



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Επίλυση Βέλτιστης Ροής Φορτίου σε Σ.Η.Ε υπό
Περιβαλλοντικούς Περιορισμούς με την Χρήση
Γενετικών Αλγορίθμων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΙΧΑΗΛ Φ. ΣΤΑΜΟΥΛΗΣ

Επιβλέπων : Χατζηαργυρίου Νικόλαος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ανέστης Αναστασιάδης
Υ.Δ. Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2009



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Επίλυση Βέλτιστης Ροής Φορτίου σε Σ.Η.Ε υπό
Περιβαλλοντικούς Περιορισμούς με την Χρήση
Γενετικών Αλγορίθμων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΙΧΑΗΛ Φ. ΣΤΑΜΟΥΛΗΣ

Επιβλέπων : Χατζηαργυρίου Νικόλαος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Χατζηαργυρίου Νικόλαος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Παπαθανασίου Σταύρος
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Καβατζά Σταυρούλα
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2009

.....
ΜΙΧΑΗΛ Φ. ΣΤΑΜΟΥΛΗΣ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Μιχαήλ Φ. Σταμούλης 2009

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία αποτελεί την Διπλωματική μου Εργασία στα πλαίσια των σπουδών μου στον τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της σχολής των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ.

Αντικείμενο της εργασίας είναι η ανάλυση και η μελέτη του προβλήματος της βέλτιστης ροής φορτίου, υπό περιβαλλοντικούς περιορισμούς, σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Η επίλυση του προβλήματος αυτού επιτεύχθηκε με τη χρήση των Γενετικών Αλγορίθμων, και συγκεκριμένα με την βοήθεια της εργαλειοθήκης γενετικών αλγορίθμων της MatLab.

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2008- 2009 υπό την επίβλεψη του κ. Νικόλαου Δ. Χατζηαργυρίου, καθηγητή του Ε.Μ.Π. της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, στον οποίο και οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της.

Με την ευκαιρία αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Ανέστη Αναστασιάδη, Υ.Δ. Ε.Μ.Π, για τη βοήθεια, τις πολύτιμες συμβουλές, την υποστήριξη και την συνεχή καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, τον αδερφό μου και τους φίλους μου για την αμέριστη στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου σταδιοδρομίας.

Αθήνα, Ιούλιος 2009

ΜΙΧΑΗΛ Φ. ΣΤΑΜΟΥΛΗΣ

Περίληψη

Στην εργασία αυτή επικεντρωνόμαστε στην ανάλυση και μελέτη της βέλτιστης ροής φορτίου σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζουμε διάφορες εκδοχές του συγκεκριμένου προβλήματος, όπως π.χ. βέλτιστη ροή φορτίου υπό περιβαλλοντικούς περιορισμούς ή οικονομική κατανομή φορτίου σε μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας. Τα προβλήματα αυτά τα προσεγγίζουμε με την βοήθεια των γενετικών αλγορίθμων.

Πιο αναλυτικά, η δομή της εργασίας οργανώνεται σε δέκα κεφάλαια:

Το πρώτο κεφάλαιο καλύπτει την ανάλυση ροών φορτίου. Περιγράφονται συνοπτικά τα μοντέλα των στοιχείων από τα οποία αποτελείται ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ΣΗΕ, όπως αυτά χρησιμοποιούνται σε μελέτες ροών φορτίου. Εν συνεχεία, καταstrώνονται οι εξισώσεις ροών φορτίου. Τα ηλεκτρικά μεγέθη που υπεισέρχονται στις εξισώσεις αυτές, δηλαδή τάσεις, γωνίες και ισχύεις, ταξινομούνται σε αντίστοιχες κατηγορίες μεταβλητών κατάστασης, ζήτησης και ελέγχου.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, εισάγεται η έννοια της οικονομικής κατανομής φορτίου (Ο.Κ.Φ) σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας. Γίνεται αναφορά σε κάποιες χαρακτηριστικές καμπύλες των μονάδων παραγωγής, που είναι απαραίτητες για την ανάλυση της οικονομικής κατανομής φορτίου. Επίσης, περιγράφονται συνοπτικά οι διάφορες μορφές με τις οποίες μπορεί να διατυπωθεί ένα πρόβλημα οικονομικής κατανομής φορτίου. Παράλληλα, για τις διάφορες αυτές μορφές προτείνονται αλγόριθμοι επίλυσης σε H/Y, όπως είναι ο αλγόριθμος επαναλήψεων λάμδα.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου (B.P.Φ). Το γενικό πρόβλημα της B.P.Φ αναφέρεται στην εύρεση βέλτιστης λύσης που ελαχιστοποιεί τη γενική αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος, ικανοποιώντας ταυτόχρονα κάποιους εξισωτικούς και ανισωτικούς περιορισμούς για την ασφαλή λειτουργία του συστήματος. Γίνεται μαθηματική περιγραφή της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών για προβλήματα B.P.Φ που σχετίζονται με την ελαχιστοποίηση κόστους και τους περιβαλλοντικούς περιορισμούς. Τέλος, αναφέρονται επιγραμματικά διάφορες τεχνικές επίλυσης σύνθετων προβλημάτων B.P.Φ γραμμικού και μη γραμμικού προγραμματισμού.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, γίνεται αναλυτική περιγραφή των γενετικών αλγορίθμων. Αρχικά, γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή ενώ στη συνέχεια παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των γενετικών αλγορίθμων, καθώς και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Επίσης, περιγράφονται τα διάφορα στάδια και η λειτουργία του απλού γενετικού αλγορίθμου. Τέλος, αναφέρονται κάποιες εφαρμογές του γενετικού αλγορίθμου.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η εργαλειοθήκη γενετικών αλγορίθμων της MatLab. Αρχικά, περιγράφονται τα διάφορα μέρη της εργαλειοθήκης και ο τρόπος λειτουργίας τους ενώ στη συνέχεια διατυπώνεται το πρόβλημα της Β.Ρ.Φ για την περίπτωση 9 ζυγών της IEEE (case9 IEEE). Τέλος, γίνεται εφαρμογή των Γ.Α για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με τα αντίστοιχα συμπεράσματα.

