^{-0.07} \\ \min 1.0 \end{cases}$	$\begin{cases} \max 1.80L_{PP}^{-0.09} \\ \min 1.0 \end{cases}$	$\begin{cases} \max 2.10L_{PP}^{-0.11} \\ \min 1.0 \end{cases}$
General cargo ship	$\frac{0.000676 \cdot L_{PP}^{3.44}}{capacity}$	1.0	$\begin{cases} \max 1.08 \\ \min 1.0 \end{cases}$	$\begin{cases} \max 1.12 \\ \min 1.0 \end{cases}$	$\begin{cases} \max 1.25 \\ \min 1.0 \end{cases}$
Containership	$\frac{0.1749 \cdot L_{PP}^{2.29}}{capacity}$	1.0	$\begin{cases} \max 1.25L_{PP}^{-0.04} \\ \min 1.0 \end{cases}$	$\begin{cases} \max 1.60L_{PP}^{-0.08} \\ \min 1.0 \end{cases}$	$\begin{cases} \max 2.10L_{PP}^{-0.12} \\ \min 1.0 \end{cases}$
Gas tanker	$\frac{0.1749 \cdot L_{PP}^{2.33}}{capacity}$	$\begin{cases} \max 1.25L_{PP}^{-0.04} \\ \min 1.0 \end{cases}$	$\begin{cases} \max 1.60L_{PP}^{-0.08} \\ \min 1.0 \end{cases}$	$\begin{cases} \max 2.10L_{PP}^{-0.12} \\ \min 1.0 \end{cases}$	1.0

Για αλλά πλοία (όχι Ice Class) ο παράγοντας f_i λαμβάνεται ίσος με 1.

10) Το μήκος μεταξύ καθέτων εδώ εννοείται το μέγιστο εκ των δυο :

- ολικό μήκος ισάλου επιφάνειας σε ύψος 85% του κοίλου.
- Πραγματικό μήκος μεταξύ καθέτων (άξονας πηδαλίου AP έως την FP)

και μετράται σε μέτρα [m].

3.3 Κατάστρωση πολυκριτηριακού προβλήματος, περιγραφή της προς βελτιστοποίηση υπορουτίνας *OPTIMIZER.m* (*Multiobjective Problem Setting, description of optimizing target subroutine OPTIMIZER.m*).

Αφού έχουν καταστρωθεί όλες οι επιμέρους υπορουτίνες οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των διαφόρων απαραίτητων χαρακτηριστικών της σχεδίασης του πλοίου, το επόμενο βήμα είναι η «σύνθεσή» τους σε μια υπορουτίνα στην οποία θα γίνει η κατάστρωση του γενικού προβλήματος βελτιστοποίησης και πάνω στην οποία θα γίνει η ίδια η βελτιστοποίηση με χρήση των γενετικών αλγορίθμων. Δηλαδή ο γενετικός αλγόριθμος θα δέχεται σαν είσοδο αυτή την συνάρτηση «σύνθεσης» και θα εκτελείται επαναληπτικά η διαδικασία της βελτιστοποίησης.

Αυτή η σύνθεση λοιπόν όλων των επιμέρους υπορουτινών έγινε στην υπορουτίνα *OPTIMIZER.m* . Σε αυτό το σημείο καλό είναι να επαναδιατυπώσουμε τα κριτήρια

(αντικειμενικές συναρτήσεις) του προβλήματος οποίο θα προσπαθήσουμε να λύσουμε.

Σκοπός μας όπως έχει ήδη αναφερθεί ήταν η εύρεση ενός συνόλου « βέλτιστων design » (Pareto front) για πλοία μεταφοράς πετρελαίου και παραγωγών του (oil tankers) με βάση τα ακόλουθα έξι (6) οικονομοτεχνικά κριτήρια :

- 1) Ελαχιστοποίηση Ολικής αντίστασης γάστρας (Resistance)
- 2) Ελαχιστοποίηση Βάρους πλήρους εξοπλισμένου αλλά άφορτου σκάφους (Lightship)
- 3) Μεγιστοποίηση Βάρους μεταφερόμενου φορτίου (Payload)
- 4) Ελαχιστοποίηση Κόστους κτήσεως πλοίου (Build Cost)
- 5) Ελαχιστοποίηση Ετήσιου κόστους εκμετάλλευσης πλοίου (Annual Cost)
- 6) Ελαχιστοποίηση Ελάχιστου απαιτούμενου ναύλου (RFR)

Η βελτιστοποίηση έγινε με χρήση 12 ανεξάρτητων μεταβλητών (L/B , B/T , L/D , $L/\nabla^{1/3}$, C_B , S_A , S_F , b , A_{BT} , h_B , A_T , DWT) και απαίτηση την ταυτόχρονη μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση (ανάλογα με το κριτήριο) όλων των αντικειμενικών συναρτήσεων. Παρακάτω θα περιγραφεί η υπορουτίνα OPTIMIZER.m

OPTIMIZER.m :

Η υπορουτίνα αυτή ξεκινά με τον υπολογισμό όλων των απαραίτητων, για την έναρξη και συνέχιση της βελτιστοποίησης, αρχικών τιμών (βασικές διαστάσεις, συντελεστές μορφής κτλ) καλώντας την υπορουτίνα Initial_Values_Calculation.m . Εξάγοντας τα αποτελέσματα της έχει παραχθεί μια υποψήφια λύση – design (διάλυση σχεδίασης) η οποία στη συνέχεια θα αξιολογηθεί με βάση τα έξι (6) επιλεγμένα κριτήρια βελτιστοποίησης που αναφέραμε παραπάνω.

Στη συνέχεια καλείται η υπορουτίνα LOADLINE.m στην οποία γίνονται όλοι οι υπολογισμοί της γραμμής φόρτωσης και μεταξύ άλλων εξάγεται το μέγιστο επιτρεπόμενο βύθισμα (T_{max}) του υπό μελέτη design. Αυτό έπειτα συγκρίνεται με το βύθισμα σχεδίασης ($T_{design} = T$) που έχει παραχθεί από τον υπολογισμό των αρχικών τιμών και ελέγχεται η απαίτηση :

$$T_{design} = T \leq T_{max}$$

Σε περίπτωση που δεν ισχύει αυτή η σχέση τότε προσαρμόζεται κατάλληλα το T_{design} .

Στο επόμενο βήμα γίνονται οι υπολογισμοί της αρχικής ευστάθειας άθικτου πλοίου μέσω της κλήσης της υπορουτίνας Stability.m . Εδώ σε περίπτωση που το προκύπτον μετακεντρικό ύψος της κατάστασης αναχώρησης πλήρους φόρτου (Full Load Departure) GM_{FLD} δεν ικανοποιεί την σχέση :

$$GM_{FLD} \geq 0.3$$

Τότε το τρέχον υποπλήσιο design απορρίπτεται και η διαδικασία επανεκκινείται από το σημείο της κλήσης της υπορουτίνας Initial_Values_Calculation.m .Σε περίπτωση που η απαίτηση του μετακεντρικού ύψους ικανοποιείται τότε προχωράμε στα επόμενα εξής βήματα :

- 1) Υπολογισμός αντίστασης (κριτήριο 1^ο) με κλήση της υπορουτίνας HOLTROP.m
- 2) Υπολογισμός βάρους υπερκατασκευών / υπερστεγασμάτων με κλήση της υπορουτίνας MullerKoster.m
- 3) Υπολογισμός βάρους μεταλλικής κατασκευής χωρίς ή με υπερκατασκευές / υπερστεγάσματα με κλήση της υπορουτίνας SCHNEEKLUTH_WATSON.m λαμβάνοντας υπόψη την επιλογή του χρήστη για την χρησιμοποιούμενη μέθοδο (Schneekluth ή Watson).
- 4) Υπολογισμός συνολικού βάρους μεταλλικής κατασκευής αποδίδοντας την τιμή της μεθόδου Watson εάν αυτή η μέθοδος είχε αρχικά επιλεγεί αλλιώς,
- 5) Υπολογισμός συνολικού βάρους μεταλλικής κατασκευής αποδίδοντας την τιμή των μεθόδων Schneekluth και Muller Koster (βάρος μεταλλικής κατασκευής κενής γάστρας + βάρος υπερκατασκευών / υπερστεγασμάτων) εάν η μέθοδος Schneekluth είχε αρχικά επιλεγεί.
- 6) Υπολογισμός βάρους μηχανολογικής εγκατάστασης με κλήση της υπορουτίνας Wm.m
- 7) Υπολογισμός βάρους ενδιαίτησης και εξοπλισμού με κλήση της υπορουτίνας Wot.m
- 8) Υπολογισμός βάρους κενού σκάφους (Lightship weight) (κριτήριο 2^ο) με πρόσθεση των : Συνολικό βάρος μεταλλικής κατασκευής + Βάρος μηχανολογικής εγκατάστασης + Βάρος ενδιαίτησης και εξοπλισμού.
- 9) Υπολογισμός βάρους μεταφερόμενου φορτίου (Payload) (κριτήριο 3^ο) με κλήση της υπορουτίνας DWTanalysis.m

- 10) Υπολογισμός συνολικού κόστους κτήσεως του πλοίου (κριτήριο 4^ο) με κλήση της υπορουτίνας Build_Cost.m
- 11) Υπολογισμός όγκων χώρων φορτίου , μηχανοστασίου κτλ με κλήση της υπορουτίνας Volumes.m
- 12) Υπολογισμός συνολικού ετήσιου λειτουργικού κόστους (κριτήριο 5^ο) του πλοίου με κλήση της υπορουτίνας Annual_Cost.m
- 13) Υπολογισμός Ελάχιστου Απαιτούμενου Ναύλου RFR (κριτήριο 6^ο)
- 14) Υπολογισμός του δείκτη EEDI με κλήση της υπορουτίνας Energy_Efficiency_Design_Index.m

Σε αυτό το σημείο έχει ολοκληρωθεί ο κύκλος των υπολογισμών του πρώτου υποψήφιου design. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για ένα σύνολο (πληθυσμό) πολλών designs που έχουν παραχθεί από τον γενετικό αλγόριθμο και αναγνωρίζονται όλα τα nondominated Pareto designs. Στη συνέχεια λαμβάνουν χώρα οι γενετικές διαδικασίες του αλγορίθμου, παράγεται ένας νέος πληθυσμός από υποψήφιες λύσεις (designs) και όλη η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ικανοποιηθούν τα επιλεγμένα μέσω του γραφικού περιβάλλοντος κριτήρια τερματισμού.

3.4 Περιγραφή διαδικασίας παραγωγής αρχείου *offsets* για την

δημιουργία του σχεδίου ναυπηγικών γραμμών της γάστρας – Η

υπορουτίνα Hull_offsets.m (Offsets file generation description –

Hull_offsets.m subroutine) .

Για την δημιουργία του αρχείου συντεταγμένων της γάστρας του υπό μελέτη πλοίου (*offsets file*) το οποίο στη συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιοδήποτε σχεδιαστικό πρόγραμμα CAD/CAM για την παραγωγή του σχεδίου των ναυπηγικών γραμμών, χρησιμοποιείται η συστηματική σειρά FORMDATA η μεθοδολογία της οποίας υλοποιείται στην υπορουτίνα Hull_offsets.m .

Συστηματική σειρά FORMDATA

Εισαγωγή

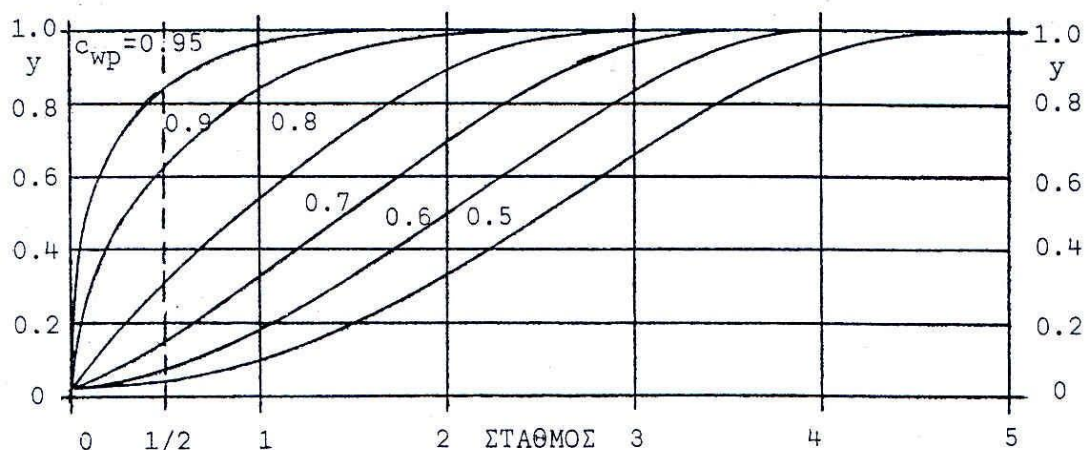
Η συστηματική σειρά FORMDATA αναπτύχθηκε στο Δανικό Πολυτεχνείο της Κοπεγχάγης και δίνει επαρκή στοιχεία για τη χάραξη των ναυπηγικών γραμμών πλοίου. Η σειρά αυτή βασίζεται στη στατιστική ανάλυση των στοιχείων υπαρχόντων πλοίων διαφόρων τύπων και έχει χρησιμοποιηθεί ευρύτατα στην σχεδίαση πολλών σύγχρονων πλοίων.

Η συστηματική σειρά FORMDATA καλύπτει συνηθισμένες μορφές πλοίων με μέση τομή η οποία έχει κατακόρυφες πλευρές. Η σειρά περιλαμβάνει τρεις βασικές μορφές γραμμών πλοίου U, N ,V που σχηματίζονται με συνδυασμό δυο σειρών A και F πρυμναίου και πρωραίου τμήματος πλοίου αντίστοιχα. Οι μορφές των γραμμών μεταβάλλονται συστηματικά με τον συντελεστή μέσης τομής C_m και με το συντελεστή γάστρας του πρυμναίου και του πρωραίου τμήματος του πλοίου C_{BA} και C_{BF} αντίστοιχα. Τα διαγράμματα της συστηματικής σειράς FORMDATA δίνουν τις καμπύλες εγκάρσιων τομών σε αδιάστατη μορφή.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι ναυπηγικές γραμμές της συστηματικής σειράς FORMDATA δεν είναι «πραγματικές» γραμμές πλοίου αλλά κατά κάποιο τρόπο ένας μέσος όρος των υπαρχόντων δυνατοτήτων.

Γενικά χαρακτηριστικά

Οι ναυπηγικές γραμμές που περιλαμβάνονται στις δυο πρώτες εκδόσεις της συστηματικής σειράς FORMDATA , βασίζονται σε μια τυποποιημένη σειρά μορφής ισάλου με συντελεστές ισάλου επιφάνειας C_{WP} 0.50 , 0.60 , 0.70 , 0.80 , 0.90 , 0.95 οι οποίες φαίνονται στο επόμενο σχήμα. Οι ναυπηγικές γραμμές που περιλαμβάνονται στις δυο τελευταίες εκδόσεις, βασίζονται σε πιο ρεαλιστικές μορφές ισάλων χωρίς να περιορίζονται από την παραπάνω τυποποιημένη σειρά μορφής ισάλων.

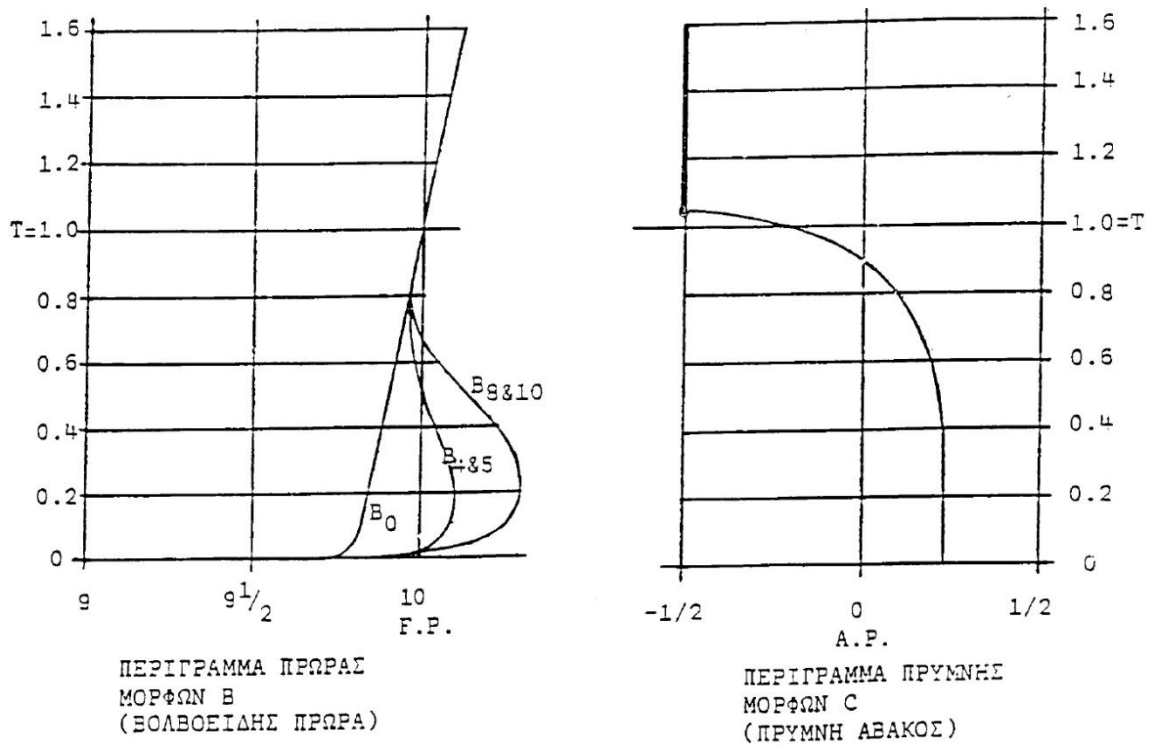
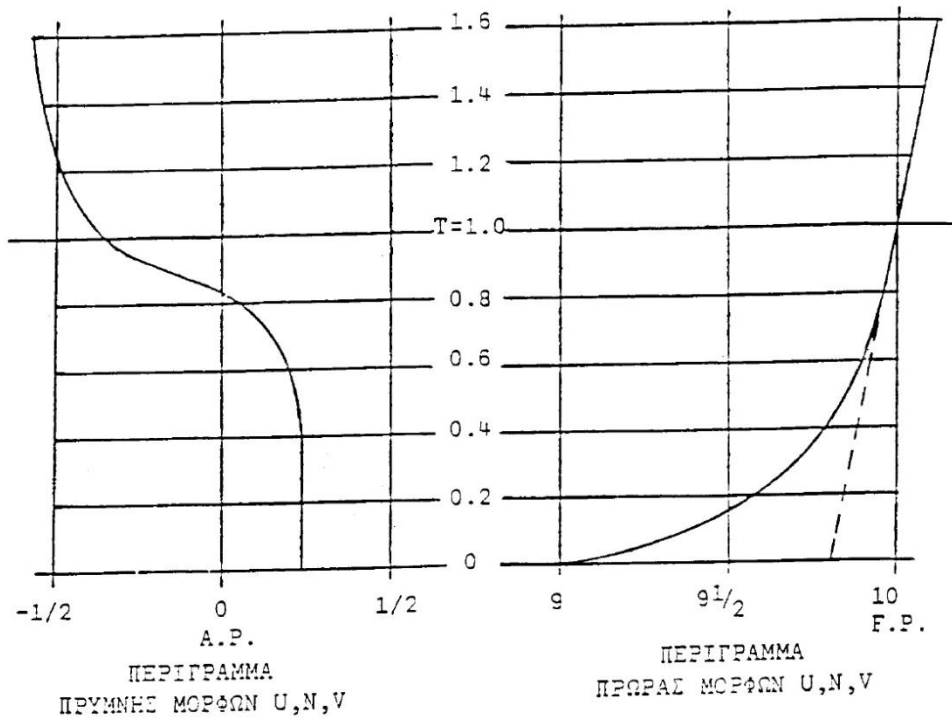


ΤΥΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΣΕΙΡΑ
ΜΟΡΦΗΣ ΙΣΑΛΩΝ

Τα διαγράμματα της συστηματικής σειράς FORMDATA δίνουν παραμετρική οικογένεια νομέων για το πρωαίο και το πρυμναίο ήμισυ του πλοίου χωριστά. Σε κάθε πλοίο αντιστοιχούν 11 θεωρητικοί νομείς. Ο σταθμός 0 αντιστοιχεί στην πρυμναία κάθετο και ο 10 στην πρωαία κάθετο.

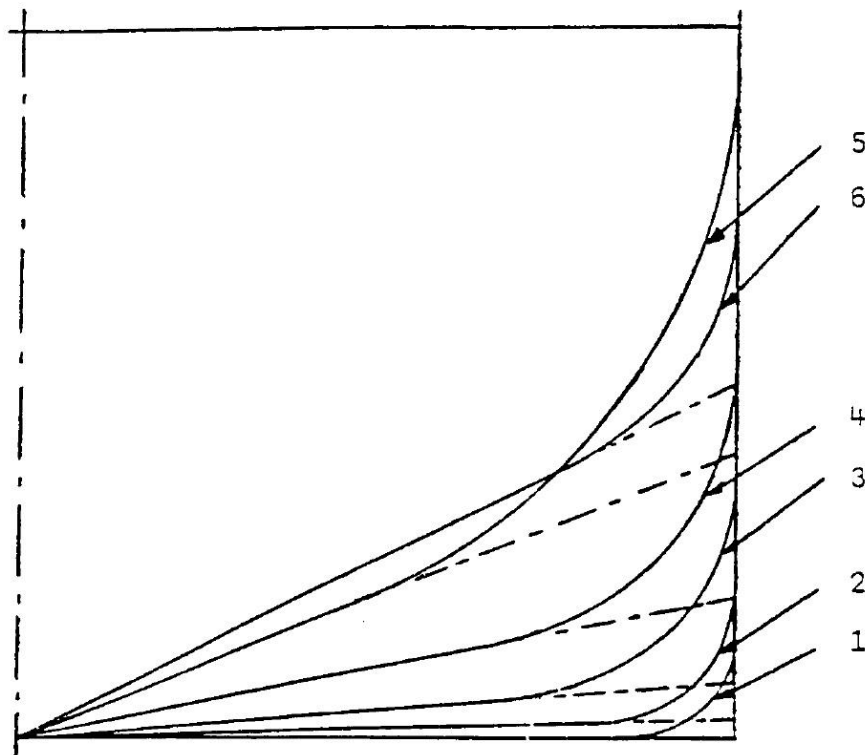
Κάθε οικογένεια νομέων χαρακτηρίζεται από ένα αλφαριθμητικό σύμβολο π.χ. U2F , B43F , T1A , C_B2A κλπ.

Ο πρώτος χαρακτήρας είναι ένα γράμμα που προσδιορίζει την μορφή των γραμμών του υπόψη τμήματος. Συγκεκριμένα η μορφή U συμβολίζει πλοίο με «πλήρεις» γραμμές (full) , η μορφή N πλοίο με «κανονικές» γραμμές (normal) , και η μορφή V συμβολίζει πλοίο με «λεπτές» γραμμές (fine). Η μορφή B συμβολίζει πλοίο με βολβοειδή πλώρα (bulbous bow). Η μορφή T συμβολίζει πρύμνη δεξαμενόπλοιου παλαιότερου τύπου και τέλος η μορφή C συμβολίζει πλοίο με πρύμνη άβακος (transom stern). Τα περιγράμματα πρύμνης και πλώρας των μορφών U , N και V, το περίγραμμα της βολβοειδούς πλώρας και τα περιγράμματα πρύμνης δεξαμενοπλοίου (ίδιο με U,N,V) και άβακος φαίνονται στα επόμενα σχήματα.



ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Στην παρούσα εργασία εφόσον μελετάμε δεξαμενόπλοια θα χρησιμοποιήσουμε μόνο τις μορφές νομέων U «πλήρεις νομείς», μορφές πλώρας B και μορφές πρύμνης C.

Ο δεύτερος χαρακτήρας είναι ένας ακέραιος, που προσδιορίζει το συντελεστή μέσης τομής C_M . Ειδικότερα ισχύει η εξής αντιστοιχία :



ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΑ ΚΩΔΙΚΟΥ
ΑΡΙΘΜΟΥ ΠΡΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ
ΜΕΣΗΣ ΤΟΜΗΣ c_M

1	γιά	$C_M=0,995$
2	"	$C_M=0,98$
3	"	$C_M=0,94$
4	"	$C_M=0,88$
5	καί 6 "	$C_M=0,74$

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Στην παρούσα εργασία εφόσον μελετάμε δεξαμενόπλοια, των οποίων ο συντελεστής μέσης τομής είναι πάντα άνω του 0.992 όλες οι οικογένειες νομέων μας θα έχουν δεύτερο χαρακτήρα τον αριθμό 1.

Ο τρίτος βασικός χαρακτήρας είναι το γράμμα A ή F που συμβολίζει το πρυμναίο η το πρωραίο τμήμα του πλοίου αντίστοιχα.

Ο δείκτης 0, 4, 5, 8 και 10 στις μορφές πλώρας B δίνει το λόγο επί τοις εκατό της επιφάνειας του βολβού στην πρωραία κάθετο προς την επιφάνεια της μέσης τομής του πλοίου (αυτός στην παρούσα εργασία καθορίζεται από την τιμή της ανεξάρτητης μεταβλητής 9 : A_{BT}).

Ο δείκτης A, B, C και D στις μορφές πρύμνης C υποδηλώνει τη σχετική κλίση της εκάστοτε πρύμνης έναντι της κατακόρυφης πρύμνης (δείκτης D) (Αυτή η κλίση επιλέγεται από το χρήστη μέσω του αρχείου εισόδου INPUT_DATA.xls).

Απαιτούμενα στοιχεία για την χάραξη των ναυπηγικών γραμμών

Για την χάραξη των ναυπηγικών γραμμών του πλοίου με βάση τη συστηματική σειρά FORMDATA απαιτούνται :

- 1) Μήκος μεταξύ καθέτων L_{BP}
- 2) Πλάτος B
- 3) Βύθισμα T
- 4) Κοίλο D
- 5) Συντελεστής μέσης τομής C_M
- 6) Συντελεστής γάστρας C_B
- 7) Διαμήκης θέση κέντρου αντώσεως X_B ως ποσοστό επί τοις εκατό (%) του L_{BP} πλώραθεν (+) ή πρύμνηθεν (-) του μέσου νομέα.
- 8) Συντελεστής γάστρας για το πρυμναίο τμήμα του πλοίου C_{BA}
- 9) Συντελεστής γάστρας για το πρωραίο τμήμα του πλοίου C_{BF}

Ισχύει για τους επιμέρους συντελεστές γάστρας :

$$C_{BA} = C_B \cdot \left(0.997 - 3.5 \cdot \frac{X_B}{L_{BP}} \right)$$
$$C_{BF} = C_B \cdot \left(1.003 + 3.5 \cdot \frac{X_B}{L_{BP}} \right)$$

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι καμπύλες των νομέων της σειράς FORMDATA έχουν χαραχτεί με παράμετρο το συντελεστή γάστρας C_{BA} και C_{BF} . Οι τεταγμένες και οι κατηγμένες δίνονται σε αδιάστατους αριθμούς. Έτσι στα διαγράμματα οι τεταγμένες

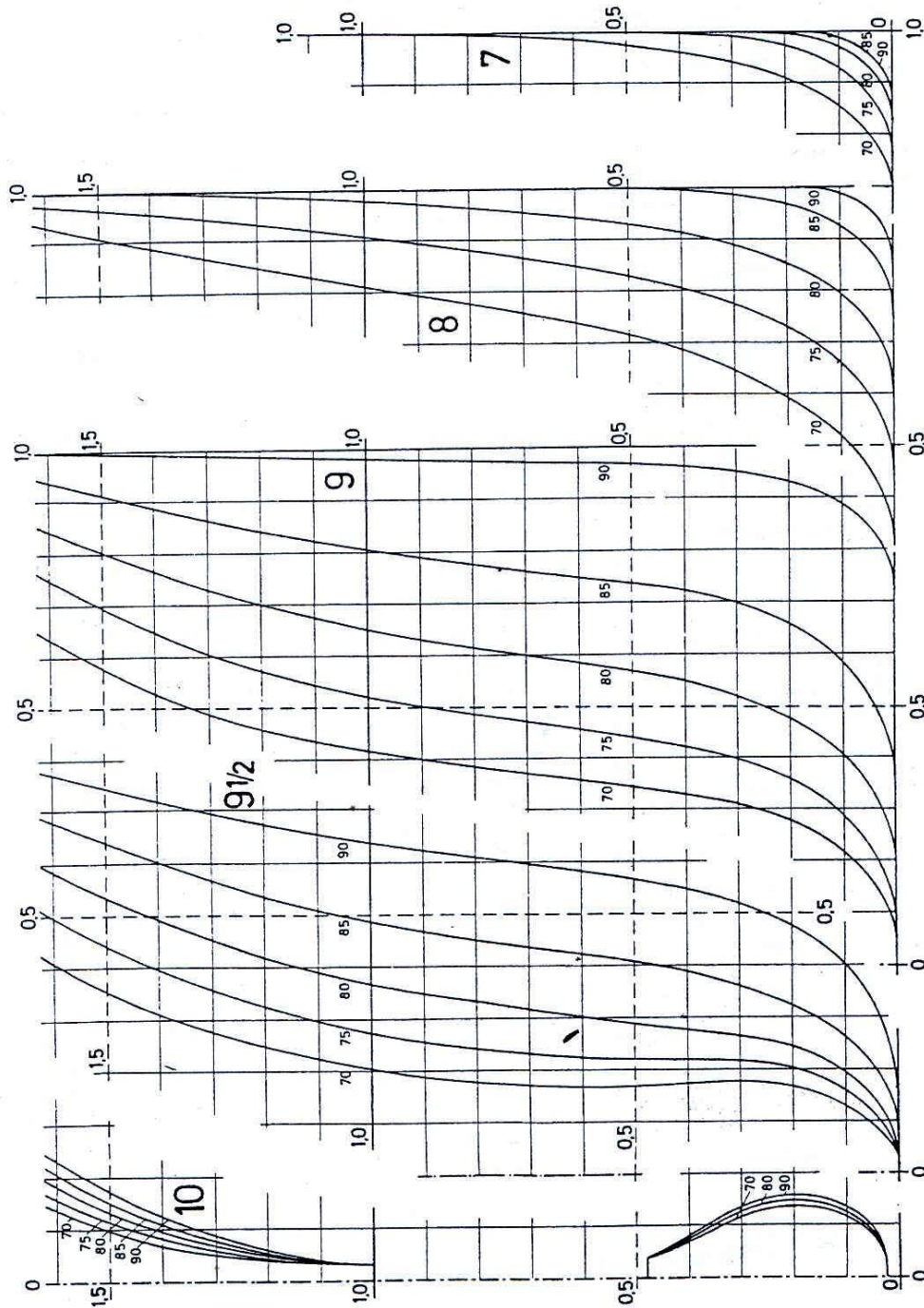
ενός σημείου είναι ο λόγος του πραγματικού πλάτους στο υπόψη σημείο προς το πλάτος αναφοράς και η καταγόμενη είναι ο λόγος της πραγματικής κατηγμένης του σημείου προς το βύθισμα αναφοράς.

Συνοψίζοντας , στην παρούσα εργασία επειδή μελετάμε δεξαμενόπλοια οι μορφές νομέων που θα χρησιμοποιήσουμε είναι οι πλήρεις νομείς U. Επειδή όμως θεωρούμε ότι θα έχουμε πάντα βολβοειδή πλώρη (bulbous bow) οι οικογένειες πρωραίων νομέων που θα χρησιμοποιήσουμε θα είναι οι B₅1F80 , B₅1F85 , B₁₀1F80 , B₁₀1F85 και λόγω της παραδοχής για πρύμνη άβακος, οι οικογένειες πρυμναίων νομέων που θα χρησιμοποιήσουμε θα είναι οι C_A1A80 , C_A1A85 , C_B1A80 , C_B1A85 , C_C1A80 , C_C1A85 , C_D1A80 , C_D1A85. Τέλος τα προφίλ πρύμνης και πλώρης που θα χρησιμοποιήσουμε θα είναι : *προφίλ – περίγραμμα πρύμνης μορφών C* και *προφίλ – περίγραμμα πλώρης μορφών B* (φαίνονται στα παραπάνω σχήματα).

Πρέπει να σημειωθεί ότι για διαφορετικές τιμές των συντελεστών γάστρας C_{BA} και C_{BF} από αυτές που προβλέπονται από τις οικογένειες νομέων γίνεται γραμμική παρεμβολή. Επίσης για διαφορετικές τιμές του λόγου επί τοις εκατό της επιφάνειας του βολβού στην πρωραία κάθετο προς την επιφάνεια της μέσης τομής του πλοίου από αυτές που προβλέπονται από τις οικογένειες νομέων (ακέραιος δείκτης του χαρακτήρα B) γίνεται γραμμική παρεμβολή.

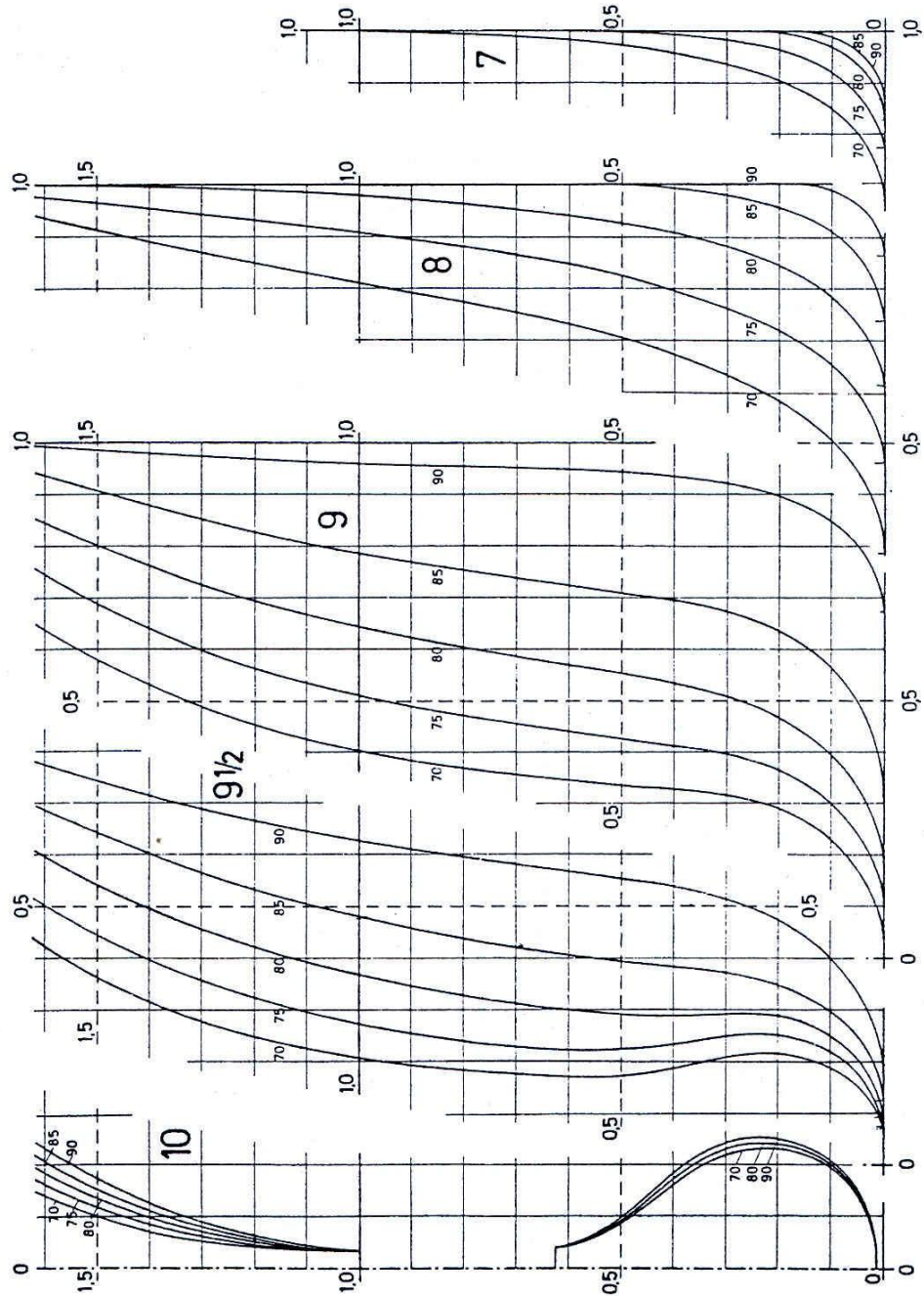
Όλες οι αδιάστατες συντεταγμένες των προφίλ πρύμνης , πλώρης και των οικογενειών νομέων διαβάζονται από το αρχείο εισόδου INPUT_DATA.xls .

Τα σκαριφήματα των οικογενειών νομέων B και C που θα χρησιμοποιηθούν φαίνονται παρακάτω :



ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΙ ΝΟΜΕΙΣ ΠΡΩΡΑΣ ΜΟΡΦΗΣ Β (ΒΟΛΒΟΕΙΔΗΣ ΠΡΩΡΑ).
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΒΟΛΒΟΥ ΣΤΟ F.P. 5% A_M .

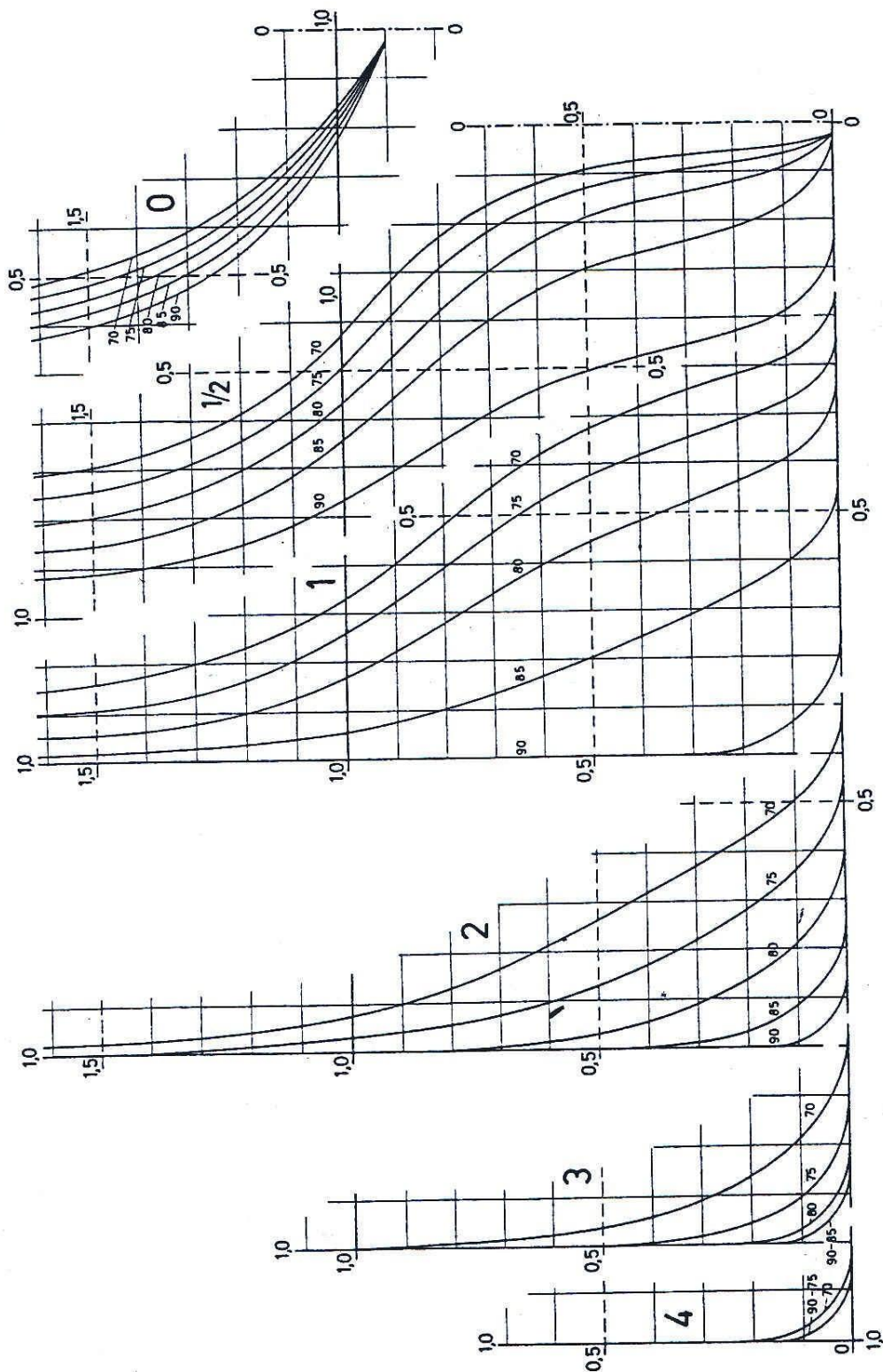
$C_M = 0.995, C_{BF} = 0.70, 0.75, 0.80, 0.85, 0.90$



ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΙ ΝΟΜΕΙΣ ΠΡΩΡΑΣ ΜΟΡΦΗΣ Β (ΒΟΛΒΟΕΙΔΗΣ ΠΡΩΡΑ).
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΒΟΛΒΟΥ ΣΤΟ F.P. 10% A_M.

$$C_M = 0.995, \quad C_{BF} = 0.70, 0.75, 0.80, 0.85, 0.90$$

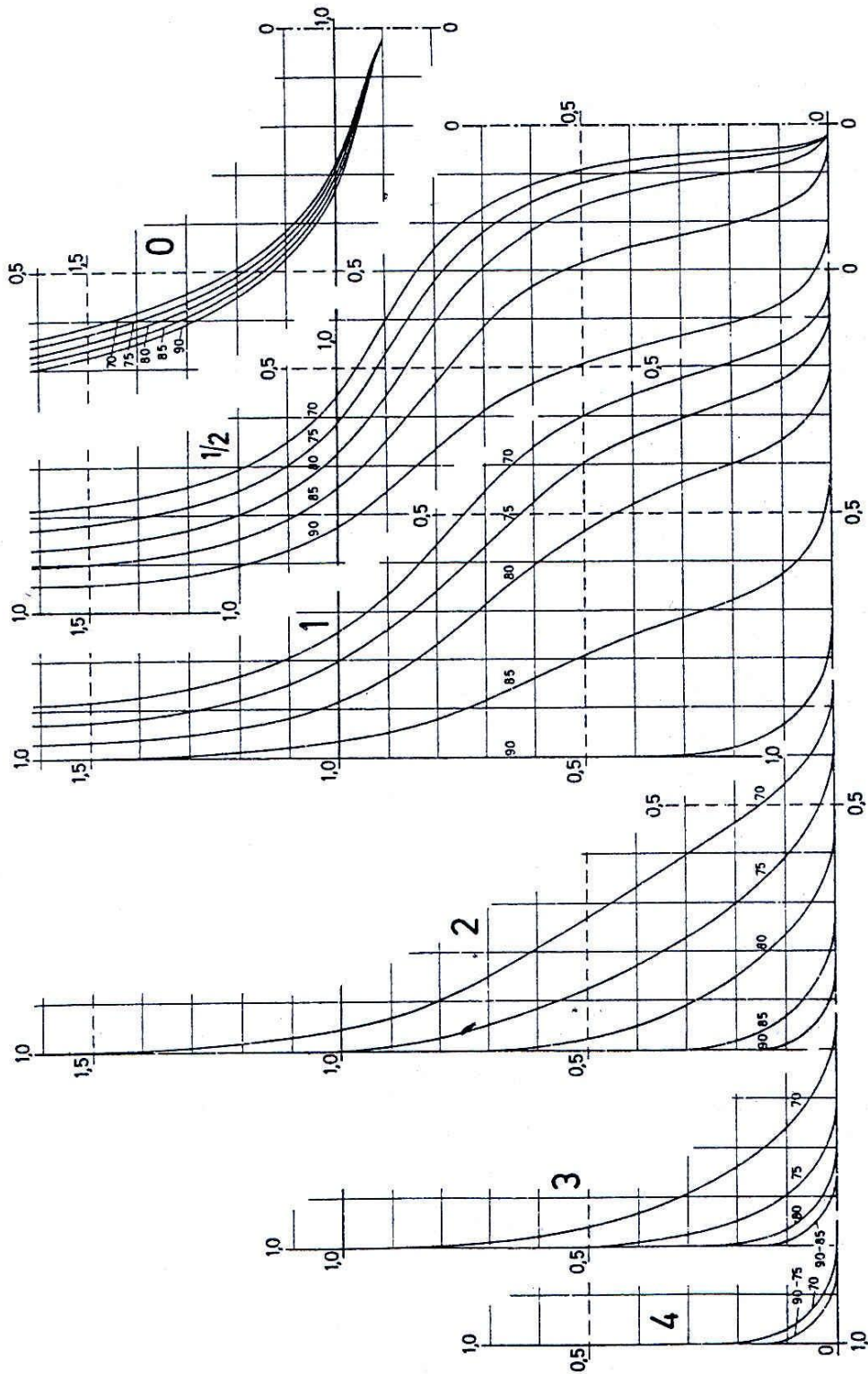
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑΣ ΝΟΜΕΩΝ CA1A



ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΙ ΝΟΜΕΙΣ ΠΥΡΜΝΗΣ ΜΟΡΦΗΣ C (ΠΥΡΜΝΗ ΑΒΑΚΟΣ).

$C_M = 0.995$, $C_{BA} = 0.70, 0.75, 0.80, 0.95, 0.90$

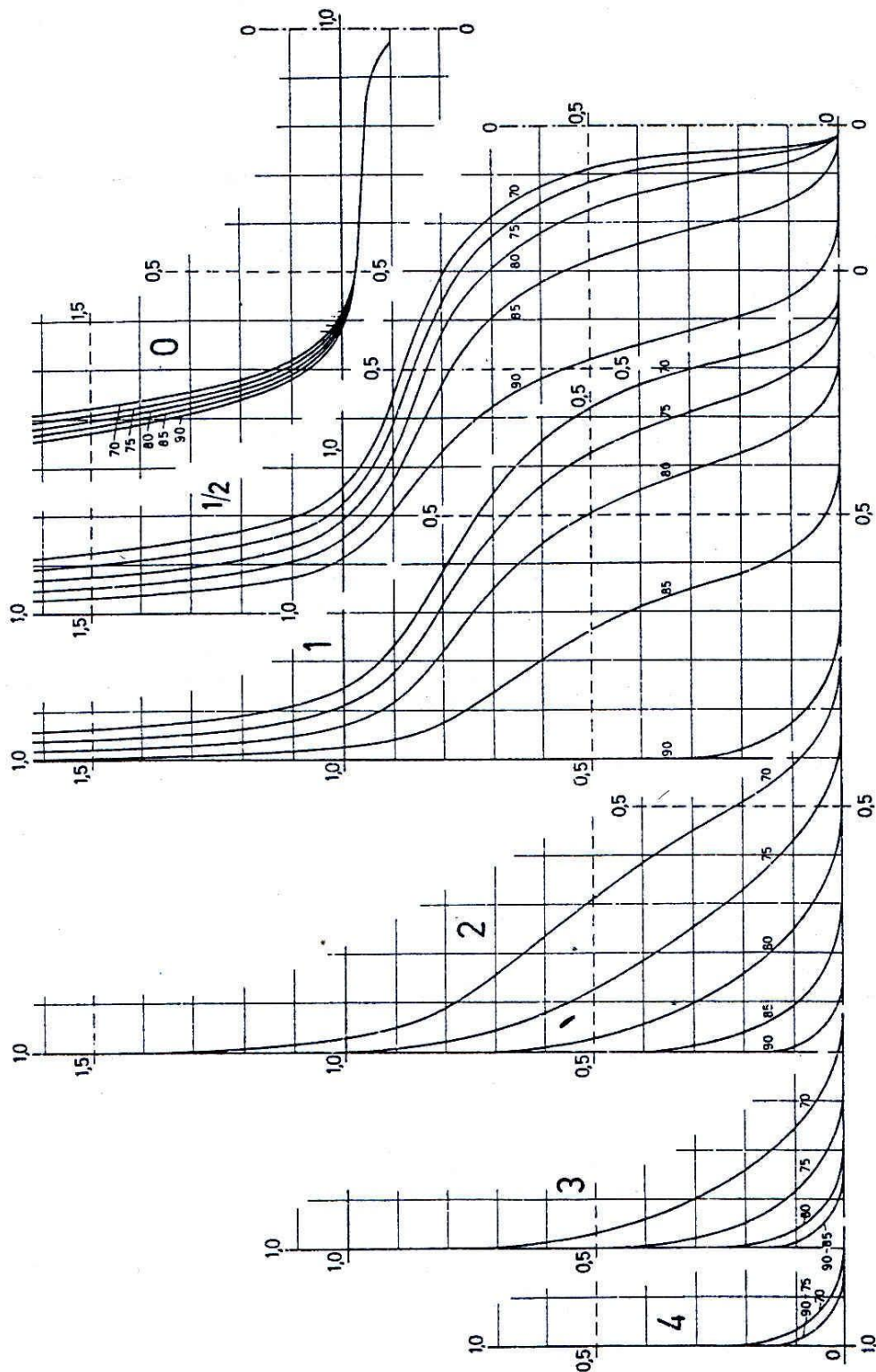
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑΣ ΝΟΜΕΩΝ CB1A



ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΙ ΝΟΜΕΙΣ ΠΥΡΜΝΗΣ ΜΟΡΦΗΣ C (ΠΥΡΜΝΗ ΑΒΑΚΟΣ).

$C_M = 0.995, C_{BA} = 0.70, 0.75, 0.80, 0.85, 0.90$

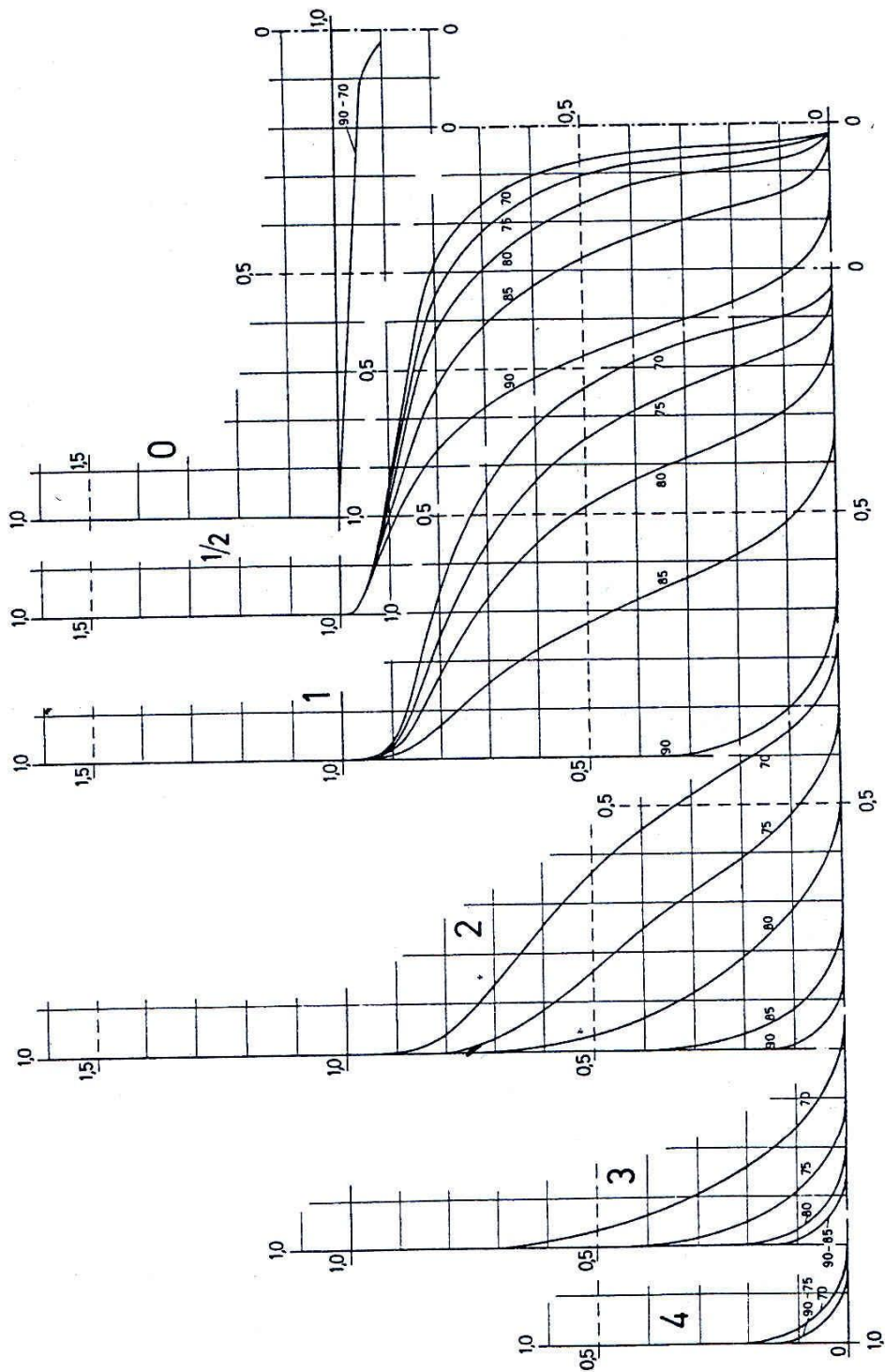
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑΣ ΝΟΜΕΩΝ Cc1A



ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΙ ΝΟΜΕΙΣ ΠΥΡΜΝΗΣ ΜΟΡΦΗΣ C (ΠΥΡΜΝΗ ΑΒΑΚΟΣ).

$C_M = 0.995, C_{BA} = 0.70, 0.75, 0.80, 0.85, 0.90$

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑΣ ΝΟΜΕΩΝ Cd1A



ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΙ ΝΟΜΕΙΣ ΠΥΡΜΝΗΣ ΜΟΡΦΗΣ C (ΠΥΡΜΝΗ ΑΒΑΚΟΣ).

$C_M = 0.995, C_{BA} = 0.70, 0.75, 0.80, 0.85, 0.90$

3.5 Αναφορά στις δευτερεύουσες αλλά απαραίτητες υπορουτίνες

(*Secondary but necessary subroutines*)

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει απλή αναφορά στις δευτερεύουσες υπορουτίνες οι οποίες είναι απαραίτητες για την υλοποίηση των διαφόρων λειτουργιών του προγράμματος (εξαγωγή αποτελεσμάτων, οριακές συνθήκες, γραφικό περιβάλλον κλπ).

Επτά (7) υπορουτίνες, αφορούν την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης, την δημιουργία οριακών συνθηκών (άνω και κάτω ορίων των ανεξάρτητων μεταβλητών) , την εξαγωγή διαφόρων στοιχείων και την λειτουργία του γραφικού περιβάλλοντος (GUI). Πιο συγκεκριμένα :

- 1) INPUT.m : Υπορουτίνα η οποία διαβάζει τα διάφορα δεδομένα από το αρχείο εισόδου INPUT_DATA.xls και τα εισάγει στο πρόγραμμα MOGA_Optimization_Tankers
- 2) Output.m : Εξαγωγή αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης και δημιουργία αρχείου «Final_Opt_Results.xls». Σε αυτή την υπορουτίνα εξάγεται το Pareto front των design που υπολογίστηκαν καθώς και το σύνολο των design που δημιουργήθηκαν από τον γενετικό αλγόριθμο. Επίσης δημιουργούνται γραφικές παραστάσεις των τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων ανά δυο για όλα τα παραχθέντα designs και για τα designs του Pareto front.
- 3) Detailed_Output.m : Υπορουτίνα στην οποία γίνεται εξαγωγή περισσότερο λεπτομερών αποτελεσμάτων για ένα συγκεκριμένο design του Pareto front το οποίο καθορίζεται από το χρήστη σε αντίστοιχη επιλογή που υπάρχει στο γραφικό περιβάλλον του προγράμματος και δημιουργία του αρχείου «Detailed_Info_Output.xls».
- 4) Sizebounds.m : Υπορουτίνα στην οποία γίνεται η δημιουργία κάτω και άνω ορίων για τις ανεξάρτητες μεταβλητές ανάλογα με την κατηγορία tanker (Handymax έως ULCC) η οποία καθορίζεται από το χρήστη σε αντίστοιχη επιλογή που υπάρχει στο γραφικό περιβάλλον του προγράμματος
- 5) MOGA_Optimization_Tankers.m : Υπορουτίνα στην οποία γίνεται η υλοποίηση του γραφικού περιβάλλοντος σε συνδυασμό με το MOGA_Optimization_Tankers.fig.

- 6) Generate Plots.m : Υπορουτίνα η οποία παράγει τις διάφορες γραφικές παραστάσεις που ζητούνται μέσω του γραφικού περιβάλλοντος του προγράμματος MOGA_Optimization_Tankers.m

- 7) Plot Hull Lines.m : Υπορουτίνα η οποία παράγει (μέσω αντίστοιχης επιλογής στο γραφικό περιβάλλον του προγράμματος MOGA_Optimization_Tankers) ένα τρισδιάστατο σχέδιο γραμμών της γάστρας του design για το οποίο έχουμε ήδη δημιουργήσει το αρχείο offsets.txt μέσω της υπορουτίνας Hull_offsets.m

Τέλος υπάρχουν άλλες 4 υπορουτίνες απαραίτητες για την ορθή λειτουργία του προγράμματος η χρήση των οποίων δεν αφορά την βελτιστοποίηση. Πιο συγκεκριμένα αυτές είναι :

- 1) closeGUI.m
- 2) LOADLINE_called_by_Output.m
- 3) Showinfowindow.m
- 4) Showinfowindow2.m

Επίσης χρησιμοποιείται το αρχείο «**optimproblem.mat**» το οποίο ορίζει τις αρχικές (default) επιλογές για την βελτιστοποίηση, το αρχείο «**INPUT_DATA.xls**» το οποίο είναι το αρχείο εισόδου δεδομένων στο πρόγραμμα και τα αρχεία εξόδου «**Final_Opt-Results.xls**» και «**Detailed_Info_Output**» στα οποία γίνεται η εξαγωγή των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης. Τέλος στο αρχείο «**offsets.txt**» τυπώνονται οι συντεταγμένες (x-y-z) των σημείων για την δημιουργία του σχεδίου ναυπηγικών γραμμών της γάστρας.

3.6 Σύνοψη του συνόλου των υπορουτινών του προγράμματος

MOGA_Optimization_Tankers

Συνοψίζοντας μπορούμε να παραθέσουμε μια λίστα με το σύνολο των απαραίτητων για την ορθή λειτουργία του προγράμματος MOGA_Optimization_Tankers υπορουτινών και αρχείων :

Βασικές υπορουτίνες

- 1) Initial_Values_Calculation.m
- 2) SCHNEEKLUTH_WATSON.m
- 3) MullerKoster.m
- 4) Wm.m
- 5) Wot.m
- 6) HOLTROP.m
- 7) LOADLINE.m
- 8) Stability.m
- 9) DWTanalysis.m
- 10) Volumes.m
- 11) Build_Cost.m
- 12) Annual_Cost.m
- 13) RFR.m
- 14) Energy_Efficiency_Design_Index.m
- 15) OPTIMIZER.m
- 16) Hull_offsets.m

Δευτερεύουσες υπορουτίνες

- 1) INPUT.m
- 2) Output.m
- 3) Detailed_Output.m
- 4) Sizebounds.m
- 5) MOGA_Optimization_Tankers.m
- 6) MOGA_Optimization_Tankers.fig
- 7) Generate_Plots.m
- 8) Plot_Hull_Lines.m
- 9) closeGUI.m
- 10) LOADLINE_called_by_Output.m
- 11) Showinfowindow.m
- 12) Showinfowindow2.m

Απαραίτητα αρχεία

- 1) INPUT_DATA.xls
- 2) Final_Opt_Results.xls
- 3) Detailed_Info_Output.xls
- 4) Optimproblem.mat
- 5) offsets.txt

Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η διαδικασία εισαγωγής δεδομένων, εκτέλεσης της βελτιστοποίησης και εξαγωγής των διαφόρων αποτελεσμάτων μέσω του γραφικού περιβάλλοντος του προγράμματος MOGA_Optimization_Tankers το οποίο αναπτύχτηκε σε περιβάλλον Matlab.

4

Τα αρχεία εισόδου, εξόδου και το γραφικό περιβάλλον του προγράμματος MOGA_Optimization_Tankers. (Input, Output files and Graphical User Interface of MOGA_Optimization_Tankers Program).

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν :

- 1) Το αρχείο εισόδου (Input file) INPUT_DATA.xls το οποίο χρησιμοποιείται για την εισαγωγή δεδομένων στο πρόγραμμα MOGA_Optimization_Tankers
- 2) Το γραφικό περιβάλλον και ο τρόπος χρήσης του προγράμματος MOGA_Optimization_Tankers
- 3) Τα διάφορα αρχεία εξόδου (Output files) που παράγει το πρόγραμμα MOGA_Optimization_Tankers.

4.1 Το αρχείο εισόδου INPUT_DATA.xls

Από το αρχείο INPUT_DATA.xls το οποίο είναι τύπου Microsoft Excel Spreadsheet το πρόγραμμα MOGA_Optimization_Tankers διαβάζει τις επιλογές και τα δεδομένα που έχει την δυνατότητα να ορίσει ο χρήστης.

Το αρχείο αυτό είναι «χωρισμένο» σε 4 μέρη – ενότητες :

- 1) General Data : Περιέχει ρυθμίσεις που έχει τη δυνατότητα να κάνει ο χρήστης και αφορούν γενικότερα στοιχεία του προβλήματος (σταθερές, μεταβλητές έλεγχου ροής κτλ)
- 2) Ship Data : Περιέχει ρυθμίσεις που έχει τη δυνατότητα να κάνει ο χρήστης και αφορούν οικονομοτεχνικά στοιχεία του πλοίου
- 3) Required Freight Rate (RFR) Data : Περιέχει ρυθμίσεις που έχει τη δυνατότητα να κάνει ο χρήστης και αφορούν οικονομικά στοιχεία απαραίτητα για τον υπολογισμό του Ελάχιστου Απαιτούμενου Ναύλου. (RFR)
- 4) Load Line Data: Περιέχει ρυθμίσεις που έχει τη δυνατότητα να κάνει ο χρήστης και αφορούν δυο κατασκευαστικά στοιχεία του πλοίου που επηρεάζουν τους υπολογισμούς της γραμμής φόρτωσης και είναι το πάχος του ελάσματος του κύριου καταστρώματος και το πάχος τυχόν ξύλινης επενδύσεως του κύριου καταστρώματος.

General Data :

GENERAL DATA		
Constants		
Water density :		
$\rho =$	1025,8700000	kg/m ³
Kinematic viscosity :		
$\nu =$	0,0000012	m ² /s
Gravity acceleration :		
$g =$	9,8100000	m/s ²
$\rho_a =$	101300,00	N/m ² = Pascal
$\rho_v =$	1700,00	N/m ² = Pascal
User Decision variables for :		
Machinery weight:		
Type 0 to take lower values from Machinery coefficients data table, 1 for upper values or 2 for median values		
	0	
Type 1 for slow speed diesel engines or 2 for medium speed diesel engines'		
	1	
Type 0 to take lower value from C_MD coefficient, 1 for upper value or 2 for median value		
	0	
Outfitting weight:		
Type 0 to take lower values from Strohbusch coefficients data table, 1 for upper values or 2 for median values		
	0	
Centres of Gravity		
Type 0 for lower values of KG and LCG calculation, 2 for upper values and 1 for median values		
	1	
Deadweight Analysis		
Type 0 for lower available value of reserve coefficient, 1 for median value or 2 for upper value		
	0	
Main Engines Fuel		
1 for Diesel/Gas Oil, 2 for Light Fuel Oil(LFO), 3 for Heavy Fuel Oil(HFO), 4 for Liquified Petroleum Gas(LPG), 5 for Liquified Natural Gas(LNG)		
	3	
Auxiliary Engines Fuel (ELECTRIC MOTOR GENERATORS)		
1 for Diesel/Gas Oil, 2 for Light Fuel Oil(LFO), 3 for Heavy Fuel Oil(HFO), 4 for Liquified Petroleum Gas(LPG), 5 for Liquified Natural Gas(LNG)		
	2	

Vessel Ice class type		
1 for IC, 2 for IB, 3 for IA, 4 for IA Super, 5 for NON-ICE CLASS		
	5	
Limitation on DWT		
1 if no limitation exists, 2 for technical/regulatory limitation		
	1	
STERN sections type C formdata offsets (angle of stern)		
1 for type A angle, 2 for type B angle, 3 for type C angle, 4 for type D angle(vertical stern)		
	4	
Steel Weight Calculation Method		
1 forSchneekluth method, 2 for Watson method		
	2	
Main Engine Fuel Oil Specific Weight [tons / m³] :		
Fuel S.G =	0,94	tons / m ³
Main Engine Lubricating Oil Specific Weight [tons / m³] :		
Lub S.G =	0,9	tons / m ³
Diesel Oil Specific Weight [tons / m³] :		
Diesel S.G =	0,85	tons / m ³
Cargo Specific Weight [tons / m³] :		
Cargo S.G =	0,87	tons / m ³

Σε αυτή την ενότητα ο χρήστης ορίζει διάφορες σταθερές τιμές και μεταβλητές απόφασης – ελέγχου ροής (όλα τα πεδία πράσινου χρώματος).

Ship Data :

SHIP DATA		
INDEPENDENT VARIABLES		
L_{BP} / B	6,5	<i>m</i>
B / T	2,6	<i>m</i>
L / D	13	<i>m</i>
$L / V^{1/3}$	5,25	<i>m</i>
C_B	0,857	
S_A	1	<i>m</i>
S_F	1	<i>m</i>
b	0,94	<i>m</i>
A_{BT}	116	m^2
$h_B =$	7,5	<i>m</i>
$A_T [m^2] =$	0	m^2
DWT	119000,00	<i>tons</i>
DEPENDENT VARIABLES		
back	0	1 if back exists 0 if not
poop	1	1 if poop exists 0 if not
b1	171	gr/kWh
bgen	190	gr/kWh
η_E	0,85	efficiency of generators (Auxiliary engines)
Crew	25	persons
weight/person	75	kg/person
weight/luggage	60	kg/luggage
weight_provision/manday	16	kg/manday
weight_water_drink/manday	20	kg/manday
weight_water_clean/manday	200	kg/manday
constant_weights	200	tons
miscellaneous_weights (constant)	118,3	tons

INPUT_MULLER_KOSTER

DWTinput

Type 0 for superstructures data calculation from MOGA_Optimization_Tankers OR type 1 to import superstructures data from the tables below (any other value makes program to take values from the tables below :	0				
Superstructures Data					
Superstructure 1					
Θεση τμηματος υπερστεγασματος	I	II	III	IV	Οιακιστηριο
Ao (m ²)	434,76	406,83	386,05	429,26	224,32
Au(m ²)	360,31	361,22	363,96	357,62	194,11
h(m)	2,8	2,8	2,8	2,8	2,77
l (m)	79,06	65,81	76,89	76,91	58,03
L_DH (m)	13,7	13,8	13,75	13,74	12,94
Superstructure 2					
Θεση τμηματος υπερστεγασματος	I	II	III	IV	Οιακιστηριο
Ao (m ²)	260,1	249,7	145,41	26,57	20,8
Au(m ²)	260,1	249,7	145,41	144,66	26,57
h(m)	3,92	2,5	3,15	3,8	5
l (m)	80,29	71,78	48,18	69,91	19,6
L_DH (m)	9,7	9,7	9,7	9,7	5,15
Winch houses and back, poop Data					
	Winch House 1	Winch House 2			
Max lifting weight (tons)	10	10			
Ao (m ²)	3,3979	1,7671			
Au(m ²)	3,3979	1,7671			
h(m)	5	2,5			
Back		Poop			
Length (m)	0	Length (m)	16,6		
Height (m)	0	Height (m)	2,5		

Build Costs DATA					
Steel price	1100	\$/ton	STEEL STRUCTURE		
Waste	12,5	%			
Man hour price	55	\$/manhour			
Makings Cost/Total Outfitting Cost	0,82		OUTFITTING		
Engine Cost	600	\$/kW	MACHINERY COST		
Reserve	20	%			
Makings Cost/Total Machinery Cost	0,85				
Annual Service Costs DATA					
1 year =	365	days			
1 day =	24	hours			
Total maneuvering time at departure and arrival ports	8	hours			
Total load-unload time at departure and arrival ports	72	hours			
Total repair days per year	30	days/year			
Cosnumables prices					
FUEL OIL	400	\$/ton			
DIESEL OIL	700	\$/ton			
LUB OIL	1000	\$/ton			
FRESH WATER	1	\$/ton			
Other expenses					
Food	16	\$/person/day			
	14	payment months/year (2 months bonus !)			
Salaries	2000	\$/month/person (mesos oros msthwn)			
Port approaches per round trip	2				
EXTRA DATA NEEDED BY HOLTROP METHOD					
	Wetted Area of Appendages m ² :				
Rudder behind Skeg	0				
Rudder behind Stern	15				
Twin-Screw Balance Rudders	0				
Shaft brackets	8				
Skeg	0				
Strut bossings	0				
Hull bossings	0				
Shafts	10				
Stabilizer fins	10				
Dome	0				
Bilge keels	7				
TOTAL	50				

		Decision (0 for lower values, 1 for median, 2 for upper values of $1+k_2$ factor for appendage resistance in Holtrop Method)				
		0				
	$C_{stem} =$	10				
	Z [number of propeller blades] =	4				
	K_{test} (for Keller's formula) =	0	0 for single-screw ships			
			1 for twin-screw ships			
	Shaft Efficiency [η_s] =	0,99				

Σε αυτή την ενότητα ο χρήστης ορίζει διάφορα απαιτούμενα στοιχεία τα οποία αφορούν :

- 1) Αρχικές τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών (διάνυσμα σχεδίασης) (Ο ορισμός των τιμών αυτών δεν είναι αναγκαίος γιατί κατά την βελτιστοποίηση καθώς ο γενετικός αλγόριθμος δημιουργεί από μονός του πληθυσμούς από υποψήφια διανύσματα σχεδίασης. Σε περίπτωση όμως που θέλουμε απλά να κάνουμε μια εφαρμογή όλου του κώδικα για ένα συγκεκριμένο και γνωστών χαρακτηριστικών πλοίο μπορούμε να ορίσουμε τις τιμές αυτές)
- 2) Τιμές των εξαρτημένων μεταβλητών οι οποίες χρησιμοποιούνται κατά την διάρκεια της βελτιστοποίησης
- 3) Χαρακτηριστικά υπερκατασκευών / υπερστεγασμάτων, βαρέων φορτωτήρων, πρόστεγου και μεσόστεγου καθώς και επιλογή οι υπερκατασκευές / υπερστεγάσματα να υπολογιστούν από το ίδιο το πρόγραμμα.
- 4) Οικονομικά δεδομένα για τον υπολογισμό του συνολικού κόστους κατασκευής του πλοίου
- 5) Οικονομικά δεδομένα για τον υπολογισμό του συνολικού ετήσιου κόστους εκμετάλλευσης του πλοίου.
- 6) Δεδομένα τα οποία αφορούν και χρησιμοποιούνται από την μέθοδο υπολογισμού της ολικής αντίστασης του πλοίου, Holtrop.

Οι τιμές όλων των πεδίων πράσινου χρώματος και εδώ καθορίζονται από το χρήστη

Required Freight Rate (RFR) Data:

Required Freight Rate (RFR) DATA			
Loan amount	60	%	of Build Cost
Owner's Capital	40	%	of Build Cost
Life of ship	20	years	
Return of investment capital	12	%	
Scrap value of ship	12	%	of Build Cost
Loan interest	8	%	

Σε αυτή την ενότητα ο χρήστης ορίζει (πράσινα πεδία) διάφορα στοιχεία που αφορούν το ύψος του οικονομικού δανείου, τον τόκο και το κεφάλαιο του πλοιοκτήτη για την ναυπήγηση του πλοίου, την διάρκεια ζωής του πλοίου, την προσδοκώμενη απόδοση του επενδεδυμένου κεφαλαίου και την αξία scrap (προς καταστροφή – ανακύκλωση) του πλοίου.

Load Line Data:

Load Line Data			
Plate thickness of main deck	$t_y =$	18	mm
Thickness of wooden tile of main	$t_x =$	0	mm

Σε αυτή την ενότητα ο χρήστης ορίζει (πράσινα πεδία) δύο στοιχεία που αφορούν δυο κατασκευαστικά στοιχεία του πλοίου που επηρεάζουν τους υπολογισμούς της γραμμής φόρτωσης και είναι το πάχος του ελάσματος του κύριου καταστρώματος και το πάχος τυχόν ξύλινης επενδύσεως του κύριου καταστρώματος.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Σημειώνεται ότι στο αρχείο INPUT_DATA.xls υπάρχουν και δεδομένα που αφορούν την υλοποίηση της μεθόδου της συστηματικής σειράς FORMDATA αλλά αυτά δεν καθορίζονται από τον χρήστη.

4.2 Το γραφικό περιβάλλον και ο τρόπος χρήσης του προγράμματος MOGA_Optimization_Tankers.

Στα παρακάτω γραφήματα παρουσιάζεται η διαδικασία εισαγωγής δεδομένων, εκτέλεσης της βελτιστοποίησης και εξαγωγής των διαφόρων αποτελεσμάτων μέσω του γραφικού περιβάλλοντος του προγράμματος MOGA_Optimization_Tankers.

Γραφικό περιβάλλον (Graphical User Interface – GUI) του προγράμματος MOGA Optimization Tankers :

The screenshot displays the MOGA Optimization Tankers GUI, which is organized into three main functional areas:

- Pre-Optimization:** This section allows users to specify an Excel input file, import data, and select an oil tanker DWT size category (Coastal, Small, Handysize, Handymax, Panamax, Aframax, Suezmax, VLCC, ULCC). It also includes fields for specific DWT requirements and service parameters like speed and range.
- Post-Optimization:** This section is used to export optimization results, save output files, and generate hull offsets for a specific Pareto design. It includes fields for the number of Pareto designs and the specific design number.
- Generate Plots:** This section provides options to generate various plots such as Total Generations vs Pareto Front Plots, Lightship - Powering, Powering - Annual Cost, Lightship - Build Cost, Payload - RFR, and Build Cost - Annual Cost. It also includes a section for generating hull lines plans.

The interface features a 'Start Optimization Tool' button, a 'Clear All' button, and a 'Message Window' at the bottom.

Το γραφικό περιβάλλον του προγράμματος MOGA_Optimization_Tankers χωρίζεται σε τρεις ενότητες : Pre-Optimization , Post-Optimization και Generate Plots οι οποίες περιέχουν λειτουργίες για πριν την ολοκλήρωση της βελτιστοποίησης , μετά την ολοκλήρωση της βελτιστοποίησης και τέλος την δημιουργία γραφημάτων, αντίστοιχα.

Καθορισμός της θέσης στο δίσκο του αρχείου εισόδου "INPUT_DATA.xls"

Πατάμε το κουμπί «Browse» και στο παράθυρο που εμφανίζεται καθορίζουμε την θέση στο δίσκο του αρχείου εισόδου.

MOGA_Optimization_Tankers

Multiobjective Genetic Algorithm Ship Design Optimization (Tankers)

Pre-Optimization

Specify the excel (.xls) input data file : **Browse**

Press to import necessary data to optimization program : **IMPORT DATA**

Data Importing Status :

Press the appropriate button once to select oil tanker DWT size category that will be used during the optimization procedure or set specific DWT requirement :

Coastal **Small** **Handysize** **Handymax** **Panamax**

Aframax **Suezmax** **VLCC** **ULCC**

Type specific DWT requirement [tons] :

Type accepted deviation from DWT requirement [tons] : +/-

Oil Tanker Size Category Selected : **Clear Size Selection**

Type required service speed [Knots] : **Clear Speed**

Type required cruising range [nautical miles] : **Clear Range**

Start Optimization Tool

Clear All

Message Window

Post-Optimization

Press to create output excel file with the Optimization Results :

Export Optimization Results

Save Output File in specified directory

Results Exporting Status :

Total number of Pareto designs :

Please type here the number of the specific Pareto design (found in excel output file "Final_Opt_Results.xls") for which you wish to retrieve more detailed information :

Clear Design Number

Export Detailed Information

Save Detailed Output File in specified directory

Detailed Design Results Exporting Status :

Please type here the number of the specific Pareto design (found in excel output file "Final_Opt_Results.xls") for which you wish to generate hull offsets for lines plan :

Clear Design Number

Generate offsets file

Offsets File Generating Status :

Save offsets file in specified directory

Generate Plots

Total Generations vs Pareto Front Plots

Plot Status

Lightship - Powering

Powering - Annual Cost

Lightship - Build Cost

Payload - RFR

Build Cost - Annual Cost

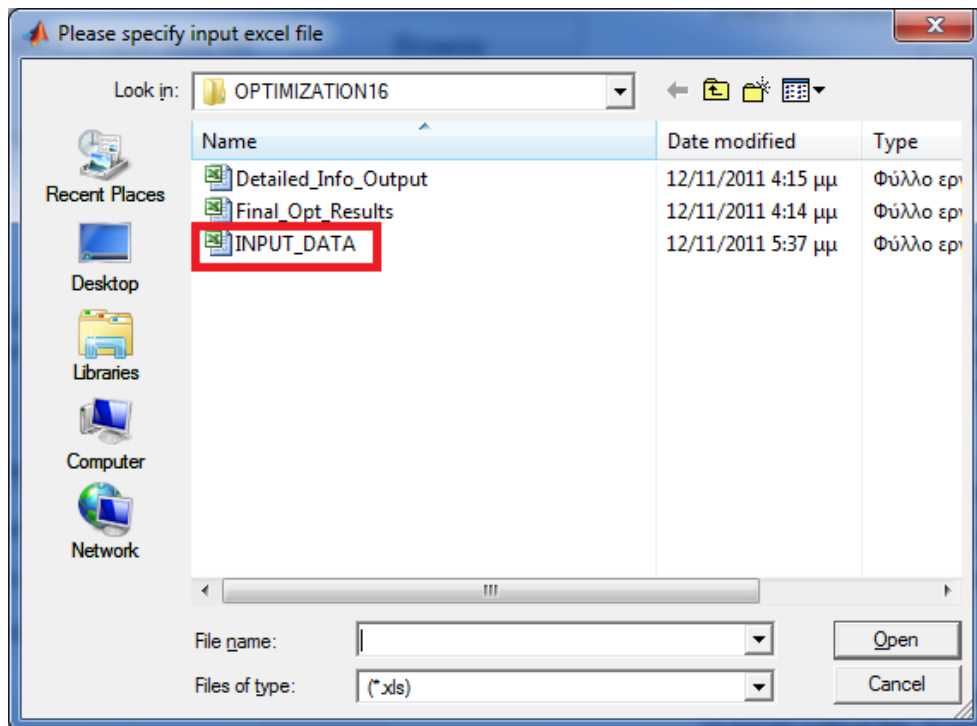
Total Number of Individuals (All Generations) :

Total Number of Pareto Individuals :

Generate Hull Lines Plan

Plot Status

Close All Plots



Αφού καθορίσουμε τη θέση του αρχείου εισόδου στο δίσκο, το επιλεγούμε και πατάμε Open.

Εισαγωγή δεδομένων του αρχείου «INPUT_DATA.xls» στο περιβάλλον του προγράμματος MOGA Optimization Tankers.

MOGA_Optimization_Tankers

Multiobjective Genetic Algorithm Ship Design Optimization (Tankers)

Pre-Optimization

Specify the excel (.xls) input data file :

Press to import necessary data to optimization program :

Data Importing Status :
... IMPORTING DATA ...

Press the appropriate button once to select oil tanker DWT size category that will be used during the optimization procedure or set specific DWT requirement :

Type specific DWT requirement [tons] :

Type accepted deviation from DWT requirement [tons] : +/-

Oil Tanker Size Category Selected :

Type required service speed [Knots] :

Type required cruising range [nautical miles] :

Message Window

Post-Optimization

Press to create output excel file with the Optimization Results :

Results Exporting Status :

Total number of Pareto designs :

Please type here the number of the specific Pareto design (found in excel output file "Final_Opt_Results.xls") for which you wish to retrieve more detailed information :

Detailed Design Results Exporting Status :

Please type here the number of the specific Pareto design (found in excel output file "Final_Opt_Results.xls") for which you wish to generate hull offsets for lines plan :

Generate Plots

Total Generations vs Pareto Front Plots

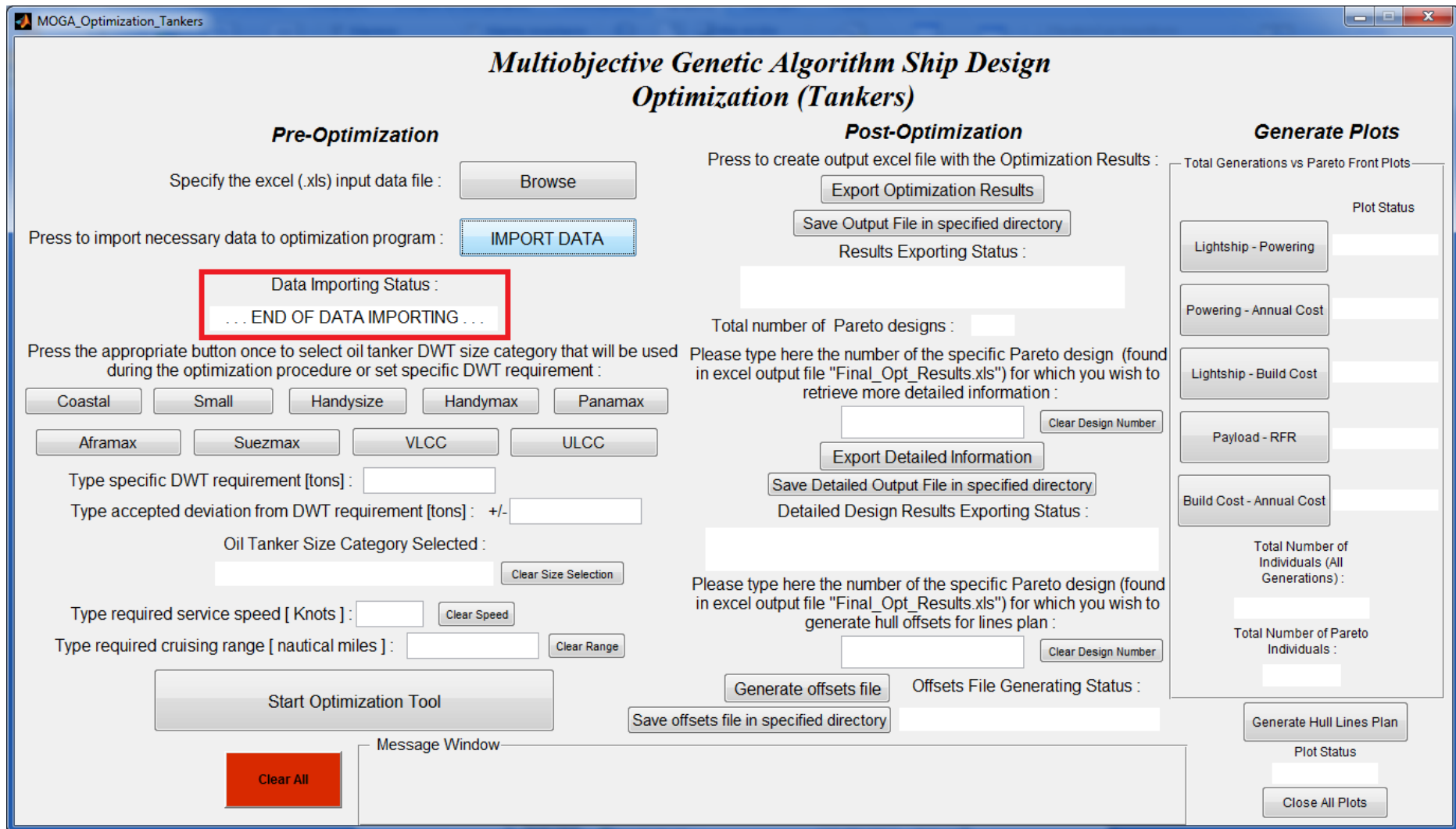
Plot Status

Total Number of Individuals (All Generations) :

Total Number of Pareto Individuals :

Plot Status

Πατώντας το κουμπί IMPORT DATA ξεκινά η εισαγωγή δεδομένων από το αρχείο «INPUT_DATA.xls» στο περιβάλλον του προγράμματος MOGA_Optimization_Tankers. Το πεδίο Data Importing Status μας πληροφορεί ότι η εισαγωγή δεδομένων βρίσκεται σε εξέλιξη. Όταν αυτή η εργασία τελειώσει εμφανίζεται κατάλληλο μήνυμα στο ίδιο πεδίο.



MOGA_Optimization_Tankers

Multiobjective Genetic Algorithm Ship Design Optimization (Tankers)

Pre-Optimization

Specify the excel (.xls) input data file :

Press to import necessary data to optimization program :

Data Importing Status :
... END OF DATA IMPORTING ...

Press the appropriate button once to select oil tanker DWT size category that will be used during the optimization procedure or set specific DWT requirement :

Type specific DWT requirement [tons] :

Type accepted deviation from DWT requirement [tons] : +/-

Oil Tanker Size Category Selected :
Aframax

Type required service speed [Knots] :

Type required cruising range [nautical miles] :

Message Window

Post-Optimization

Press to create output excel file with the Optimization Results :

Results Exporting Status :

Total number of Pareto designs :

Please type here the number of the specific Pareto design (found in excel output file "Final_Opt_Results.xls") for which you wish to retrieve more detailed information :

Detailed Design Results Exporting Status :

Please type here the number of the specific Pareto design (found in excel output file "Final_Opt_Results.xls") for which you wish to generate hull offsets for lines plan :

Offsets File Generating Status :

Generate Plots

Total Generations vs Pareto Front Plots

Plot Status

Total Number of Individuals (All Generations) :

Total Number of Pareto Individuals :

Plot Status

Επιλέγουμε την κατηγορία tanker που μας ενδιαφέρει (Costal, Small, Handysize, Handymax, Panamax, Aframax, Suezmax, VLCC, ULCC) πατώντας το αντίστοιχο κουμπί. Το πεδίο Oil Tanker Size Category Selected μας πληροφορεί για την επιλογή που έχουμε κάνει. Εναλλακτικά μπορούμε να ορίσουμε μια συγκεκριμένη απαίτηση για DWT συμπληρώνοντας το πεδίο Type specific DWT requirement [tons] και εάν θέλουμε να ορίσουμε και μια επιτρεπτή απόκλιση από αυτή την απαίτηση συμπληρώνοντας το πεδίο Type accepted deviation from DWT requirement [tons] (επόμενο γράφημα). Προφανώς δεν γίνεται να ορίσουμε γενικότερη κατηγορία μεγέθους (π.χ. Aframax) και συγκεκριμένη απαίτηση

DWT συγχρόνως. Σε κάθε περίπτωση πατώντας το κουμπί Clear Size Selection αναιρούνται όλες οι μέχρι τώρα επιλογές μας για την κατηγορία μεγέθους.

MOGA_Optimization_Tankers

Multiobjective Genetic Algorithm Ship Design Optimization (Tankers)

Pre-Optimization

Specify the excel (.xls) input data file :

Press to import necessary data to optimization program :

Data Importing Status :
... END OF DATA IMPORTING ...

Press the appropriate button once to select oil tanker DWT size category that will be used during the optimization procedure or set specific DWT requirement :

Type specific DWT requirement [tons] :

Type accepted deviation from DWT requirement [tons] : +/-

Oil Tanker Size Category Selected :
Specific DWT requirement is set

Type required service speed [Knots] :

Type required cruising range [nautical miles] :

Post-Optimization

Press to create output excel file with the Optimization Results :

Results Exporting Status :

Total number of Pareto designs :

Please type here the number of the specific Pareto design (found in excel output file "Final_Opt_Results.xls") for which you wish to retrieve more detailed information :

Detailed Design Results Exporting Status :

Please type here the number of the specific Pareto design (found in excel output file "Final_Opt_Results.xls") for which you wish to generate hull offsets for lines plan :

Offsets File Generating Status :

Generate Plots

Total Generations vs Pareto Front Plots

Plot Status

Total Number of Individuals (All Generations) :

Total Number of Pareto Individuals :

Plot Status

Message Window

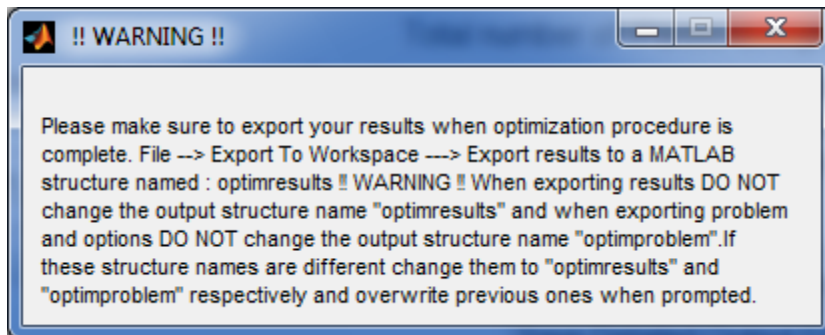
Speed requirement cleared !

Συμπληρώνοντας τα πεδία Type required service speed [Knots] και Type required cruising range [nautical miles] καθορίζουμε τις απαιτήσεις μας για ταχύτητα υπηρεσίας και ακτίνα ενέργειας του πλοίου. Σε αυτό το σημείο έχουμε εισάγει όλα τα απαραίτητα αρχικά δεδομένα και είμαστε έτοιμοι για την εκκίνηση του γραφικού περιβάλλοντος της βελτιστοποίησης (Optimization Tool). Στο Optimization Tool θα καταστρώσουμε το πρόβλημα μας και θα καθορίσουμε τις διάφορες επιλογές της βελτιστοποίησης μέσω του γενετικού αλγορίθμου.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Ο χαρακτήρας κόμμα εφόσον χρειάζεται είναι ‘.’ και όχι ‘,’. Ισχύει για όλα τα πεδία εισαγωγής δεδομένων στο πρόγραμμα!

Εκκίνηση του Optimization Tool.

Πατάμε το κουμπί Start Optimization Tool και προτού ανοίξει το γραφικό περιβάλλον του Optimization Tool, εμφανίζεται το ακόλουθο παράθυρο (επόμενο γράφημα) το οποίο μας πληροφορεί για διάφορες **σημαντικές** λεπτομέρειες που πρέπει να προσέξουμε κατά την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης από το Optimization Tool πίσω στο πρόγραμμα MOGA_Optimization_Tankers (ή Workspace). Μετά από αναμονή λίγων δευτερόλεπτων, ανοίγει το γραφικό περιβάλλον του Optimization Tool.



Σε αυτό το παράθυρο πληροφορούμαστε ότι μετά το τέλος της βελτιστοποίησης πρέπει να εξάγουμε τα αποτελέσματα μας στο πρόγραμμα MOGA_Optimization_Tankers (ή Workspace).