Στο έκτο κεφάλαιο, διατυπώνεται το πρόβλημα της Β.Ρ.Φ υπό περιβαλλοντικούς περιορισμούς. Συγκεκριμένα περιγράφονται οι διάφορες μαθηματικές συναρτήσεις, όπως η συνάρτηση κόστους και εκπομπών, καθώς και η συνολική αντικειμενική συνάρτηση. Τέλος, επιλύεται το πρόβλημα για διάφορες περιπτώσεις ανάλογα με το ποσοστό συμμετοχής της κάθε συνάρτησης στην συνολική αντικειμενική συνάρτηση και παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα.

Στο έβδομο και όγδοο κεφάλαιο, εισάγεται η έννοια της συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας. Αρχικά περιγράφονται τα διάφορα χαρακτηριστικά της συμπαραγωγής και τα πλεονεκτήματα της έναντι των συμβατικών τρόπων παραγωγής ενέργειας. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι διάφορες εφαρμογές της και τέλος, στο όγδοο κεφάλαιο, αναλύονται οι σύγχρονες τεχνικές συμπαραγωγής.

Στο ένατο κεφάλαιο, διατυπώνεται το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου σε μονάδες Σ.Η.Θ. Αρχικά παρουσιάζονται οι διάφορες παραλλαγές του προβλήματος, όπως απλή Ο.Κ.Φ, Ο.Κ.Φ υπό περιβαλλοντικούς περιορισμούς, ένταξη του προβλήματος στην απελευθερωμένη αγορά ενέργειας, και Ο.Κ.Φ και δικαιώματα εμπορίας ρύπων. Τέλος εκτελούνται αριθμητικές εφαρμογές για τις διάφορες περιπτώσεις και παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα.

Στο δέκατο και τελευταίο κεφάλαιο γίνεται μια σύνοψη της εργασίας, και συγκεκριμένα διατυπώνονται κάποια συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα των γενετικών αλγορίθμων με βάση τα αποτελέσματα των εφαρμογών που εκτελέσαμε και τα αντίστοιχα αποτελέσματα των εφαρμογών αυτών με τη χρήση άλλων μεθόδων.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:

Ροή Φορτίου, Οικονομική Κατανομή Φορτίου, Βέλτιστη Ροή Φορτίου, Γενετικοί Αλγόριθμοι, Εργαλειοθήκη Γενετικών Αλγορίθμων, Οικονομική-Περιβαλλοντική Κατανομή Φορτίου, Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού-Θερμότητας (Σ.Η.Θ), Δικαιώματα Εκπομπής Ρύπων

Abstract

In this thesis, we are focusing on the optimal power flow (OPF) at electric power systems. Specifically, we examine various versions of OPF problems, like OPF under environmental constraints or combined heat and power economic dispatch. We are approaching these problems using the genetic algorithms.

Analytically, the structure of this thesis is consisting of ten chapters:

The first chapter covers the analysis of power flow. The models of the components of an electric power system are synoptically described, as they are used at studies of power flow. After, the power flow equations are planned. The electric elements that participate in these equations, like voltages, angles and powers are classified at categories of state or demand or control variables

In the second chapter, is introduced the concept of economic load dispatch at power stations. Some characteristic curves of generation units are referred, which are essential for the economic load dispatch study. Different forms, in which an economic load dispatch problem is formulated, are concisely described. Simultaneously, some algorithms for solving such economic load dispatch problems using PC are proposed, like the lambda iteration algorithm

In the third chapter is presented the optimal power flow problem (OPF). The general OPF problem is posed as finding an optimal solution that minimizes the general objective function of the problem while satisfying some equality and inequality constraints, in order to stay secure the system. It is discussed a mathematical description of the objective function and constraints for problems relative to the cost minimization and environmental constraints. Finally, different solution techniques for complex linear and nonlinear programming OPF problem are mentioned.

In the fourth chapter, an analytic description of genetic algorithms is presented. Initially, we have a short historical retrospection, while afterwards, the characteristics of genetic algorithms, as well as the advantages and their disadvantages, are described. Also, the various stages and the operation of a simple genetic algorithm are described. Finally, certain applications of the genetic algorithms are reported.

In the fifth chapter, the Genetic Algorithm Toolbox of MatLab is presented. First of all, there are described the various parts of the toolbox and its way of operation, while afterwards, the OPF problem of a 9-bus network is formulated (case9 IEEE). Finally, we apply the genetic algorithms on the previous problem and we present the results with the corresponding conclusions.

In the sixth chapter, is introduced the concept of an economic-environmental dispatch problem (EED). Specifically, there are described the various mathematic functions, like the cost and emission functions, as well as the total objective function. Finally, we solve three different cases of the problem, depending on the rate of attendance of each function in the total objective function, and the corresponding results are presented.