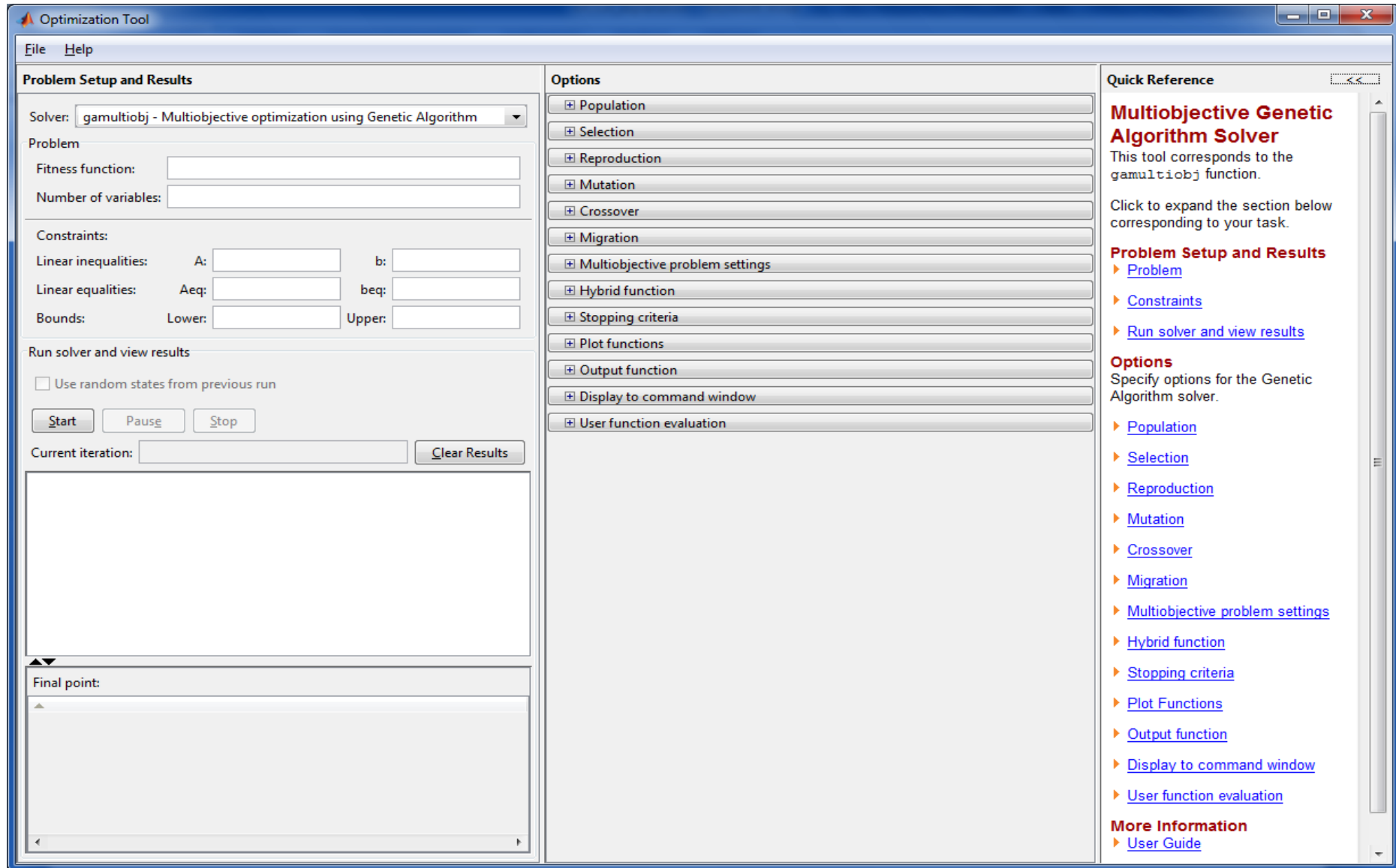
Κατά την εξαγωγή των αποτελεσμάτων **ΔΕΝ** πρέπει να αλλάξουμε τα ονόματα των μεταβλητών «optimproblem» και «optimresults» οι οποίες περιέχουν πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση του προβλήματος και τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης αντίστοιχα.

Σε περίπτωση όπου στα αντίστοιχα πεδία επιλογής ονόματος για τη δημιουργία μεταβλητών οι οποίες θα περιέχουν πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση του προβλήματος και τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης, υπάρχουν διαφορετικά ονόματα από τα «optimproblem» και «optimresults» (λόγω συνήθως της ύπαρξης ονομάτων «optimproblem» και «optimresults» ήδη, από προηγούμενη εκτέλεση βελτιστοποίησης μέσω του Optimization Tool), **πρέπει να τα αλλάξουμε** σε «optimproblem» και «optimresults» και να κάνουμε “overwrite” των ενδεχομένως υπάρχοντων μεταβλητών όταν ρωτηθούμε γι αυτό από κατάλληλο μήνυμα που εμφανίζεται.

(Η διαδικασία θα περιγραφεί και αργότερα με αντίστοιχα γραφήματα.)

Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται το γραφικό περιβάλλον του Optimization Tool.

Γραφικό περιβάλλον του Optimization Tool.



Το Optimization Tool χωρίζεται σε τρεις διαφορετικές ενότητες :

- 1) Problem Setup and Results
- 2) Options
- 3) Quick Reference

Problem Setup and Results

Σε αυτή την ενότητα ορίζουμε :

- Στο πεδίο fitness function, την υπορουτίνα που θα χρησιμοποιηθεί κατά την βελτιστοποίηση προσθέτοντας πριν το όνομα της υπορουτίνας τον χαρακτήρα @.(στην περίπτωση μας η υπορουτίνα αυτή είναι η OPTIMIZER.m οπότε πληκτρολογούμε @OPTIMIZER).
- Στο πεδίο Number of Variables, τον αριθμό των ανεξάρτητων μεταβλητών (στην περίπτωση μας πληκτρολογούμε 12).
- Στο πεδίο Bounds, τα κάτω και άνω όρια των μεταβλητών μας. Στο πεδίο Lower: πληκτρολογούμε το όνομα του πίνακα κάτω ορίων για τις μεταβλητές μας ο οποίος αποτελείται από Number of variables στήλες και μια γραμμή. Στο πεδίο Upper: πληκτρολογούμε το όνομα του πίνακα άνω ορίων για τις μεταβλητές μας ο οποίος αποτελείται από Number of variables στήλες και μια γραμμή.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ : Όλα τα παραπάνω πεδία συμπληρώνονται αυτόματα κατά την εισαγωγή του αρχείου «optimproblem.mat» στο Optimization Tool , η διαδικασία εισαγωγής του οποίου περιγράφεται παρακάτω.

~~~~~  
Τα επόμενα πεδία δεν χρησιμοποιούνται στην περίπτωσή μας αλλά παρατίθενται για λόγους πληρότητας μια σύντομη περιγραφή τους :

- Στο πεδίο Linear inequalities, ορίζουμε τους γραμμικούς ανισοτικούς περιορισμούς που θα ικανοποιούν οι ανεξάρτητες μεταβλητές μας. Οι περιορισμοί τίθενται υπό την μορφή  $A*x \leq b$  όπου A είναι πίνακας με στήλες τους συντελεστές των ανεξάρτητων μεταβλητών (άρα μέγιστος αριθμός στηλών=Number of variables) για κάθε περιορισμό και γραμμές τόσες όσες ο αντίστοιχος αριθμός των περιορισμών που θέτουμε(στο πεδίο A: πληκτρολογούμε το όνομα του πίνακα συντελεστών). X είναι το διάνυσμα των ανεξάρτητων μεταβλητών μας (δεν το ορίζουμε εμείς)και b το διάνυσμα των περιορισμών(στο πεδίο b: πληκτρολογούμε το όνομα του διανύσματος περιορισμών). Για ανισοτικό περιορισμό της μορφής  $A*x \geq b$  αρκεί να πολλαπλασιάσουμε την αντίστοιχη γραμμή του πίνακα A και τον αντίστοιχο ορό του διανύσματος b με -1.
- Στο πεδίο Linear Equalities,ορίζουμε ισοτικούς γραμμικούς περιορισμούς με τον ίδιο τρόπο που περιγράφηκε για τους ανισοτικούς περιορισμούς.(μορφή  $Aeq*x = beq$  )

Με το κουμπί Start ξεκινά η βελτιστοποίηση

Με τα κουμπιά Pause και Stop γίνεται παύση και διακοπή της βελτιστοποίησης αντίστοιχα

Με το κουμπί Clear Results διαγράφονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης που έχουν προκύψει μετά την ολοκλήρωση της ή μετά από διακοπή της μέσω του κουμπιού Stop.

### Options

Σε αυτή την ενότητα ορίζουμε τις επιλογές τις σχετικές με την λειτουργία της βελτιστοποίησης και του γενετικού αλγορίθμου :

Οι επιλογές αυτές χωρίζονται σε 13 κατηγορίες οι οποίες είναι :

- 1) Population
- 2) Selection
- 3) Reproduction
- 4) Mutation
- 5) Crossover
- 6) Migration
- 7) Multiobjective problem settings
- 8) Hybrid function
- 9) Stopping criteria
- 10) Plot functions
- 11) Output function
- 12) Display to command window
- 13) User function evaluation

Πατώντας τον χαρακτήρα + δίπλα από το όνομα της κάθε κατηγορίας εμφανίζονται οι διαθέσιμες ρυθμίσεις που μπορούμε να κάνουμε για την εκάστοτε κατηγορία επιλογών.

**ΣΗΜΕΙΩΣΗ :** Οι ρυθμίσεις αυτές για όλες τις κατηγορίες επιλογών εισάγονται αυτόματα κατά την εισαγωγή του αρχείου «optimproblem.mat» στο Optimization Tool , η διαδικασία εισαγωγής του οποίου περιγράφεται παρακάτω.

**ΣΗΜΕΙΩΣΗ :** Επεξηγήσεις για κάθε κατηγορία επιλογών δεν θα παρατεθούν εδώ γιατί βρίσκονται ενσωματωμένες στο γραφικό περιβάλλον του Optimization Tool στην ενότητα Quick Reference του Optimization Tool.

### Quick Reference

Σε αυτή την ενότητα υπάρχουν επεξηγήσεις για την λειτουργία και το χειρισμό στο σύνολό του, του Optimization Tool.

**Σημείωση :** Μπορούμε να αποκρύψουμε την ενότητα Quick Reference πατώντας το κουμπί << στην άνω δεξιά γωνία.

Σε αυτό το σημείο καλό είναι να γίνει μια αναφορά στον Γενετικό Αλγόριθμο που χρησιμοποιούμε στο Optimization Tool προκειμένου να πραγματοποιήσουμε την βελτιστοποίηση. Το Optimization Tool χρησιμοποιεί έναν Controlled Elitist Γενετικό Αλγόριθμο με επιλογή τουρνουά (η οποία παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 2.7.4.3) ο οποίος είναι μια μικρή παραλλαγή του «Nondominated Sorting Genetic Algorithm II – NSGA-II»). Ο αλγόριθμος λειτουργεί κατά τα γνωστά πάνω σε «πληθυσμούς» από υποψήφια designs στους οποίους εφαρμόζει διάφορες γενετικές διαδικασίες (γενετικοί τελεστές). Ο αρχικός πληθυσμός (εάν χρησιμοποιηθεί η αρχική βασική επιλογή – default option) δημιουργείται με τυχαίο τρόπο με κάθε άτομο βέβαια να ικανοποιεί όλους τους τυχόν περιορισμούς που έχουν τεθεί. Η επομένη γένια (επόμενος πληθυσμός) δημιουργείται χρησιμοποιώντας επιπρόσθετα των βασικών γενετικών τελεστών και μια non-dominated κατάταξη και ένα μέτρο της «απόστασης μεταξύ των ατόμων» (distance measure) στην εκάστοτε επανάληψη.

Μια non-dominated κατάταξη (ή βαθμός) προσδίδεται σε κάθε άτομο χρησιμοποιώντας την σχετική απόδοσή του. Λέμε ότι το άτομο 'p' κυριαρχεί ή dominates το άτομο 'q' (το 'p' έχει μικρότερη κατάταξη από το 'q') εάν το 'p' είναι αυστηρά καλύτερο από το 'q' σε τουλάχιστον ένα κριτήριο και το 'p' δεν είναι χειρότερο από το 'q' σε κανένα κριτήριο. Αυτό είναι το ίδιο με το να λέμε ότι το 'q' κυριαρχείται (dominated ή inferior) από το 'p' ή ότι το 'p' είναι μη κυριαρχούμενο (nondominated ή non-inferior) από το 'q'. Δυο άτομα 'p' και 'q' θεωρούνται ότι έχουν την ίδια κατάταξη εάν κανένα δεν κυριαρχεί το άλλο. Το «μέτρο της απόστασης μεταξύ ατόμων» (distance measure) χρησιμοποιείται για την σύγκριση ατόμων με ίδια κατάταξη. Είναι λοιπόν ένα μέτρο του «πόσο μακριά» είναι ένα άτομο από τα υπόλοιπα άτομα της ίδιας κατάταξης.

Ένας «elitist» Γενετικός Αλγόριθμος (όπως ο NSGA-II) πάντα ευνοεί άτομα με καλύτερη απόδοση (κατάταξη), ενώ ένας «controlled elitist» Γενετικός Αλγόριθμος (αυτός που χρησιμοποιούμε εδώ) ευνοεί επίσης και άτομα τα οποία μπορούν να βοηθήσουν στην αύξηση της ποικιλότητας – ποικιλομορφίας του πληθυσμού ακόμα και αν έχουν χαμηλότερη απόδοση. Είναι πολύ σημαντική η διατήρηση της ποικιλότητας του πληθυσμού για την σύγκλιση σε ένα βέλτιστο Pareto μέτωπο. Αυτό γίνεται ελέγχοντας τα «ελίτ» άτομα (αυτά δηλαδή με την μεγαλύτερη απόδοση) καθώς ο οι πληθυσμοί μέσω του αλγορίθμου εξελίσσονται. Δυο επιλογές 'ParetoFraction' και 'DistanceFcn' χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του «ελιτισμού» (elitism). Η επιλογή 'ParetoFraction' περιορίζει τον αριθμό (πλήθος) των ατόμων του Pareto Front (άτομα «ελίτ» ή elite members) και η επιλογή 'DistanceFcn' βοηθά στην διατήρηση της ποικιλότητας του πληθυσμού καθώς ευνοεί και άτομα τα οποία βρίσκονται σχετικά μακριά από το Pareto Front

## Σύντομη γενική περιγραφή του NSGA-II

Ο αρχικός πληθυσμός δημιουργείται ως συνήθως με τυχαίο τρόπο. Μετά την δημιουργία του, ο πληθυσμός κατατάσσεται με βάση τα dominated και nondominated άτομα σε διάφορα μέτωπα. Το πρώτο μέτωπο (σύνολο ατόμων) περιέχει άτομα τα οποία είναι απολύτως nondominated στον παρόντα πληθυσμό ενώ το δεύτερο μέτωπο περιέχει άτομα τα οποία είναι dominated από τα άτομα του πρώτου μετώπου και ούτω καθεξής (έτσι διάφορα διαδοχικά μέτωπα δημιουργούνται). Σε κάθε άτομο κάθε μετώπου αντιστοιχίζεται μια κατάταξη (rank ) με βάση το μέτωπο στο οποίο ανήκει. Άτομα του πρώτου μετώπου έχουν κατάταξη 1 άτομα του δεύτερου μετώπου έχουν κατάταξη 2 και ούτω καθεξής. Επιπρόσθετα με την κατάταξη μια νέα παράμετρος η οποία καλείται crowding distance υπολογίζεται για κάθε άτομο. Η crowding distance είναι ένα μέτρο του πόσο κοντά ένα άτομο βρίσκεται στους «γείτονες» του. Μεγάλη μέση τιμή της crowding distance συνεπάγεται μεγάλη και καλύτερη ποικιλότητα – ποικιλομορφία του πληθυσμού. Στη συνέχεια γονείς επιλέγονται μέσα από τον πληθυσμό μέσω της μεθόδου δυαδικής επιλογής με τουρνουά και με βάση την κατάταξη και την crowding distance. Ένα άτομο επιλέγεται στο τουρνουά ένα αυτό έχει χαμηλότερη κατάταξη και από τον ανταγωνιστή του ή εάν τύχει να έχουν την ίδια κατάταξη τότε επιλέγεται αυτό με τη μεγαλύτερη crowding distance. Ο επιλεγμένος πλέον πληθυσμός γονέων παράγει παιδιά μέσω των γενετικών τελεστών (crossover, mutation κλπ). Ο νέος πληθυσμός κατατάσσεται ξανά και επιλέγονται πάλι N άτομα όπου N το μέγεθος του πληθυσμού.

## Λεπτομερέστερη περιγραφή του NSGA-II

### 1) Δημιουργία αρχικού πληθυσμού

Δημιουργείται ο αρχικός πληθυσμός με τυχαίο τρόπο και πάντα έτσι ώστε να ισχύουν όλοι οι τυχόν περιορισμοί

### 2) Κατάταξη Non-Domination

Ο αρχικός πληθυσμός κατατάσσεται με βάση την κυριαρχία η μη κάθε ατόμου σε σχέση με το άλλο όπως περιγράφηκε παραπάνω ως εξής :

- Για κάθε άτομο p στον αρχικό πληθυσμό P κάνε τα εξής :
  - Δημιούργησε το σύνολο  $S_p = \emptyset$ . Αυτό το σύνολο θα πληρωθεί με όλα τα άτομα τα οποία κυριαρχούνται από το άτομο p
  - Δημιούργησε τον αριθμό  $n_p = 0$ . Αυτός θα είναι ο αριθμός των ατόμων τα οποία κυριαρχούν το άτομο p.
  - Για κάθε άτομο q μέσα στον πληθυσμό P

**Εάν** p κυριαρχεί το q τότε :

Πρόσθεσε το q στο σύνολο  $S_p$  π.χ.  $S_p = S_p \cup q$

Αλλιώς εάν το  $q$  κυριαρχεί το  $p$  τότε :

Θέσε τον μετρητή κυριαρχίας  $n_p = n_p + 1$

- Εάν  $n_p = 0$  πχ εάν κανένα άτομο δεν κυριαρχεί το  $p$  τότε το  $p$  ανήκει στο πρώτο μέτωπο. Θέσε την κατάταξη του ατόμου  $p$  ίση με 1 πχ  $p_{\text{rank}} = 1$ . Ενημέρωσε το πρώτο μέτωπο προσθέτοντας το άτομο  $p$  σε αυτό π.χ  $F_1 = F_1 \cup p$

- Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε για όλα τα άτομα του αρχικού πληθυσμού  $P$
- Θέσε τον μετρητή μετώπων ίσο με 1 .  $i = 1$
- Εκτέλεσε τα επόμενα όσο το  $i$ -οστό μέτωπο είναι μη κενό πχ  $F_i \neq \emptyset$ 
  - $Q = \emptyset$ . Αυτό είναι το σύνολο των ατόμων του  $(i+1)$ -οστού μετώπου.
  - Για κάθε άτομο  $p$  του μετώπου  $F_i$

Για κάθε άτομο  $q$  του συνόλου  $S_p$  ( $S_p$  είναι το σύνολο των ατόμων κυριαρχούμενων από το  $p$ )

$n_q = n_q + 1$ , ελάττωσε τον μετρητή κυριαρχίας για το άτομο  $q$ .

Εάν  $n_q = 0$  τότε κανένα από τα άτομα των επακολουθούντων μετώπων δεν θα κυριαρχεί το άτομο  $q$ . Επομένως θέσε  $q_{\text{rank}} = i + 1$ . Ενημέρωσε το σύνολο  $Q$  με το άτομο  $q$ . Δηλαδή :  $Q = Q \cup q$

- Αύξησε τον μετρητή μετώπων κατά ένα
- Πλέον το σύνολο  $Q$  είναι το επόμενο μέτωπο και έτσι  $F_i = Q$ .

Αυτός ο αλγόριθμος είναι πιο αποτελεσματικός από τον αρχικό απλό NSGA καθώς κάνει χρήση της πληροφορίας του συνόλου το οποία ένα άτομο κυριαρχεί ( $S_p$ ) και του αριθμού (πλήθος) των ατόμων που κυριαρχούν ένα συγκεκριμένο άτομο ( $n_p$ ).

### 3) Crowding Distance

Όταν ολοκληρωθεί η κατάταξη με βάση την κυριαρχία των διαφόρων ατόμων, λαμβάνει χώρα η crowding distance διαδικασία. Εφόσον τα άτομα επιλέγονται με βάση την κατάταξη τους και την τιμή του crowding distance τους, συνεπάγεται ότι σε όλα τα άτομα θα αποδοθεί μια τιμή crowding distance. Η διαδικασία απόδοσης crowding distance λαμβάνει χώρα για κάθε ένα μέτωπο ξεχωριστά και προφανώς η σύγκριση του crowding distance δυο ατόμων διαφορετικών μετώπων δεν έχει κανένα νόημα. Η απόδοση crowding distance τιμής υπολογίζεται ως εξής :

- Για κάθε μέτωπο  $F_i$ ,  $n$  είναι ο αριθμός (πλήθος) των ατόμων που το απαρτίζουν.
  - Αρχικοποίησε μηδενική τιμή crowding distance για όλα τα άτομα του μετώπου. Δηλαδή,  $F_i(d_j) = 0$ , όπου  $j$  αντιστοιχεί στο  $j$ -οστό άτομο του μετώπου  $F_i$ .
  - Για κάθε αντικειμενική συνάρτηση  $m$

Κατέταξε τα άτομα του μετώπου  $F_i$  με βάση τη αντικειμενική συνάρτηση  $m$ . Π.χ.  $I = \text{sort}(F_i, m)$ .

Θέσε άπειρη τιμή crowding distance στις συνοριακές ακραίες τιμές (boundary values) για κάθε άτομο μέσα στο μέτωπο  $F_i$  π.χ.  $I(d_1) = \infty$  και  $I(d_n) = \infty$

Για  $k = 2$  μέχρι  $(n-1)$

$$I(d_k) = I(d_k) + \frac{I(k+1, m) - I(k-1, m)}{f_m^{\max} - f_m^{\min}}$$

$I(k, m)$  είναι η τιμή της  $m$ -οστής αντικειμενικής συνάρτησης του  $k$ -οστού ατόμου στο  $I$ .

Η βασική ιδέα πίσω από την crowding distance είναι η εύρεση της ευκλείδειας απόστασης μεταξύ δυο ατόμων σε ένα μέτωπο βασισμένη στα  $m$  κριτήρια μέσα σε έναν  $m$ -διάστατο χώρο ( $m$ -dimensional hyper space). Τα άτομα των συνόρων διαλέγονται πάντα καθώς έχουν άπειρη τιμή crowding distance.

#### 4) Επιλογή

Μόλις οι διαδικασίες κατάταξης με βάση την κυριαρχία των διαφόρων ατόμων, και απόδοσης τιμής crowding distance, ολοκληρωθεί για όλο τον πληθυσμό, τότε λαμβάνει χώρα η διαδικασία της επιλογής χρησιμοποιώντας έναν τελεστή σύγκρισης (crowded-comparison-operator)  $\prec_n$ . Η σύγκριση εκτελείται ως εξής βασισμένη σε :

Κατάταξη μη κυριαρχίας  $p_{\text{rank}}$  π.χ. άτομα στο μέτωπο  $F_i$  θα έχουν την κατάταξη τους ως  $p_{\text{rank}} = i$ .

##### (1) Crowding Distance $F_i(d_j)$

- $p \prec_n q$  εάν :

- $P_{\text{rank}} < Q_{\text{rank}}$  .
- και σε περίπτωση που τα  $p$  και  $q$  ανήκουν στο ίδιο μέτωπο  $F_i$  τότε  $F_i(d_p) > F_i(d_q)$  δηλαδή η crowding distance θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη.

Τα άτομα επιλέγονται μέσω της μεθόδου επιλογής δυαδικού τουρνουά (binary tournament) με έναν τελεστή crowded-comparison.

#### 5) Γενετικοί τελεστές

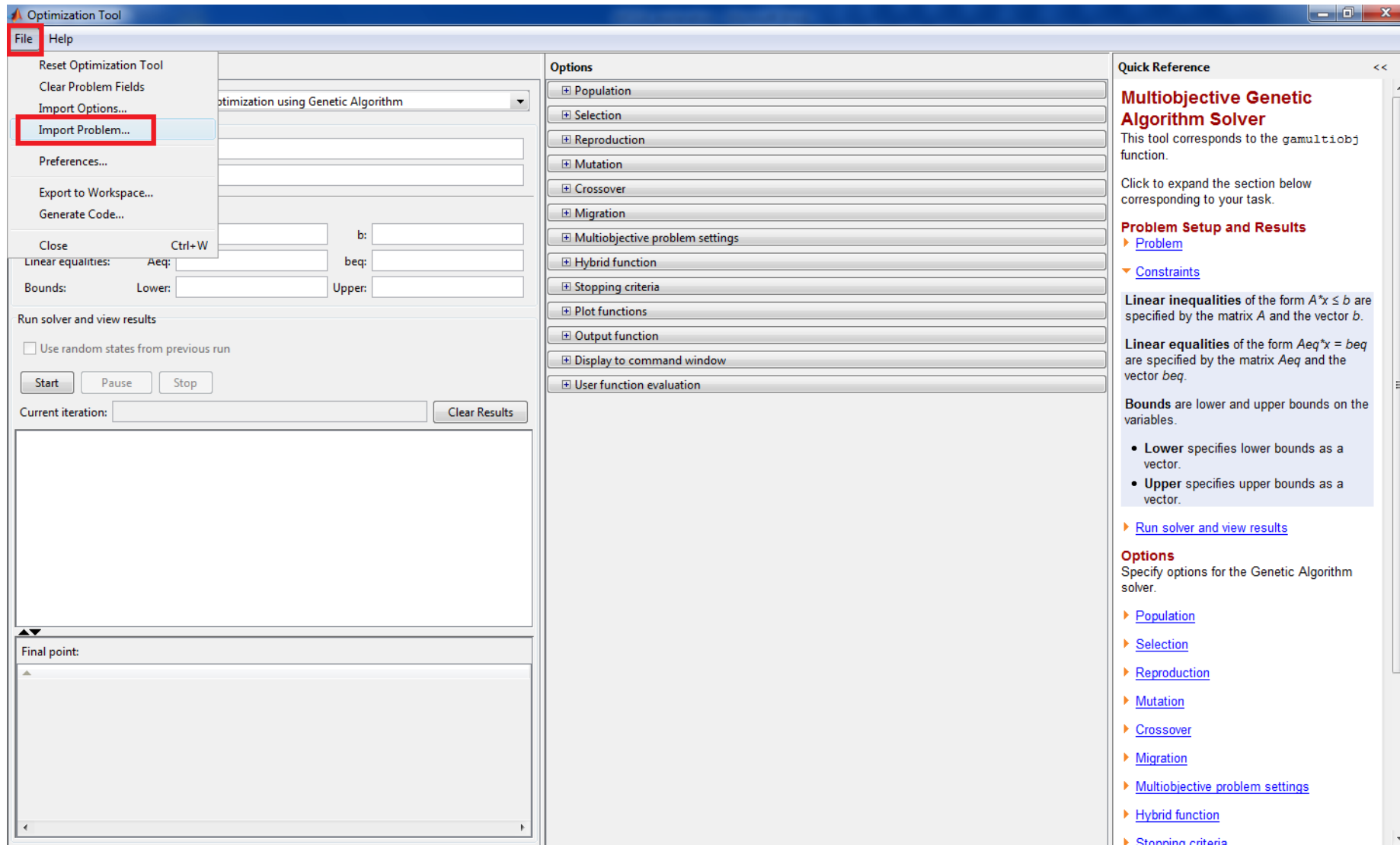
Στη συνέχεια λαμβάνουν χώρα οι γενετικές διαδικασίες (crossover, mutation κλπ) μέσω διαφόρων γενετικών τελεστών (genetic operators) οι οποίοι μπορεί να είναι διαφόρων τύπων παρόμοιων όμως και της ίδιας λογικής συνήθως .

#### 6) Αναπαραγωγή και επιλογή (recombination and selection)

Ο πληθυσμός των παιδιών τώρα συνδυάζεται με την εκάστοτε γενιά και επιλογή λαμβάνει χώρα ώστε να δημιουργηθούν τα άτομα της επόμενης γενιάς. Εφόσον όλα τα προηγούμενα (παλαιότερων γενεών) και τρέχοντα (της εν λόγω γενιάς) καλύτερα άτομα έχουν προστεθεί στον νέο πληθυσμό, η «διαδικασία ελίτ» είναι εγγυημένη. Ο νέος πληθυσμός επανακατατάσσεται με βάση τη μη κυριαρχία. Η νέα γενιά συμπληρώνεται με κάθε μέτωπο διαδοχικά μέχρι το μέγεθος του πληθυσμού να ξεπεράσει το μέγεθος του πληθυσμού που μόλις θα απέλθει. Εάν βάζοντας όλα τα άτομα ενός μετώπου  $F_j$  στον νέο πληθυσμό μας οδηγήσει κατ' ευθείαν στον να ξεπεράσουμε το μέγεθος  $N$  του μόλις απελθόντος προηγούμενου πληθυσμού τότε τα άτομα του μετώπου  $F_j$  επιλέγονται με βάση την τιμή crowding distance με φθίνουσα σειρά μέχρι το μέγεθος του νέου πληθυσμού να γίνει  $N$ . Έτσι η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται και δημιουργούνται οι διαδοχικές γενεές.

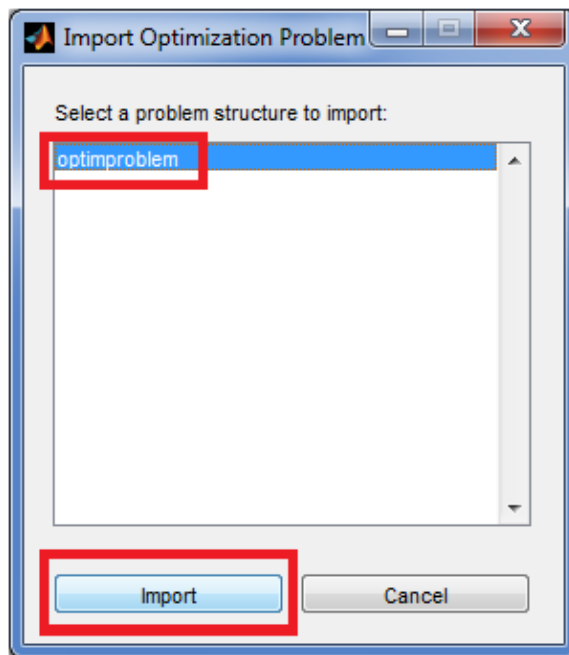
Τώρα μπορούμε να συνεχίσουμε την περιγραφή της διαδικασίας βελτιστοποίησης μέσω του Optimization Tool.

Εισαγωγή του αρχείου «optimproblem.mat» στο Optimization Tool το οποίο ορίζει τις αρχικές (default) επιλογές για την βελτιστοποίηση.



Εδώ γίνεται η εισαγωγή του αρχείου «optimproblem.mat» στο Optimization Tool. Πατάμε File → Import Problem... και στο παράθυρο που εμφανίζεται (επόμενο γράφημα) επιλέγουμε το αρχείο «optimproblem» και πατάμε Import.





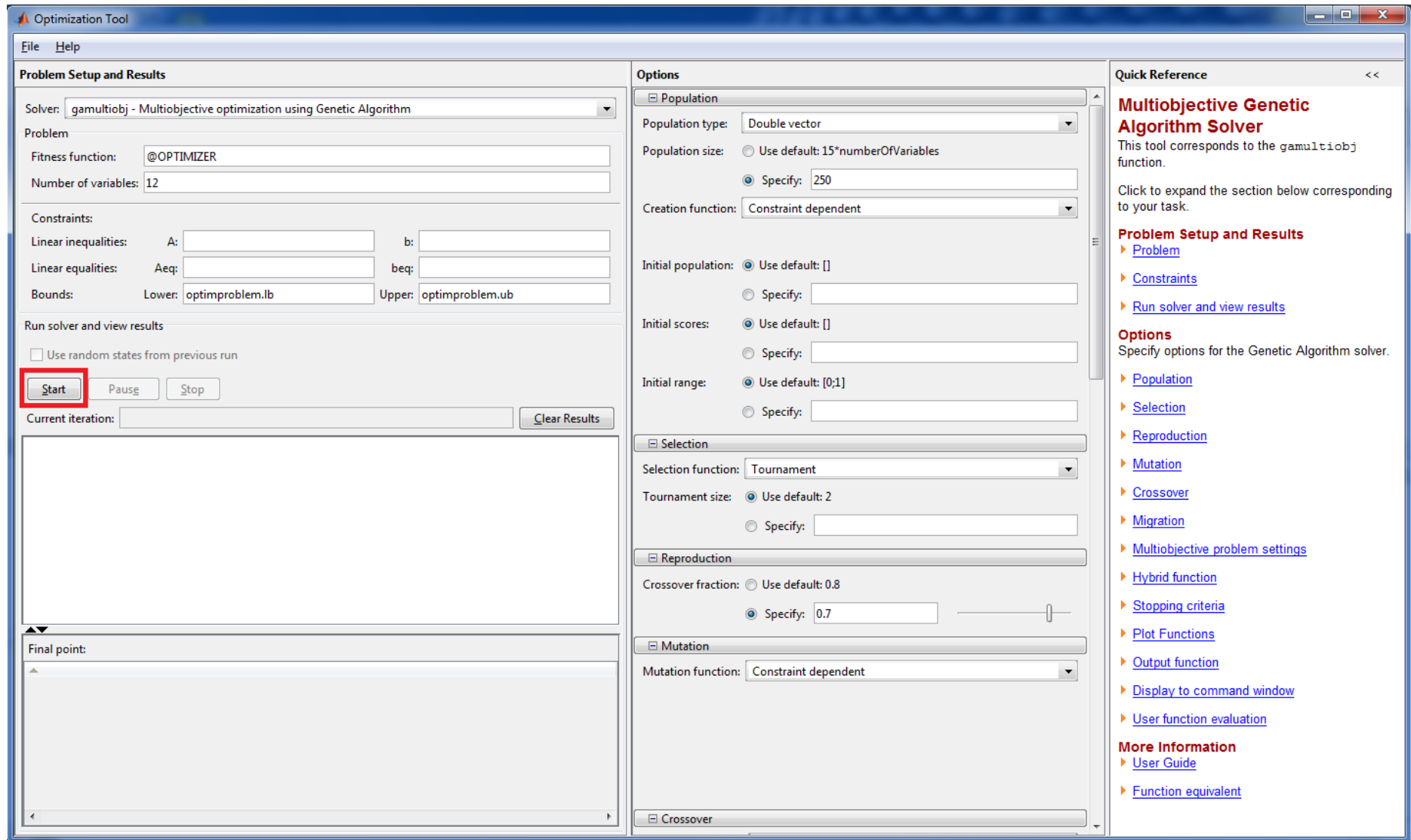
Εδώ επιλέγουμε το αρχείο «optimproblem» και πατάμε Import.

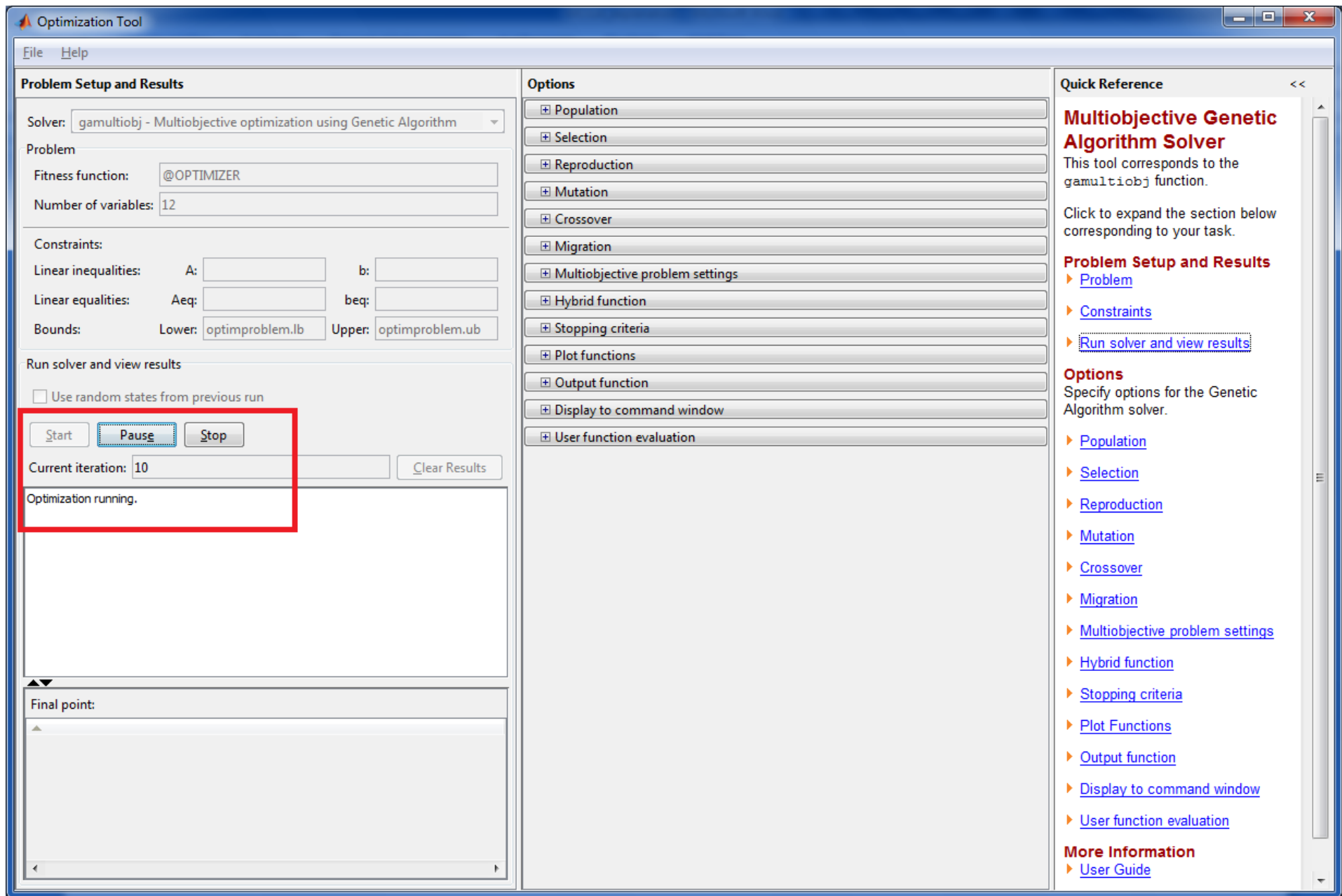
## Εκκίνηση βελτιστοποίησης στο Optimization Tool

The screenshot displays the Optimization Tool interface, which is divided into several sections:

- Problem Setup and Results:** This section contains fields for Solver (set to 'gamultiobj - Multiobjective optimization using Genetic Algorithm'), Problem (set to '@OPTIMIZER'), Fitness function, Number of variables (set to 12), Constraints (Linear inequalities, Linear equalities, and Bounds), and Run solver and view results (with buttons for Start, Pause, Stop, and Clear Results).
- Options:** A list of expandable options for the Genetic Algorithm solver, including Population, Selection, Reproduction, Mutation, Crossover, Migration, Multiobjective problem settings, Hybrid function, Stopping criteria, Plot functions, Output function, Display to command window, and User function evaluation.
- Quick Reference:** A section providing a summary of the tool and links to expandable sections: Problem Setup and Results (with links for Problem, Constraints, and Run solver and view results), Options (with links for Population, Selection, Reproduction, Mutation, Crossover, Migration, Multiobjective problem settings, Hybrid function, Stopping criteria, Plot Functions, Output function, Display to command window, and User function evaluation), and More Information (with a link for User Guide).

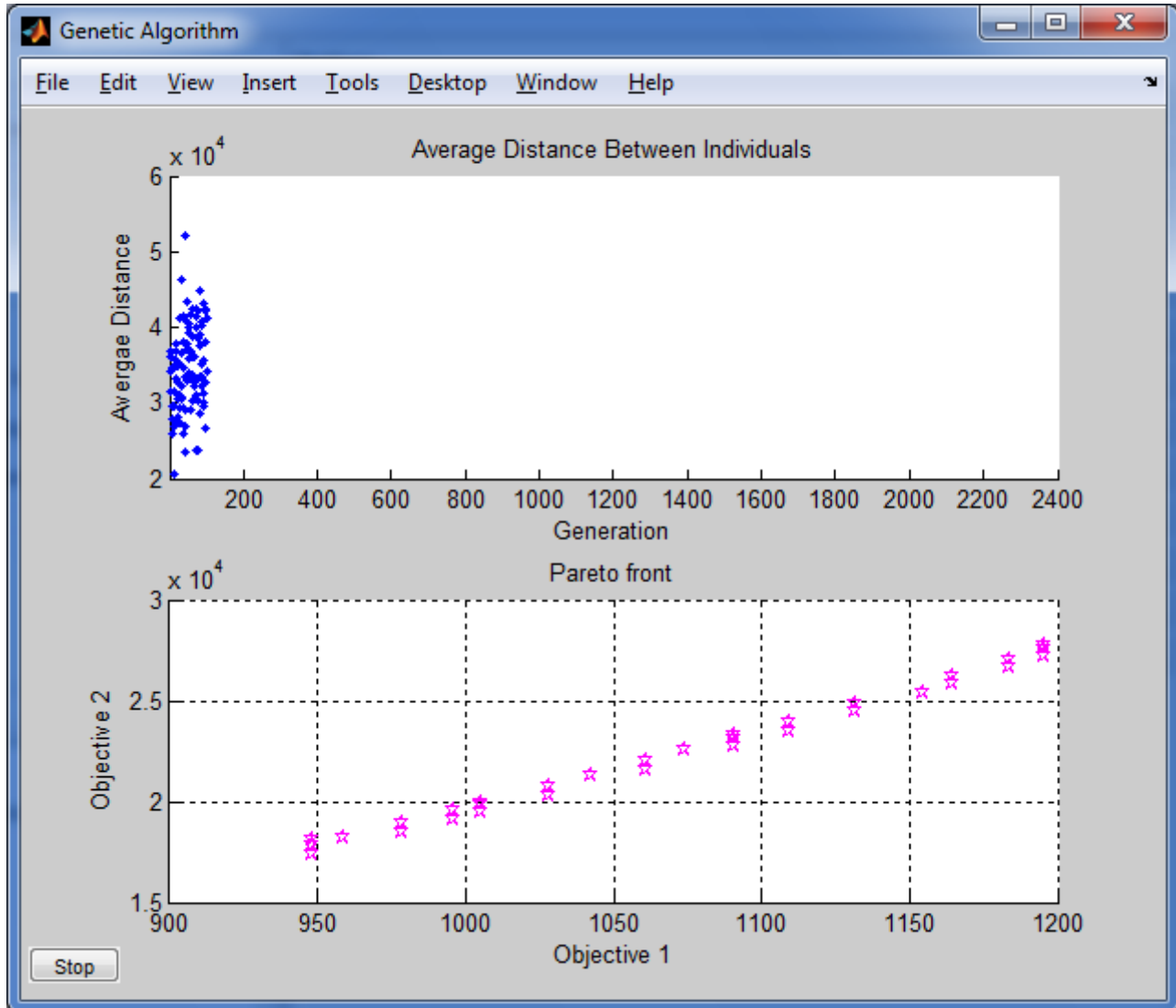
Μετά την εισαγωγή του αρχείου «optimproblem.mat» στο Optimization Tool παρατηρούμε πως έχουν συμπληρωθεί διάφορα πεδία των ενότητων **Problem Setup and Results** και **Options**. Ενώ τα πεδία της ενότητας Problem Setup and Results είναι σταθερά και **ΔΕΝ** πρέπει να τα αλλάζουμε, τα πεδία της ενότητας Options μπορούμε να τα αλλάξουμε σύμφωνα με τις απαιτήσεις μας. Σε αυτό το σημείο το Optimization Tool είναι έτοιμο για την εκκίνηση της βελτιστοποίησης. Πατάμε το κουμπί Start και η βελτιστοποίηση ξεκινά με τις επιλογές και τις ρυθμίσεις που έχουμε ήδη κάνει.





Το πεδίο Current iteration μας πληροφορεί για την τρέχουσα επανάληψη στην οποία βρισκόμαστε και στο λευκό χώρο ακριβώς από κάτω εμφανίζονται μηνύματα σχετικά με την λειτουργία του αλγορίθμου και της βελτιστοποίησης.

Επίσης σε νέο παράθυρο εμφανίζονται οι γραφικές παραστάσεις που έχουμε επιλέξει μέσω της ενότητας Options και της κατηγορίας Plot functions.



Μόλις ολοκληρωθεί η βελτιστοποίηση εμφανίζεται κατάλληλο μήνυμα και είμαστε έτοιμοι να εξάγουμε τα αποτελέσματα μας πίσω στο πρόγραμμα MOGA\_Optimization\_Tankers.

The screenshot displays the 'Optimization Tool' window, which is divided into several panels:

- Problem Setup and Results:**
  - Solver: `gamultiobj - Multiobjective optimization using Genetic Algorithm`
  - Problem:
    - Fitness function: `@OPTIMIZER`
    - Number of variables: `12`
  - Constraints:
    - Linear inequalities: A:  b:
    - Linear equalities: Aeq:  beq:
    - Bounds: Lower: `optimproblem.lb` Upper: `optimproblem.ub`
  - Run solver and view results:
    - Use random states from previous run
    - Buttons: `Start`, `Pause`, `Stop`
    - Current iteration: `103` `Clear Results`
  - Output area (highlighted with a red box):

```

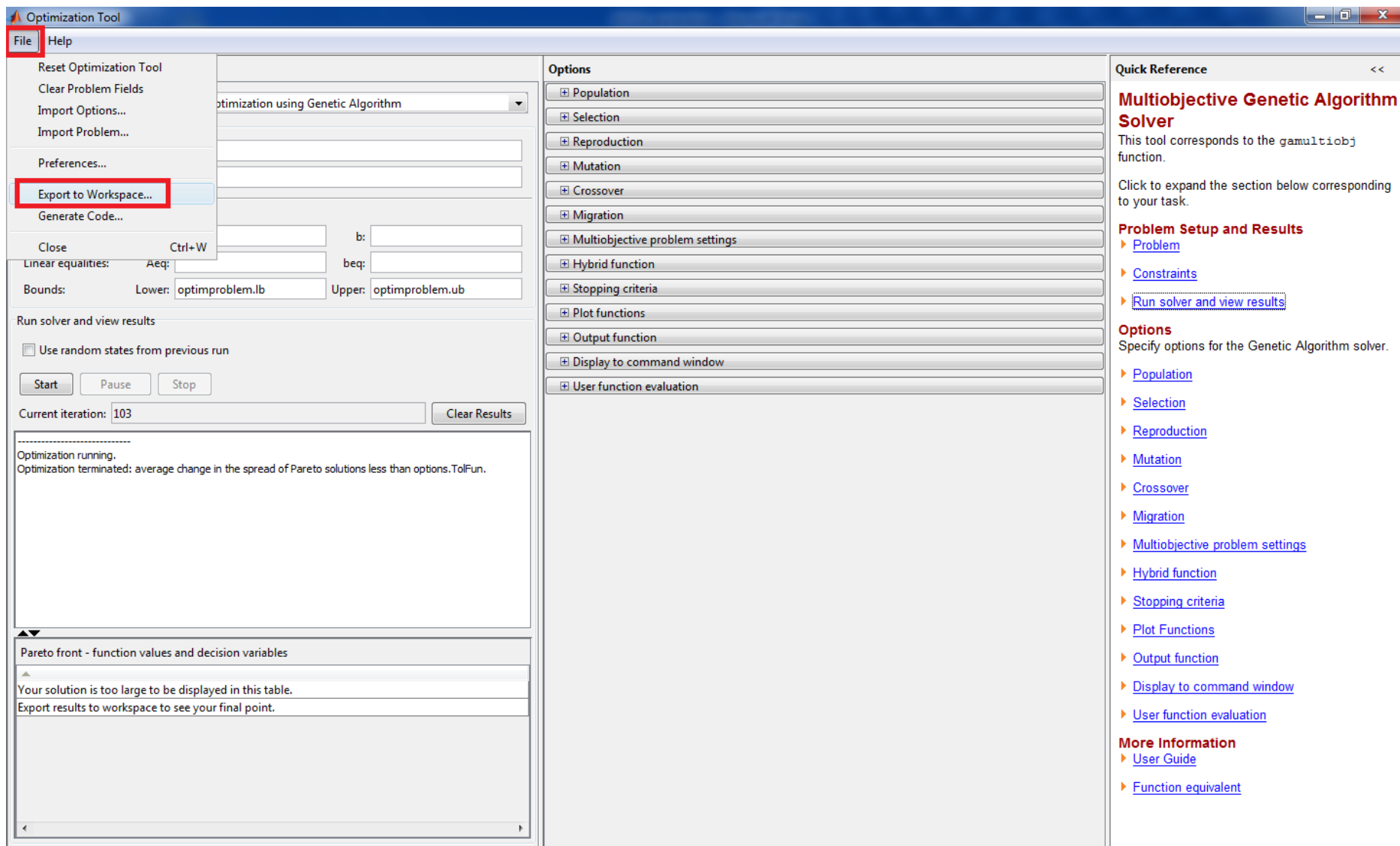
Optimization running.
Optimization terminated: average change in the spread of Pareto solutions less than options.TolFun.

```
  - Pareto front table (highlighted with a red box):

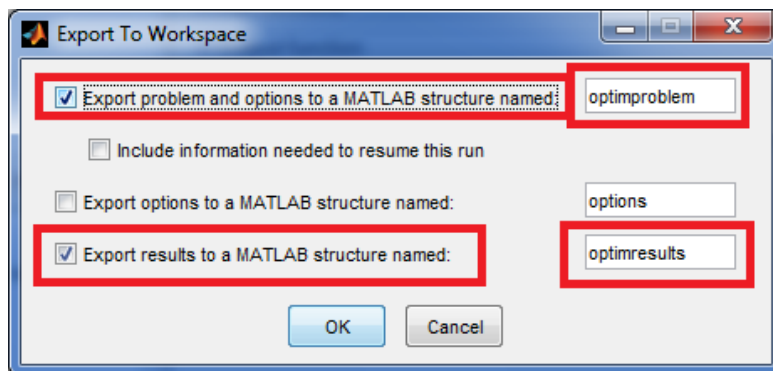
Pareto front - function values and decision variables

Your solution is too large to be displayed in this table.  
Export results to workspace to see your final point.
- Options:** A list of expandable sections including Population, Selection, Reproduction, Mutation, Crossover, Migration, Multiobjective problem settings, Hybrid function, Stopping criteria, Plot functions, Output function, Display to command window, and User function evaluation.
- Quick Reference:**
  - Multiobjective Genetic Algorithm Solver:** This tool corresponds to the `gamultiobj` function. Click to expand the section below corresponding to your task.
  - Problem Setup and Results:**
    - [Problem](#)
    - [Constraints](#)
    - [Run solver and view results](#)
  - Options:** Specify options for the Genetic Algorithm solver.
    - [Population](#)
    - [Selection](#)
    - [Reproduction](#)
    - [Mutation](#)
    - [Crossover](#)
    - [Migration](#)
    - [Multiobjective problem settings](#)
    - [Hybrid function](#)
    - [Stopping criteria](#)
    - [Plot Functions](#)
    - [Output function](#)
    - [Display to command window](#)
    - [User function evaluation](#)
  - More Information:**
    - [User Guide](#)

## Εξαγωγή αποτελεσμάτων από το Optimization Tool



Εδώ γίνεται η εξαγωγή των αποτελεσμάτων και άλλων πληροφοριών από το Optimization Tool. Πατάμε File → Export to Workspace... και στο παράθυρο που εμφανίζεται (επόμενο γράφημα) έχουμε τις εξής επιλογές :



Για ενεργοποίηση της κάθε επιλογής πρέπει να πατήσουμε στο κουτάκι στα αριστερά της .

### 1) Export problem and options to a matlab structure named :

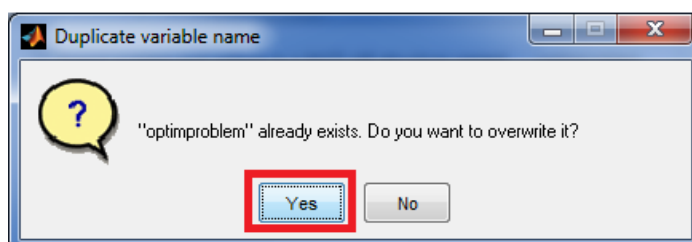
Εξαγωγή μιας μεταβλητής η οποία θα περιέχει πληροφορίες σχετικά με τις επιλογές που έχουμε κάνει στις ενότητες

**Problem Setup and Results** και **Options**.

### **ΠΡΟΣΟΧΗ !!**

Υπενθυμίζεται πως κατά την εξαγωγή αυτή **ΔΕΝ** πρέπει να αλλάξουμε το όνομα της μεταβλητής «optimproblem» .

Σε περίπτωση όπου στο αντίστοιχο πεδίο επιλογής ονόματος για τη δημιουργία της μεταβλητής αυτής, υπάρχει διαφορετικό όνομα από το «optimproblem» (λόγω συνήθως της ύπαρξης του ονόματος «optimproblem» ήδη, από προηγούμενη εκτέλεση βελτιστοποίησης μέσω του Optimization Tool), **πρέπει να το αλλάξουμε** σε «optimproblem» και να κάνουμε “overwrite” της ενδεχομένως υπάρχουσας μεταβλητής όταν ρωτηθούμε γι αυτό από κατάλληλο μήνυμα που εμφανίζεται.



Εδώ εάν επιλέξουμε την επιλογή Include information needed to resume this run μπορούμε να συμπεριλάβουμε στην μεταβλητή optimproblem πληροφορίες απαραίτητες ώστε να ξεκινήσουμε μια νέα βελτιστοποίηση στο μέλλον με πληθυσμό εκκίνησης τον τελευταίο πληθυσμό της παρούσας βελτιστοποίησης.

### 2) Export options to a matlab structure named :

Εξαγωγή μιας μεταβλητής η οποία θα περιέχει πληροφορίες σχετικά με τις επιλογές που έχουμε κάνει στην ενότητα **Options**.

### 3) Export results to a matlab structure named :

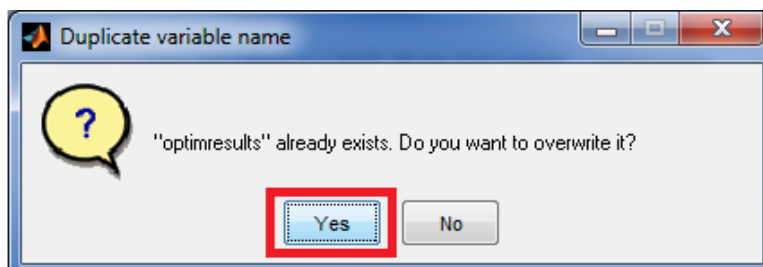
Εξαγωγή μιας μεταβλητής η οποία θα περιέχει τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης που μόλις ολοκληρώθηκε.



## **ΠΡΟΣΟΧΗ !!**

Υπενθυμίζεται πως κατά την εξαγωγή αυτή **ΔΕΝ** πρέπει να αλλάξουμε το όνομα της μεταβλητής «optimresults» .

Σε περίπτωση όπου στο αντίστοιχο πεδίο επιλογής ονόματος για τη δημιουργία της μεταβλητής αυτής, υπάρχει διαφορετικό όνομα από το «optimresults» (λόγα συνήθως της ύπαρξης του ονόματος «optimresults» ήδη, από προηγούμενη εκτέλεση βελτιστοποίησης μέσω του Optimization Tool), **πρέπει να το αλλάξουμε** σε «optimresults» και να κάνουμε “overwrite” της ενδεχομένως υπάρχουσας μεταβλητής όταν ρωτηθούμε γι αυτό από κατάλληλο μήνυμα που εμφανίζεται.



**ΣΗΜΕΙΩΣΗ:** Η εξαγωγή της μεταβλητής « optimresults» είναι απαραίτητη για να συνεχίσουμε στο πρόγραμμα MOGA\_Optimization\_Tankers (δημιουργία .xls αρχείων output , δημιουργία offsets κτλ), ενώ η εξαγωγή της μεταβλητής «optimproblem» είναι απαραίτητη μόνο σε περίπτωση που θέλουμε να αποθηκεύσουμε τις επιλογές που έχουμε κάνει στις ενότητες **Problem Setup and Results** και **Options** για μελλοντική χρήση τους σε επομένη βελτιστοποίηση.

Σε αυτό το σημείο μπορούμε να επιστρέψουμε στο πρόγραμμα MOGA\_Optimization\_Tankers.

**MOGA\_Optimization\_Tankers**

### Multiobjective Genetic Algorithm Ship Design Optimization (Tankers)

**Pre-Optimization**

Specify the excel (.xls) input data file :

Press to import necessary data to optimization program :

Data Importing Status :  
... END OF DATA IMPORTING ...

Press the appropriate button once to select oil tanker DWT size category that will be used during the optimization procedure or set specific DWT requirement :

Type specific DWT requirement [tons] :

Type accepted deviation from DWT requirement [tons] : +/-

Oil Tanker Size Category Selected :

Type required service speed [ Knots ] :

Type required cruising range [ nautical miles ] :

**Post-Optimization**

Press to create output excel file with the Optimization Results :

Results Exporting Status :

Total number of Pareto designs :

Please type here the number of the specific Pareto design (found in excel output file "Final\_Opt\_Results.xls") for which you wish to retrieve more detailed information :

Detailed Design Results Exporting Status :

Please type here the number of the specific Pareto design (found in excel output file "Final\_Opt\_Results.xls") for which you wish to generate hull offsets for lines plan :

Offsets File Generating Status :

**Generate Plots**

Total Generations vs Pareto Front Plots

Plot Status

Total Number of Individuals (All Generations) :

Total Number of Pareto Individuals :

Plot Status

Message Window

Trip Range Requirement Entered Successfully

Πατώντας το κουμπί Export Optimization Results ξεκινά η εξαγωγή των αποτελεσμάτων και η δημιουργία του αρχείου «Final\_Opt\_Results.xls». Το πεδίο Results Exporting Status εμφανίζει κατάλληλο μήνυμα στον αυτή η εργασία τελειώσει. Το πεδίο Total number of Pareto designs μας πληροφορεί για τον αριθμό των designs που απαρτίζουν το Pareto front.

**MOGA\_Optimization\_Tankers**

## Multiobjective Genetic Algorithm Ship Design Optimization (Tankers)

### Pre-Optimization

Specify the excel (.xls) input data file :

Press to import necessary data to optimization program :

Data Importing Status :  
... END OF DATA IMPORTING ...

Press the appropriate button once to select oil tanker DWT size category that will be used during the optimization procedure or set specific DWT requirement :

Type specific DWT requirement [tons] :

Type accepted deviation from DWT requirement [tons] : +/-

Oil Tanker Size Category Selected :

Type required service speed [ Knots ] :

Type required cruising range [ nautical miles ] :

### Post-Optimization

Press to create output excel file with the Optimization Results :

Results Exporting Status :  
... Output Excel File "Final\_Opt\_Results.xls"  
Generated ...

Total number of Pareto designs :

Please type here the number of the specific Pareto design (found in excel output file "Final\_Opt\_Results.xls") for which you wish to retrieve more detailed information :

Detailed Design Results Exporting Status :

Please type here the number of the specific Pareto design (found in excel output file "Final\_Opt\_Results.xls") for which you wish to generate hull offsets for lines plan :

Offsets File Generating Status :

### Generate Plots

Total Generations vs Pareto Front Plots

Plot Status

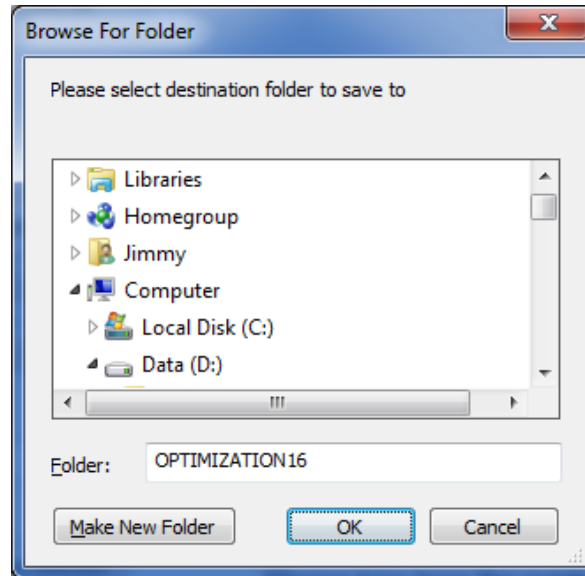
Total Number of Individuals (All Generations) :

Total Number of Pareto Individuals :

Plot Status

Message Window

Επιπρόσθετα, πατώντας το κουμπί Save Output File in specified directory έχουμε την δυνατότητα να σώσουμε σε οποιαδήποτε θέση του δίσκου επιθυμούμε το αρχείο εξόδου «Final\_Opt\_Results.xls». Το παράθυρο που εμφανίζεται είναι το εξής :



Εξαγωγή περισσότερο λεπτομερών αποτελεσμάτων από το MOGA\_Optimization\_Tankers για ένα συγκεκριμένο design του Pareto front και δημιουργία του αρχείου «Detailed\_Info\_Output.xls»

**MOGA\_Optimization\_Tankers**

### Multiobjective Genetic Algorithm Ship Design Optimization (Tankers)

**Pre-Optimization**

Specify the excel (.xls) input data file :

Press to import necessary data to optimization program :

Data Importing Status :  
... END OF DATA IMPORTING ...

Press the appropriate button once to select oil tanker DWT size category that will be used during the optimization procedure or set specific DWT requirement :

Type specific DWT requirement [tons] :

Type accepted deviation from DWT requirement [tons] : +/-

Oil Tanker Size Category Selected :  
Aframax

Type required service speed [ Knots ] :

Type required cruising range [ nautical miles ] :

**Post-Optimization**

Press to create output excel file with the Optimization Results :

Results Exporting Status :  
... Output Excel File "Final\_Opt\_Results.xls" Generated ...

Total number of Pareto designs : 36

Please type here the number of the specific Pareto design (found in excel output file "Final\_Opt\_Results.xls") for which you wish to retrieve more detailed information :

Detailed Design Results Exporting Status :

Please type here the number of the specific Pareto design (found in excel output file "Final\_Opt\_Results.xls") for which you wish to generate hull offsets for lines plan :

Offsets File Generating Status :

**Generate Plots**

Total Generations vs Pareto Front Plots

| Plot Name                | Plot Status          |
|--------------------------|----------------------|
| Lightship - Powering     | <input type="text"/> |
| Powering - Annual Cost   | <input type="text"/> |
| Lightship - Build Cost   | <input type="text"/> |
| Payload - RFR            | <input type="text"/> |
| Build Cost - Annual Cost | <input type="text"/> |

Total Number of Individuals (All Generations) :

Total Number of Pareto Individuals :

Plot Status :

Σε αυτό το σημείο πληκτρολογούμε στο αντίστοιχο πεδίο τον αριθμό του συγκεκριμένου design του Pareto front για το οποίο θέλουμε να λάβουμε πιο λεπτομερείς πληροφορίες και στη συνέχεια πατάμε το κουμπί Export Detailed Information. Ο αριθμός αυτός πρέπει προφανώς να είναι ακέραιος, μεγαλύτερος η ίσος του 1 και μικρότερος η ίσος του αριθμού των designs που απαρτίζουν το Pareto front (πεδίο Total number of Pareto designs).

**MOGA\_Optimization\_Tankers**

## Multiobjective Genetic Algorithm Ship Design Optimization (Tankers)

### Pre-Optimization

Specify the excel (.xls) input data file :

Press to import necessary data to optimization program :

Data Importing Status :  
... END OF DATA IMPORTING ...

Press the appropriate button once to select oil tanker DWT size category that will be used during the optimization procedure or set specific DWT requirement :

Type specific DWT requirement [tons] :

Type accepted deviation from DWT requirement [tons] : +/-

Oil Tanker Size Category Selected :

Type required service speed [ Knots ] :

Type required cruising range [ nautical miles ] :

### Post-Optimization

Press to create output excel file with the Optimization Results :

Results Exporting Status :  
... Output Excel File "Final\_Opt\_Results.xls" Generated ...

Total number of Pareto designs :

Please type here the number of the specific Pareto design ( found in excel output file "Final\_Opt\_Results.xls") for which you wish to retrieve more detailed information :

Detailed Design Results Exporting Status :  
... Detailed Output Excel File "Detailed\_Info\_Output.xls" Generated ...

Please type here the number of the specific Pareto design ( found in excel output file "Final\_Opt\_Results.xls") for which you wish to generate hull offsets for lines plan :

Offsets File Generating Status :

### Generate Plots

Total Generations vs Pareto Front Plots

Plot Status

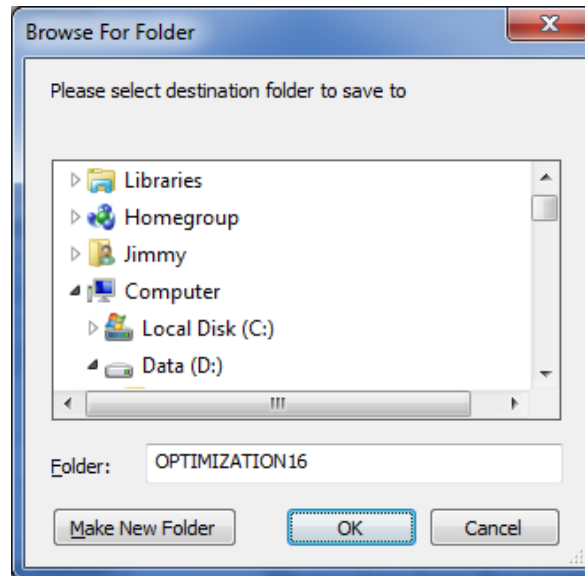
Total Number of Individuals (All Generations) :

Total Number of Pareto Individuals :

Plot Status

Πατώντας το κουμπί Export Detailed Information ξεκινά η εξαγωγή των λεπτομερών αποτελεσμάτων για το επιλεγμένο design του Pareto front και η δημιουργία του αρχείου «Detailed\_Info\_Output.xls». Το πεδίο Detailed Design Results Exporting Status εμφανίζει κατάλληλο μήνυμα όταν αυτή η εργασία τελειώσει. Το πεδίο Total number of Pareto designs μας πληροφορεί για τον αριθμό των designs που απαρτίζουν το Pareto front. Το κουμπί Clear Design Number σβήνει τον αριθμό του design που έχουμε πληκτρολογήσει και έτσι μπορούμε να πληκτρολογήσουμε άλλο και να επαναλάβουμε την διαδικασία εξαγωγής λεπτομερών αποτελεσμάτων.

Επιπρόσθετα πατώντας το κουμπί Save Output File in specified directory έχουμε την δυνατότητα να σώσουμε σε οποιαδήποτε θέση του δίσκου επιθυμούμε το αρχείο εξόδου «Detailed\_Info\_Output.xls». Το παράθυρο που εμφανίζεται είναι το εξής :



Δημιουργία αρχείου «offsets.txt» για ένα συγκεκριμένο design του Pareto front.

Σε αυτό το σημείο πληκτρολογούμε στο αντίστοιχο πεδίο τον αριθμό του συγκεκριμένου design του Pareto front για το οποίο θέλουμε να λάβουμε αρχείο με offsets για δημιουργία του lines plan και στη συνέχεια πατάμε το κουμπί Generate offsets file. Ο αριθμός αυτός πρέπει προφανώς να είναι ακέραιος, μεγαλύτερος ή ίσος του 1 και μικρότερος ή ίσος του αριθμού των designs που απαρτίζουν το Pareto front (πεδίο Total number of Pareto designs).



**MOGA\_Optimization\_Tankers**

## Multiobjective Genetic Algorithm Ship Design Optimization (Tankers)

### Pre-Optimization

Specify the excel (.xls) input data file :

Press to import necessary data to optimization program :

Data Importing Status :  
... END OF DATA IMPORTING ...

Press the appropriate button once to select oil tanker DWT size category that will be used during the optimization procedure or set specific DWT requirement :

Type specific DWT requirement [tons] :

Type accepted deviation from DWT requirement [tons] : +/-

Oil Tanker Size Category Selected :

Type required service speed [ Knots ] :

Type required cruising range [ nautical miles ] :

### Post-Optimization

Press to create output excel file with the Optimization Results :

Results Exporting Status :  
... Output Excel File "Final\_Opt\_Results.xls" Generated ...

Total number of Pareto designs :

Please type here the number of the specific Pareto design (found in excel output file "Final\_Opt\_Results.xls") for which you wish to retrieve more detailed information :

Detailed Design Results Exporting Status :  
... Detailed Output Excel File "Detailed\_Info\_Output.xls" Generated ...

Please type here the number of the specific Pareto design (found in excel output file "Final\_Opt\_Results.xls") for which you wish to generate hull offsets for lines plan :

### Generate Plots

Total Generations vs Pareto Front Plots

Plot Status

Total Number of Individuals (All Generations) :

Total Number of Pareto Individuals :

Plot Status

Message Window

Πατώντας το κουμπί Generate offsets file ξεκινά η δημιουργία του αρχείου «offsets.txt» για το επιλεγμένο design του Pareto front. Το πεδίο Offsets File Generating Status μας πληροφορεί ότι η διαδικασία βρίσκεται σε εξέλιξη και εμφανίζει κατάλληλο μήνυμα όταν αυτή η εργασία τελειώσει. Το πεδίο Total number of Pareto designs μας πληροφορεί για τον αριθμό των designs που απαρτίζουν το Pareto front. Το κουμπί Clear Design Number σβήνει τον αριθμό του design που έχουμε πληκτρολογήσει και έτσι μπορούμε να πληκτρολογήσουμε άλλο και να επαναλάβουμε την διαδικασία δημιουργίας του offsets.txt αρχείου.

**MOGA\_Optimization\_Tankers**

## Multiobjective Genetic Algorithm Ship Design Optimization (Tankers)

### Pre-Optimization

Specify the excel (.xls) input data file :

Press to import necessary data to optimization program :

Data Importing Status :  
... END OF DATA IMPORTING ...

Press the appropriate button once to select oil tanker DWT size category that will be used during the optimization procedure or set specific DWT requirement :

Type specific DWT requirement [tons] :

Type accepted deviation from DWT requirement [tons] : +/-

Oil Tanker Size Category Selected :

Type required service speed [ Knots ] :

Type required cruising range [ nautical miles ] :

### Post-Optimization

Press to create output excel file with the Optimization Results :

Results Exporting Status :  
... Output Excel File "Final\_Opt\_Results.xls" Generated ...

Total number of Pareto designs :

Please type here the number of the specific Pareto design (found in excel output file "Final\_Opt\_Results.xls") for which you wish to retrieve more detailed information :

Detailed Design Results Exporting Status :  
... Detailed Output Excel File "Detailed\_Info\_Output.xls" Generated ...

Please type here the number of the specific Pareto design (found in excel output file "Final\_Opt\_Results.xls") for which you wish to generate hull offsets for lines plan :

"offsets.txt" File Generated

### Generate Plots

Total Generations vs Pareto Front Plots

Plot Status

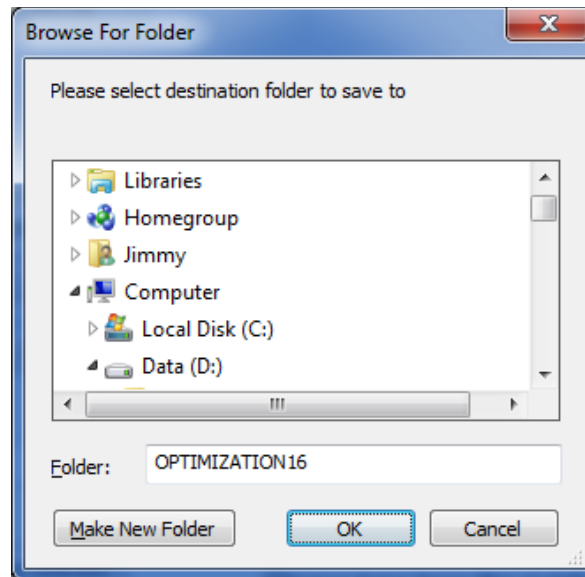
Total Number of Individuals (All Generations) :

Total Number of Pareto Individuals :

Plot Status

Message Window

Επιπρόσθετα πατώντας το κουμπί Save Output File in specified directory έχουμε την δυνατότητα να σώσουμε σε οποιαδήποτε θέση του δίσκου επιθυμούμε το αρχείο εξόδου «Detailed\_Info\_Output.xls». Το παράθυρο που εμφανίζεται είναι το εξής :



## Δημιουργία γραφικών παραστάσεων μέσω του γραφικού περιβάλλοντος (GUI) του προγράμματος MOGA\_Optimization\_Tankers

Στην ενότητα Generate Plots του προγράμματος MOGA\_Optimization\_Tankers έχουμε την δυνατότητα να παράγουμε διάφορα διαγράμματα στα οποία φαίνονται οι προκύπτουσες τιμές συγκεκριμένων αντικειμενικών συναρτήσεων του συνολικού πληθυσμού των design που παράγαγε ο γενετικός αλγόριθμος (όλες οι γενεές) και των nondominated Pareto λύσεων που πρόέκυψαν (Pareto Front) για τα εξής ζεύγη κριτηρίων (αντικειμενικές συναρτήσεις) : (1) Lighthship – Powering , (2) Powering – Annual Cost, (3) Lighthship – Build Cost , (4) Payload – RFR , (5) Build Cost – Annual Cost.

The screenshot displays the MOGA\_Optimization\_Tankers software interface. The main window is titled "Multiobjective Genetic Algorithm Ship Design Optimization (Tankers)". It is divided into three main sections: "Pre-Optimization", "Post-Optimization", and "Generate Plots".

**Pre-Optimization:** Includes a "Browse" button for input data, an "IMPORT DATA" button, and a "Start Optimization Tool" button. A "Clear All" button is located at the bottom left.

**Post-Optimization:** Features buttons for "Export Optimization Results", "Save Output File in specified directory", "Export Detailed Information", and "Save Detailed Output File in specified directory". It shows the "Total number of Pareto designs" as 36 and the "Detailed Design Results Exporting Status" as "Detailed Output Excel File 'Detailed\_Info\_Output.xls' Generated...".

**Generate Plots:** This section is highlighted with a red box. It shows a list of plots with their "Plot Status". The "Lightship - Powering" plot is highlighted in blue and has a status of "Generating...". Other plots include "Powering - Annual Cost", "Lightship - Build Cost", "Payload - RFR", and "Build Cost - Annual Cost". A red box highlights the "Total Number of Pareto Individuals" as 36.

The "Message Window" at the bottom shows the status: "offsets.txt" File Generated.

Βέβαια αξίζει να σημειωθεί ότι η εγκατεστημένη ισχύς (Powering) δεν έχει οριστεί ως αντικειμενική συνάρτηση – κριτήριο στο πρόβλημα βελτιστοποίησης αλλά είναι άμεσο αποτέλεσμα της αντικειμενικής συνάρτησης – κριτήριο της ολικής αντίστασης (Resistance).

**Multiobjective Genetic Algorithm Ship Design  
Optimization (Tankers)**

**Pre-Optimization**

Specify the excel (.xls) input data file :

Press to import necessary data to optimization program :

Data Importing Status :  
... END OF DATA IMPORTING ...

Press the appropriate button once to select oil tanker DWT size category that will be used during the optimization procedure or set specific DWT requirement :

Type specific DWT requirement [tons] :

Type accepted deviation from DWT requirement [tons] : +/-

Oil Tanker Size Category Selected :

Type required service speed [ Knots ] :

Type required cruising range [ nautical miles ] :

**Post-Optimization**

Press to create output excel file with the Optimization Results :

Results Exporting Status :  
... Output Excel File "Final\_Opt\_Results.xls" Generated ...

Total number of Pareto designs :

Please type here the number of the specific Pareto design (found in excel output file "Final\_Opt\_Results.xls") for which you wish to retrieve more detailed information :

Detailed Design Results Exporting Status :  
... Detailed Output Excel File "Detailed\_Info\_Output.xls" Generated ...

Please type here the number of the specific Pareto design (found in excel output file "Final\_Opt\_Results.xls") for which you wish to generate hull offsets for lines plan :

"offsets.txt" File Generated

**Generate Plots**

Total Generations vs Pareto Front Plots

| Plot Name                | Plot Status |
|--------------------------|-------------|
| Lightship - Powering     | Generated   |
| Powering - Annual Cost   |             |
| Lightship - Build Cost   |             |
| Payload - RFR            | Generated   |
| Build Cost - Annual Cost |             |

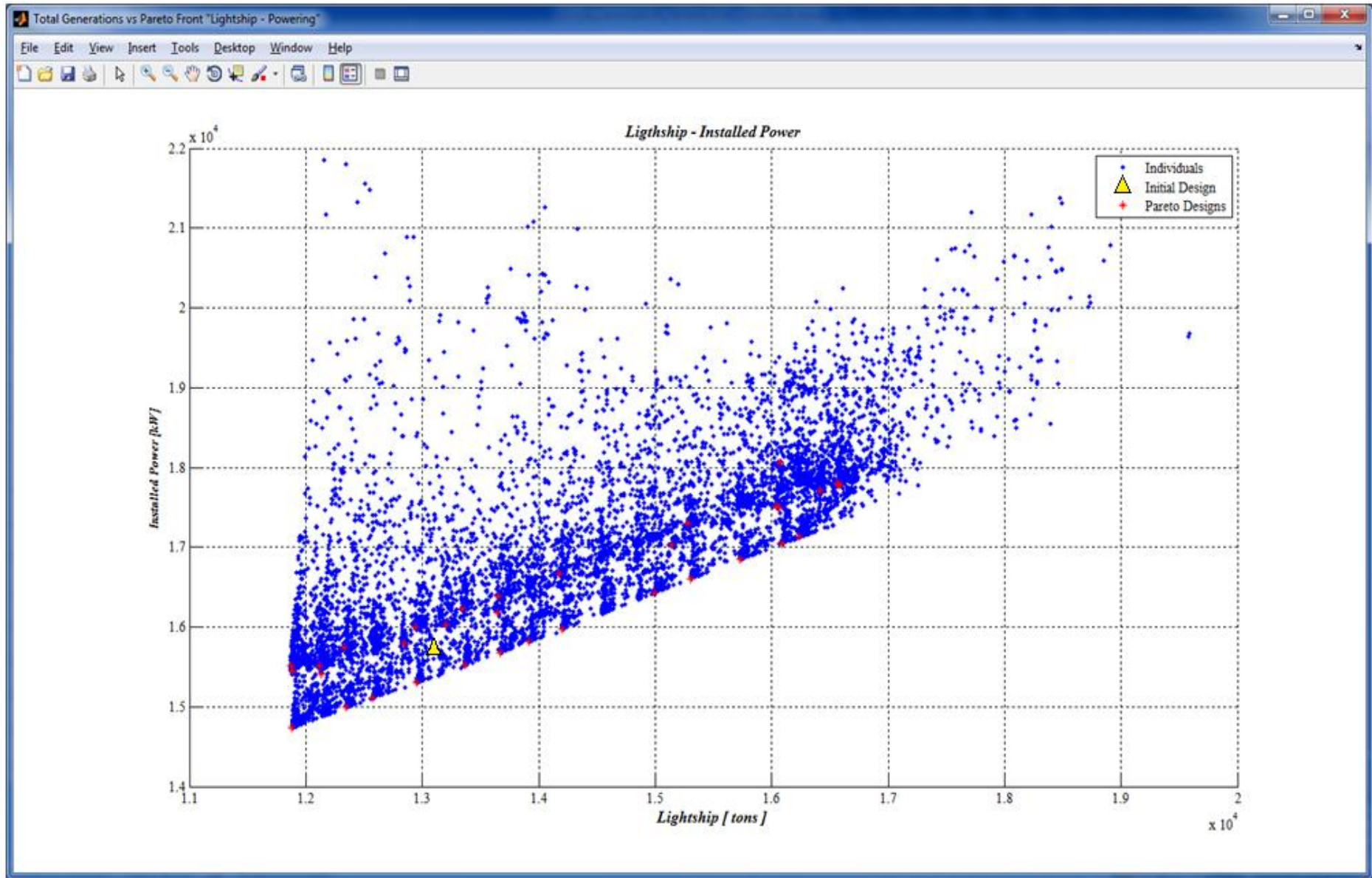
Total Number of Individuals (All Generations) :

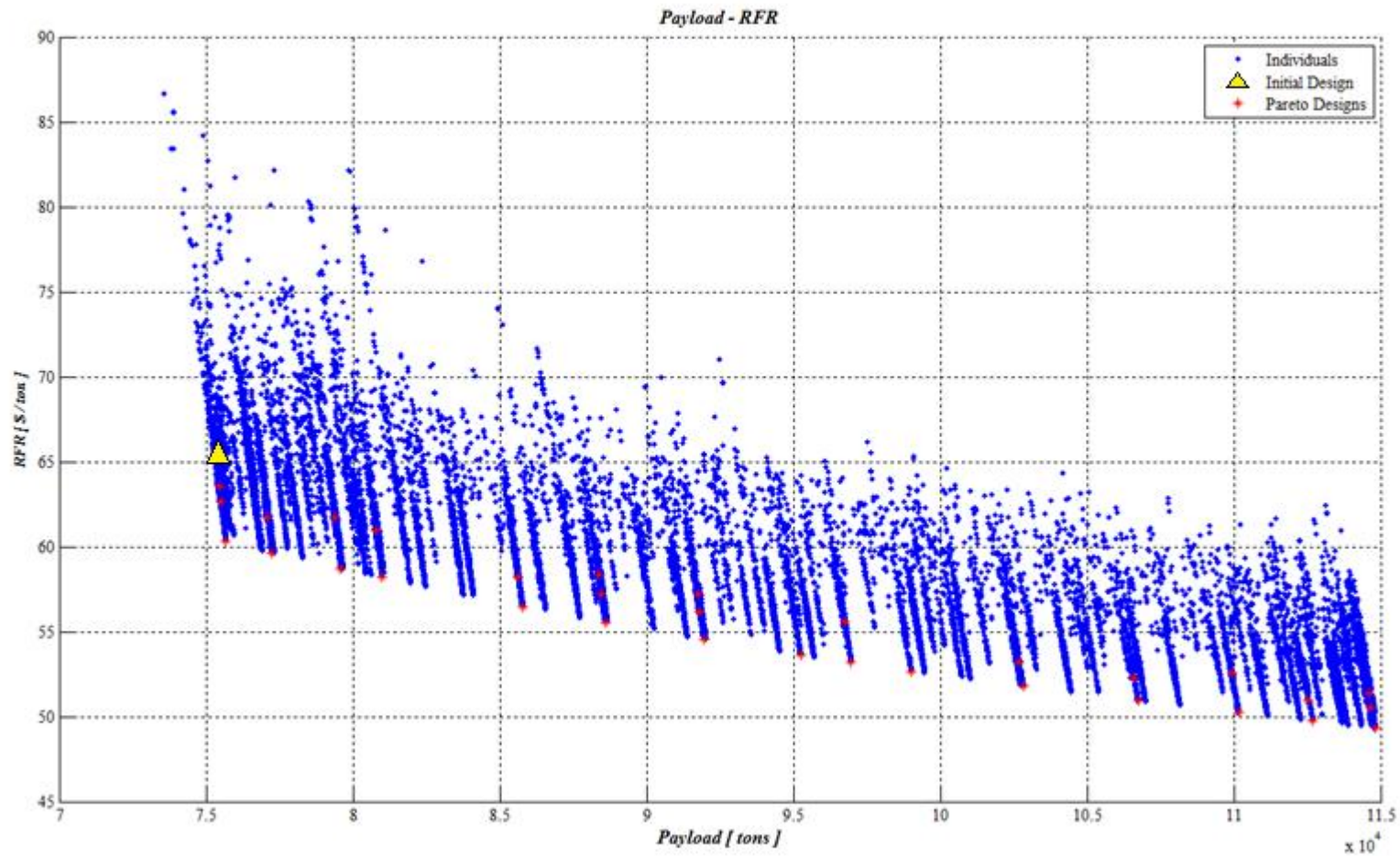
Total Number of Pareto Individuals :

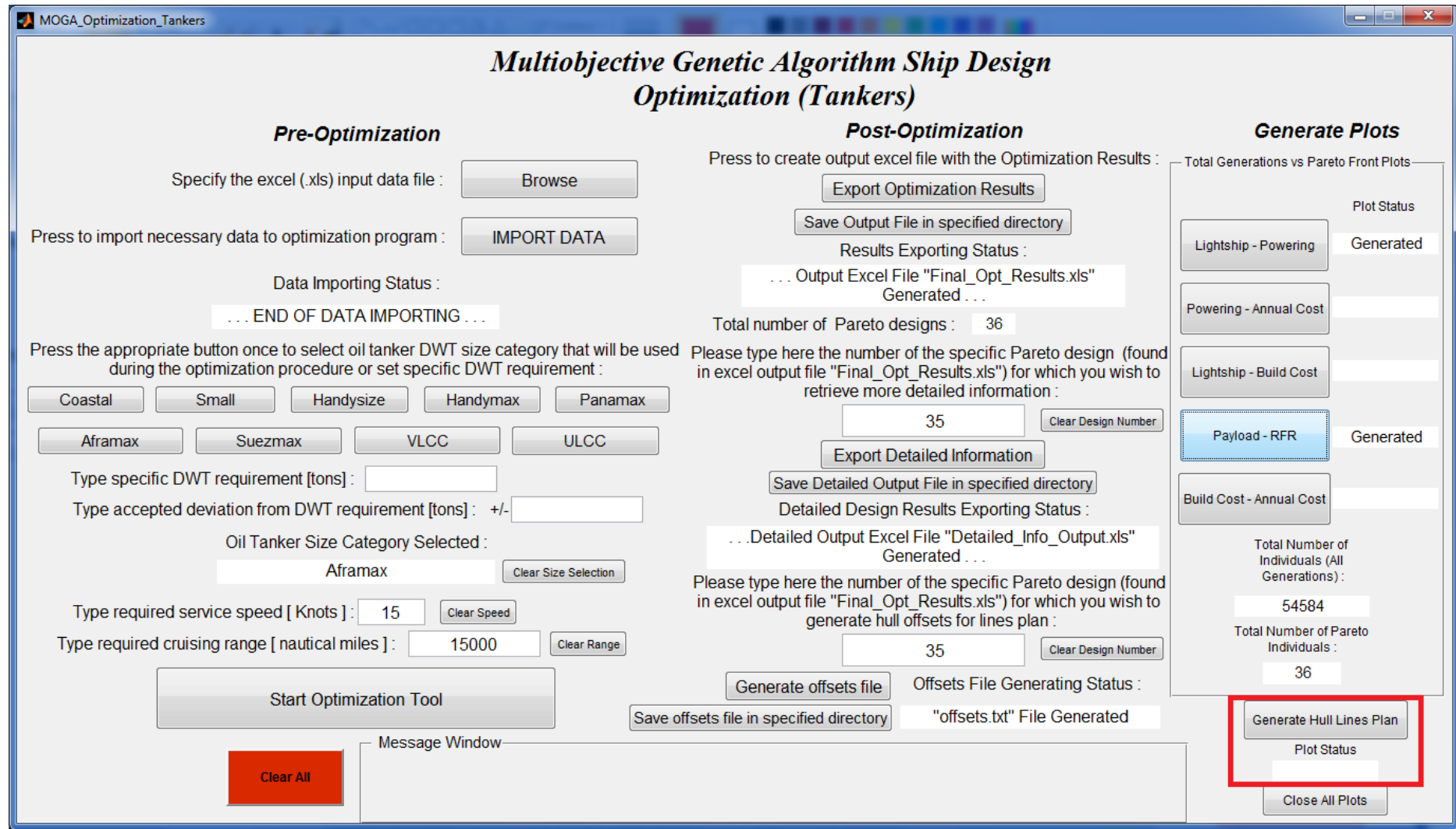
Plot Status

Message Window

Πατώντας το κατάλληλο κουμπί ανάλογα με το διάγραμμα που επιθυμούμε να δημιουργήσουμε, το πρόγραμμα δημιουργεί τις εκάστοτε γραφικές παραστάσεις οι οποίες φαίνονται σε καινούριο κάθε φορά αναδυόμενο παράθυρο. Πατώντας το κουμπί Close All Plots κλείνουν όλα τα παραχθέντα διαγράμματα. Επίσης στα πεδία Total Number of Individuals (All Generations) και Total Number of Pareto Individuals φαίνονται ο συνολικός αριθμός των παραχθέντων από τον γενετικό αλγόριθμο design και ο συνολικός αριθμός των Pareto designs αντίστοιχα. Παρακάτω παρατίθενται ενδεικτικά τα γραφήματα Lightship – Powering και Payload – RFR για κατηγορία δεξαμενοπλοίων Aframax.







Πατώντας το κουμπί Generate Hull Lines Plan το πρόγραμμα δημιουργεί ένα σχέδιο γραμμών της γάστρας του design για το οποίο προηγουμένως έχουμε εξάγει το αρχείο offsets.txt μέσω του κουμπιού Generate offsets file. Το πεδίο Plot Status μας πληροφορεί για την εξέλιξη αυτής της διαδικασίας.



**MOGA\_Optimization\_Tankers**

## Multiobjective Genetic Algorithm Ship Design Optimization (Tankers)

### Pre-Optimization

Specify the excel (.xls) input data file :

Press to import necessary data to optimization program :

Data Importing Status :  
... END OF DATA IMPORTING ...

Press the appropriate button once to select oil tanker DWT size category that will be used during the optimization procedure or set specific DWT requirement :

Type specific DWT requirement [tons] :

Type accepted deviation from DWT requirement [tons] : +/-

Oil Tanker Size Category Selected :

Type required service speed [ Knots ] :

Type required cruising range [ nautical miles ] :

### Post-Optimization

Press to create output excel file with the Optimization Results :

Results Exporting Status :  
... Output Excel File "Final\_Opt\_Results.xls" Generated ...

Total number of Pareto designs :

Please type here the number of the specific Pareto design (found in excel output file "Final\_Opt\_Results.xls") for which you wish to retrieve more detailed information :

Detailed Design Results Exporting Status :  
... Detailed Output Excel File "Detailed\_Info\_Output.xls" Generated ...

Please type here the number of the specific Pareto design (found in excel output file "Final\_Opt\_Results.xls") for which you wish to generate hull offsets for lines plan :

Offsets File Generating Status :  
"offsets.txt" File Generated

### Generate Plots

Total Generations vs Pareto Front Plots

| Plot Name                | Plot Status |
|--------------------------|-------------|
| Lightship - Powering     | Generated   |
| Powering - Annual Cost   |             |
| Lightship - Build Cost   |             |
| Payload - RFR            | Generated   |
| Build Cost - Annual Cost |             |

Total Number of Individuals (All Generations) :

Total Number of Pareto Individuals :

Message Window

**Multiobjective Genetic Algorithm Ship Design  
Optimization (Tankers)**

**Pre-Optimization**

Specify the excel (.xls) input data file :

Press to import necessary data to optimization program :

Data Importing Status :  
... END OF DATA IMPORTING ...

Press the appropriate button once to select oil tanker DWT size category that will be used during the optimization procedure or set specific DWT requirement :

Type specific DWT requirement [tons] :

Type accepted deviation from DWT requirement [tons] : +/-

Oil Tanker Size Category Selected :

Type required service speed [ Knots ] :

Type required cruising range [ nautical miles ] :

**Post-Optimization**

Press to create output excel file with the Optimization Results :

Results Exporting Status :  
... Output Excel File "Final\_Opt\_Results.xls" Generated ...

Total number of Pareto designs :

Please type here the number of the specific Pareto design (found in excel output file "Final\_Opt\_Results.xls") for which you wish to retrieve more detailed information :

Detailed Design Results Exporting Status :  
... Detailed Output Excel File "Detailed\_Info\_Output.xls" Generated ...

Please type here the number of the specific Pareto design (found in excel output file "Final\_Opt\_Results.xls") for which you wish to generate hull offsets for lines plan :

Offsets File Generating Status :  
"offsets.txt" File Generated

**Generate Plots**

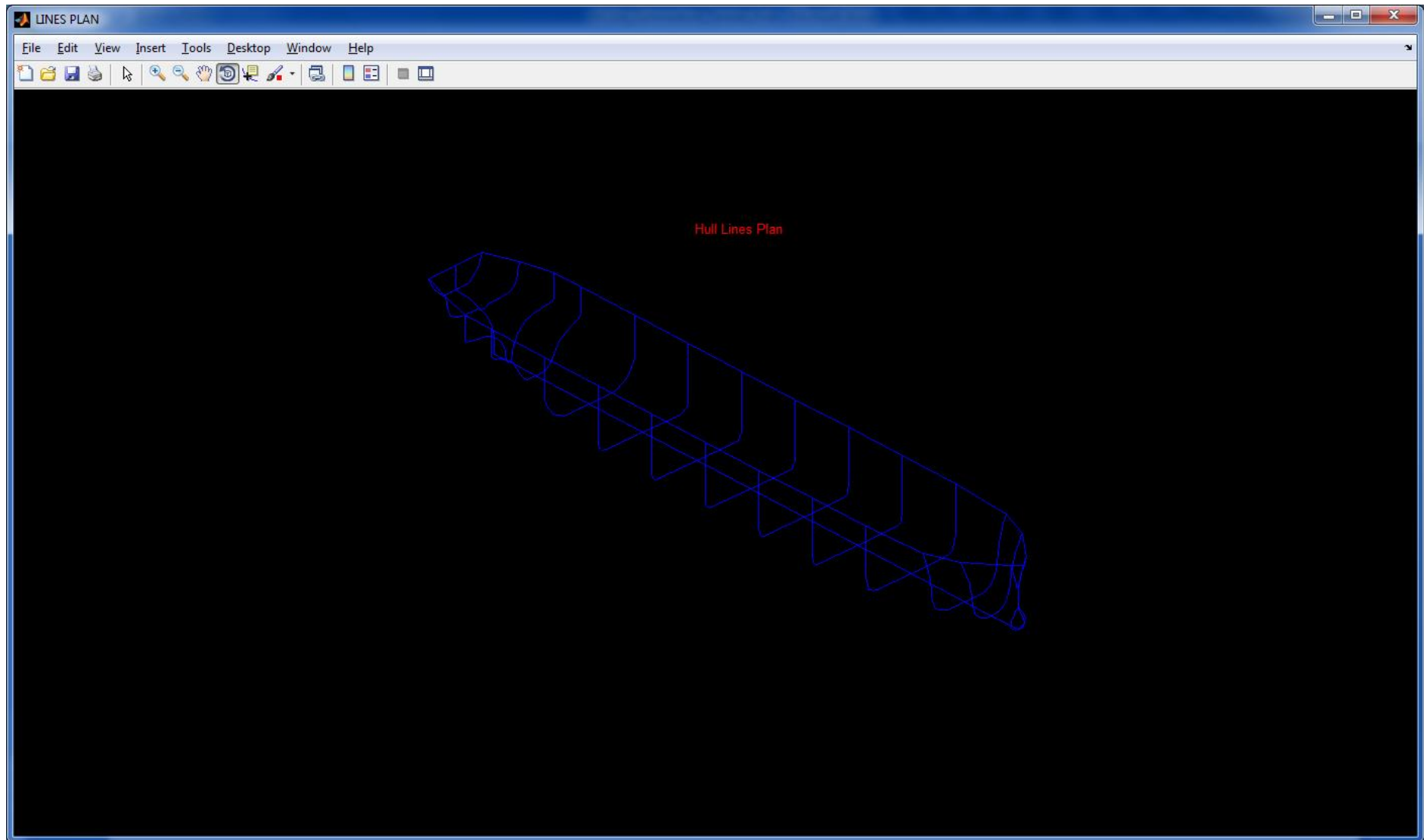
Total Generations vs Pareto Front Plots

| Plot Name                | Plot Status |
|--------------------------|-------------|
| Lightship - Powering     | Generated   |
| Powering - Annual Cost   |             |
| Lightship - Build Cost   |             |
| Payload - RFR            | Generated   |
| Build Cost - Annual Cost |             |

Total Number of Individuals (All Generations) :

Total Number of Pareto Individuals :

Αφού η διαδικασία τελειώσει εμφανίζεται σε τρισδιάστατη μορφή το σχέδιο γραμμών της γάστρας :



Χώρος Message Window και κουμπί Clear All.

**MOGA\_Optimization\_Tankers**

### Multiobjective Genetic Algorithm Ship Design Optimization (Tankers)

**Pre-Optimization**

Specify the excel (.xls) input data file :

Press to import necessary data to optimization program :

Data Importing Status :  
... END OF DATA IMPORTING ...

Press the appropriate button once to select oil tanker DWT size category that will be used during the optimization procedure or set specific DWT requirement :

Type specific DWT requirement [tons] :

Type accepted deviation from DWT requirement [tons] : +/-

Oil Tanker Size Category Selected :

Type required service speed [ Knots ] :

Type required cruising range [ nautical miles ] :

**Post-Optimization**

Press to create output excel file with the Optimization Results :

Results Exporting Status :  
... Output Excel File "Final\_Opt\_Results.xls"  
Generated ...

Total number of Pareto designs :

Please type here the number of the specific Pareto design (found in excel output file "Final\_Opt\_Results.xls") for which you wish to retrieve more detailed information :

Detailed Design Results Exporting Status :  
... Detailed Output Excel File "Detailed\_Info\_Output.xls"  
Generated ...