In the seventh and eighth chapter, is introduced the concept of combined heat and power (CHP). Initially, there are described the various characteristics of the CHP units and their advantages over conventional units of energy production. Afterwards, there are presented the various applications of CHP units and finally, in the eighth chapter, modern techniques of co-production are analyzed.

In the ninth chapter, is formulated the combined heat and power economic dispatch problem. At first, various versions of the problem are presented, like the simple economic dispatch (E.D), the E.E.D, the E.D in the released market of energy, and E.D with rights of pollutants trading. Finally numerical applications for the previous cases are executed and the corresponding results are presented.

In the tenth and final chapter there is a synopsis of the thesis, and more specifically, the effectiveness of genetic algorithms is concluded, regarding the results of our applications and the corresponding results by other methods

KEY WORDS:

Power Flow, Economic Dispatch Load, Optimal Power Flow, Genetic Algorithms, Economic-Environmental Dispatch Load, Combined Heat and Power (CHP), Combined Heat and Power Economic Dispatch (CHPED), Pollutants trading

Περιεχόμενα

Λίστα Σχημάτων	xiii
Λίστα Πινάκων.....	xvi
Ονοματολογία	xiv

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ	1
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	2
1.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ ΣΗΕ	2
1.2.1 Παράσταση Γραμμών Μεταφοράς	3
1.2.2 Παράσταση Εγκάρσιων Πυκνωτών και Αυτεπαγωγών	4
1.2.3 Παράσταση Μετασχηματιστών	4
1.2.4 Παράσταση Γεννητριών	5
1.2.5 Παράσταση Φορτίων	5
1.3 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ	6
1.4 ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	9
1.5 ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ.....	11
1.6 ΨΗΦΙΑΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ	12

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ	13
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΚΑΙ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	14
2.3 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΧΩΡΙΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ...	17
2.3.1 Γραφική Επίλυση των Εξισώσεων Συνεργασίας.....	18
2.4 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΟΡΙΑ	20
2.5 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ.....	22
2.5.1 Διαμόρφωση της Εξίσωσης Απωλειών με τη Μέθοδο Συντελεστών Β	24

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ	27
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	28
3.2 ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	31
3.2.1 Μοντελοποίηση	31
3.2.2 Μαθηματική Περιγραφή Αντικειμενικής Συνάρτησης και Περιορισμών για την Ελαχιστοποίηση Κόστους	32
3.3 ΕΠΙΠΡΟΣΘΕΤΟΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ	34
3.3.1 Θέματα Μοντελοποίησης για Περιβαλλοντικούς Περιορισμούς	34
3.6 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	35

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ	37
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	38
4.1.1 Γενική Δομή των Γενετικών Αλγορίθμων	38
4.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΝΝΟΙΕΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΟΝ ΓΕΝΕΤΙΚΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ	38
4.2.1 Εξελκτικοί Αλγόριθμοι	39
4.2.2 Γενετικός Προγραμματισμός.....	41
4.3 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	42
4.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ	43
4.5 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ	45
4.6 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ	46
4.7 ΟΡΟΛΟΓΙΑ	48
4.8 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ	49
4.8.1 Τελεστές	49
4.8.2 Υλοποίηση απλού γενετικού αλγορίθμου	52
4.9 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΑΔΙΑ ΑΠΛΟΥ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ	55
4.9.1 Κωδικοποίηση	55
4.9.2 Επιλογή.....	55
4.10 ΘΕΩΡΙΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	60

4.11 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	63
---------------------	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ GA TOOLBOX ΤΗΣ MATLAB ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ65

5.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ GA TOOLBOX ΤΗΣ MATLAB	66
5.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ Γ.Α. ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΗΣ Β.Ρ.Φ.	69
5.2.1 Απλό Πρόβλημα Οικονομικής Κατανομής Φορτίου	69
5.2.2 Προσομοίωση Συστήματος 9 Ζυγών - Μελέτη Β.Ρ.Φ.....	73
5.2.3 Συμπεριφορά του Συστήματος των 9 Ζυγών για Εξάρτηση της Συνάρτησης Κόστους και από την Άεργο Παραγωγή των Γεννητριών	80

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Β.Ρ.Φ ΥΠΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ.....84

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	85
6.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	86
6.2.1 Αντικειμενικές Συναρτήσεις.....	87
6.2.2 Περιορισμοί της Αντικειμενικής Συνάρτησης.....	88
6.2.3 Διατύπωση του Προβλήματος	89
6.3 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ Γ.Α ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΗΣ Β.Ρ.Φ ΥΠΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ	90
6.3.1 Μέθοδος Γ.Α-Μέθοδος SLP	98

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ-ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ 100

7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	101
7.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....	104
7.2.1 Επιπτώσεις στην κατανάλωση καυσίμου.....	104
7.2.2 Επιπτώσεις στο σύστημα ηλεκτρισμού της χώρας	104
7.2.3 Οικονομικές και Κοινωνικές Επιπτώσεις.....	105
7.2.4 Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις	105

7.3 Η ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ	107
7.4 ΤΡΟΠΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....	108

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....	110
8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	111
8.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ.	111
8.2.1 Συστήματα αεριοστρόβιλου ανοιχτού τύπου	111
8.2.2 Συστήματα αεριοστρόβιλου κλειστού τύπου	112
8.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ	113
8.4 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ.	116
8.5 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΟΥ.....	117
8.6 ΤΥΠΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ (ΠΑΚΕΤΑ).....	119
8.7 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ.	120