Please type here the number of the specific Pareto design (found in excel output file "Final\_Opt\_Results.xls") for which you wish to generate hull offsets for lines plan :

Offsets File Generating Status :  
"offsets.txt" File Generated

**Generate Plots**

Total Generations vs Pareto Front Plots

| Plot Name                | Plot Status |
|--------------------------|-------------|
| Lightship - Powering     | Generated   |
| Powering - Annual Cost   |             |
| Lightship - Build Cost   |             |
| Payload - RFR            | Generated   |
| Build Cost - Annual Cost |             |

Total Number of Individuals (All Generations) :

Total Number of Pareto Individuals :

Plot Status  
Generated

Message Window

Τέλος στον χώρο Message Window εμφανίζονται μηνύματα που καθοδηγούν τον χρήστη (σε περίπτωση που κάνει κάποιο λάθος στον χειρισμό) ώστε να γίνει ορθή χρήση του προγράμματος και το κουμπί Clear All σβήνει ΟΛΛ τα δεδομένα που έχουν δημιουργηθεί από την στιγμή που ξεκινήσαμε το MOGA\_Optimization\_Tankers.

### 4.3 Τα διάφορα αρχεία εξόδου (Output files) που παράγει το πρόγραμμα

#### *MOGA\_Optimization\_Tankers.*

Τέλος θα γίνει μια παρουσίαση των περιεχόμενων των αρχείων Final\_Opt\_results.xls και Detailed\_Info\_Output.xls καθώς και ενός σχεδίου γραμμών γάστρας που δημιουργήθηκε από το αρχείο offsets.txt με χρήση του προγράμματος Rhinoceros.

#### *Το αρχείο εξόδου Final Opt Results.xls*

Αυτό το αρχείο εξόδου το οποίο είναι τύπου Microsoft Excel Spreadsheet (\*.xls) είναι χωρισμένο σε τέσσερις (4) βασικές ενότητες – μέρη καθεμία από τις οποίες περιέχει μια διαφορετική κατηγορία αποτελεσμάτων της διαδικασίας βελτιστοποίησης και πέντε (5) δευτερεύουσες ενότητες καθεμία από τις οποίες περιέχει ένα συγκεκριμένο γράφημα από αυτά που περιγράφηκαν στην ενότητα 4.2 κάτω από τον τίτλο «Δημιουργία γραφικών παραστάσεων μέσω του γραφικού περιβάλλοντος (GUI) του προγράμματος MOGA\_Optimization\_Tankers».

#### *Βασικές Ενότητες :*

Ενότητα 1<sup>η</sup> (Pareto Set Main Characteristics) : Σε αυτή την ενότητα εξάγονται οι κύριες διαστάσεις, οι συντελεστές μορφής και άλλα βασικά χαρακτηριστικά όλων των design του Pareto Set το οποίο δημιουργήθηκε από τον γενετικό αλγόριθμο.

Ενότητα 2<sup>η</sup> (Pareto Set Obj Functions Values) : Σε αυτή την ενότητα εξάγονται οι προκύπτουσες τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων – κριτηρίων (objective functions), όλων των design του Pareto Set το οποίο δημιουργήθηκε από τον γενετικό αλγόριθμο.

Ενότητα 3<sup>η</sup> (MOGA Population objectives) : Σε αυτή την ενότητα εξάγονται οι προκύπτουσες τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων – κριτηρίων (objective functions), όλων των design (του συνόλου δηλαδή των πληθυσμών όλων των γενεών) που παρήχθησαν από τον γενετικό αλγόριθμο.

Ενότητα 4<sup>η</sup> (MOGA Population characteristics) : Σε αυτή την ενότητα εξάγονται οι κύριες διαστάσεις, οι συντελεστές μορφής και άλλα βασικά χαρακτηριστικά όλων των design (του συνόλου δηλαδή των πληθυσμών όλων των γενεών) που παρήχθησαν από τον γενετικό αλγόριθμο.

### Δευτερεύουσες Ενότητες :

Σε αυτές τις ενότητες παράγονται εντός του αρχείου εξόδου Final\_Opt\_Results.xls τα ίδια ακριβώς γραφήματα με αυτά που ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει και μέσω του γραφικού περιβάλλοντος (GUI) του προγράμματος MOGA\_Optimization\_Tankers με μόνη διαφορά ότι εδώ από τον συνολικό πληθυσμό των design που παρήγαγε ο γενετικός αλγόριθμος (όλες οι γενεές) έχουμε τη δυνατότητα να απεικονίσουμε μόνο τα πρώτα 32000 designs.

Δευτερεύουσα Ενότητα 1<sup>η</sup> (Population-Pareto Res-RFR) : Εδώ φαίνεται το γράφημα των προκυπτουσών τιμών του ζεύγους αντικειμενικών συναρτήσεων Resistance – RFR για τα πρώτα 32000 designs που παρήχθησαν από τον γενετικό αλγόριθμο και για όλες τις nondominated Pareto λύσεις.

Δευτερεύουσα Ενότητα 2<sup>η</sup> (Population-Pareto LS-RFR) : Εδώ φαίνεται το γράφημα των προκυπτουσών τιμών του ζεύγους αντικειμενικών συναρτήσεων Lightship – RFR για τα πρώτα 32000 designs που παρήχθησαν από τον γενετικό αλγόριθμο και για όλες τις nondominated Pareto λύσεις.

Δευτερεύουσα Ενότητα 3<sup>η</sup> (Population-Pareto BuildCost-RFR) : Εδώ φαίνεται το γράφημα των προκυπτουσών τιμών του ζεύγους αντικειμενικών συναρτήσεων Build Cost – RFR για τα πρώτα 32000 designs που παρήχθησαν από τον γενετικό αλγόριθμο και για όλες τις nondominated Pareto λύσεις.

Δευτερεύουσα Ενότητα 4<sup>η</sup> (Population-Pareto PLoad-LS) : Εδώ φαίνεται το γράφημα των προκυπτουσών τιμών του ζεύγους αντικειμενικών συναρτήσεων Payload – Lightship για τα πρώτα 32000 designs που παρήχθησαν από τον γενετικό αλγόριθμο και για όλες τις nondominated Pareto λύσεις.

Δευτερεύουσα Ενότητα 5<sup>η</sup> (Population-Pareto Pload-RFR) : Εδώ φαίνεται το γράφημα των προκυπτουσών τιμών του ζεύγους αντικειμενικών συναρτήσεων Payload – RFR για τα πρώτα 32000 designs που παρήχθησαν από τον γενετικό αλγόριθμο και για όλες τις nondominated Pareto λύσεις.

Στις επόμενες εικόνες φαίνονται οι τέσσερις (4) κύριες ενότητες του αρχείου εξόδου Final\_Opt\_Results.xls (στις ενότητες (3) και (4) παραθέτουμε τα πρώτα 100 designs καθώς το σύνολο των designs για όλους τους δημιουργηθέντες πληθυσμούς ήταν 23221 και είναι αδύνατο να παρουσιαστούν όλα εδώ):

Ενότητα 1<sup>η</sup> (Pareto Set Main Characteristics) :

Pareto Front (Design Variables)

| DESIGN Number | L <sub>WL</sub> [m] | L <sub>BP</sub> [m] | B [m] | D [m] | T [m] | C <sub>B</sub> | C <sub>M</sub> | C <sub>WP</sub> | C <sub>P</sub> | L <sub>s</sub> [m] | S <sub>A</sub> [m] | S <sub>F</sub> [m] | b    | n | A <sub>BT</sub> [m <sup>2</sup> ] | h <sub>B</sub> [m] | A <sub>T</sub> [m <sup>2</sup> ] | DWT [tons] |
|---------------|---------------------|---------------------|-------|-------|-------|----------------|----------------|-----------------|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|------|---|-----------------------------------|--------------------|----------------------------------|------------|
| 1             | 243,05              | 234,83              | 37,27 | 18,79 | 13,31 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 234,829            | 0,02               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 80001,00   |
| 2             | 246,27              | 237,95              | 37,77 | 19,04 | 14,62 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 202,254            | 0,02               | 0,00               | 0,74 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 83400,71   |
| 3             | 274,73              | 265,44              | 42,13 | 21,24 | 16,36 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 225,627            | 0,01               | 0,00               | 0,05 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 117438,65  |
| 4             | 243,05              | 234,83              | 37,27 | 19,70 | 13,31 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 234,829            | 0,03               | 0,01               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,58                             | 80001,00   |
| 5             | 273,81              | 264,55              | 41,99 | 21,16 | 16,30 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 224,867            | 0,02               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 116212,41  |
| 6             | 244,23              | 235,97              | 37,46 | 18,88 | 14,50 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 200,576            | 0,01               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 7,05               | 1,57                             | 81237,52   |
| 7             | 259,80              | 251,01              | 39,84 | 20,08 | 14,24 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 213,360            | 0,02               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 98648,87   |
| 8             | 272,51              | 263,30              | 41,79 | 21,06 | 16,22 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 223,801            | 0,02               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 114508,16  |
| 9             | 272,14              | 262,94              | 41,74 | 21,04 | 16,23 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 262,937            | 0,02               | 0,71               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 114023,86  |
| 10            | 270,41              | 261,27              | 41,47 | 20,90 | 16,09 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 222,076            | 0,01               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 111782,99  |
| 11            | 267,33              | 258,29              | 41,00 | 20,66 | 15,90 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 219,546            | 0,02               | 0,00               | 0,05 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 107862,35  |
| 12            | 276,64              | 267,29              | 42,43 | 21,38 | 16,48 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 227,193            | 0,02               | 0,00               | 0,05 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 119990,95  |
| 13            | 263,83              | 254,91              | 40,46 | 20,39 | 15,68 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 216,670            | 0,01               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 103513,15  |
| 14            | 274,73              | 265,44              | 42,13 | 21,24 | 15,06 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 265,444            | 0,02               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,32                             | 7,05               | 1,57                             | 117438,66  |
| 15            | 252,68              | 244,13              | 38,75 | 19,53 | 15,00 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 207,512            | 0,02               | 0,00               | 0,05 | 1 | 29,32                             | 7,05               | 1,57                             | 90413,20   |
| 16            | 247,18              | 238,82              | 37,91 | 19,11 | 14,67 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 203,000            | 0,01               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 84375,23   |
| 17            | 257,65              | 248,94              | 39,51 | 19,92 | 15,31 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 211,596            | 0,01               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 96118,26   |
| 18            | 264,88              | 255,93              | 40,62 | 20,47 | 15,75 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 217,536            | 0,02               | 0,00               | 0,05 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 104810,93  |
| 19            | 276,64              | 267,29              | 42,43 | 21,38 | 15,15 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 227,193            | 0,02               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 119990,95  |
| 20            | 243,05              | 234,83              | 37,27 | 18,79 | 14,43 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 199,604            | 0,01               | 0,00               | 0,05 | 1 | 29,31                             | 7,05               | 1,57                             | 80001,00   |
| 21            | 259,45              | 250,67              | 39,79 | 20,05 | 14,22 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 213,073            | 0,02               | 0,00               | 0,74 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 98233,56   |
| 22            | 272,14              | 262,94              | 41,74 | 21,04 | 14,91 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 262,937            | 0,02               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 114023,86  |
| 23            | 256,80              | 248,11              | 39,38 | 19,85 | 15,25 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 210,897            | 0,01               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 95126,18   |
| 24            | 266,52              | 257,51              | 40,87 | 21,61 | 14,60 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 257,507            | 0,03               | 0,01               | 0,08 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,58                             | 106846,21  |
| 25            | 248,42              | 240,02              | 38,10 | 19,20 | 14,75 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 204,015            | 0,01               | 0,00               | 0,05 | 1 | 29,31                             | 7,05               | 1,57                             | 85711,48   |
| 26            | 247,18              | 238,82              | 37,91 | 19,11 | 13,55 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 238,824            | 0,02               | 0,71               | 0,06 | 1 | 29,32                             | 6,66               | 1,57                             | 84375,23   |
| 27            | 276,28              | 266,93              | 42,37 | 21,35 | 15,13 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 226,894            | 0,02               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 119500,58  |
| 28            | 254,75              | 246,14              | 39,07 | 19,69 | 13,97 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 246,140            | 0,02               | 0,00               | 0,75 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 92772,42   |
| 29            | 276,64              | 267,29              | 42,43 | 22,43 | 15,23 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 267,286            | 0,03               | 0,71               | 0,74 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,58                             | 119990,71  |
| 30            | 268,72              | 259,63              | 41,21 | 20,77 | 15,99 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 220,688            | 0,02               | 0,00               | 0,05 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 109620,59  |
| 31            | 251,47              | 242,97              | 38,57 | 20,40 | 13,78 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 206,520            | 0,03               | 0,00               | 0,74 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 89066,13   |
| 32            | 259,80              | 251,01              | 39,84 | 21,06 | 14,23 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 213,360            | 0,01               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 98648,87   |
| 33            | 252,67              | 244,13              | 38,75 | 19,53 | 15,01 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 207,509            | 0,04               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 90413,20   |
| 34            | 247,18              | 238,82              | 37,91 | 20,04 | 13,54 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 238,824            | 0,03               | 0,71               | 0,08 | 1 | 29,32                             | 6,65               | 1,58                             | 84375,23   |
| 35            | 270,41              | 261,27              | 41,47 | 21,92 | 14,89 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 261,266            | 0,02               | 0,01               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 111782,99  |
| 36            | 244,23              | 235,97              | 37,46 | 18,88 | 13,40 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 200,576            | 0,02               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 81237,52   |

Αποτελέσματα Pareto\_Set\_Main\_Characteristics για τα 36 designs του Pareto front που δημιουργήθηκαν κατά την βελτιστοποίηση κατηγορίας Aframax.

Ενότητα 2<sup>η</sup> (Pareto Set Obj Functions Values) :

Pareto Front (Objectives)

| DESIGN | Resistance [kN] | LightShip Weight [tons] | Payload [tons] | Build Cost [ \$ ] | Annual Cost [ \$ ] | RFR [ \$/ton ] |
|--------|-----------------|-------------------------|----------------|-------------------|--------------------|----------------|
| 1      | 979,43          | 11867,01                | 75499,86       | 61693110,69       | 14848308,62        | 62,44          |
| 2      | 1028,76         | 12265,51                | 79003,22       | 62887652,89       | 14590576,68        | 59,11          |
| 3      | 1193,83         | 15985,71                | 112387,73      | 79482742,82       | 17214269,67        | 49,78          |
| 4      | 979,43          | 12082,81                | 75474,21       | 62636393,61       | 14999738,51        | 63,17          |
| 5      | 1188,11         | 15854,77                | 111185,17      | 78900322,84       | 17118690,15        | 50,02          |
| 6      | 1017,73         | 12022,13                | 76891,01       | 61761220,04       | 14375394,47        | 59,79          |
| 7      | 1065,76         | 13929,41                | 93808,59       | 70876812,08       | 16230994,24        | 55,53          |
| 8      | 1180,06         | 15672,34                | 109514,45      | 78086625,88       | 16983254,01        | 50,36          |
| 9      | 1178,73         | 15622,30                | 109032,59      | 77885489,23       | 16973752,81        | 50,53          |
| 10     | 1166,98         | 15379,71                | 106843,55      | 76778946,41       | 16764610,88        | 50,90          |
| 11     | 1147,90         | 14956,73                | 103001,72      | 74885368,51       | 16447730,90        | 51,73          |
| 12     | 1205,65         | 16257,61                | 114890,40      | 80693184,06       | 17415543,55        | 49,31          |
| 13     | 1126,50         | 14484,76                | 98739,78       | 72771441,81       | 16097840,80        | 52,73          |
| 14     | 1153,00         | 15953,67                | 112228,50      | 79929446,33       | 17722979,74        | 51,05          |
| 15     | 1062,94         | 13047,29                | 85893,25       | 66345409,65       | 15075619,17        | 56,43          |
| 16     | 1033,58         | 12374,64                | 79968,19       | 63342357,05       | 14618576,69        | 58,57          |
| 17     | 1090,31         | 13676,08                | 91490,49       | 69152026,42       | 15512242,63        | 54,67          |
| 18     | 1132,90         | 14625,94                | 100011,59      | 73403708,92       | 16201887,84        | 52,43          |
| 19     | 1163,53         | 16223,62                | 114733,09      | 81128095,88       | 17917999,87        | 50,53          |
| 20     | 1011,29         | 11882,51                | 75679,11       | 61132286,02       | 14276811,16        | 60,29          |
| 21     | 1063,82         | 13884,05                | 93390,91       | 70713337,09       | 16252701,04        | 55,81          |
| 22     | 1137,05         | 15589,19                | 108880,71      | 78303521,73       | 17451866,02        | 51,76          |
| 23     | 1085,50         | 13567,01                | 90517,50       | 68664575,02       | 15435148,59        | 54,96          |
| 24     | 1103,81         | 15095,03                | 101807,54      | 76065650,69       | 17095975,83        | 54,12          |
| 25     | 1040,15         | 12524,03                | 81279,48       | 64009642,62       | 14719439,34        | 58,07          |
| 26     | 1000,43         | 12356,97                | 79792,99       | 63885042,37       | 15181571,92        | 60,58          |
| 27     | 1161,41         | 16171,71                | 114251,98      | 80897537,94       | 17880176,25        | 50,63          |
| 28     | 1038,69         | 13285,96                | 88032,31       | 68044787,09       | 15836006,74        | 57,53          |
| 29     | 1165,97         | 16532,02                | 114675,07      | 82526560,73       | 18244962,09        | 51,47          |
| 30     | 1156,50         | 15146,72                | 104724,61      | 75736040,60       | 16589674,26        | 51,35          |
| 31     | 1021,84         | 13117,82                | 84363,55       | 67276019,05       | 15735378,13        | 59,59          |
| 32     | 1065,41         | 14187,18                | 93774,89       | 72003717,79       | 16426350,14        | 56,27          |
| 33     | 1062,90         | 13046,91                | 85893,05       | 66344671,71       | 15076590,92        | 56,43          |
| 34     | 1000,09         | 12582,42                | 79764,99       | 64872774,37       | 15345248,82        | 61,31          |
| 35     | 1129,13         | 15639,47                | 106646,11      | 78489392,39       | 17495874,41        | 52,97          |
| 36     | 985,86          | 12006,38                | 76714,82       | 62311219,66       | 14936745,86        | 61,87          |

Αποτελέσματα Pareto\_Set\_Obj\_Functions\_Values για τα 36 designs του Pareto front που δημιουργήθηκαν κατά την βελτιστοποίηση κατηγορίας Aframax.



**Ενότητα 3<sup>η</sup> (MOGA Population objectives) :**

|         |          |           |             |             |       |  |  |  |
|---------|----------|-----------|-------------|-------------|-------|--|--|--|
| 1101,10 | 13092,41 | 75387,41  | 66756997,06 | 15408887,86 | 65,49 |  |  |  |
| 1101,10 | 13092,41 | 75387,41  | 66756997,06 | 15408887,86 | 65,49 |  |  |  |
| 1213,17 | 17184,57 | 110481,76 | 85471593,88 | 18761689,40 | 55,03 |  |  |  |
| 1299,23 | 17753,63 | 111630,32 | 88527321,06 | 19786790,00 | 57,20 |  |  |  |
| 1199,29 | 16010,87 | 107362,21 | 80550316,31 | 18246413,66 | 54,68 |  |  |  |
| 1306,23 | 16269,50 | 102959,42 | 81541502,19 | 18374860,48 | 57,49 |  |  |  |
| 1296,11 | 17210,52 | 104213,49 | 85634734,64 | 18950705,96 | 58,81 |  |  |  |
| 1335,67 | 17393,78 | 110272,02 | 86947847,73 | 19617888,81 | 57,29 |  |  |  |
| 1117,57 | 13260,88 | 77633,62  | 68579907,80 | 16628422,55 | 67,90 |  |  |  |
| 1166,68 | 13919,53 | 88437,55  | 71195240,13 | 16799141,86 | 60,57 |  |  |  |
| 1102,91 | 13452,22 | 75245,58  | 69205598,34 | 16494580,50 | 69,75 |  |  |  |
| 1398,83 | 17671,43 | 107336,10 | 88156641,48 | 19914751,74 | 59,73 |  |  |  |
| 1178,16 | 14924,09 | 95069,80  | 75896691,53 | 17688141,78 | 59,49 |  |  |  |
| 1222,93 | 14814,08 | 89297,39  | 75789092,57 | 18068723,22 | 64,38 |  |  |  |
| 1084,19 | 13413,01 | 84209,29  | 68852950,20 | 16260172,16 | 61,56 |  |  |  |
| 1158,10 | 14676,55 | 96270,32  | 74609546,94 | 17277456,53 | 57,46 |  |  |  |
| 1112,05 | 14386,47 | 86580,75  | 73129502,78 | 16835784,11 | 62,34 |  |  |  |
| 1172,82 | 13620,50 | 77497,30  | 70769568,94 | 17484725,03 | 71,24 |  |  |  |
| 1093,75 | 13235,40 | 78677,41  | 67701186,18 | 15767035,43 | 64,08 |  |  |  |
| 1143,64 | 13897,21 | 77739,42  | 71126958,11 | 16709138,13 | 68,60 |  |  |  |
| 1251,88 | 15311,14 | 91063,92  | 77636207,44 | 18071560,62 | 63,47 |  |  |  |
| 1204,90 | 14667,90 | 79920,49  | 74153667,29 | 16950717,00 | 68,10 |  |  |  |
| 1239,11 | 15183,15 | 92309,92  | 77413784,65 | 18269644,38 | 63,11 |  |  |  |
| 1387,75 | 18567,66 | 109999,69 | 92214439,14 | 20595954,44 | 60,43 |  |  |  |
| 1244,66 | 15366,81 | 88821,03  | 77856316,96 | 18043737,97 | 65,03 |  |  |  |
| 1060,84 | 13187,49 | 79989,13  | 67871164,56 | 16104732,53 | 64,12 |  |  |  |
| 1248,58 | 14957,79 | 97319,64  | 76621346,01 | 18347482,05 | 59,93 |  |  |  |
| 1377,35 | 18065,73 | 109046,12 | 90275108,29 | 20508146,27 | 60,47 |  |  |  |
| 1271,87 | 14276,35 | 88137,68  | 75040512,07 | 19415281,61 | 68,91 |  |  |  |
| 1203,70 | 13899,48 | 76422,83  | 71874360,45 | 17545056,14 | 72,68 |  |  |  |
| 1195,05 | 14124,87 | 80485,25  | 72641200,04 | 17452339,64 | 68,88 |  |  |  |
| 1136,50 | 13104,10 | 78249,45  | 67408370,52 | 16064741,78 | 65,32 |  |  |  |
| 1263,84 | 15903,79 | 104216,22 | 80198671,56 | 18403693,83 | 56,65 |  |  |  |
| 1192,66 | 15183,15 | 92880,84  | 77388342,79 | 18240116,18 | 62,63 |  |  |  |
| 1272,80 | 16645,96 | 101432,08 | 82752039,59 | 18134621,14 | 57,95 |  |  |  |
| 1286,52 | 17197,45 | 102388,41 | 85804441,26 | 19162544,63 | 60,41 |  |  |  |
| 1290,44 | 16579,85 | 97384,92  | 83020003,70 | 18727831,98 | 61,93 |  |  |  |
| 1238,25 | 16221,00 | 99585,65  | 81989603,38 | 18925035,22 | 60,89 |  |  |  |
| 1274,36 | 16486,29 | 109500,45 | 83125786,14 | 19147235,66 | 56,05 |  |  |  |
| 1264,11 | 15464,12 | 101003,02 | 78748047,52 | 18618838,61 | 58,75 |  |  |  |
| 1274,69 | 16876,56 | 109535,52 | 84237367,10 | 18733422,70 | 55,25 |  |  |  |
| 1245,06 | 15659,03 | 93455,78  | 78748120,93 | 17845301,52 | 61,43 |  |  |  |
| 1133,87 | 14099,86 | 80649,64  | 71975929,10 | 16791048,60 | 66,55 |  |  |  |
| 1199,81 | 14042,72 | 77748,25  | 71566826,58 | 16728031,91 | 68,75 |  |  |  |
| 1339,53 | 16432,64 | 103061,81 | 82497134,83 | 18784518,11 | 58,57 |  |  |  |
| 1179,23 | 14832,10 | 87197,82  | 75182451,66 | 17270950,43 | 63,53 |  |  |  |
| 1256,26 | 15330,02 | 101528,96 | 77669774,82 | 18030924,77 | 56,83 |  |  |  |
| 1203,28 | 16031,54 | 100756,11 | 80573618,76 | 18204413,78 | 58,16 |  |  |  |
| 1236,58 | 15849,96 | 95764,80  | 80257169,06 | 18618698,42 | 62,22 |  |  |  |
| 1322,75 | 16719,62 | 102859,54 | 84404189,53 | 19590190,98 | 60,95 |  |  |  |
| 1248,68 | 15604,57 | 94875,24  | 78765200,89 | 18092056,73 | 61,61 |  |  |  |
| 1305,33 | 16283,87 | 93858,88  | 82451175,46 | 19273425,08 | 65,61 |  |  |  |
| 1284,59 | 15578,55 | 94385,31  | 79286572,99 | 18712805,29 | 63,21 |  |  |  |
| 1312,90 | 17758,62 | 111558,95 | 88921912,59 | 20214095,33 | 58,25 |  |  |  |
| 1116,89 | 14080,52 | 90615,39  | 71781530,13 | 16666597,77 | 58,85 |  |  |  |
| 1081,65 | 13504,82 | 79809,11  | 69286000,75 | 16333548,18 | 65,27 |  |  |  |
| 1173,33 | 14743,72 | 84536,11  | 74719691,56 | 17152517,81 | 65,09 |  |  |  |
| 1300,88 | 17477,07 | 101815,20 | 86873046,52 | 19177800,90 | 60,95 |  |  |  |
| 1273,86 | 16830,92 | 107992,74 | 84370208,45 | 19022156,32 | 56,73 |  |  |  |
| 1355,52 | 17769,75 | 113168,93 | 88126041,98 | 19415430,51 | 55,54 |  |  |  |
| 1186,55 | 13726,73 | 83554,09  | 70580932,94 | 16952229,69 | 64,45 |  |  |  |
| 1323,29 | 17499,64 | 104834,23 | 86923377,70 | 19198569,34 | 59,26 |  |  |  |
| 1229,79 | 15628,66 | 98050,15  | 78878192,35 | 18046126,88 | 59,08 |  |  |  |
| 1291,68 | 15668,23 | 90476,60  | 79995019,27 | 19079127,96 | 67,09 |  |  |  |
| 1250,17 | 15041,01 | 94790,75  | 77480189,79 | 18936546,39 | 63,22 |  |  |  |
| 1238,01 | 15210,78 | 94676,44  | 76683031,86 | 17438224,11 | 59,21 |  |  |  |
| 1322,18 | 16087,38 | 100456,82 | 81452130,06 | 19025887,85 | 60,52 |  |  |  |
| 1346,52 | 17339,16 | 103992,10 | 86841704,29 | 19721339,17 | 60,98 |  |  |  |
| 1160,86 | 13992,75 | 87055,20  | 71576780,61 | 16853540,15 | 61,76 |  |  |  |
| 1140,71 | 13535,49 | 78560,16  | 69790242,14 | 16814857,50 | 67,94 |  |  |  |
| 1292,48 | 17218,38 | 107427,61 | 85976496,38 | 19218999,12 | 57,73 |  |  |  |
| 1150,36 | 14124,48 | 90625,26  | 71913456,92 | 16674280,06 | 58,89 |  |  |  |
| 1311,39 | 16989,20 | 105371,58 | 85148522,37 | 19318119,50 | 58,96 |  |  |  |
| 1154,86 | 13772,88 | 82347,30  | 70086389,77 | 16190380,53 | 62,98 |  |  |  |
| 1323,60 | 13045,87 | 78090,87  | 71599288,13 | 20737456,67 | 81,29 |  |  |  |
| 1381,62 | 18377,85 | 110405,83 | 90972872,15 | 20045417,45 | 58,78 |  |  |  |
| 1309,78 | 16550,72 | 109524,50 | 83068588,76 | 18903737,13 | 55,47 |  |  |  |
| 1312,53 | 17312,14 | 114347,76 | 86412413,75 | 19363934,25 | 54,62 |  |  |  |
| 1307,66 | 16915,08 | 109073,44 | 84397854,37 | 18814800,52 | 55,70 |  |  |  |
| 1123,75 | 13156,39 | 76597,71  | 67837622,33 | 16248986,12 | 67,42 |  |  |  |
| 1247,66 | 15555,00 | 96517,39  | 78416409,13 | 17873628,28 | 59,50 |  |  |  |
| 1329,75 | 18408,69 | 114015,92 | 91454135,01 | 20319851,68 | 57,59 |  |  |  |
| 1198,59 | 14985,48 | 95103,22  | 76452238,08 | 18007718,67 | 60,40 |  |  |  |
| 1330,88 | 16590,41 | 109352,48 | 83381604,32 | 19108492,45 | 56,08 |  |  |  |
| 1087,62 | 13453,11 | 77922,31  | 69101881,85 | 16373460,04 | 66,94 |  |  |  |
| 1417,56 | 18211,79 | 113556,10 | 90747038,41 | 20507322,97 | 58,13 |  |  |  |
| 1317,97 | 17563,62 | 111245,83 | 87449438,85 | 19440501,34 | 56,46 |  |  |  |
| 1333,18 | 16629,59 | 96832,98  | 84011898,02 | 19545613,81 | 64,56 |  |  |  |
| 1238,69 | 15789,37 | 91780,24  | 80017182,73 | 18606804,17 | 64,85 |  |  |  |
| 1215,38 | 15202,03 | 88301,21  | 76884698,26 | 17645437,12 | 64,11 |  |  |  |
| 1288,85 | 17541,79 | 103090,25 | 87652089,19 | 19726694,44 | 61,65 |  |  |  |
| 1083,72 | 12927,59 | 75823,87  | 66485916,65 | 15761340,47 | 66,22 |  |  |  |
| 1215,59 | 15240,82 | 89664,16  | 77312868,14 | 17897394,36 | 63,91 |  |  |  |
| 1320,21 | 16903,29 | 111164,83 | 85117416,18 | 19596820,73 | 56,51 |  |  |  |
| 1320,99 | 16673,17 | 96242,14  | 83812670,77 | 19122519,07 | 63,82 |  |  |  |
| 1260,17 | 14868,75 | 93410,35  | 76566537,09 | 18638604,85 | 63,20 |  |  |  |
| 1197,82 | 15419,05 | 94625,56  | 77840547,12 | 17741559,34 | 60,24 |  |  |  |
| 1223,68 | 14756,77 | 87201,39  | 74940223,00 | 17394894,11 | 63,83 |  |  |  |
| 1353,42 | 17297,78 | 112362,64 | 86398344,95 | 19460579,63 | 55,79 |  |  |  |
| 1324,25 | 17742,53 | 113359,02 | 88982470,20 | 20322553,41 | 57,57 |  |  |  |

| Columns Explanation : |             |            |
|-----------------------|-------------|------------|
| A                     | Resistance  | [kN]       |
| B                     | Lightship   | [tons]     |
| C                     | Payload     | [tons]     |
| D                     | Build Cost  | [ \$ ]     |
| E                     | Annual Cost | [ \$ ]     |
| F                     | RFR         | [ \$/ton ] |

## Ενότητα 4<sup>η</sup> (MOGA Population characteristics) :

|        |       |       |       |       |       |       |       |           |  |  |  |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|--|--|--|
| 234,83 | 40,49 | 19,90 | 16,87 | 0,840 | 0,997 | 0,896 | 0,843 | 80001,00  |  |  |  |
| 234,83 | 40,49 | 19,90 | 16,87 | 0,840 | 0,997 | 0,896 | 0,843 | 80001,00  |  |  |  |
| 272,09 | 43,34 | 22,34 | 15,74 | 0,841 | 0,997 | 0,896 | 0,843 | 115941,10 |  |  |  |
| 271,85 | 44,99 | 22,19 | 16,27 | 0,848 | 0,997 | 0,902 | 0,851 | 117387,50 |  |  |  |
| 262,87 | 42,40 | 21,58 | 15,60 | 0,844 | 0,997 | 0,898 | 0,846 | 112714,84 |  |  |  |
| 259,47 | 44,20 | 21,09 | 18,12 | 0,855 | 0,998 | 0,906 | 0,857 | 108355,94 |  |  |  |
| 267,48 | 44,50 | 21,99 | 17,77 | 0,847 | 0,997 | 0,901 | 0,850 | 109728,34 |  |  |  |
| 273,59 | 43,72 | 21,89 | 17,25 | 0,857 | 0,998 | 0,908 | 0,859 | 115987,59 |  |  |  |
| 242,10 | 39,07 | 20,25 | 14,62 | 0,855 | 0,998 | 0,906 | 0,857 | 82610,46  |  |  |  |
| 247,74 | 39,45 | 20,86 | 16,07 | 0,851 | 0,997 | 0,904 | 0,854 | 93436,78  |  |  |  |
| 242,45 | 39,57 | 20,41 | 14,72 | 0,844 | 0,997 | 0,898 | 0,846 | 80174,39  |  |  |  |
| 265,68 | 45,67 | 22,43 | 18,69 | 0,859 | 0,998 | 0,910 | 0,861 | 113123,17 |  |  |  |
| 255,20 | 41,00 | 21,12 | 15,40 | 0,845 | 0,997 | 0,900 | 0,848 | 100297,40 |  |  |  |
| 254,83 | 40,66 | 21,04 | 15,65 | 0,858 | 0,998 | 0,909 | 0,861 | 94646,77  |  |  |  |
| 243,06 | 39,59 | 20,16 | 14,60 | 0,844 | 0,997 | 0,899 | 0,847 | 89066,14  |  |  |  |
| 253,70 | 41,06 | 20,57 | 15,29 | 0,847 | 0,997 | 0,901 | 0,850 | 101393,20 |  |  |  |
| 251,42 | 40,74 | 20,54 | 14,75 | 0,842 | 0,997 | 0,897 | 0,844 | 91579,82  |  |  |  |
| 242,85 | 40,50 | 19,68 | 14,69 | 0,853 | 0,997 | 0,905 | 0,855 | 82735,70  |  |  |  |
| 242,76 | 39,62 | 19,49 | 15,64 | 0,844 | 0,997 | 0,898 | 0,846 | 83399,66  |  |  |  |
| 244,00 | 41,46 | 19,55 | 15,47 | 0,841 | 0,997 | 0,896 | 0,843 | 82734,44  |  |  |  |
| 255,94 | 41,60 | 21,45 | 16,78 | 0,854 | 0,998 | 0,906 | 0,857 | 96392,84  |  |  |  |
| 246,52 | 42,39 | 20,72 | 17,57 | 0,847 | 0,997 | 0,901 | 0,849 | 84936,01  |  |  |  |
| 253,03 | 42,61 | 20,59 | 15,79 | 0,853 | 0,997 | 0,905 | 0,855 | 97720,78  |  |  |  |
| 271,40 | 46,61 | 22,87 | 17,93 | 0,848 | 0,997 | 0,901 | 0,850 | 115956,79 |  |  |  |
| 252,59 | 43,19 | 20,76 | 16,66 | 0,853 | 0,997 | 0,905 | 0,855 | 94145,85  |  |  |  |
| 242,86 | 39,10 | 19,95 | 14,16 | 0,840 | 0,997 | 0,896 | 0,843 | 84807,88  |  |  |  |
| 254,92 | 41,47 | 20,55 | 15,68 | 0,858 | 0,998 | 0,909 | 0,860 | 102764,30 |  |  |  |
| 271,57 | 45,58 | 22,37 | 17,22 | 0,856 | 0,998 | 0,907 | 0,858 | 115000,56 |  |  |  |
| 250,33 | 39,89 | 20,73 | 14,54 | 0,855 | 0,998 | 0,906 | 0,857 | 93943,30  |  |  |  |
| 241,90 | 41,58 | 19,71 | 15,28 | 0,856 | 0,998 | 0,907 | 0,858 | 81677,76  |  |  |  |
| 246,85 | 41,01 | 20,04 | 15,59 | 0,848 | 0,997 | 0,901 | 0,850 | 85694,30  |  |  |  |
| 238,60 | 39,83 | 19,62 | 16,10 | 0,852 | 0,997 | 0,905 | 0,855 | 83064,56  |  |  |  |
| 260,91 | 42,20 | 21,66 | 16,91 | 0,852 | 0,997 | 0,904 | 0,854 | 109620,58 |  |  |  |
| 255,99 | 41,31 | 21,50 | 15,00 | 0,851 | 0,997 | 0,903 | 0,853 | 98261,09  |  |  |  |
| 262,22 | 44,49 | 21,48 | 18,45 | 0,846 | 0,997 | 0,900 | 0,848 | 106729,64 |  |  |  |
| 267,22 | 44,21 | 22,30 | 17,03 | 0,845 | 0,997 | 0,899 | 0,847 | 107969,44 |  |  |  |
| 262,20 | 43,54 | 22,16 | 17,65 | 0,849 | 0,997 | 0,902 | 0,851 | 102854,15 |  |  |  |
| 263,42 | 43,02 | 21,37 | 15,41 | 0,845 | 0,997 | 0,899 | 0,847 | 105147,48 |  |  |  |
| 264,26 | 42,94 | 22,08 | 15,99 | 0,856 | 0,998 | 0,907 | 0,858 | 115109,80 |  |  |  |
| 257,96 | 41,76 | 21,30 | 16,06 | 0,860 | 0,998 | 0,910 | 0,862 | 106493,74 |  |  |  |
| 264,57 | 44,55 | 21,54 | 17,21 | 0,841 | 0,997 | 0,896 | 0,843 | 115015,79 |  |  |  |
| 258,76 | 42,14 | 21,47 | 17,39 | 0,851 | 0,997 | 0,903 | 0,853 | 98700,75  |  |  |  |
| 248,67 | 40,58 | 20,19 | 15,18 | 0,842 | 0,997 | 0,897 | 0,844 | 85654,16  |  |  |  |
| 243,57 | 41,42 | 20,17 | 17,14 | 0,856 | 0,998 | 0,907 | 0,858 | 82726,24  |  |  |  |
| 260,15 | 44,40 | 21,19 | 18,28 | 0,860 | 0,998 | 0,910 | 0,862 | 108569,27 |  |  |  |
| 252,59 | 41,76 | 20,55 | 16,01 | 0,841 | 0,997 | 0,897 | 0,844 | 92319,83  |  |  |  |
| 258,60 | 41,18 | 21,35 | 16,89 | 0,859 | 0,998 | 0,909 | 0,861 | 106846,22 |  |  |  |
| 258,09 | 43,23 | 21,85 | 15,85 | 0,840 | 0,997 | 0,896 | 0,843 | 106096,53 |  |  |  |
| 259,34 | 42,57 | 21,55 | 15,61 | 0,854 | 0,997 | 0,906 | 0,856 | 101241,89 |  |  |  |
| 262,13 | 44,34 | 21,67 | 16,49 | 0,856 | 0,998 | 0,907 | 0,858 | 108603,85 |  |  |  |
| 258,60 | 41,87 | 21,57 | 17,02 | 0,851 | 0,997 | 0,903 | 0,853 | 100192,42 |  |  |  |
| 258,97 | 43,69 | 21,69 | 16,40 | 0,858 | 0,998 | 0,909 | 0,860 | 99520,00  |  |  |  |
| 257,69 | 42,57 | 20,82 | 16,33 | 0,858 | 0,998 | 0,909 | 0,860 | 99913,54  |  |  |  |
| 273,00 | 44,39 | 22,56 | 15,92 | 0,853 | 0,997 | 0,905 | 0,855 | 117438,15 |  |  |  |
| 250,73 | 40,15 | 20,19 | 15,09 | 0,843 | 0,997 | 0,898 | 0,845 | 95571,49  |  |  |  |
| 245,86 | 39,15 | 20,36 | 14,39 | 0,844 | 0,997 | 0,899 | 0,847 | 84686,57  |  |  |  |
| 252,53 | 41,58 | 20,47 | 16,11 | 0,844 | 0,997 | 0,898 | 0,846 | 89617,46  |  |  |  |
| 266,53 | 45,41 | 22,07 | 17,65 | 0,841 | 0,997 | 0,896 | 0,843 | 107395,97 |  |  |  |
| 263,47 | 44,85 | 21,31 | 16,43 | 0,842 | 0,997 | 0,897 | 0,845 | 113569,47 |  |  |  |
| 270,19 | 45,57 | 21,92 | 18,73 | 0,852 | 0,997 | 0,905 | 0,855 | 118804,85 |  |  |  |
| 246,01 | 39,55 | 20,39 | 16,12 | 0,859 | 0,998 | 0,909 | 0,861 | 88607,35  |  |  |  |
| 267,09 | 45,06 | 22,35 | 18,25 | 0,847 | 0,997 | 0,901 | 0,849 | 110413,21 |  |  |  |
| 260,65 | 41,99 | 21,10 | 16,43 | 0,848 | 0,997 | 0,902 | 0,851 | 103363,95 |  |  |  |
| 256,49 | 43,31 | 20,58 | 15,85 | 0,860 | 0,998 | 0,910 | 0,862 | 96118,26  |  |  |  |
| 256,00 | 40,86 | 21,28 | 15,02 | 0,859 | 0,998 | 0,909 | 0,861 | 100401,59 |  |  |  |
| 253,96 | 42,50 | 20,70 | 17,53 | 0,854 | 0,997 | 0,905 | 0,856 | 99825,78  |  |  |  |
| 257,75 | 43,70 | 21,29 | 17,07 | 0,860 | 0,998 | 0,910 | 0,862 | 106054,43 |  |  |  |
| 267,44 | 45,13 | 21,60 | 17,29 | 0,855 | 0,998 | 0,907 | 0,857 | 109747,76 |  |  |  |
| 247,49 | 40,52 | 20,06 | 15,79 | 0,847 | 0,997 | 0,901 | 0,849 | 92078,53  |  |  |  |
| 241,67 | 40,03 | 20,28 | 15,03 | 0,853 | 0,997 | 0,905 | 0,855 | 83585,30  |  |  |  |
| 267,77 | 44,81 | 21,59 | 16,90 | 0,845 | 0,997 | 0,899 | 0,847 | 113037,97 |  |  |  |
| 250,68 | 40,33 | 20,07 | 16,03 | 0,846 | 0,997 | 0,900 | 0,848 | 95583,70  |  |  |  |
| 267,12 | 43,84 | 21,97 | 17,04 | 0,854 | 0,997 | 0,906 | 0,856 | 111011,64 |  |  |  |
| 245,81 | 40,46 | 19,79 | 16,82 | 0,851 | 0,997 | 0,903 | 0,853 | 87175,41  |  |  |  |
| 240,22 | 38,38 | 19,67 | 13,74 | 0,848 | 0,997 | 0,902 | 0,851 | 84375,23  |  |  |  |
| 272,50 | 45,85 | 22,88 | 18,59 | 0,852 | 0,997 | 0,904 | 0,854 | 116205,52 |  |  |  |
| 264,72 | 42,84 | 22,17 | 17,54 | 0,855 | 0,998 | 0,907 | 0,857 | 115053,29 |  |  |  |
| 270,31 | 43,76 | 22,37 | 17,17 | 0,852 | 0,997 | 0,904 | 0,854 | 119990,70 |  |  |  |
| 265,75 | 44,36 | 21,56 | 17,89 | 0,851 | 0,997 | 0,904 | 0,853 | 114569,46 |  |  |  |
| 241,01 | 39,61 | 19,47 | 15,26 | 0,852 | 0,997 | 0,904 | 0,854 | 81476,03  |  |  |  |
| 254,43 | 43,58 | 20,60 | 17,19 | 0,850 | 0,997 | 0,903 | 0,852 | 101787,21 |  |  |  |
| 271,39 | 46,57 | 22,57 | 16,75 | 0,842 | 0,997 | 0,897 | 0,844 | 119903,65 |  |  |  |
| 253,48 | 41,79 | 20,82 | 15,10 | 0,854 | 0,998 | 0,906 | 0,857 | 100440,30 |  |  |  |
| 264,75 | 42,77 | 22,32 | 17,67 | 0,860 | 0,998 | 0,910 | 0,862 | 114939,74 |  |  |  |
| 244,57 | 39,03 | 20,59 | 14,48 | 0,847 | 0,997 | 0,901 | 0,849 | 82809,72  |  |  |  |
| 269,93 | 46,02 | 22,69 | 18,35 | 0,859 | 0,998 | 0,910 | 0,861 | 119500,57 |  |  |  |
| 271,21 | 44,57 | 22,09 | 17,35 | 0,847 | 0,997 | 0,901 | 0,849 | 116907,69 |  |  |  |
| 263,59 | 43,68 | 21,70 | 16,68 | 0,858 | 0,998 | 0,909 | 0,860 | 102570,31 |  |  |  |
| 254,03 | 43,75 | 21,29 | 15,76 | 0,849 | 0,997 | 0,902 | 0,851 | 97258,62  |  |  |  |
| 253,36 | 42,45 | 20,86 | 16,54 | 0,848 | 0,997 | 0,902 | 0,851 | 93514,11  |  |  |  |
| 266,58 | 45,33 | 22,40 | 16,23 | 0,844 | 0,997 | 0,899 | 0,847 | 108828,50 |  |  |  |
| 239,25 | 38,61 | 20,21 | 15,32 | 0,843 | 0,997 | 0,898 | 0,845 | 80547,20  |  |  |  |
| 254,23 | 42,69 | 20,51 | 15,93 | 0,846 | 0,997 | 0,900 | 0,849 | 94962,66  |  |  |  |
| 266,17 | 43,89 | 21,83 | 16,46 | 0,855 | 0,998 | 0,906 | 0,857 | 116906,56 |  |  |  |
| 262,70 | 44,66 | 21,10 | 17,07 | 0,856 | 0,998 | 0,907 | 0,858 | 101859,09 |  |  |  |
| 253,07 | 41,48 | 20,60 | 15,48 | 0,854 | 0,997 | 0,906 | 0,856 | 98955,53  |  |  |  |
| 254,57 | 42,92 | 20,85 | 16,09 | 0,840 | 0,997 | 0,896 | 0,843 | 99861,50  |  |  |  |
| 253,33 | 41,35 | 20,48 | 16,73 | 0,857 | 0,998 | 0,908 | 0,859 | 92359,23  |  |  |  |
| 270,86 | 44,08 | 21,82 | 17,98 | 0,858 | 0,998 | 0,909 | 0,860 | 118032,60 |  |  |  |
| 274,66 | 44,49 | 21,99 | 15,89 | 0,855 | 0,998 | 0,907 | 0,858 | 119278,77 |  |  |  |

| Columns Explanation : |                 |        |
|-----------------------|-----------------|--------|
| A                     | L <sub>BP</sub> | [m]    |
| B                     | B               | [m]    |
| C                     | D               | [m]    |
| D                     | T               | [m]    |
| E                     | C <sub>B</sub>  | --     |
| F                     | C <sub>M</sub>  | --     |
| G                     | C <sub>WP</sub> | --     |
| H                     | C <sub>P</sub>  | --     |
| I                     | DWT             | [tons] |

### **Το αρχείο εξόδου Detailed Info Output.xls**

Αυτό το αρχείο εξόδου το οποίο είναι τύπου Microsoft Excel Spreadsheet (\*.xls) δημιουργείται για ένα συγκεκριμένο design του Pareto Set ή Pareto Front το οποίο καθορίζεται από το χρήστη μέσω του γραφικού περιβάλλοντος (GUI) του προγράμματος MOGA\_Optimization\_Tankers. Το Detailed\_Info\_Output.xls περιέχει λεπτομερέστερα στοιχεία για το design που έχει επιλεγεί. Αυτά τα στοιχεία αφορούν τις εξής 14 κατηγορίες :

- 1) Κυρία Χαρακτηριστικά Πλοίου (Main Ship Characteristics)
- 2) Ομάδες Βαρών (Weights)
- 3) Ομάδες Όγκων (Volumes)
- 4) Στοιχεία Αντίστασης και Πρόωσης (Propulsion and Resistance Data)
- 5) Ιπποδύναμη Κύριας Μηχανής (Machinery Data)
- 6) Στοιχεία Γραμμής Φόρτωσης (Loadline)
- 7) Ελάχιστο Απαιτούμενο Έρμα με Βάση τη MARPOL (Minimum Water Ballast Requirements (MARPOL) ).
- 8) Στοιχεία Αρχικής Ευστάθειας Άθικτου Πλοίου (Initial Intact Stability Summary)
- 9) Στοιχεία Συνολικού Κόστους Κτήσεως (Build Cost Data)
- 10) Στοιχεία Συνολικού Ετήσιου Κόστους Εκμετάλλευσης (Annual Costs Data)
- 11) Στοιχεία Ελάχιστου Απαιτούμενου Ναύλου (Required Freight Rate Data)
- 12) Στοιχεία δείκτη EEDI (Energy Efficiency Design Index)
- 13) Στοιχεία Καμπυλών Ευστάθειας KN – φ (Initial Intact Stability KN – φ Curves (cross curves)).
- 14) Στοιχεία Μοχλοβραχίονα Επαναφοράς GZ – φ (Initial Intact Stability GZ – φ Curves (righting lever) ).

Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το αρχείο εξόδου Detailed\_Info\_Output.xls :

# Detailed Info Output.xls

Output file of MOGA\_Optimization\_Tankers with detailed information about the selected design.

| Main Ship Characteristics   |        |                |
|-----------------------------|--------|----------------|
| L <sub>WL</sub>             | 256,80 | m              |
| L <sub>BP</sub>             | 248,11 | m              |
| B                           | 39,38  | m              |
| D                           | 20,80  | m              |
| T                           | 14,07  | m              |
| C <sub>A</sub>              | 0,84   |                |
| C <sub>M</sub>              | 1,00   |                |
| C <sub>WP</sub>             | 0,90   |                |
| C <sub>P</sub>              | 0,84   |                |
| L <sub>c</sub>              | 210,90 | m              |
| S <sub>A</sub>              | 0,01   | m              |
| S <sub>P</sub>              | 0,00   | m              |
| b                           | 0,06   | m              |
| n                           | 1,00   | full decks     |
| A <sub>air</sub>            | 29,31  | m <sup>2</sup> |
| h <sub>a</sub>              | 6,65   | m <sup>2</sup> |
| A <sub>r</sub>              | 1,57   | m <sup>2</sup> |
| T <sub>max</sub> (Loadline) | 15,94  | m              |

| Weights                         |           |      |
|---------------------------------|-----------|------|
| Steel (no superstructures)      | 10916,51  | tons |
| Superstructures                 | 421,20    | tons |
| Steel (with superstructures)    | 10937,71  | tons |
| Machinery                       | 1091,09   | tons |
| Outfitting                      | 1961,77   | tons |
| LIGHTSHIP                       | 13790,57  | tons |
| DWT                             | 95126,18  | tons |
| Fuel Oil                        | 3851,62   | tons |
| Diesel Oil Generators           | 517,56    | tons |
| Diesel Oil Manuever             | 294,61    | tons |
| Diesel Oil Total                | 752,17    | tons |
| Lubricating Oil                 | 134,06    | tons |
| TOTAL OILS                      | 4237,85   | tons |
| Crew                            | 3,38      | tons |
| Provisions                      | 16,67     | tons |
| Fresh Water                     | 229,17    | tons |
| Constants (no constant ballast) | 200,00    | tons |
| Misc                            | 118,30    | tons |
| Rest (Constants + Misc)         | 318,30    | tons |
| Payload                         | 90320,82  | tons |
| Disp                            | 108916,75 | tons |

| Volumes                               |           |                |
|---------------------------------------|-----------|----------------|
| Geometric Displacement                | 106260,25 | m <sup>3</sup> |
| Total Achieved Volume Under Main Deck | 192525,71 | m <sup>3</sup> |
| Superstructures Volume                | 1722,42   | m <sup>3</sup> |
| Winch Houses Volume                   | 21,41     | m <sup>3</sup> |
| Machinery Room Volume                 | 18318,81  | m <sup>3</sup> |
| Minimum Water Ballast Tanks Volume    | 41406,26  | m <sup>3</sup> |
| Fuel Oil Tanks Volume                 | 3712,57   | m <sup>3</sup> |
| Lubricating Oil Tanks Volume          | 155,10    | m <sup>3</sup> |
| Diesel Oil Tanks Volume               | 921,39    | m <sup>3</sup> |
| Fresh Water Tanks Volume              | 229,17    | m <sup>3</sup> |
| Total Consumables Tanks Volume        | 5018,23   | m <sup>3</sup> |
| Payload (Cargo) Tanks Volume          | 108097,71 | m <sup>3</sup> |
| Slop Tanks Volume                     | 2161,95   | m <sup>3</sup> |
| Fore and Aft Trimming Tanks Volume    | 4140,63   | m <sup>3</sup> |
| Minimum Required Enclosed Volume      | 167822,78 | m <sup>3</sup> |
| Total Achieved Enclosed Volume        | 194269,54 | m <sup>3</sup> |
| Gross Tonnage                         | 40908,66  |                |

| Propulsion and Resistance Data |           |                |
|--------------------------------|-----------|----------------|
| Resistance                     | 1049,13   | kN             |
| Wetted Area of the hull        | 14983,17  | m <sup>2</sup> |
| Angle of Entrance              | 53,01     | degrees        |
| w                              | 0,50      |                |
| t                              | 0,24      |                |
| η <sub>p</sub>                 | 1,02      |                |
| η <sub>o</sub>                 | 0,44      |                |
| η <sub>s</sub>                 | 1,51      |                |
| Propulsive Coefficient         | 0,67      |                |
| Propeller Diameter             | 7,09      | m              |
| Propeller Thrust               | 141176,31 | kilopond       |
| P/D                            | 0,75      |                |
| Propeller Pitch                | 5,28      | m              |
| A <sub>0</sub> /A <sub>0</sub> | 0,54      |                |
| K <sub>T</sub> /J <sup>2</sup> | 1,83      |                |
| 1/J                            | 2,98      |                |
| Propeller Revolutions          | 98,31     | RPM            |

| Machinery Data |          |    |
|----------------|----------|----|
| EHP            | 8095,80  | kW |
| SHP            | 16333,41 | kW |

| Loadline             |         |    |
|----------------------|---------|----|
| T <sub>max</sub>     | 15,94   | m  |
| Min_Summer_Freeboard | 4877,02 | mm |

| Minimum Water Ballast Requirements (MARPOL) |          |                |
|---------------------------------------------|----------|----------------|
| Minimum Water Ballast                       | 41627,89 | tons           |
| Minimum Water Ballast Tanks Volume          | 41406,26 | m <sup>3</sup> |

| Initial Intact Stability Summary |        |   |
|----------------------------------|--------|---|
| KG steel                         | 13,31  | m |
| KG outfitting                    | 20,28  | m |
| KG machinery                     | 10,66  | m |
| LCG steel                        | 117,85 | m |
| LCG outfitting                   | 110,41 | m |
| LCG machinery                    | 26,67  | m |
| KB                               | 7,29   | m |
| BM                               | 9,18   | m |
| KG FLD                           | 11,12  | m |
| LCG FLD                          | 130,96 | m |
| GM FLD                           | 5,35   | m |
| KG DWT                           | 12,48  | m |
| LCG DWT                          | 133,32 | m |

| Build Cost Data               |             |    |
|-------------------------------|-------------|----|
| Steel build cost makings      | 13287913,55 | \$ |
| Steel build cost work         | 3296223,23  | \$ |
| Outfitting build cost makings | 6714070,85  | \$ |
| Outfitting build cost work    | 1473820,43  | \$ |
| Machinery build cost makings  | 13427133,41 | \$ |
| Machinery build cost work     | 2369494,13  | \$ |
| SHIP BUILD COST TOTAL         | 70234755,60 | \$ |

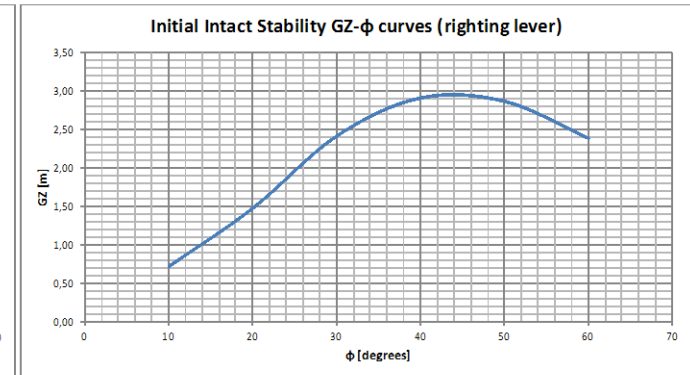
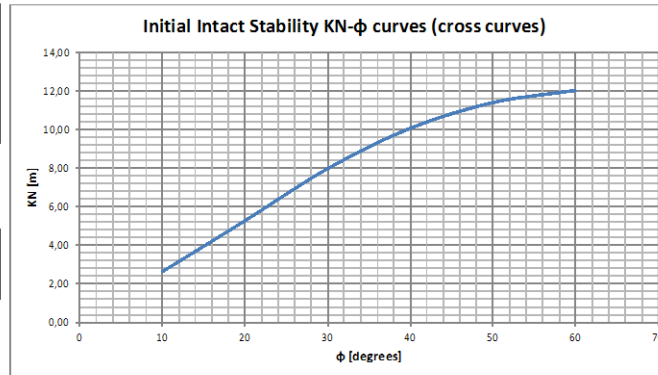
| Annual Costs Data           |            |    |
|-----------------------------|------------|----|
| Fuel Oil annual cost        | 9652652,00 | \$ |
| Diesel Oil annual cost      | 379039,45  | \$ |
| Lubricating Oil annual cost | 965265,20  | \$ |
| Fresh Water annual cost     | 1650,00    | \$ |
| Food annual cost            | 146000,00  | \$ |
| Crew payments annual cost   | 700000,00  | \$ |
| Service repairs annual cost | 579482,20  | \$ |
| insurance annual cost       | 126874,17  | \$ |
| Port annual cost            | 33516,10   | \$ |
| Rest annual costs           | 148801,15  | \$ |
| Total Annual Cost           | 1615180,27 | \$ |

| Required Freight Rate Data  |             |         |
|-----------------------------|-------------|---------|
| Loan amount                 | 42140853,36 | \$      |
| Capital amount              | 28039902,24 | \$      |
| Scrap value of ship         | 8428170,67  | \$      |
| Total Annual Paylod         | 361283,29   | tons    |
| Annual Loan Desege          | 4292139,00  | \$      |
| Required Freight Rate (RFR) | 57,32       | \$/ ton |

| Energy Efficiency Design Index |       |  |
|--------------------------------|-------|--|
| EEDI                           | 5,385 |  |

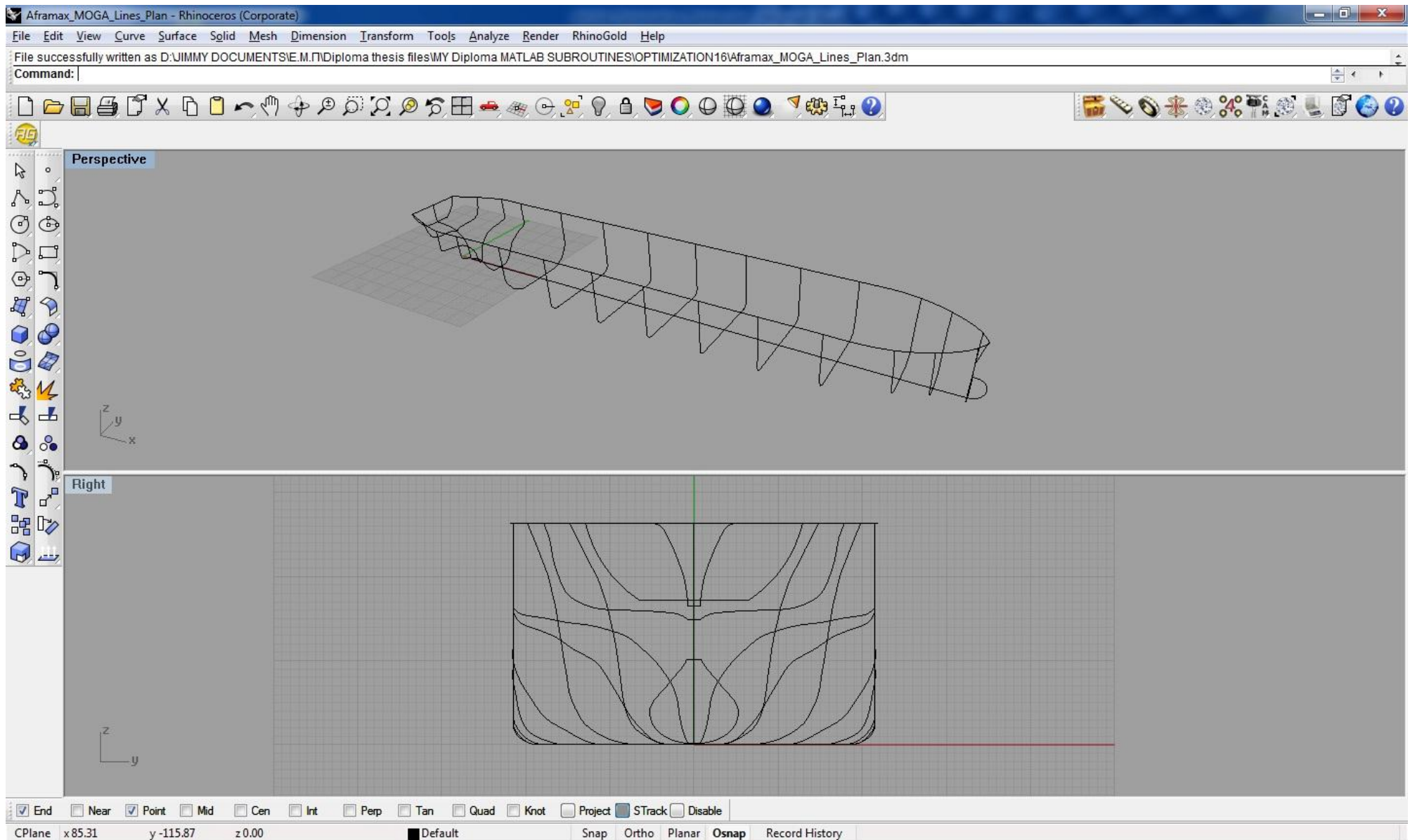
| Initial Intact Stability KN-φ curves (cross curves) |        |  |
|-----------------------------------------------------|--------|--|
| φ (degrees)                                         | KN (m) |  |
| 10                                                  | 2,65   |  |
| 20                                                  | 5,28   |  |
| 30                                                  | 7,98   |  |
| 40                                                  | 10,06  |  |
| 50                                                  | 11,38  |  |
| 60                                                  | 12,02  |  |

| Initial Intact Stability GZ-φ curves (righting lever) |        |  |
|-------------------------------------------------------|--------|--|
| φ (degrees)                                           | GZ (m) |  |
| 10                                                    | 0,72   |  |
| 20                                                    | 1,48   |  |
| 30                                                    | 2,42   |  |
| 40                                                    | 2,91   |  |
| 50                                                    | 2,87   |  |
| 60                                                    | 2,39   |  |



ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ, ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΠΛΟΙΟΥ.  
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ : Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση Σχεδίασης Δεξαμενοπλοίων με Οικονομοτεχνικά Κριτήρια και Χρήση Γενετικών Αλγορίθμων. ΧΟΝΤΖΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Σχέδιο Γραμμών Γάστρας (Lines Plan) που δημιουργήθηκε από το αρχείο offsets.txt κατά την βελτιστοποίηση κατηγορίας Aframax.



# 5

## *Χρησιμότητα*

Στην παρούσα εργασία επιχειρήσαμε να αναπτύξουμε ένα πρόγραμμα το οποίο θα επιλύει δυο γενικές κατηγορίες προβλημάτων βελτιστοποίησης προκαταρκτικής σχεδίασης – μελέτης δεξαμενοπλοίων. Η βασική ιδέα (με βάση την οποία νοούνται και οι δυο γενικές κατηγορίες προβλημάτων βελτιστοποίησης) ήταν το πρόγραμμα αυτό να δημιουργεί προτάσεις βέλτιστων design δεξαμενοπλοίων βασιζόμενο σε κάποιες απαιτήσεις ενός πλοιοκτήτη οι οποίες είναι σύμφωνες με τα εξής δυο σενάρια :

1) **Σενάριο πρώτο** : Το ενδιαφέρον εύρεσης ενός βέλτιστου design προσανατολίζεται σε μια γενικότερη κατηγορία μεγέθους δεξαμενοπλοίων μέσα στην οποία μας ενδιαφέρει να ανήκει το υπό μελέτη πλοίο. Δηλαδή οι αρχικές μας απαιτήσεις αφορούν ένα μεγάλο εύρος DWT του υπό μελέτη πλοίου με βάση το οποίο το design κατατάσσεται σε μια από τις επόμενες κατηγορίες :

- Coastal Tankers
- Small Tankers
- Handysize Tankers
- Handymax Tankers
- Panamax Tankers
- Aframax Tankers
- VLCC Tankers
- ULCC Tankers

Οι κατηγορίες αυτές καλύπτουν όλα τα υπάρχοντα στην αγορά μεγέθη δεξαμενοπλοίων. Οι υπόλοιπες απαιτήσεις στη συνέχεια αφορούν την επίτευξη μιας συγκεκριμένης ταχύτητας υπηρεσίας (Service Speed) του υπό μελέτη πλοίου καθώς και την επίτευξη μιας συγκεκριμένης ακτίνας ενέργειας (Cruising Range) που θα είναι ικανό να καλύψει το πλοίο χωρίς κανένα ανεφοδιασμό.

2) **Σενάριο δεύτερο :** Το ενδιαφέρον εύρεσης ενός βέλτιστου design προσανατολίζεται σε μια συγκεκριμένη απαίτηση επιτυγχανόμενου βάρους DWT του υπό μελέτη πλοίου. Εδώ υπάρχει η δυνατότητα, αν αυτό είναι επιθυμητό, να οριστούν και κάποιες επιτρεπτές ανοχές – αποκλίσεις του τελικού επιτυγχανόμενου DWT από την αρχική απαίτηση. Και πάλι εδώ, οι υπόλοιπες απαιτήσεις στη συνέχεια αφορούν την επίτευξη μιας συγκεκριμένης ταχύτητας υπηρεσίας (Service Speed) του υπό μελέτη πλοίου καθώς και την επίτευξη μιας συγκεκριμένης ακτίνας ενέργειας (Cruising Range) που θα είναι ικανό να καλύψει το πλοίο χωρίς κανένα ανεφοδιασμό.

Η βελτιστοποίηση γίνεται με χρήση γενετικών αλγορίθμων και λαμβάνοντας υπόψη έξι (6) οικονομοτεχνικά κριτήρια τα οποία μας ενδιαφέρει να ικανοποιούνται συγχρόνως όλα μαζί (πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση). Μετά το τέλος της βελτιστοποίησης για τα προκύπτοντα design υπάρχει διαθέσιμη μια πληθώρα πληροφοριών οι οποίες καλύπτουν όλες τις βασικές υποκατηγορίες μελέτης και σχεδίασης ενός πλοίου (όγκοι, βάρη, ευστάθεια, αντίσταση, πρόωση, μηχανολογική εγκατάσταση, σχεδίαση γάστρας κλπ)

Επιδίωξη ήταν η ανάπτυξη ενός σχετικά εύκολου στην χρήση από τρίτους προγράμματος , και για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε ένα γραφικό περιβάλλον σε γλωσσά προγραμματισμού Matlab (Graphical User Interface).

Το πρόγραμμα αυτό μπορεί να φανεί χρήσιμο στην φάση της αρχικής μελέτης και όταν δεν έχουμε πολλές πληροφορίες για τον καθορισμό λεπτομερών απαιτήσεων, καθώς δέχεται πολύ βασικά χαρακτηριστικά τα οποία είναι γνωστά από τα πρώτα στάδια της σχεδίασης, και παράγει design λεπτομερέστερων προδιαγραφών τα οποία είναι βέλτιστα ως προς τα θεωρούμενα τεχνικοοικονομικά κριτήρια.

# 6

## *Μελλοντικές Κατευθύνσεις – Επεκτάσεις.*

Στην παρούσα εργασία υλοποιείται μια πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση μελέτης και σχεδίασης δεξαμενοπλοίων και εξάγονται διάφορα προκύπτοντα χαρακτηριστικά του υπό μελέτη πλοίου όπως και ένα αρχικό σχέδιο γραμμών γάστρας με βάση τη συστηματική σειρά Formdata. Πιθανές μελλοντικές κατευθύνσεις και περεταίρω επεκτάσεις της παρούσας εργασίας μπορεί να περιλαμβάνουν :

- Δημιουργία επιπλέον υπορουτινών υλοποίησης αυτόματης εξομάλυνσης της ήδη προκύπτουσας γεωμετρίας της γάστρας και σύνδεση του παρόντος προγράμματος MOGA\_Optimization\_Tankers με ναυπηγικό ή άλλο πρόγραμμα σχεδίασης CAD/CAM (Aveva marine, NAPA κλπ).
- Σύνδεση του παρόντος προγράμματος με λογισμικά υδροδυναμικής ανάλυσης ώστε να γίνονται και υπολογισμοί υδροδυναμικής απόδοσης γάστρας ή υπολογισμοί συμπεριφοράς και απόκρισης σε δυσμενείς καταστάσεις θάλασσας μέσω μεθόδων υπολογιστικής ρευστομηχανικής.
- Περεταίρω αύξηση των αντικειμενικών συναρτήσεων – κριτηρίων της βελτιστοποίησης με πρόσθεση ενός ακόμα κριτηρίου, αυτού της πιθανής εκροής πετρελαίου μετά από ατύχημα και ρήγμα της γάστρας και πιθανοθεωρητικοί υπολογισμοί εκροής πετρελαίου με βάση την αντίστοιχη μεθοδολογία της MARPOL.
- Δημιουργία επιπλέον υπορουτινών υπολογισμού της διάταξης χώρων φορτίου και διαμερισματοποίησης της γάστρας με βάση την πιθανοθεωρητική μεθοδολογία υπολογισμών εκροής πετρελαίου της MARPOL και σύνδεση του παρόντος προγράμματος με ναυπηγικό ή άλλο πρόγραμμα σχεδίασης CAD/CAM (Aveva marine, NAPA κλπ) ώστε να παράγονται αυτόματα τα εν λόγω σχέδια.