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....	121
9.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	122
9.2 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ ΜΟΝΑΔΕΣ Σ.Η.Θ.....	122
9.2.1 Απλή Οικονομική Κατανομή Φορτίου	122
9.2.2 Οικονομική Κατανομή Φορτίου με Περιβαλλοντικούς Περιορισμούς	124
9.2.3 Απλή Οικονομική Κατανομή Φορτίου σε Απελευθερωμένη Αγορά Ενέργειας	124
9.2.4 Οικονομική Κατανομή Φορτίου με Δικαιώματα Εκπομπής Ρύπων.....	125
9.3 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ Σ.Η.Θ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ Γ.Α.	126
9.3.1 Εφαρμογή 1	126
9.3.2 Εφαρμογή 2	131
9.3.3 Εφαρμογή 3	137
9.3.4 Εφαρμογή 4	140

9.3.5 Εφαρμογή 5	146
------------------------	-----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

ΕΠΙΛΟΓΟΣ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	153
------------------------------------	------------

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΚΩΔΙΚΑΣ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ GA ΤΟΥ MATLAB	157
--	------------

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	160
---------------------------	------------

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 1.1	Ονομαστικό ισοδύναμο κύκλωμα Π γραμμής μεταφοράς.....	3
Σχήμα 1.2	Παράσταση εγκάρσιου στοιχείου	4
Σχήμα 1.3	Παράσταση M/Σ σε ονομαστική σχέση μετασχηματισμού	4
Σχήμα 1.4	Παράσταση φορτίων	6
Σχήμα 1.5	Γενικευμένος ζυγός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας	6
Σχήμα 2.1	Χαρακτηριστικές καμπύλες κατανάλωσης καυσίμου.....	15
Σχήμα 2.2	Χαρακτηριστικές καμπύλες κόστους λειτουργίας.....	16
Σχήμα 2.3	Σχηματική επίλυση των εξισώσεων συνεργασίας	19
Σχήμα 2.4	Αλγόριθμος επαναλήψεων λ.....	21
Σχήμα 2.5	Διαφορικό κόστος καυσίμου με και χωρίς απώλειες.....	24
Σχήμα 2.6	Αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος οικονομικής κατανομής φορτίου με απώλειες	25
Σχήμα 4.1	Τυπική κατάταξη ευφών συστημάτων	40
Σχήμα 4.2	Απλή δομή που δείχνει την πράξη $X*Y-(A+B)*C$	41
Σχήμα 4.3	Ο τελεστής διασταύρωσης σε ένα ζεύγος συμβολοσειρών.....	50
Σχήμα 4.4	Διαδικασία διασταύρωσης ενός σημείου	50
Σχήμα 4.5	Διαδικασία αριθμητικής (γραμμικής) διασταύρωσης.....	50
Σχήμα 4.6	Διαδικασία διασταύρωσης δέντρου	51
Σχήμα 4.7	Διαδικασία τυχαίας μετάλλαξης	51
Σχήμα 4.8	Διάγραμμα βαθμίδων γενετικού αλγορίθμου	53
Σχήμα 4.9	Σχηματική αναπαράσταση μεθόδου ρουλέτας	56
Σχήμα 4.10	Μέθοδος αναλογικής επιλογής	58
Σχήμα 4.11	Τρισδιάστατος (κυβικός) χώρος	61
Σχήμα 5.1	Εργαλειοθήκη γενετικών αλγορίθμων του MatLab.....	66
Σχήμα 5.2	Ορισμός συναρτήσεων και περιορισμών του προβλήματος	67
Σχήμα 5.3	Ρύθμιση επιλογών για την εκτέλεση του γενετικού αλγορίθμου	68
Σχήμα 5.4	Βέλτιστες τιμές για 20 γενιές και πληθυσμό	70
Σχήμα 5.5	Βέλτιστες τιμές για 100 γενιές και πληθυσμό	71
Σχήμα 5.6	Βέλτιστες τιμές για 100 γενιές και πληθυσμό, και $p_c=0.87$	71

Σχήμα 5.7	Μονογραμμικό διάγραμμα του ηλεκτρικού δικτύου των 9 ζυγών	73
Σχήμα 5.8	Γραφικές παραστάσεις των συναρτήσεων κόστους των γεννητριών	75
Σχήμα 5.9	Δήλωση δεδομένων του προβλήματος.....	77
Σχήμα 5.10	Βέλτιστες τιμές για το σύστημα των 9 ζυγών (case9)	77
Σχήμα 5.11	Ανά μονάδα μέτρο τάσης των ζυγών (case9).....	79
Σχήμα 5.12	Γωνία τάσης των ζυγών (case9)	79
Σχήμα 5.13	Βέλτιστες τιμές για το σύστημα των 9 ζυγών και εξάρτηση κόστους από Q	80
Σχήμα 5.14	Ανά μονάδα μέτρο τάσης των ζυγών(case9Q)	82
Σχήμα 5.15	Γωνία τάσης των ζυγών(case9Q).....	82
Σχήμα 6.1	Βέλτιστες τιμές για το σύστημα των 9 ζυγών για $h=0$	91
Σχήμα 6.2	Ανά μονάδα μέτρο τάσης των ζυγών για $h=0$	92
Σχήμα 6.3	Γωνία τάσης των ζυγών για $h=0$	93
Σχήμα 6.4	Βέλτιστες τιμές για το σύστημα των 9 ζυγών για $h=0,5$	93
Σχήμα 6.5	Ανά μονάδα μέτρο τάσης των ζυγών για $h=0,5$	95
Σχήμα 6.6	Γωνία τάσης των ζυγών για $h=0,5$	95
Σχήμα 6.7	Κατανομή της παραγόμενης ενεργού ισχύος των γεννητριών και για τις 3 περιπτώσεις	96
Σχήμα 6.8	Μεταβολή κόστους για τις διάφορες τιμές του h	97
Σχήμα 6.9	Μεταβολή εκπομπών για τις διάφορες τιμές του h	97
Σχήμα 6.10	Σύγκριση κόστους μεταξύ Γ.Α και SLP για τις διάφορες τιμές του h	99
Σχήμα 6.11	Σύγκριση κόστους μεταξύ Γ.Α και SLP για τις διάφορες τιμές του h	99
Σχήμα 7.1	Ο βαθμός απόδοσης του συμβατικού συστήματος παροχής ηλεκτρικής ενέργειας	101
Σχήμα 7.2	Η ανάκτηση της απορριπτόμενης ενέργειας	102
Σχήμα 7.3	Εκπομπή χημικών ρύπων ως συνάρτηση του βαθμού απόδοσης	106
Σχήμα 8.1	Σύστημα συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο ανοικτού κύκλου	111
Σχήμα 8.2	Σύστημα συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο κλειστού τύπου.....	113
Σχήμα 8.3	Σύστημα συμπαραγωγής με παλινδρομική μηχανή εσωτερικής καύσης..	114
Σχήμα 8.4	Σύστημα συμπαραγωγής με ατμοστρόβιλο αντίθλιψης	116
Σχήμα 8.5	Σύστημα συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο ανοικτού κύκλου	116
Σχήμα 8.6	Σύστημα συμπαραγωγής με ατμοστρόβιλο απομάστευσης	117

Σχήμα 8.7	Σύστημα συμπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου	118
Σχήμα 8.8	Τυποποιημένη μονάδα συμπαραγωγής Fiat TOTEM 15kW	119
Σχήμα 9.1	Περιοχή εφικτής λειτουργίας μονάδας συμπαραγωγής	123
Σχήμα 9.2	Περιοχή εφικτής λειτουργίας της πρώτης μονάδας συμπαραγωγής.....	127
Σχήμα 9.3	Περιοχή εφικτής λειτουργίας της δεύτερης μονάδας συμπαραγωγής	127
Σχήμα 9.4	Βέλτιστες τιμές της 1 ^{ης} εφαρμογής.....	129
Σχήμα 9.5	Περιοχή εφικτής λειτουργίας της πρώτης μονάδας συμπαραγωγής.....	132
Σχήμα 9.6	Περιοχή εφικτής λειτουργίας της δεύτερης μονάδας συμπαραγωγής	132
Σχήμα 9.7	Περιοχή εφικτής λειτουργίας της τρίτης μονάδας συμπαραγωγής.....	133
Σχήμα 9.8	Βέλτιστες τιμές για $P_D=300$ MW και $H_D=150$ MW	134
Σχήμα 9.9	Βέλτιστες τιμές για $P_D=250$ MW και $H_D=175$ MW	135
Σχήμα 9.10	Βέλτιστες τιμές για $P_D=250$ MW και $H_D=175$ MW	135
Σχήμα 9.11	Σύγκριση κόστους μεταξύ Γ.Α-Η.Σ για τα διάφορα σενάρια ζήτησης ισχύος.....	136
Σχήμα 9.12	Σύγκριση κόστους μεταξύ Γ.Α-fmincon για τις τρεις περιπτώσεις.....	139
Σχήμα 9.13	Ελαχιστοποίηση κόστους λειτουργίας.....	149
Σχήμα 9.14	Ελαχιστοποίηση εκπομπών CO ₂	149
Σχήμα 9.15	Σύγκριση κόστους για τα διάφορα σενάρια περιορισμού του CO ₂	151
Σχήμα 9.16	Χρόνος εκτέλεσης για τις διάφορες περιπτώσεις	151

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 3.1	Αντικειμενικές συναρτήσεις και περιορισμοί της B.P.Φ.....	30
Πίνακας 4.1	Ορολογία στους γενετικούς αλγορίθμους.....	39
Πίνακας 5.1	Δεδομένα γεννητριών	69
Πίνακας 5.2	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των τριών περιπτώσεων	72
Πίνακας 5.3	Δεδομένα των γραμμών μεταφοράς του δικτύου.....	74
Πίνακας 5.4	Βέλτιστες τιμές για το σύστημα των 9 ζυγών(case9).....	78
Πίνακας 5.5	Αναλυτικά αποτελέσματα για το σύστημα των 9 ζυγών(case9).....	78
Πίνακας 5.6	Βέλτιστες τιμές για το σύστημα των 9 ζυγών με εξάρτηση κόστους από Q	81
Πίνακας 5.7	Αναλυτικά αποτελέσματα για το σύστημα των 9 ζυγών και εξάρτηση κόστους από Q.....	81
Πίνακας 6.1	Ονοματολογία για το πρόβλημα B.P.Φ υπό περιβαλλοντικούς περιορισμούς.....	86
Πίνακας 6.2	Συντελεστές συναρτήσεων εκπομπών	90
Πίνακας 6.3	Βέλτιστες τιμές για το σύστημα των 9 ζυγών για $h=0$	91
Πίνακας 6.4	Αναλυτικά αποτελέσματα για το σύστημα των 9 ζυγών για $h=0$	91
Πίνακας 6.5	Βέλτιστες τιμές για το σύστημα των 9 ζυγών για $h=0,5$	94
Πίνακας 6.6	Αναλυτικά αποτελέσματα για το σύστημα των 9 ζυγών για $h=0,5$	94
Πίνακας 6.7	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα και για τις 3 περιπτώσεις.....	96
Πίνακας 6.8	Σύγκριση μεθόδων Γ.Α-S.L.P.....	98
Πίνακας 7.1	Παραδείγματα σύγκρισης εκπομπών μεταξύ συστημάτων συμπαγωγής και συμβατικών τρόπων παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας.(Οι τιμές αναφέρονται σε παραγωγή 100 kWh ηλεκτρικής ενέργειας).....	106
Πίνακας 8.1	Κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά συστημάτων συμπαγωγής	120
Πίνακας 9.1	Δεδομένα συμβατικών μονάδων παραγωγής ισχύος εφαρμογής1	126
Πίνακας 9.2	Δεδομένα μονάδων συμπαγωγής ισχύος.....	126
Πίνακας 9.3	Δεδομένα μονάδων παραγωγής θερμότητας.....	128
Πίνακας 9.4	Αποτελέσματα Εφαρμογής 1.....	130
Πίνακας 9.5	Δεδομένα συμβατικών μονάδων παραγωγής ισχύος εφαρμογής 2	131