- Ανάπτυξη επιπλέον υπορουτινών για τον υπολογισμό της γενικής διάταξης του υπό μελέτη design και δημιουργία αρχείων εξόδου γραφικής απεικόνισης τα οποία να μπορούν να χρησιμοποιηθούν από οποιοδήποτε άλλο πρόγραμμα CAD/CAM.
- Επέκταση για μελέτη – βελτιστοποίηση και άλλων τύπων πλοίων εκτός των δεξαμενοπλοίων (π.χ. Containerships, LNG, LPG, Ro-Ro, Bulk Carriers κλπ)

Όλα τα παραπάνω βέβαια αποτελούν μια παράθεση αρχικών σκέψεων για περαιτέρω επεκτάσεις της παρούσης εργασίας χωρίς αυτό να σημαίνει ότι άλλες κατευθύνσεις δεν μπορούν να ακολουθηθούν. Προφανώς οι ιδέες και σκέψεις για την πρόσθεση επιπλέον δυνατοτήτων σε ένα λογισμικό μελέτης και σχεδίασης πλοίων είναι παρά πολλές καθώς ο τομέας αυτός επιδέχεται συνεχή βελτίωση και ανάπτυξη.

# 7

## *Επίλογος*

Στην παρούσα διπλωματική εργασία στόχος ήταν η ανάπτυξη ενός πλήρως αυτοματοποιημένου πακέτου πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης μελέτης δεξαμενοπλοίων. Διερευνώντας , μέσω της χρήσης Γενετικών Αλγορίθμων προσαρμοσμένων για πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση , «πληθυσμούς» από υποψήφια design , δημιουργήσαμε και αναγνωρίσαμε όλα τα «μη-κυριαρχούμενα» ή «non-dominated» από αυτά, τα οποία και τελικά είναι τα βέλτιστα αφού ικανοποιούν τις απαιτήσεις ελαχιστοποίησης ή μεγιστοποίησης των διαφόρων κριτηρίων – αντικειμενικών συναρτήσεων με τρόπο τέτοιο ώστε περαιτέρω βελτίωση κάποιου κριτηρίου να μην είναι εφικτή χωρίς την ταυτόχρονη επιδείνωση κάποιου άλλου. Αποτελέσματα σχετικά με τα κύρια και πιο λεπτομερή χαρακτηριστικά όλων των βέλτιστων design, καθώς και με τη μορφή της γάστρας αυτών εξάγονται άμεσα μετά το τέλος της βελτιστοποίησης. Οι μορφές των αρχείων εξόδου είναι τέτοιες ώστε να είναι πολύ εύκολη η περαιτέρω επεξεργασία και μελέτη τους μέσω της εισαγωγής τους σε αλλά προγράμματα διεξαγωγής υπολογισμών και κατηγορίας CAD/CAM (Microsoft Excel, AutoCAD, Rhinoceros, Avena marine κλπ). Επίσης γραφική απεικόνιση όλων των παραχθέντων design σε αντιπαράθεση με τα βέλτιστα και το αρχικό design εκκίνησης είναι δυνατή για διάφορα ζεύγη αντικειμενικών συναρτήσεων.

Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι βάρος δόθηκε στην υλοποίηση ενός προγράμματος το οποίο να είναι εύχρηστο και εύκολα κατανοητό ως προς τον τρόπο χρήσης του. Για το λόγο αυτό εκτός από τις διάφορες υπορουτίνες διεκπεραίωσης υπολογισμών σχετικών με τη μελέτη, αναπτύχθηκε και γραφικό περιβάλλον (Graphical User Interface). Ο προγραμματισμός όλων των υπορουτινών καθώς και του γραφικού περιβάλλοντος έγινε σε γλώσσα Matlab έκδοση Matlab R2011a 7.12.0.635 (32-bit) και σε λειτουργικό σύστημα Windows 7.

# 8

## *Βιβλιογραφία*

- i. **SINGERESU S.RAO**, (2009) , “ENGINEERING OPTIMIZATION : THEORY AND PRACTICE FOURTH EDITION” , JOHN WILEY & SONS, INC
- ii. **PRATYUSH SEN and JIAN-BO YANG**, (1998) , “MULTIPLE CRITERIA DECISION SUPPORT IN ENGINEERING DESIGN” , SPRINGER.
- iii. **G.WINTER, J.PERIAUX, M.GALAN, P.CUESTA**, (1996) , “GENETIC ALGORITHMS IN ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCE” , JOHN WILEY & SONS, INC
- iv. **ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ Δ. ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ**, (2009) , “ΜΕΛΕΤΗ ΠΛΟΙΟΥ : ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΠΡΟΜΕΛΕΤΗΣ ΤΕΥΧΟΣ Ι, ΤΕΥΧΟΣ ΙΙ” , ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΥΜΕΩΝ.
- v. **ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ Δ. ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ, Κ. ΑΝΑΣΤΑΣΟΠΟΥΛΟΣ**, (2007) , “ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΛΟΙΟΥ Ι (ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΠΡΟΜΕΛΕΤΗΣ) ΣΥΛΛΟΓΗ ΒΟΗΘΗΜΑΤΩΝ” , ΕΚΔΟΣΕΙΣ Ε.Μ.Π.
- vi. **DAVID A.COLEY**, (1999) , “AN INTRODUCTION TO GENETIC ALGORITHMS FOR SCIENTISTS AND ENGINEERS” , WORLD SCIENTIFIC PUBLISHING Co.Pte.Lte
- vii. **MITSUO GEN, RUNWEI CHENG**, (2000) , “GENETIC ALGORITHMS AND ENGINEERING OPTIMIZATION” , JOHN WILEY & SONS, INC
- viii. **COLIN R. REEVES, JONATHAN E.ROWE**, (2003) , “GENETIC ALGORITHMS : PRINCIPLES AND PERSPECTIVES, A GUIDE TO GA THEORY” , KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS.
- ix. **ΣΠΥΡΙΔΩΝ ΛΥΚΟΘΑΝΑΣΗΣ**, (2001) , “ ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ” , ΕΣΠΙ ΕΚΔΟΤΙΚΗ Ε.Π.Ε.

- x. **MICHAEL G.PARSONS**, “PARAMETRIC DESIGN CHAPTER 11” , TECHNICAL PAPER.
- xi. **EDWIN K.P.CHONG, STANISLAW H.ZAK**, (2001) , “AN INTRODUCTION TO OPTIMIZATION SECOND EDITION” , JOHN WILEY & SONS, INC
- xii. **HOLTROP, J.MEMMEN**, (1978) , “A STATISTICAL POWER PREDICTION METHOD” , INTERNATIONAL SHIPBUILDING PROGRESS.
- xiii. **KALYANMOY DEB, SAMIR AGRAWAL, AMRIT PRATAP, AND T MEYARIVAN**, (1999) , “A FAST ELITIST NON-DOMINATED SORTING GENETIC ALGORITHM FOR MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION: NSGA-II” KanGAL Report No. 200001.
- xiv. **TOBIAS BLICKE, LOTHAR THIELE**, (1995) , “A MATHEMATICAL ANALYSIS OF TOURNAMENT SELECTION” , TECHNICAL REPORT
- xv. **KALYANMOY DEB**, “A FAST AND ELITIST MULTIOBJECTIVE GENETIC ALGORITHM” , TECHNICAL REPORT.
- XVI. **CARLOS A. COELLO COELLO AND GARY B. LAMONT**, “AN INTRODUCTION TO MULTI-OBJECTIVE EVOLUTIONARY ALGORITHMS AND THEIR APPLICATIONS”
- XVII. **ΗΛΙΑΣ ΚΑΡΥΑΜΠΙΑΣ**, (1996) , “ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΕΜΠΟΡΙΚΩΝ ΠΛΟΙΩΝ ΜΕ Η/Υ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ ΠΡΟΣΦΟΡΩΝ ΑΠΟ ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΝΑΥΠΗΓΕΙΑ ” , ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Ε.Μ.Π
- XVIII. **IMO TECHNICAL PAPER**, (2009) , “INTERIM GUIDELINES ON THE METHOD OF CALCULATION OF THE ENERGY EFFICIENCY DESIGN INDEX”
- XIX. **ABDULLAH KONAK, DAVID W.COIT, ALICE E.SMITH**, (2006) , “MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION USING GENETIC ALGORITHMS: A TUTORIAL” , TECHNICAL PAPER.
- xx. **MATTHIAS EHRGOTT, XAVIER GANDIBLEUX**, (2003) , “MULTIPLE CRITERIA OPTIMIZATION , STATE OF THE ART ANNOTATED BIBLIOGRAPHIC SURVEYS” , KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS.

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

## Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης κατηγορίας Aframax

Παρακάτω θα δοθούν το προκύπτον σύνολο Pareto και τα αντίστοιχα διαγράμματα της βελτιστοποίησης δεξαμενοπλοίων κατηγορίας Aframax (80001 – 119999 DWT) για ταχύτητα υπηρεσίας  $V_s = 15$  Knots και ακτίνας ενέργειας  $R = 15000$  nautical miles.

Σύνολο Pareto βέλτιστων design Aframax :

| DESIGN Number | L <sub>WL</sub> [m] | L <sub>BP</sub> [m] | B [m] | D [m] | T [m] | C <sub>B</sub> | C <sub>M</sub> | C <sub>WP</sub> | C <sub>P</sub> | Ls [m]  | S <sub>A</sub> [m] | S <sub>F</sub> [m] | b    | n | A <sub>BT</sub> [m <sup>2</sup> ] | h <sub>B</sub> [m] | A <sub>T</sub> [m <sup>2</sup> ] | DWT [tons] |
|---------------|---------------------|---------------------|-------|-------|-------|----------------|----------------|-----------------|----------------|---------|--------------------|--------------------|------|---|-----------------------------------|--------------------|----------------------------------|------------|
| 1             | 243,05              | 234,83              | 37,27 | 18,79 | 13,31 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 234,829 | 0,02               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 80001,00   |
| 2             | 246,27              | 237,95              | 37,77 | 19,04 | 14,62 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 202,254 | 0,02               | 0,00               | 0,74 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 83400,71   |
| 3             | 274,73              | 265,44              | 42,13 | 21,24 | 16,36 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 225,627 | 0,01               | 0,00               | 0,05 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 117438,65  |
| 4             | 243,05              | 234,83              | 37,27 | 19,70 | 13,31 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 234,829 | 0,03               | 0,01               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,58                             | 80001,00   |
| 5             | 273,81              | 264,55              | 41,99 | 21,16 | 16,30 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 224,867 | 0,02               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 116212,41  |
| 6             | 244,23              | 235,97              | 37,46 | 18,88 | 14,50 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 200,576 | 0,01               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 7,05               | 1,57                             | 81237,52   |
| 7             | 259,80              | 251,01              | 39,84 | 20,08 | 14,24 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 213,360 | 0,02               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 98648,87   |
| 8             | 272,51              | 263,30              | 41,79 | 21,06 | 16,22 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 223,801 | 0,02               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 114508,16  |
| 9             | 272,14              | 262,94              | 41,74 | 21,04 | 16,23 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 262,937 | 0,02               | 0,71               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 114023,86  |
| 10            | 270,41              | 261,27              | 41,47 | 20,90 | 16,09 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 222,076 | 0,01               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 111782,99  |
| 11            | 267,33              | 258,29              | 41,00 | 20,66 | 15,90 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 219,546 | 0,02               | 0,00               | 0,05 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 107862,35  |
| 12            | 276,64              | 267,29              | 42,43 | 21,38 | 16,48 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 227,193 | 0,02               | 0,00               | 0,05 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 119990,95  |
| 13            | 263,83              | 254,91              | 40,46 | 20,39 | 15,68 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 216,670 | 0,01               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 103513,15  |
| 14            | 274,73              | 265,44              | 42,13 | 21,24 | 15,06 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 265,444 | 0,02               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,32                             | 7,05               | 1,57                             | 117438,66  |
| 15            | 252,68              | 244,13              | 38,75 | 19,53 | 15,00 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 207,512 | 0,02               | 0,00               | 0,05 | 1 | 29,32                             | 7,05               | 1,57                             | 90413,20   |
| 16            | 247,18              | 238,82              | 37,91 | 19,11 | 14,67 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 203,000 | 0,01               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 84375,23   |
| 17            | 257,65              | 248,94              | 39,51 | 19,92 | 15,31 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 211,596 | 0,01               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 96118,26   |
| 18            | 264,88              | 255,93              | 40,62 | 20,47 | 15,75 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 217,536 | 0,02               | 0,00               | 0,05 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 104810,93  |
| 19            | 276,64              | 267,29              | 42,43 | 21,38 | 15,15 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 227,193 | 0,02               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 119990,95  |
| 20            | 243,05              | 234,83              | 37,27 | 18,79 | 14,43 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 199,604 | 0,01               | 0,00               | 0,05 | 1 | 29,31                             | 7,05               | 1,57                             | 80001,00   |
| 21            | 259,45              | 250,67              | 39,79 | 20,05 | 14,22 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 213,073 | 0,02               | 0,00               | 0,74 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 98233,56   |
| 22            | 272,14              | 262,94              | 41,74 | 21,04 | 14,91 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 262,937 | 0,02               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 114023,86  |
| 23            | 256,80              | 248,11              | 39,38 | 19,85 | 15,25 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 210,897 | 0,01               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 95126,18   |
| 24            | 266,52              | 257,51              | 40,87 | 21,61 | 14,60 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 257,507 | 0,03               | 0,01               | 0,08 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,58                             | 106846,21  |
| 25            | 248,42              | 240,02              | 38,10 | 19,20 | 14,75 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 204,015 | 0,01               | 0,00               | 0,05 | 1 | 29,31                             | 7,05               | 1,57                             | 85711,48   |
| 26            | 247,18              | 238,82              | 37,91 | 19,11 | 13,55 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 238,824 | 0,02               | 0,71               | 0,06 | 1 | 29,32                             | 6,66               | 1,57                             | 84375,23   |
| 27            | 276,28              | 266,93              | 42,37 | 21,35 | 15,13 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 226,894 | 0,02               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 119500,58  |
| 28            | 254,75              | 246,14              | 39,07 | 19,69 | 13,97 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 246,140 | 0,02               | 0,00               | 0,75 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 92772,42   |
| 29            | 276,64              | 267,29              | 42,43 | 22,43 | 15,23 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 267,286 | 0,03               | 0,71               | 0,74 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,58                             | 119990,71  |
| 30            | 268,72              | 259,63              | 41,21 | 20,77 | 15,99 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 220,688 | 0,02               | 0,00               | 0,05 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 109620,59  |
| 31            | 251,47              | 242,97              | 38,57 | 20,40 | 13,78 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 206,520 | 0,03               | 0,00               | 0,74 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 89066,13   |
| 32            | 259,80              | 251,01              | 39,84 | 21,06 | 14,23 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 213,360 | 0,01               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 98648,87   |
| 33            | 252,67              | 244,13              | 38,75 | 19,53 | 15,01 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 207,509 | 0,04               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 90413,20   |
| 34            | 247,18              | 238,82              | 37,91 | 20,04 | 13,54 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 238,824 | 0,03               | 0,71               | 0,08 | 1 | 29,32                             | 6,65               | 1,58                             | 84375,23   |
| 35            | 270,41              | 261,27              | 41,47 | 21,92 | 14,89 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 261,266 | 0,02               | 0,01               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 111782,99  |
| 36            | 244,23              | 235,97              | 37,46 | 18,88 | 13,40 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 200,576 | 0,02               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 81237,52   |
| 37            | 249,76              | 241,31              | 38,30 | 19,31 | 13,68 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 205,116 | 0,01               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,58                             | 87175,41   |
| 38            | 248,42              | 240,02              | 38,10 | 19,20 | 13,61 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 204,015 | 0,01               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 7,05               | 1,58                             | 85711,48   |
| 39            | 273,81              | 264,55              | 41,99 | 21,16 | 15,00 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 224,867 | 0,03               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 116212,41  |
| 40            | 243,05              | 234,83              | 37,27 | 19,71 | 13,31 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 234,829 | 0,04               | 0,71               | 0,74 | 1 | 29,32                             | 6,65               | 1,57                             | 80001,00   |
| 41            | 274,73              | 265,44              | 42,13 | 22,28 | 15,05 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 225,627 | 0,04               | 0,00               | 0,74 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 117438,65  |
| 42            | 254,75              | 246,14              | 39,07 | 19,69 | 15,13 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 209,219 | 0,01               | 0,00               | 0,05 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 92772,42   |
| 43            | 259,80              | 251,01              | 39,84 | 20,08 | 15,44 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 213,360 | 0,01               | 0,00               | 0,05 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 98648,87   |
| 44            | 256,80              | 248,11              | 39,38 | 19,85 | 14,08 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 248,114 | 0,02               | 0,71               | 0,74 | 1 | 29,32                             | 6,65               | 1,57                             | 95126,18   |
| 45            | 268,72              | 259,63              | 41,21 | 20,77 | 14,73 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 259,633 | 0,02               | 0,71               | 0,74 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 109620,59  |
| 46            | 246,27              | 237,95              | 37,77 | 19,04 | 13,49 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 202,254 | 0,02               | 0,00               | 0,74 | 1 | 29,32                             | 6,65               | 1,57                             | 83400,71   |
| 47            | 244,23              | 235,97              | 37,46 | 18,88 | 13,38 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 200,576 | 0,03               | 0,00               | 0,74 | 1 | 29,32                             | 6,65               | 1,57                             | 81237,52   |
| 48            | 276,64              | 267,29              | 42,43 | 22,44 | 15,21 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 267,286 | 0,03               | 0,71               | 0,74 | 1 | 29,32                             | 6,65               | 1,57                             | 119990,70  |
| 49            | 262,65              | 253,77              | 40,28 | 21,29 | 14,39 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 253,770 | 0,03               | 0,01               | 0,08 | 1 | 29,32                             | 6,65               | 1,58                             | 102078,37  |
| 50            | 256,80              | 248,11              | 39,38 | 20,80 | 14,07 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 210,897 | 0,01               | 0,00               | 0,06 | 1 | 29,31                             | 6,65               | 1,57                             | 95126,18   |

Το παράθυρο του προγράμματος MOGA\_Optimization Tankers μετά το τέλος της βελτιστοποίησης :

**Multiobjective Genetic Algorithm Ship Design  
Optimization (Tankers)**

**Pre-Optimization**

Specify the excel (.xls) input data file :

Press to import necessary data to optimization program :

Data Importing Status :  
... END OF DATA IMPORTING ...

Press the appropriate button once to select oil tanker DWT size category that will be used during the optimization procedure or set specific DWT requirement :

Type specific DWT requirement [tons] :

Type accepted deviation from DWT requirement [tons] : +/-

Oil Tanker Size Category Selected :

Type required service speed [ Knots ] :

Type required cruising range [ nautical miles ] :

**Post-Optimization**

Press to create output excel file with the Optimization Results :

Results Exporting Status :  
... Output Excel File "Final\_Opt\_Results.xls" Generated ...

Total number of Pareto designs : 50

Please type here the number of the specific Pareto design ( found in excel output file "Final\_Opt\_Results.xls") for which you wish to retrieve more detailed information :

Detailed Design Results Exporting Status :  
... Detailed Output Excel File "Detailed\_Info\_Output.xls" Generated ...

Please type here the number of the specific Pareto design ( found in excel output file "Final\_Opt\_Results.xls") for which you wish to generate hull offsets for lines plan :

Offsets File Generating Status :  
"offsets.txt" File Generated

**Generate Plots**

Total Generations vs Pareto Front Plots

| Plot Name                | Plot Status |
|--------------------------|-------------|
| Lightship - Powering     | Generated   |
| Powering - Annual Cost   | Generated   |
| Lightship - Build Cost   | Generated   |
| Payload - RFR            | Generated   |
| Build Cost - Annual Cost | Generated   |

Total Number of Individuals (All Generations) :

Total Number of Pareto Individuals :

Plot Status  
Generated

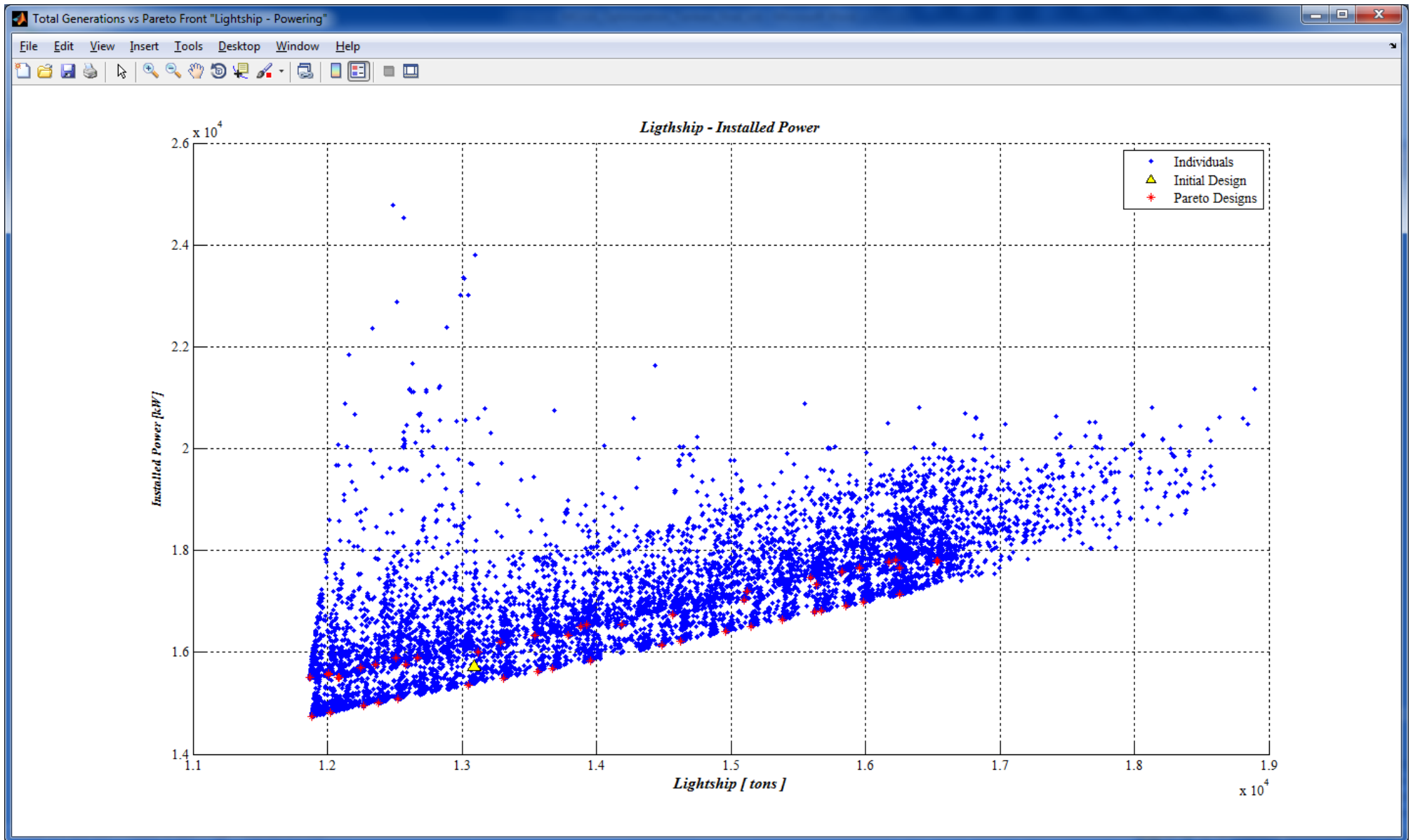
Message Window

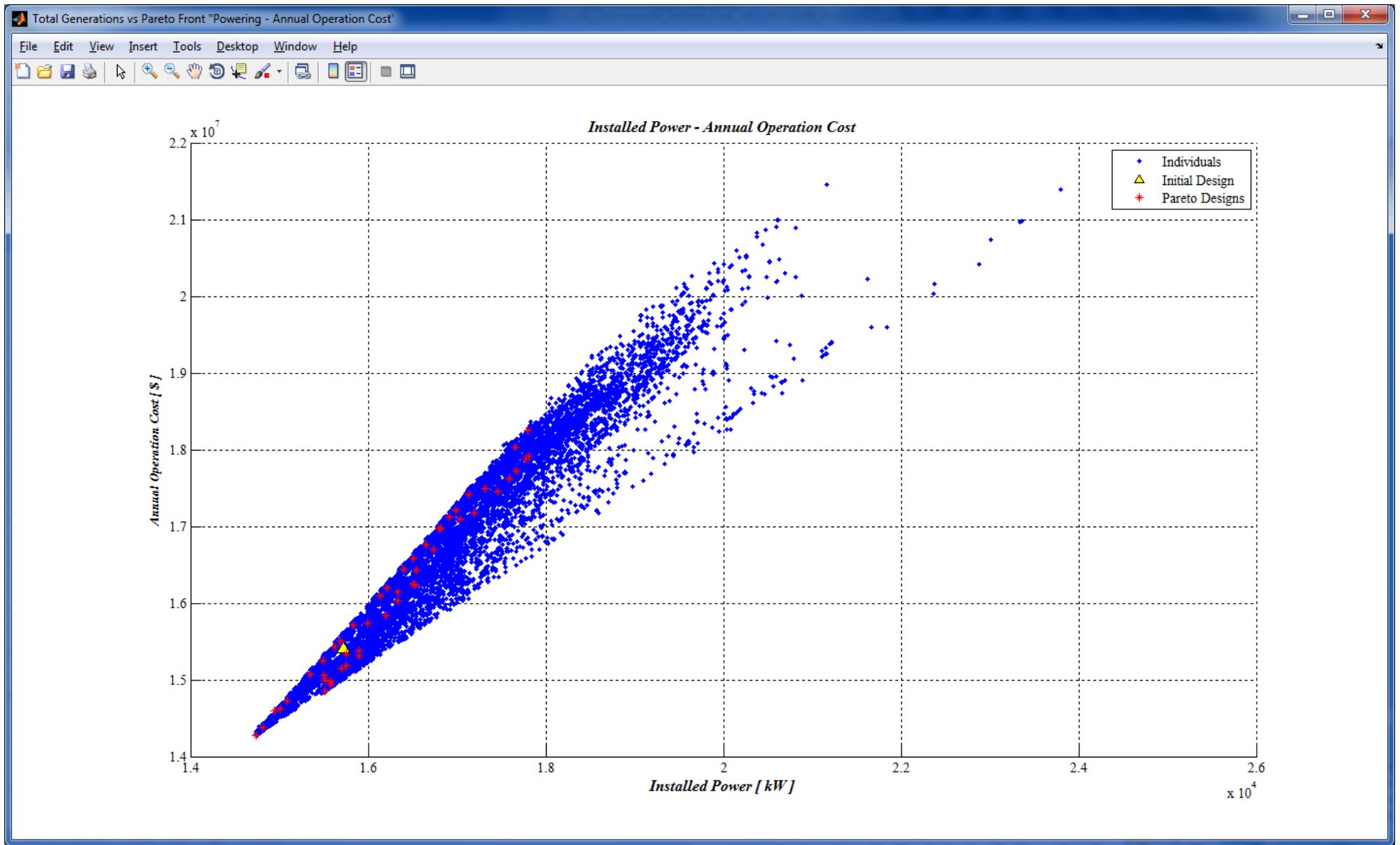
Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης δεξαμενοπλοίων κατηγορίας Aframax είναι γενικά κοντά στις τιμές κυρίων χαρακτηριστικών ήδη κατασκευασμένων πλοίων aframax πράγμα που επιβεβαιώνει την ορθότητα των υπολογισμών και της μοντελοποίησης του προβλήματος (π.χ. η μέση τιμή του μήκους μεταξύ καθέτων όλων των Pareto Design είναι  $L_{BP} \approx 245m$  τιμή λογική για αυτή την κατηγορία δεξαμενοπλοίων). Επίσης μπορεί να παρατηρηθεί ότι τα προκύπτοντα design έχουν ελαφρώς μεγαλύτερο μήκος καθώς η ύπαρξη των κριτηρίων ελαχιστοποίησης της αντίστασης και του συνολικού ετήσιου κόστους εκμετάλλευσης οδηγεί σε πλοία μεγαλύτερου μήκους και ελαφρώς περιορισμένου πλάτους σε σχέση με τα ήδη υπάρχοντα. Αυτό διότι πλοία με μεγαλύτερο μήκος και επομένως μεγαλύτερους λόγους μήκους προς πλάτος και μήκους προς κοίλο, για συγκεκριμένη ταχύτητα και λόγω της μειωμένης αντίστασης που παρουσιάζουν απαιτούν και μικρότερη εγκατεστημένη ισχύ, επομένως καταναλώνουν μικρότερες ποσότητες καυσίμου και έτσι τελικά έχουν και χαμηλότερο ετήσιο συνολικό κόστος εκμετάλλευσης.

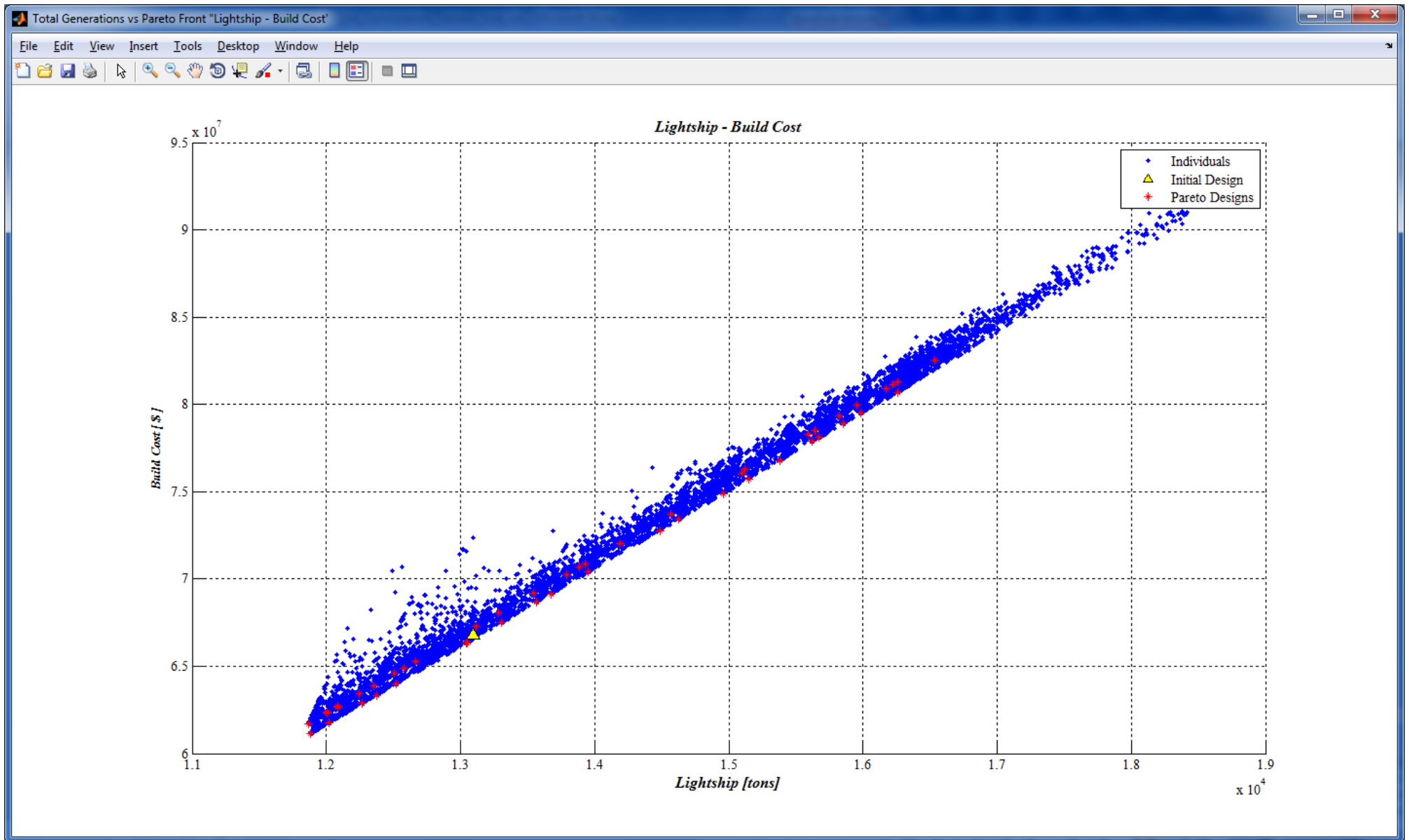
Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα στα οποία φαίνονται οι προκύπτουσες τιμές συγκεκριμένων αντικειμενικών συναρτήσεων του συνολικού πληθυσμού των design που παρήγαγε ο γενετικός αλγόριθμος (όλες οι γενεές) και των nondominated Pareto λύσεων που πρόεκυψαν (Pareto Front) για τα εξής ζεύγη κριτηρίων (αντικειμενικές συναρτήσεις) :

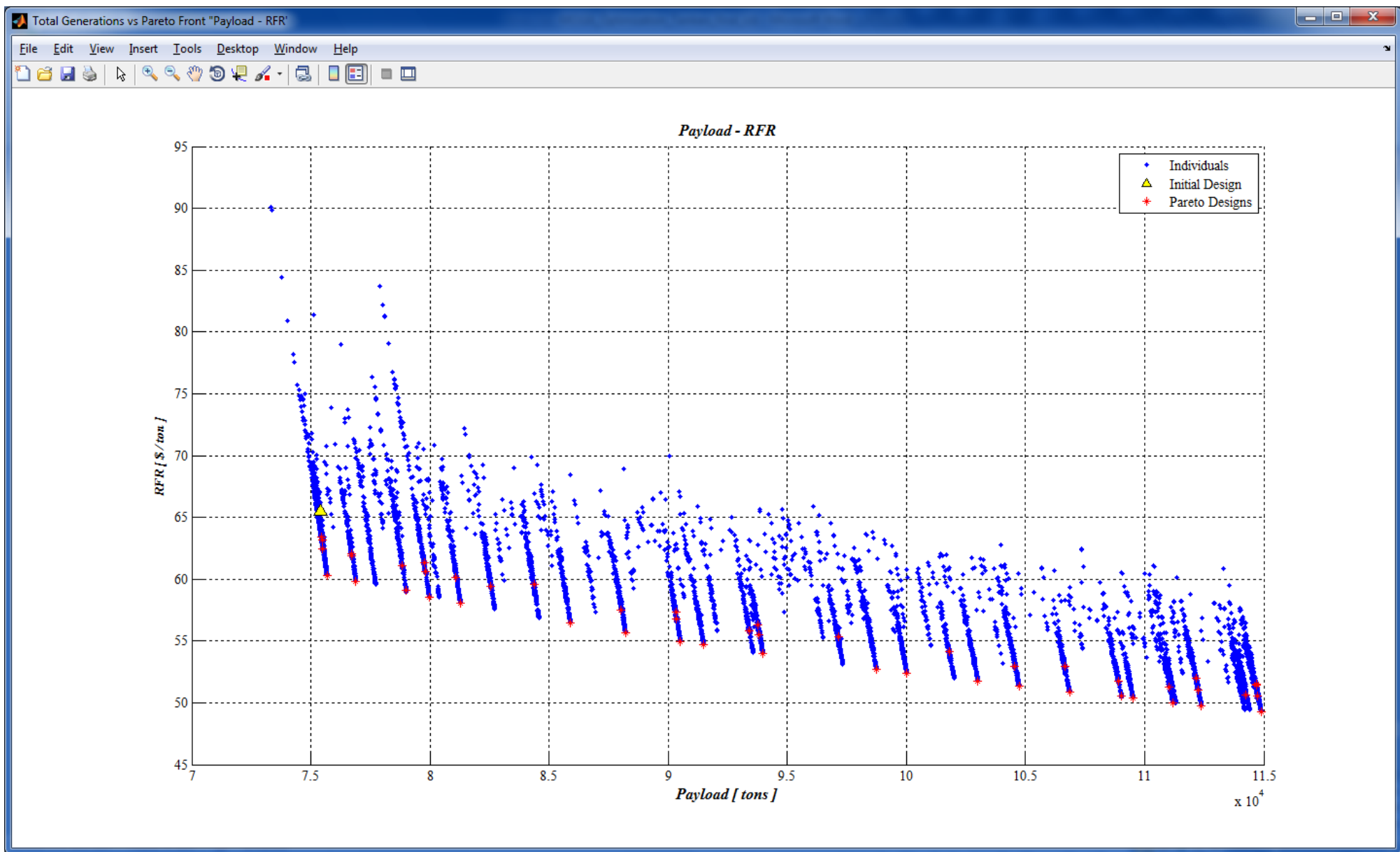
- (1) Lightship – Powering
- (2) Powering – Annual Cost
- (3) Lightship – Build Cost
- (4) Payload – RFR
- (5) Build Cost – Annual Cost

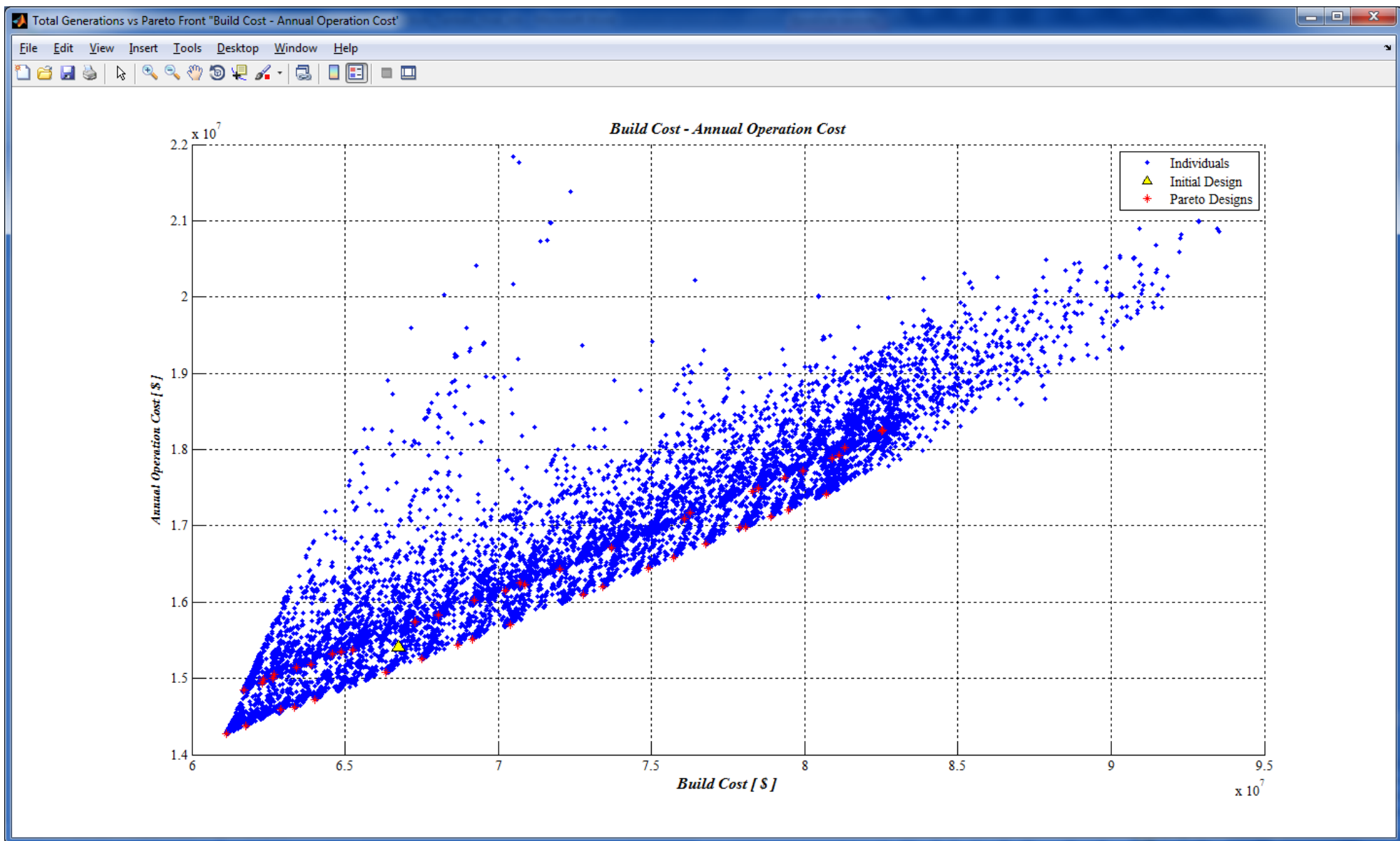












### Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης δεξαμενοπλοίου $DWT = 115000ton$

Παρακάτω θα δοθούν το προκύπτον σύνολο Pareto και τα αντίστοιχα διαγράμματα της βελτιστοποίησης ενός δεξαμενόπλοιου 115000DWT για ταχύτητα υπηρεσίας  $V_s = 15$  Knots και ακτίνας ενέργειας  $R = 15000$  nautical miles.

## Τα πρώτα 100 designs του συνολικού πληθυσμού όλων των γενεών

|        |       |       |       |       |       |       |       |           |  |                       |                     |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|--|-----------------------|---------------------|
| 263,66 | 45,46 | 22,34 | 18,94 | 0,840 | 0,997 | 0,896 | 0,843 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 263,66 | 45,46 | 22,34 | 18,94 | 0,840 | 0,997 | 0,896 | 0,843 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 271,91 | 45,36 | 22,77 | 17,20 | 0,855 | 0,998 | 0,906 | 0,857 | 115000,00 |  | Columns Explanation : |                     |
| 270,19 | 44,12 | 22,69 | 16,59 | 0,855 | 0,998 | 0,907 | 0,857 | 115000,00 |  | A                     | L <sub>BP</sub> [m] |
| 270,32 | 43,90 | 21,72 | 16,36 | 0,845 | 0,997 | 0,899 | 0,847 | 115000,00 |  | B                     | B [m]               |
| 268,07 | 43,85 | 22,18 | 16,25 | 0,858 | 0,998 | 0,908 | 0,860 | 115000,00 |  | C                     | D [m]               |
| 264,04 | 42,90 | 22,17 | 15,73 | 0,849 | 0,997 | 0,902 | 0,852 | 115000,00 |  | D                     | T [m]               |
| 272,35 | 46,15 | 21,88 | 17,45 | 0,850 | 0,997 | 0,903 | 0,852 | 115000,00 |  | E                     | C <sub>B</sub> --   |
| 266,66 | 45,88 | 22,44 | 16,65 | 0,845 | 0,997 | 0,900 | 0,848 | 115000,00 |  | F                     | C <sub>M</sub> --   |
| 265,10 | 44,73 | 21,77 | 18,61 | 0,857 | 0,998 | 0,908 | 0,859 | 115000,00 |  | G                     | C <sub>WP</sub> --  |
| 265,60 | 42,40 | 22,39 | 15,33 | 0,854 | 0,997 | 0,906 | 0,856 | 115000,00 |  | H                     | C <sub>P</sub> --   |
| 265,78 | 43,78 | 22,00 | 16,24 | 0,845 | 0,997 | 0,899 | 0,847 | 115000,00 |  | I                     | DWT [tons]          |
| 264,64 | 44,33 | 21,45 | 17,32 | 0,849 | 0,997 | 0,902 | 0,852 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 267,39 | 45,37 | 22,59 | 16,85 | 0,849 | 0,997 | 0,903 | 0,852 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 268,74 | 43,81 | 21,89 | 17,84 | 0,841 | 0,997 | 0,896 | 0,843 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 272,20 | 46,23 | 22,90 | 18,40 | 0,855 | 0,998 | 0,907 | 0,857 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 271,15 | 45,90 | 22,40 | 16,79 | 0,843 | 0,997 | 0,898 | 0,846 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 265,56 | 43,39 | 22,23 | 17,37 | 0,859 | 0,998 | 0,909 | 0,861 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 271,08 | 43,95 | 22,51 | 16,22 | 0,842 | 0,997 | 0,897 | 0,845 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 270,61 | 44,12 | 21,69 | 17,28 | 0,849 | 0,997 | 0,902 | 0,851 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 271,25 | 44,29 | 22,02 | 18,44 | 0,842 | 0,997 | 0,897 | 0,844 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 263,96 | 45,19 | 21,28 | 16,16 | 0,857 | 0,998 | 0,908 | 0,859 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 267,81 | 44,15 | 21,89 | 16,05 | 0,857 | 0,998 | 0,908 | 0,859 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 271,05 | 43,11 | 22,01 | 17,93 | 0,857 | 0,998 | 0,908 | 0,859 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 264,72 | 45,03 | 21,66 | 16,66 | 0,859 | 0,998 | 0,910 | 0,861 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 266,74 | 45,99 | 21,62 | 18,40 | 0,850 | 0,997 | 0,903 | 0,853 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 272,18 | 45,72 | 22,37 | 16,44 | 0,849 | 0,997 | 0,902 | 0,851 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 264,58 | 42,53 | 21,45 | 16,67 | 0,852 | 0,997 | 0,905 | 0,854 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 271,26 | 46,43 | 22,39 | 17,12 | 0,857 | 0,998 | 0,908 | 0,859 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 268,32 | 42,83 | 21,78 | 16,04 | 0,853 | 0,997 | 0,905 | 0,855 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 263,80 | 44,20 | 21,83 | 16,38 | 0,855 | 0,998 | 0,906 | 0,857 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 267,08 | 45,79 | 21,73 | 18,33 | 0,851 | 0,997 | 0,904 | 0,854 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 271,67 | 44,62 | 22,99 | 17,46 | 0,840 | 0,997 | 0,896 | 0,843 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 264,46 | 44,33 | 21,17 | 17,83 | 0,847 | 0,997 | 0,901 | 0,850 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 271,20 | 44,78 | 22,32 | 16,49 | 0,855 | 0,998 | 0,907 | 0,857 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 270,84 | 46,62 | 21,91 | 19,36 | 0,860 | 0,998 | 0,910 | 0,862 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 272,87 | 43,98 | 22,96 | 17,79 | 0,854 | 0,997 | 0,906 | 0,856 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 267,41 | 44,16 | 22,21 | 17,34 | 0,845 | 0,997 | 0,899 | 0,848 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 272,57 | 44,50 | 23,06 | 17,10 | 0,846 | 0,997 | 0,900 | 0,848 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 268,40 | 43,61 | 22,13 | 15,95 | 0,846 | 0,997 | 0,900 | 0,848 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 272,07 | 43,92 | 22,55 | 15,83 | 0,859 | 0,998 | 0,909 | 0,861 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 269,97 | 43,16 | 22,36 | 16,21 | 0,857 | 0,998 | 0,908 | 0,859 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 269,48 | 45,70 | 22,08 | 17,00 | 0,850 | 0,997 | 0,903 | 0,853 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 265,96 | 44,59 | 21,73 | 17,54 | 0,846 | 0,997 | 0,900 | 0,849 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 265,94 | 43,41 | 21,38 | 17,09 | 0,852 | 0,997 | 0,904 | 0,854 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 270,50 | 45,63 | 22,18 | 16,43 | 0,844 | 0,997 | 0,898 | 0,846 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 268,71 | 45,33 | 21,98 | 17,80 | 0,856 | 0,998 | 0,907 | 0,858 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 272,73 | 43,58 | 22,81 | 16,88 | 0,858 | 0,998 | 0,909 | 0,860 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 263,88 | 44,30 | 21,60 | 16,54 | 0,857 | 0,998 | 0,908 | 0,859 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 264,26 | 44,47 | 22,34 | 16,80 | 0,854 | 0,997 | 0,906 | 0,856 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 265,93 | 42,73 | 21,96 | 15,51 | 0,858 | 0,998 | 0,908 | 0,860 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 269,59 | 43,06 | 22,02 | 16,79 | 0,841 | 0,997 | 0,897 | 0,844 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 272,14 | 44,11 | 22,50 | 17,68 | 0,841 | 0,997 | 0,896 | 0,843 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 273,30 | 43,50 | 23,14 | 17,87 | 0,842 | 0,997 | 0,897 | 0,844 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 271,73 | 43,70 | 22,47 | 18,10 | 0,860 | 0,998 | 0,910 | 0,862 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 265,54 | 43,34 | 22,43 | 17,43 | 0,849 | 0,997 | 0,902 | 0,851 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 264,94 | 45,18 | 22,18 | 16,90 | 0,853 | 0,997 | 0,905 | 0,855 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 266,01 | 44,10 | 21,67 | 16,03 | 0,851 | 0,997 | 0,904 | 0,853 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 269,47 | 43,97 | 22,36 | 17,28 | 0,851 | 0,997 | 0,904 | 0,853 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 265,28 | 42,18 | 21,40 | 15,54 | 0,847 | 0,997 | 0,901 | 0,849 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 267,70 | 44,94 | 21,77 | 16,24 | 0,858 | 0,998 | 0,908 | 0,860 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 270,49 | 46,43 | 22,17 | 18,65 | 0,844 | 0,997 | 0,899 | 0,847 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 272,06 | 46,82 | 22,88 | 19,13 | 0,858 | 0,998 | 0,909 | 0,860 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 266,59 | 42,41 | 22,35 | 16,50 | 0,848 | 0,997 | 0,902 | 0,850 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 271,43 | 45,41 | 22,46 | 18,72 | 0,851 | 0,997 | 0,903 | 0,853 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 273,76 | 45,63 | 22,37 | 18,66 | 0,855 | 0,998 | 0,907 | 0,857 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 264,06 | 43,28 | 21,24 | 16,12 | 0,850 | 0,997 | 0,903 | 0,852 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 267,91 | 42,91 | 21,63 | 15,50 | 0,857 | 0,998 | 0,908 | 0,859 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 265,89 | 43,47 | 22,18 | 15,60 | 0,851 | 0,997 | 0,903 | 0,853 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 273,50 | 45,58 | 22,04 | 17,06 | 0,841 | 0,997 | 0,897 | 0,844 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 267,74 | 44,36 | 22,39 | 17,20 | 0,850 | 0,997 | 0,903 | 0,853 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 270,06 | 44,88 | 22,54 | 16,38 | 0,854 | 0,998 | 0,906 | 0,856 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 263,93 | 43,30 | 21,83 | 16,97 | 0,845 | 0,997 | 0,899 | 0,848 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 268,42 | 44,46 | 21,52 | 16,25 | 0,847 | 0,997 | 0,901 | 0,850 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 266,27 | 44,01 | 22,01 | 16,93 | 0,855 | 0,998 | 0,906 | 0,857 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 267,20 | 43,91 | 21,94 | 16,38 | 0,855 | 0,998 | 0,907 | 0,857 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 267,97 | 43,93 | 21,63 | 17,56 | 0,855 | 0,998 | 0,907 | 0,857 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 269,32 | 46,19 | 21,99 | 17,63 | 0,858 | 0,998 | 0,909 | 0,860 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 265,52 | 43,06 | 21,79 | 15,55 | 0,843 | 0,997 | 0,898 | 0,845 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 271,87 | 46,84 | 22,14 | 19,32 | 0,856 | 0,998 | 0,907 | 0,858 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 268,24 | 46,04 | 21,68 | 16,89 | 0,855 | 0,998 | 0,907 | 0,857 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 268,59 | 45,26 | 22,02 | 16,54 | 0,848 | 0,997 | 0,902 | 0,850 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 271,36 | 45,02 | 22,95 | 17,71 | 0,846 | 0,997 | 0,900 | 0,849 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 266,32 | 43,61 | 22,03 | 17,71 | 0,845 | 0,997 | 0,899 | 0,848 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 264,84 | 42,05 | 21,61 | 15,55 | 0,857 | 0,998 | 0,908 | 0,860 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 271,30 | 46,44 | 21,82 | 19,25 | 0,855 | 0,998 | 0,907 | 0,857 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 266,77 | 43,30 | 22,56 | 18,04 | 0,844 | 0,997 | 0,898 | 0,846 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 270,99 | 45,87 | 22,30 | 18,18 | 0,852 | 0,997 | 0,904 | 0,854 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 270,39 | 45,58 | 22,43 | 18,32 | 0,841 | 0,997 | 0,896 | 0,843 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 270,54 | 44,87 | 22,23 | 16,23 | 0,842 | 0,997 | 0,897 | 0,844 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 270,39 | 46,06 | 22,51 | 17,48 | 0,849 | 0,997 | 0,902 | 0,851 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 272,89 | 46,95 | 22,06 | 16,93 | 0,851 | 0,997 | 0,904 | 0,854 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 266,66 | 43,24 | 21,65 | 16,49 | 0,842 | 0,997 | 0,897 | 0,844 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 273,19 | 45,55 | 22,97 | 16,39 | 0,845 | 0,997 | 0,899 | 0,847 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 263,67 | 44,05 | 21,95 | 18,11 | 0,845 | 0,997 | 0,900 | 0,848 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 265,76 | 43,75 | 22,17 | 17,88 | 0,849 | 0,997 | 0,902 | 0,851 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 264,75 | 42,34 | 21,38 | 15,57 | 0,844 | 0,997 | 0,899 | 0,846 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 265,13 | 44,79 | 22,44 | 17,76 | 0,841 | 0,997 | 0,896 | 0,843 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 264,61 | 44,85 | 21,53 | 17,82 | 0,854 | 0,997 | 0,906 | 0,856 | 115000,00 |  |                       |                     |
| 270,57 | 43,69 | 22,11 | 18,13 | 0,843 | 0,997 | 0,898 | 0,846 | 115000,00 |  |                       |                     |

Σύνολο Pareto βέλτιστων design για δεξαμενόπλοιο 115000 DWT :

| DESIGN Number | L <sub>VL</sub> [m] | L <sub>BP</sub> [m] | B [m] | D [m] | T [m] | C <sub>B</sub> | C <sub>M</sub> | C <sub>WP</sub> | C <sub>P</sub> | Ls [m]  | S <sub>λ</sub> [m] | S <sub>r</sub> [m] | b    | n | A <sub>BT</sub> [m <sup>2</sup> ] | h <sub>0</sub> [m] | A <sub>T</sub> [m <sup>2</sup> ] | DWT [tons] |
|---------------|---------------------|---------------------|-------|-------|-------|----------------|----------------|-----------------|----------------|---------|--------------------|--------------------|------|---|-----------------------------------|--------------------|----------------------------------|------------|
| 1             | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,41 | 15,86 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,00 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 2             | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,09 | 16,03 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,00 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 3             | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,09 | 15,86 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,00 | 1 | 30,86                             | 6,83               | 10,00                            | 115000,00  |
| 4             | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,09 | 15,39 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,39 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 5             | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,09 | 15,58 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,00 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 6             | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,09 | 15,14 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,00 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 7             | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,09 | 15,86 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,00 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 8             | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,09 | 14,95 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,00 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 9             | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,09 | 15,45 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,88 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 10            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,41 | 14,95 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,39 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 11            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,79 | 15,86 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,00 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 12            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,09 | 16,02 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,00 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 13            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,09 | 16,31 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,00 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 14            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,09 | 15,93 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,00 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 15            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,41 | 15,58 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,659 | 0,34               | 0,00               | 0,39 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 16            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,09 | 15,15 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,00 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 17            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,41 | 14,97 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,00 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 18            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,79 | 14,95 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,00 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 19            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,09 | 15,61 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,659 | 0,00               | 0,00               | 0,00 | 1 | 30,86                             | 6,83               | 10,00                            | 115000,00  |
| 20            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,41 | 15,86 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,659 | 0,00               | 0,00               | 0,88 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 21            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,09 | 15,68 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,39 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 22            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,41 | 15,33 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,39 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 23            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,41 | 15,77 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,39 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 24            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,09 | 15,33 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,00 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 25            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,09 | 15,10 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,00 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 26            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,79 | 15,27 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,39 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 27            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,41 | 15,32 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,659 | 0,34               | 0,00               | 0,00 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 28            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,41 | 14,95 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,00 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 29            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,09 | 15,27 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,00 | 1 | 30,86                             | 6,83               | 10,00                            | 115000,00  |
| 30            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,79 | 15,38 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,34               | 0,00               | 0,00 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 31            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,79 | 14,95 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,00 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 32            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,09 | 15,41 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,34               | 0,00               | 0,39 | 1 | 30,86                             | 6,83               | 10,00                            | 115000,00  |
| 33            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,41 | 14,95 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,39 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 34            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,79 | 15,45 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,34               | 0,00               | 0,88 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 35            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,41 | 15,41 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,88 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 36            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,41 | 15,77 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,88 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 37            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,09 | 15,05 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,00 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 38            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,09 | 15,86 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,88 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 39            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,09 | 15,93 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,00 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 40            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,79 | 15,04 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,39 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 41            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,09 | 15,32 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,34               | 0,00               | 0,88 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 42            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,09 | 14,95 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,39 | 1 | 30,86                             | 6,83               | 10,00                            | 115000,00  |
| 43            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,09 | 15,25 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,34               | 0,00               | 0,39 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 44            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,79 | 14,95 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,00 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 45            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,09 | 15,10 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,00 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 46            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,79 | 15,41 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,660 | 0,00               | 0,00               | 0,00 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 47            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,79 | 15,38 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,34               | 0,00               | 0,88 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 48            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,41 | 15,81 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,00               | 0,00               | 0,39 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 49            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,09 | 14,98 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,659 | 0,00               | 0,00               | 0,00 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |
| 50            | 272,89              | 263,66              | 41,85 | 21,79 | 15,83 | 0,840          | 0,993          | 0,897           | 0,846          | 263,658 | 0,34               | 0,00               | 0,39 | 1 | 30,86                             | 6,82               | 10,00                            | 115000,00  |

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι οι διαφορές μεταξύ της πλειοψηφίας των Pareto design είναι της τάξης του 4<sup>ου</sup> δεκαδικού ψηφίου και άνω.



Το παράθυρο του προγράμματος MOGA\_Optimization Tankers μετά το τέλος της βελτιστοποίησης :

**Multiobjective Genetic Algorithm Ship Design  
Optimization (Tankers)**

**Pre-Optimization**

Specify the excel (.xls) input data file :

Press to import necessary data to optimization program :

Data Importing Status :  
... END OF DATA IMPORTING ...

Press the appropriate button once to select oil tanker DWT size category that will be used during the optimization procedure or set specific DWT requirement :

Type specific DWT requirement [tons] :

Type accepted deviation from DWT requirement [tons] : +/-

Oil Tanker Size Category Selected :  
Specific DWT requirement is set

Type required service speed [ Knots ] :

Type required cruising range [ nautical miles ] :

**Post-Optimization**

Press to create output excel file with the Optimization Results :

Results Exporting Status :  
... Output Excel File "Final\_Opt\_Results.xls" Generated ...

Total number of Pareto designs : 50

Please type here the number of the specific Pareto design (found in excel output file "Final\_Opt\_Results.xls") for which you wish to retrieve more detailed information :

Detailed Design Results Exporting Status :  
... Detailed Output Excel File "Detailed\_Info\_Output.xls" Generated ...

Please type here the number of the specific Pareto design (found in excel output file "Final\_Opt\_Results.xls") for which you wish to generate hull offsets for lines plan :

Offsets File Generating Status :  
 "offsets.txt" File Generated

**Generate Plots**

Total Generations vs Pareto Front Plots

| Plot Name                | Plot Status |
|--------------------------|-------------|
| Lightship - Powering     | Generated   |
| Powering - Annual Cost   | Generated   |
| Lightship - Build Cost   | Generated   |
| Payload - RFR            | Generated   |
| Build Cost - Annual Cost | Generated   |

Total Number of Individuals (All Generations) :

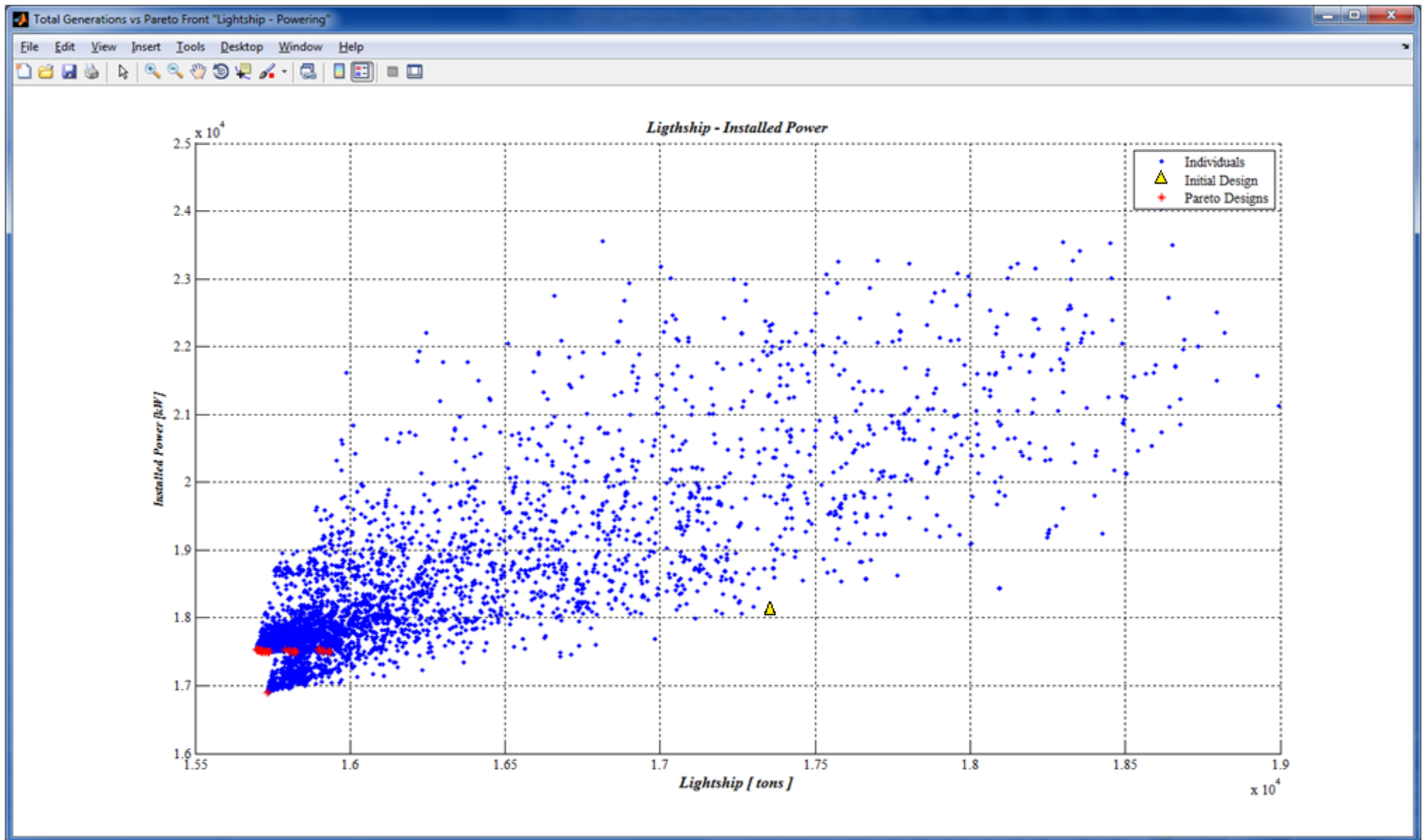
Total Number of Pareto Individuals :

Plot Status  
Generated

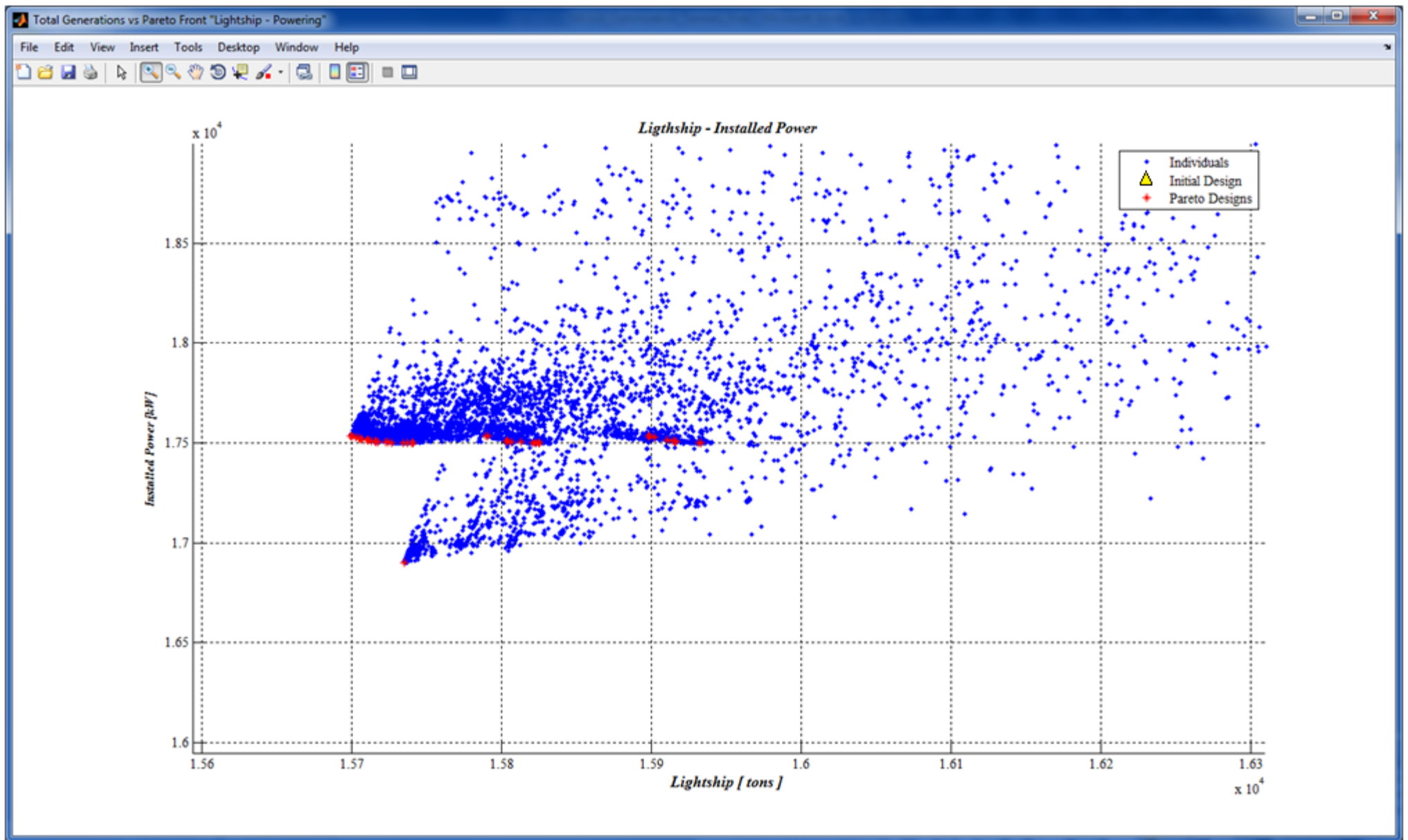
Message Window

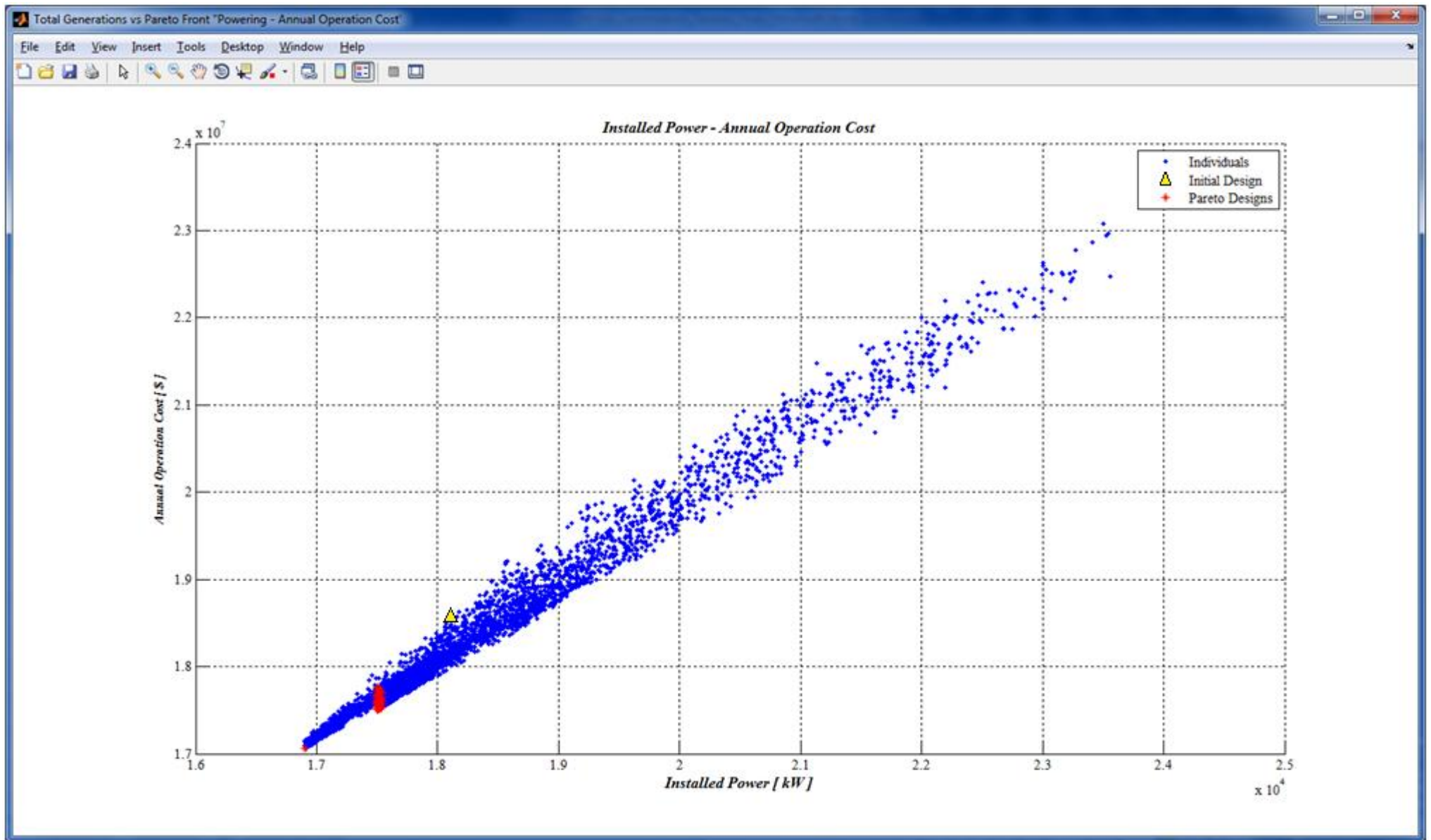
Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα στα οποία φαίνονται οι προκύπτουσες τιμές συγκεκριμένων αντικειμενικών συναρτήσεων του συνολικού πληθυσμού των design που παράγαγε ο γενετικός αλγόριθμος (όλες οι γενεές) και των nondominated Pareto λύσεων που πρόεκυψαν (Pareto Front) για τα εξής ζεύγη κριτηρίων (αντικειμενικές συναρτήσεις) :

- (1) Lightship – Powering
- (2) Powering – Annual Cost
- (3) Lightship – Build Cost
- (4) Payload – RFR
- (5) Build Cost – Annual Cost

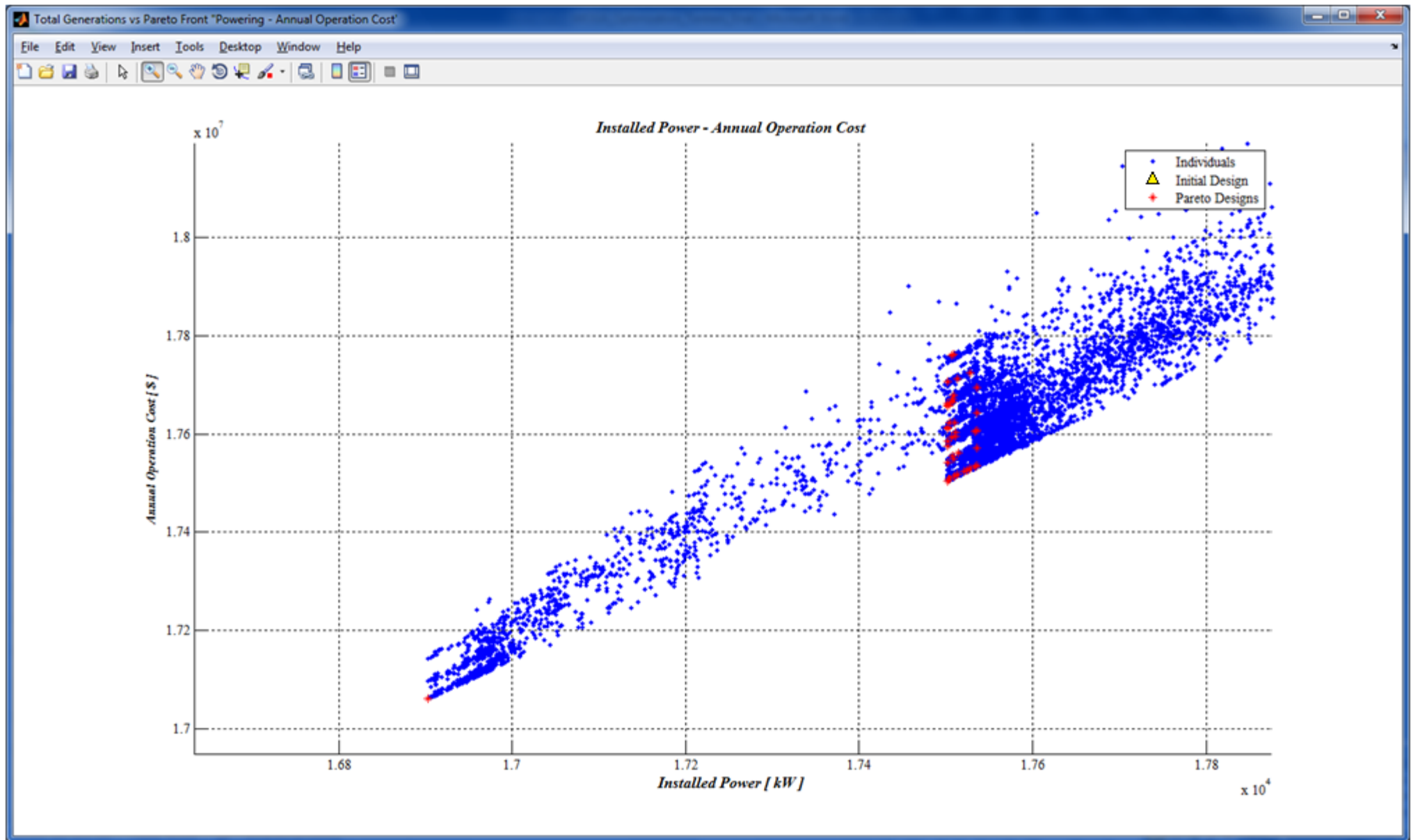


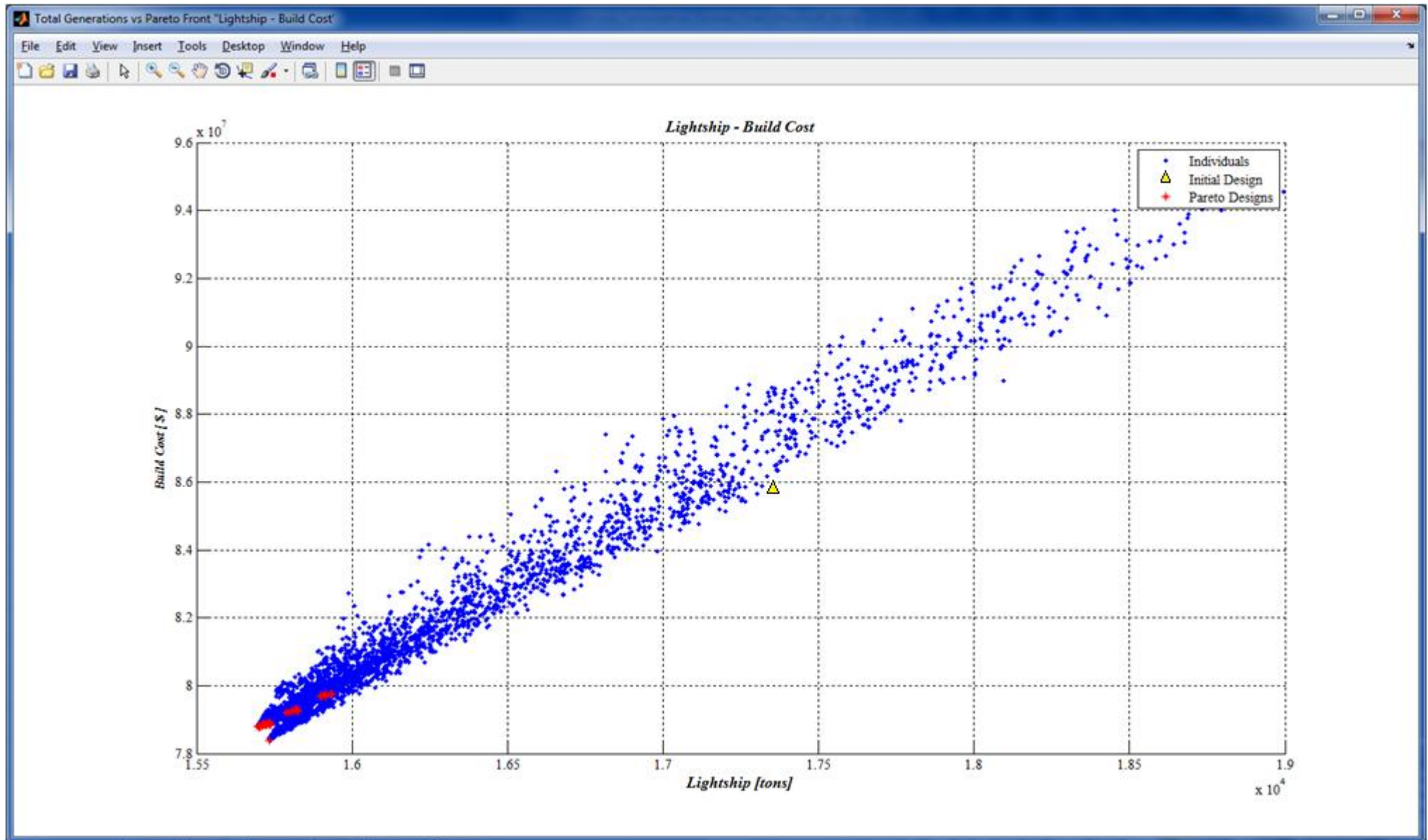
Στο επόμενο σχήμα φαίνεται εστιασμένα το μέτωπο Pareto :



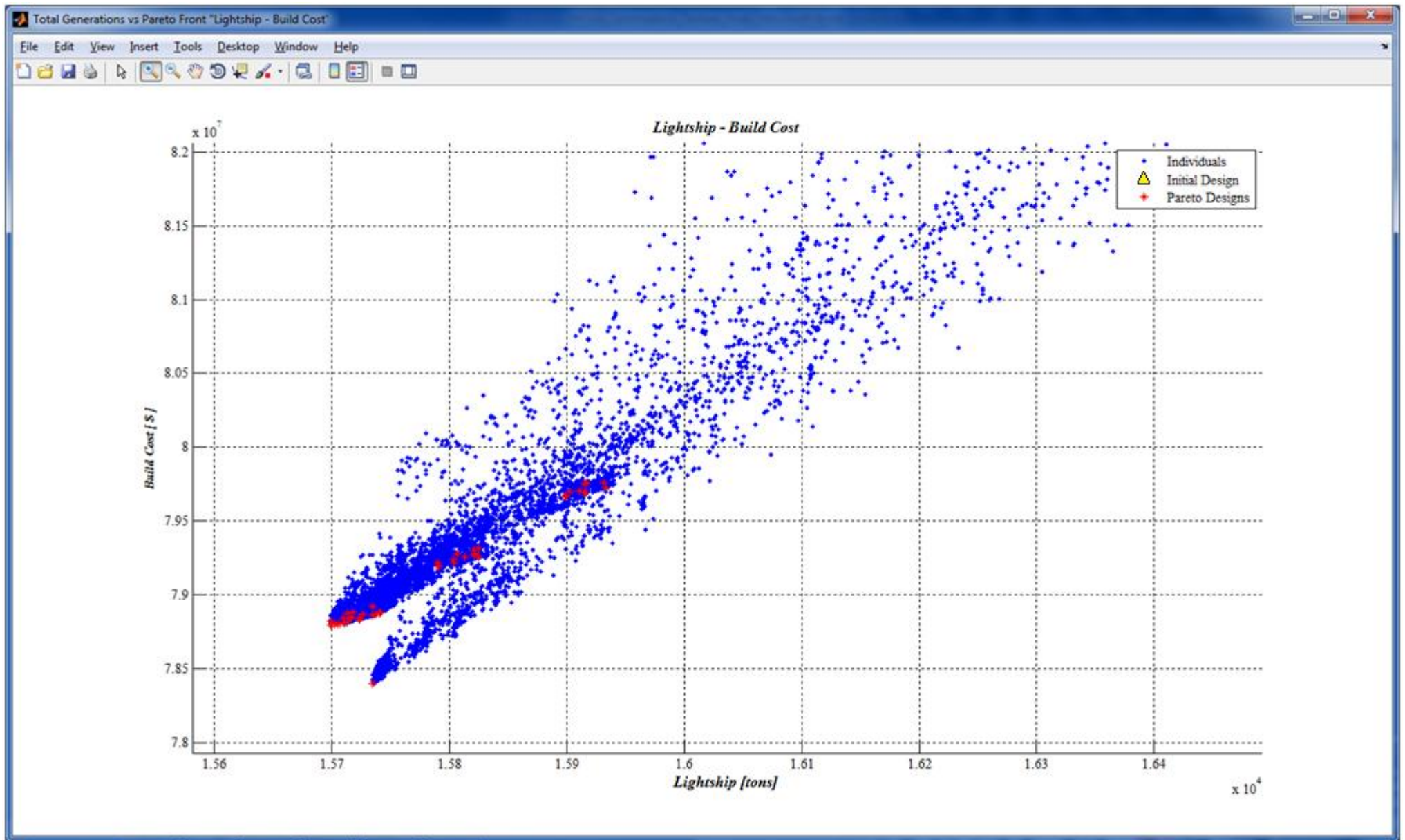


Στο επόμενο σχήμα φαίνεται εστιασμένα το μέτωπο Pareto :

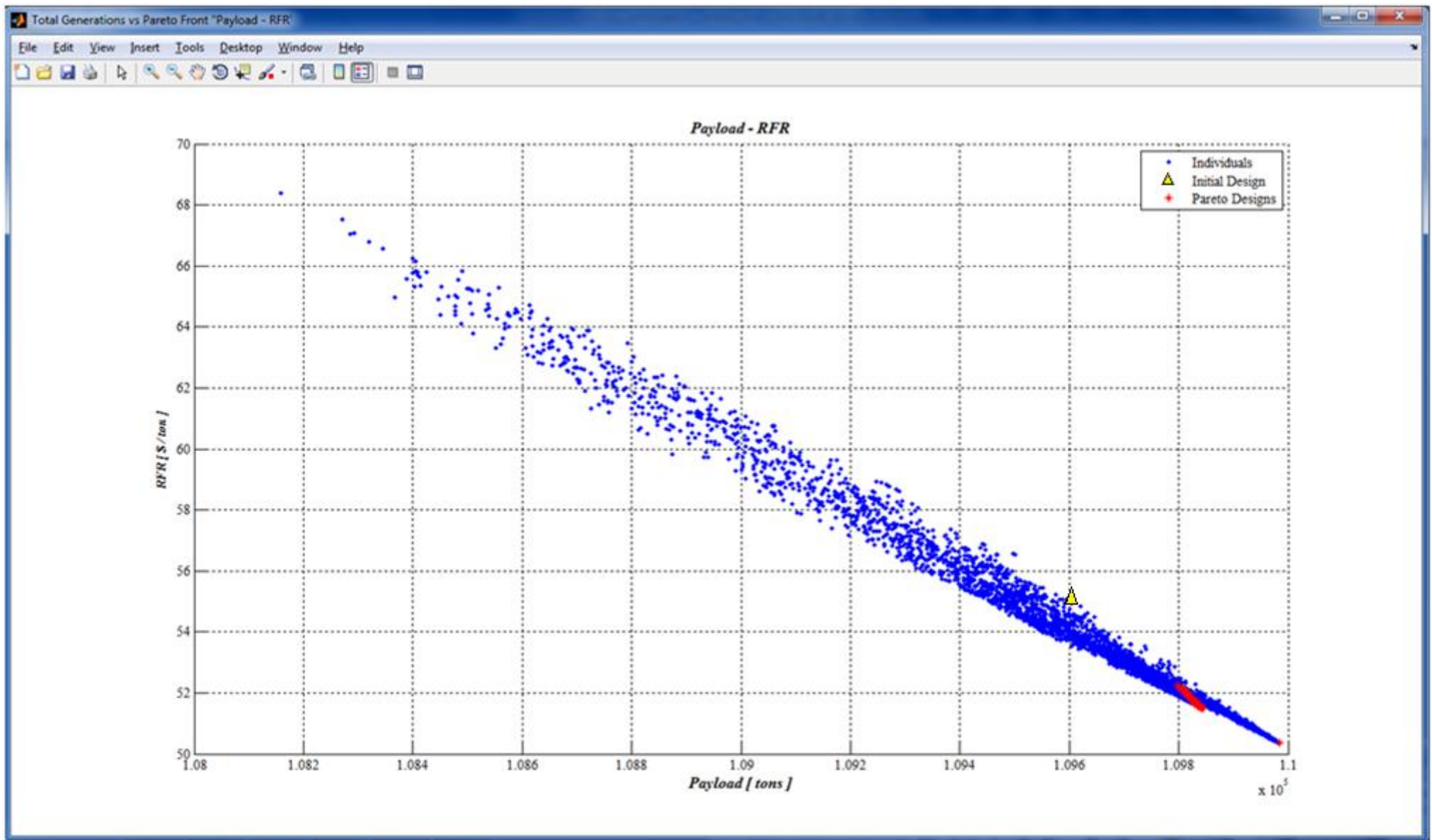




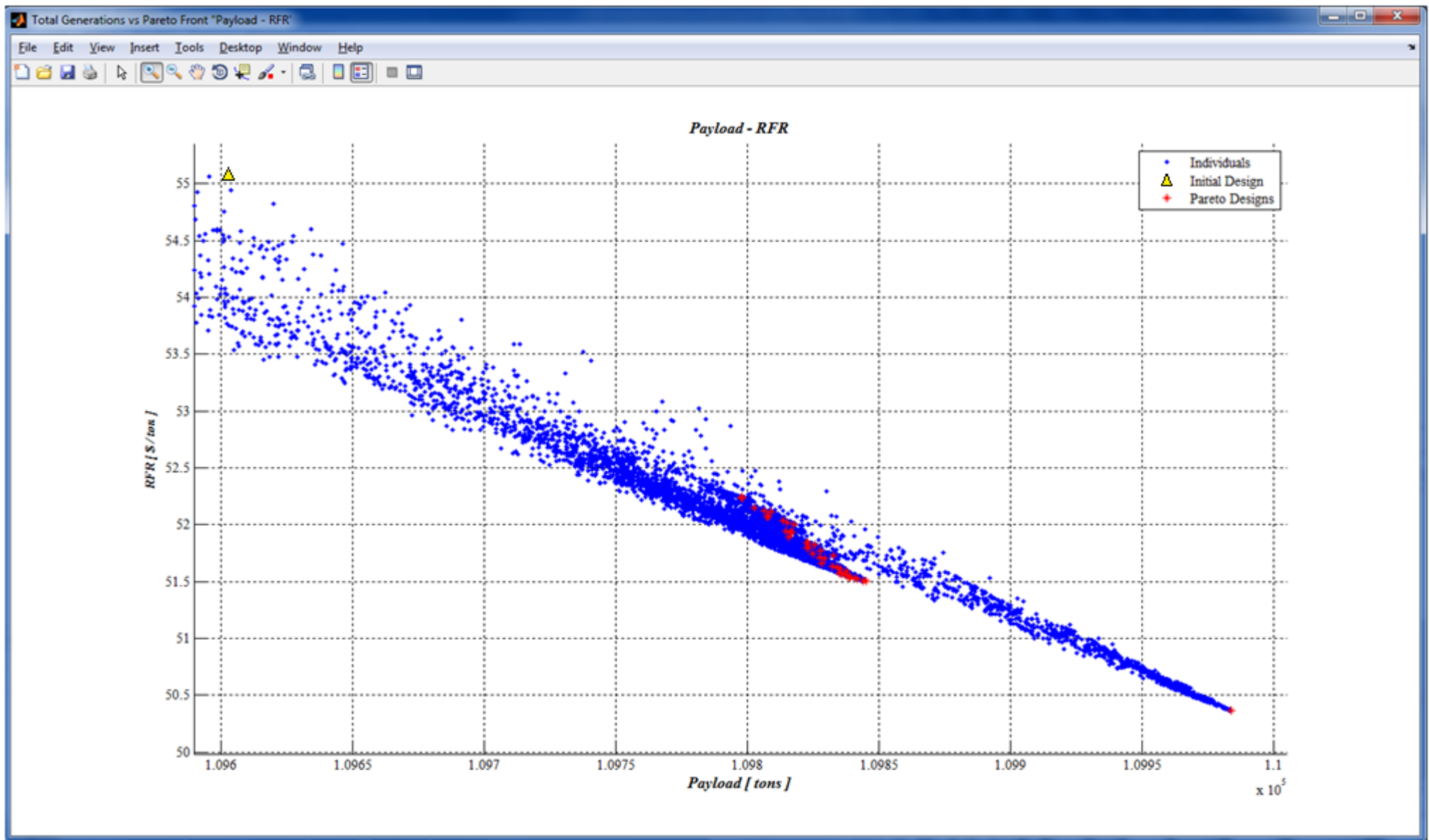
Στο επόμενο σχήμα φαίνεται εστιασμένα το μέτωπο Pareto :



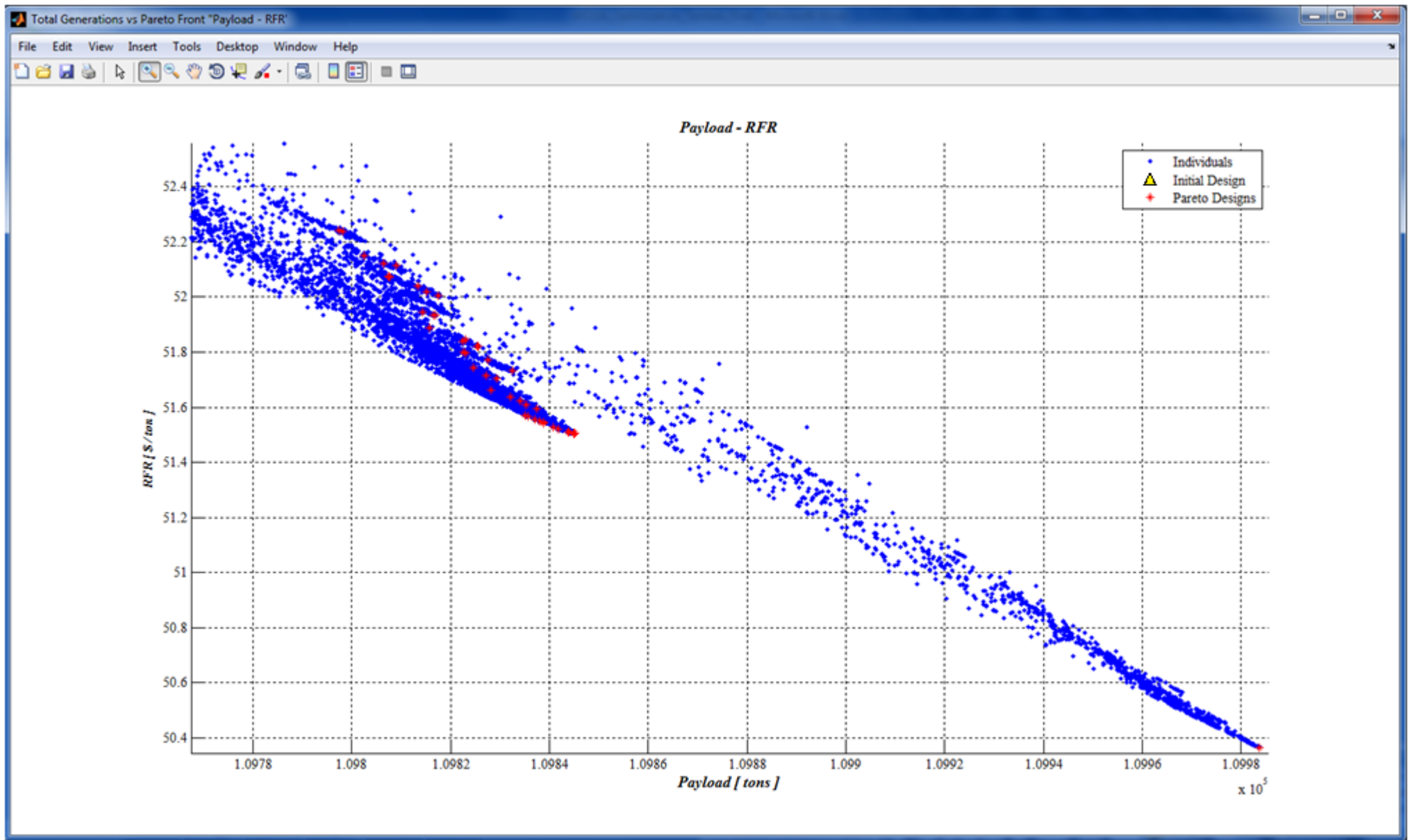


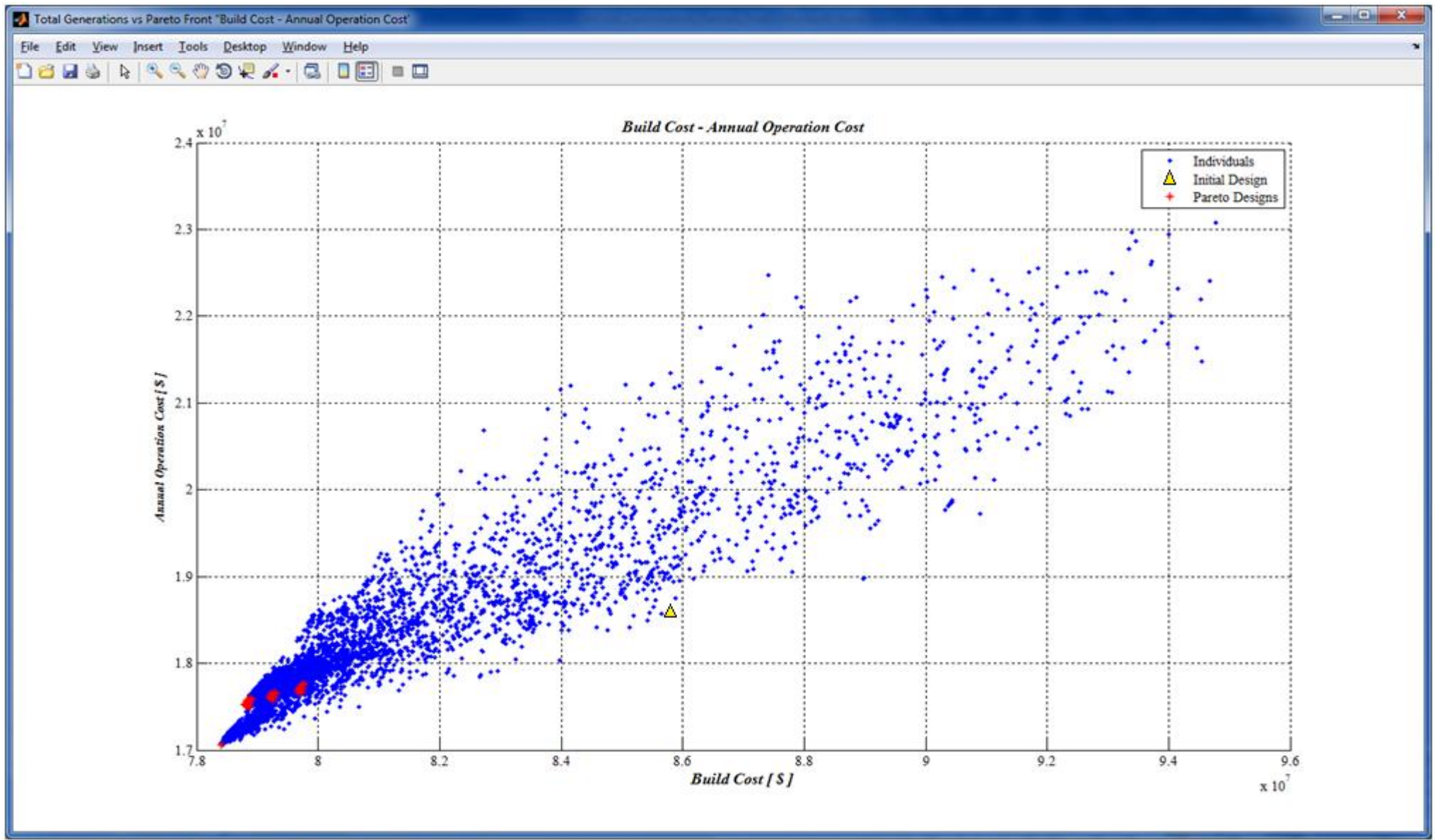


Στο επόμενο σχήμα φαίνεται εστιασμένα το μέτωπο Pareto :

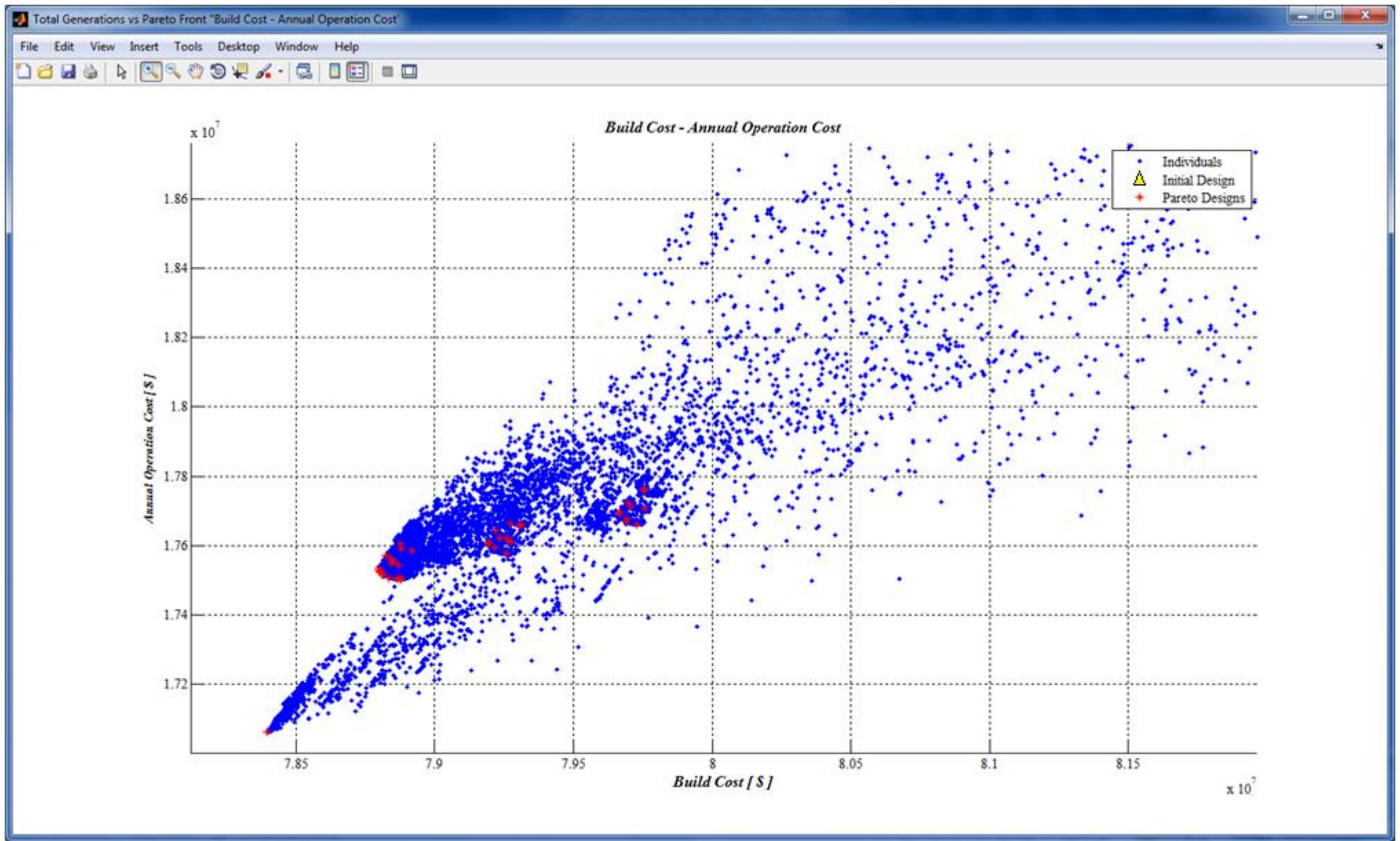


Εστιάζοντας ακόμη περισσότερο στην περιοχή με τις Pareto λύσεις :





Στο επόμενο σχήμα φαίνεται εστιασμένα το μέτωπο Pareto :



## Γενικές παρατηρήσεις επί των διαγραμμάτων

Κάποιες γενικές παρατηρήσεις που μπορούν να εξαχθούν από τα ανωτέρω διαγράμματα είναι οι εξής :

Στα διαγράμματα *Lightship – Installed Power* (βάρος κενού σκάφους – εγκατεστημένης ισχύος) παρατηρείται πως καθώς αυξάνεται το βάρος *Lightship* οδηγούμαστε και σε μεγαλύτερες απαιτήσεις ισχύος καθώς μεγαλύτερο βάρος κενού σκάφους υποδηλώνει γενικά πλοία μεγαλύτερου απόλυτου μεγέθους με αποτέλεσμα μεγαλύτερες τιμές αντίστασης και επομένως μεγαλύτερων απαιτήσεων εγκατεστημένης ισχύος κύριων και βοηθητικών μηχανών ώστε να είναι δυνατή η επίτευξη μιας συγκεκριμένης απαίτησης ταχύτητας υπηρεσίας.

Σαν αποτέλεσμα της αύξησης της εγκατεστημένης ισχύος, όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα *Installed Power – Annual Operation Cost* (εγκατεστημένη ισχύς – συνολικό ετήσιο κόστος εκμετάλλευσης), έχουμε και την παράλληλη αύξηση του ετήσιου κόστους εκμετάλλευσης. Αυτό συμβαίνει διότι, δεδομένου ότι τα υπόλοιπα κόστη εκμετάλλευσης (έξοδα εφοδίων πληρώματος, έξοδα μισθοδοσίας, συντήρησης και επισκευών, έξοδα λιμένων, έξοδα ασφαλίσεως κλπ) είναι σε γενικές γραμμές γνωστά και σταθερά, τα μόνα κόστη που μεταβάλλονται και αυξάνονται σημαντικά με την αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος επηρεάζοντας έτσι και τα κόστη εκμετάλλευσης, είναι τα έξοδα βαρέως καύσιμου και λιπαντικών ελαίων κύριας μηχανής και καύσιμου βοηθητικών μηχανών.

Στα διαγράμματα *Lightship – Build Cost* (Βάρος κενού σκάφους – συνολικού κόστους κτήσεως) φαίνεται η αναμενόμενη αύξηση του κόστους κτήσεως όσο το βάρος κενού σκάφους μεγαλώνει. Αυτό είναι λογικό επακόλουθο δυο παραγόντων. Αρχικά, αυξημένο βάρος κενού σκάφους υποδηλώνει και πλοίο μεγαλύτερου απόλυτου μεγέθους όπως έχει ήδη αναφερθεί, άρα περισσότερες απαιτούμενες εργατοώρες και επομένως αυξημένα εργατικά κόστη. Επίσης, αύξηση κόστους υλικών κατασκευής (ελάσματα, σωληνώσεις, ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις βαφές κλπ) είναι αναμενόμενη καθώς το *Lightship* αυξάνεται. Το άθροισμα τελικά των δυο αυτών παραγόντων καθορίζει και την τάση κατεύθυνσης του συνολικού κόστους κτήσεως.

Στα διαγράμματα *Payload – RFR* (συνολικού μεταφερόμενου εκμεταλλεύσιμου φορτίου – ελάχιστου απαιτούμενου ναύλου) φαίνεται πολύ καθαρά η σταδιακή μείωση του ελάχιστου απαιτούμενου ναύλου καθώς η ποσότητα του συνολικού *Payload* αυξάνεται. Αυτή η τάση είναι γνωστή και ως οικονομία κλίμακας όπου το μέσο κόστος παραγωγής ανά μονάδα προϊόντος (εδώ κόστος (\$) για μεταφορά ενός τόνου φορτίου) μειώνεται όσο η κλίμακα της συνολικής παραγωγής (εδώ το συνολικό βάρος μεταφερόμενου εκμεταλλεύσιμου φορτίου) αυξάνεται. Εδώ υπεισέρχονται διάφοροι παράγοντες εξήγησης αυτού του φαινόμενου από τη συνολική

βελτίωση του ισοζυγίου εσόδων-εξόδων για μεγάλης κλίμακας δραστηριότητες, έως την αυξημένη διαπραγματευτική δύναμη μεγάλων ισχυρών εταιριών σε κάθε αγορά, τις διοικητικές οικονομίες (απαιτούμενος αριθμός διοικητικών υπάλληλων δεν αυξάνεται ανάλογα με το μέγεθος της εταιρίας) κλπ.

Στα διαγράμματα *Build Cost – Annual Cost* (συνολικό κόστος κτήσεως – συνολικό κόστος εκμετάλλευσης) φαίνεται η αύξηση του Annual Cost με ανάλογη αύξηση του Build Cost λόγω του ότι γενικά αυξημένο κόστος κτήσεως υποδηλώνει πλοία μεγαλύτερου απόλυτου μεγέθους ή πλοία με αυξημένη εγκατεστημένη ισχύ παράγοντες που αυξάνουν τα λειτουργικά κόστη.

Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι οι παρατηρούμενες «ασυνέχειες» του μετώπου Pareto οι οποίες φαίνονται πιο καθαρά στα διαγράμματα της βελτιστοποίησης δεξαμενοπλοίου 115000 DWT αποδεικνύουν, και εξηγούνται από, την ικανότητα του τροποποιημένου γενετικού αλγορίθμου NSGA-II (Controlled Elitist NSGA-II) ο οποίος χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα MOGA\_Optimization\_Tankers, να διατηρεί την ποικιλότητα (diversity) του πληθυσμού των υποψήφιων λύσεων (designs) ευνοώντας (όπως έχει ήδη αναφερθεί στην ενότητα 4.2) όχι μόνο άτομα (designs) με την καλύτερη απόδοση αλλά και άτομα τα οποία μπορούν να βοηθήσουν στην αύξηση της ποικιλότητας – ποικιλομορφίας του πληθυσμού ακόμα και αν έχουν χαμηλότερη απόδοση. Ο διαχωρισμός του μετώπου Pareto σε δυο «επιμέρους μέτωπα – γειτονιές» που φαίνεται πιο καθαρά στο διάγραμμα Lightship – Installed Power της βελτιστοποίησης κατηγορίας Aframax μπορεί επίσης να αποδοθεί στην διατηρούμενη αυξημένη ποικιλότητα πληθυσμού από τον Controlled Elitist NSGA-II.