Πίνακας 9.6	Δεδομένα μονάδων συμπαραγωγής ισχύος.....	131
Πίνακας 9.7	Δεδομένα μονάδων παραγωγής θερμότητας.....	133
Πίνακας 9.8	Αποτελέσματα Εφαρμογής 2.....	136
Πίνακας 9.9	Συντελεστές εκπομπών γ	137
Πίνακας 9.10	Αποτελέσματα Εφαρμογής 3.....	139
Πίνακας 9.11	Δεδομένα συμβατικών μονάδων παραγωγής ισχύος 7 μονάδων	141
Πίνακας 9.12	Δεδομένα μονάδων συμπαραγωγής ισχύος.....	141
Πίνακας 9.13	Συντεταγμένες ορίων λειτουργίας μονάδων συμπαραγωγής ισχύος	141
Πίνακας 9.14	Δεδομένα μονάδων παραγωγής θερμότητας.....	141
Πίνακας 9.15	Αποτελέσματα 7 μονάδων.....	142
Πίνακας 9.16	Δεδομένα συμβατικών μονάδων παραγωγής ισχύος 14 μονάδων	143
Πίνακας 9.17	Δεδομένα μονάδων συμπαραγωγής ισχύος.....	143
Πίνακας 9.18	Συντεταγμένες ορίων λειτουργίας μονάδων συμπαραγωγής ισχύος	143
Πίνακας 9.19	Δεδομένα μονάδων παραγωγής θερμότητας.....	144
Πίνακας 9.20	Αποτελέσματα 14 μονάδων.....	145
Πίνακας 9.21	Αποτελέσματα Εφαρμογής 5.....	150

Ονοματολογία

B.P.Φ	Βέλτιστη ροή φορτίου
PV	Ζυγός παραγωγής
PQ	Ζυγός φορτίου
Pgi, Qgi	Παραγόμενη ενεργός και άεργος ισχύς της μονάδας i αντίστοιχα
Pi, Qi	Εγγυόμενη ενεργός και άεργος ισχύς του ζυγού i αντίστοιχα
Pdi, Qdi	Ζήτηση ενεργού και άεργου ισχύος στο ζυγό i αντίστοιχα
Pij	Ενεργός φόρτιση της γραμμής μεταφοράς i-j
Ploss	Συνάρτηση απωλειών
Vi, θi	Μέτρο και γωνία τάσης στο ζυγό i αντίστοιχα
F(Pg)	Συνάρτηση κόστους καυσίμου
dF/dP	Διαφορικό κόστος καυσίμου
E(Pg)	Συνάρτηση εκπομπών αέριων ρύπων
Ftot(Pg)	Ολική αντικειμενική συνάρτηση
αi, βi, γi	Συντελεστές της συνάρτησης κόστους καυσίμου της γεννήτριας i
αi, di, ci	Συντελεστές της συνάρτησης κόστους καυσίμου του λέβητα i
x	Διάνυσμα μεταβλητών κατάστασης
u	Διάνυσμα μεταβλητών ελέγχου
g(x,u)	Σύνολο εξισωτικών περιορισμών
h(x,u)	Σύνολο ανισωτικών περιορισμών
λ	Πολλαπλασιαστής Lagrange
L(Pg,λ)	Συνάρτηση Lagrange
Y	Σύνθετος πίνακας αγωγιμοτήτων
Gij	Στοιχείο ij πραγματικού μέρους του σύνθετου πίνακα αγωγιμοτήτων
Bij	Στοιχείο ij φανταστικού μέρους του σύνθετου πίνακα αγωγιμοτήτων
Γ.A	Γενετικός Αλγόριθμος
Σ.Η.Θ	Συμπαράγωγή Θερμότητας Ηλεκτρισμού
Ο.Κ.Φ	Οικονομική Κατανομή Φορτίου
γ	Συντελεστής εκπομπών ρύπων
SLP	Μέθοδος Διαδοχικού Γραμμικού Προγραμματισμού

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με τον όρο “σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας” εννοούμε το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Κύριος στόχος ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι να προμηθεύει την πραγματική και άεργο ισχύ, τις οποίες ζητούν τα διάφορα συνδεδεμένα φορτία στο σύστημα. Η ροή ισχύος ή φορτίου στο δίκτυο για την τροφοδότηση της ζήτησης, αποτελεί την χαρακτηριστική εκδήλωση της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας για ένα σύστημα. Στα δίκτυα διανομής τα οποία λειτουργούν κατά κανόνα ακτινικά η ροή ισχύος είναι καθορισμένη και δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα προβλήματα. Στα διασυνδεδεμένα, όμως, δίκτυα μεταφοράς η κατανομή των ροών ισχύος έχει πολύ μεγάλη τεχνική και οικονομική σημασία.

Η ανάλυση ροών φορτίου συνίσταται στον υπολογισμό των τάσεων κατά μέτρο και γωνία σε όλους τους ζυγούς, καθώς και των ροών ενεργού και άεργου ισχύος σε όλες τις γραμμές ενός ΣΗΕ για ένα δεδομένο σημείο λειτουργίας, το οποίο ορίζεται από τις καταναλώσεις των φορτίων, την παραγωγή ενεργού ισχύος και τις τάσεις των γεννητριών. Οι μελέτες ροών φορτίου είναι πολύ χρήσιμες για διάφορους λόγους, μερικοί από τους οποίους αναφέρονται ενδεικτικά παρακάτω:

- Είναι απαραίτητες για την επιλογή της πλέον οικονομικής λειτουργίας των γεννητριών του συστήματος. Επειδή στη διάρκεια κάθε ημέρας τα φορτία μεταβάλλονται συνεχώς, απαιτείται συχνά ο υπολογισμός εκ νέου της παραγόμενης ισχύος κάθε γεννήτριας, ώστε τα φορτία να τροφοδοτούνται με τον πιο οικονομικό τρόπο.
- Είναι απαραίτητες για τον έλεγχο των τάσεων και ροών, ώστε να διατηρούνται εντός προκαθορισμένων ορίων λειτουργίας.
- Είναι απαραίτητες στη μελέτη των επιπτώσεων ενδεχομένων διαταραχών (π.χ. απώλεια γραμμής, γεννήτριας, κλπ.).
- Είναι απαραίτητες σε μελέτες ανάπτυξης και επέκτασης του συστήματος παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι η ανάλυση ροών φορτίου είναι το σημείο εκκίνησης για όλες τις επιμέρους μελέτες των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

1.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ ΣΗΕ

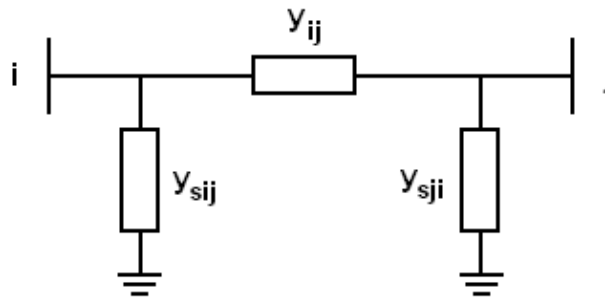
Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιάσουμε τα μοντέλα των στοιχείων ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, όπως αυτά χρησιμοποιούνται σε μελέτες ροών φορτίου. Επειδή η μελέτη ροών φορτίου προϋποθέτει τη συμμετρική κατάσταση του συστήματος, η ανάλυση βασίζεται στα μονοφασικά ισοδύναμα κυκλώματα, οι

παράμετροι των οποίων εκφράζονται σε κοινό ανά μονάδα σύστημα. Τα στοιχεία του συστήματος που θα παρουσιαστούν εδώ είναι τα εξής:

- Γραμμές Μεταφοράς
- Εγκάρσιοι Πυκνωτές και Αυτεπαγωγές
- Μετασχηματιστές
- Γεννήτριες
- Φορτία

1.2.1 Παράσταση Γραμμών Μεταφοράς

Οι γραμμές μεταφοράς παριστάνονται στις μελέτες ροών φορτίου με το ονομαστικό κύκλωμα Π όπως απεικονίζεται στο σχήμα 1.1:



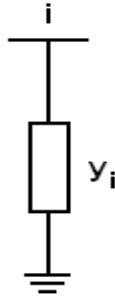
Σχήμα 1.1: Ονομαστικό ισοδύναμο κύκλωμα Π γραμμής μεταφοράς

Στο σχήμα 1.1 η αγωγιμότητα y_{ij} είναι η αγωγιμότητα σειράς της γραμμής, ενώ οι y_{sij} , y_{sji} είναι οι εγκάρσιες αγωγιμότητες. Οι αγωγιμότητες αυτές μπορούν να γραφούν χωρίζοντας πραγματικά και φανταστικά μέρη ως εξής:

$$\begin{aligned} y_{ij} &= g_{ij} + jb_{ij} \\ y_{sij} &= g_{sij} + jb_{sij} \\ y_{sji} &= g_{sji} + jb_{sji} \end{aligned} \quad (1.1)$$

1.2.2 Παράσταση Εγκάρσιων Πυκνωτών και Αυτεπαγωγών

Οι εγκάρσιοι πυκνωτές και αυτεπαγωγές παριστάνονται με μια απλή αγωγιμότητα y_i όπως στο σχήμα 1.2:



Σχήμα 1.2 Παράσταση εγκάρσιου στοιχείου

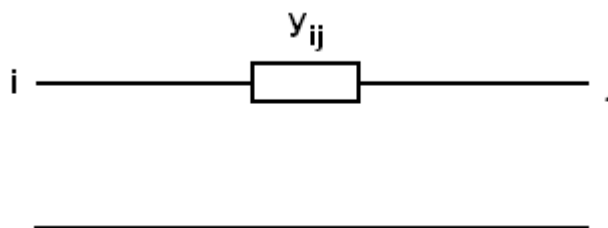
Η αγωγιμότητα y_i είναι της μορφής:

$$y_i = jb_i, \quad (1.2)$$

όπου η παράμετρος b_i είναι θετική για πυκνωτή και αρνητική για αυτεπαγωγή.

1.2.3 Παράσταση Μετασχηματιστών

Οι μετασχηματιστές παριστάνονται τις περισσότερες φορές στις μελέτες ροών φορτίου με το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα χωρίς την αγωγιμότητα μαγνητίσεως. Οπότε, ο μετασχηματιστής παριστάνεται με μια αγωγιμότητα σειράς, όπως στο σχήμα 1.3:



Σχήμα 1.3 Παράσταση M/Σ σε ονομαστική σχέση μετασχηματισμού

Το σχήμα 1.3 αναφέρεται σε ένα μετασχηματιστή με ονομαστική σχέση μετασχηματισμού, δηλαδή τέτοια που να αντιστοιχεί στο λόγο των βασικών τάσεων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχουν επίσης

μετασχηματιστές ρύθμισης, η σχέση μετασχηματισμού των οποίων διαφέρει από το λόγο των ονομαστικών τάσεων. Στους μετασχηματιστές αυτούς πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η σχέση μετασχηματισμού ανάγοντας τις ανά μονάδα αντιστάσεις στο ένα από τα δύο τυλίγματα του.

1.2.4 Παράσταση Γεννητριών

Οι γεννήτριες παριστάνονται σαν πηγές ενεργού και άεργου ισχύος:

$$S_G = P_G + jQ_G \quad (1.3)$$

όπου:

S_G είναι η μιγαδική παραγόμενη ισχύς,

P_G η παραγόμενη ενεργός ισχύς και

Q_G η παραγόμενη άεργος ισχύς.

Οι σύγχρονες γεννήτριες ρυθμίζονται συνεχώς από δύο διατάξεις ελέγχου:

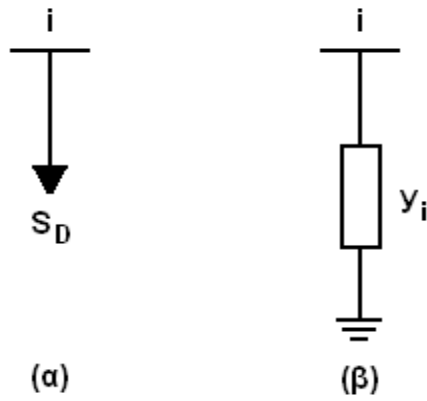
- i) τον αυτόματο ρυθμιστή τάσεως (APT), ο οποίος διατηρεί σταθερό το μέτρο της τερματικής τάσης της γεννήτριας ρυθμίζοντας κατάλληλα το ρεύμα διεγέρσεως και
- ii) τον ρυθμιστή στροφών, οποίος κρατάει σταθερή την ενεργό παραγωγή προσαρμόζοντας την παραγόμενη μηχανική ισχύ της κινητήριας μηχανής.

Έτσι, στις μελέτες ροής φορτίου οι σύγχρονες γεννήτριες παριστάνονται συνήθως με σταθερή κατά μέτρο τερματική τάση και σταθερή παραγωγή πραγματικής ισχύος.

1.2.5 Παράσταση Φορτίων

Τα φορτία που συμπεριλαμβάνονται στις συνηθισμένες μελέτες ροών φορτίου ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες:

- Φορτία σταθερής ενεργού και άεργου ισχύος (σχήμα 1.4α)
- Φορτία σταθερής σύνθετης αγωγιμότητας (σχήμα 1.4β)



Σχήμα 1.4 Παράσταση φορτίων

Όσον αφορά το φορτίο σταθερής ισχύος η μιγαδική ισχύς που απορροφά είναι:

$$S_D = P_D + jQ_D \quad (1.4)$$

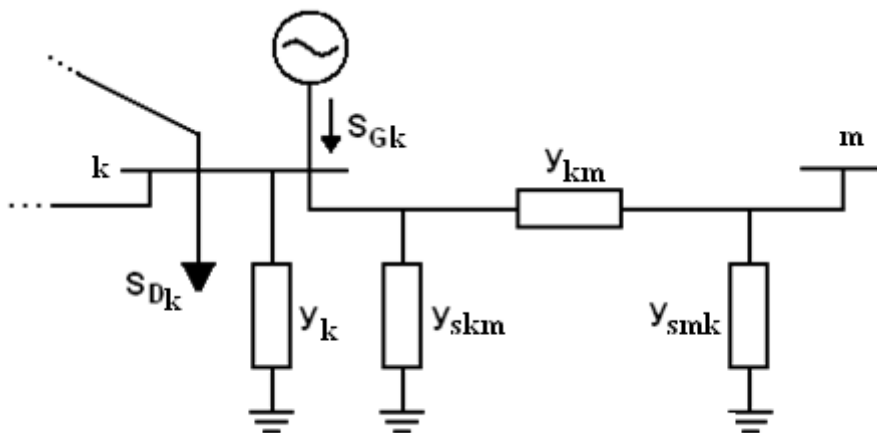
όπου P_D είναι η ενεργός ισχύς και Q_D είναι η άεργος ισχύς.

Ενώ, το φορτίο σταθερής αγωγιμότητας γράφεται με την εξής μορφή:

$$y_i = g_i + jb_i \quad (1.5)$$

1.3 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ

Οι εξισώσεις ροών φορτίου μπορούν να καταστρωθούν με τη βοήθεια του σχήματος 1.5 που απεικονίζει ένα γενικευμένο ζυγό συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 1.5 Γενικευμένος ζυγός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Η γραμμή μεταξύ των ζυγών k και m παριστάνεται με το ονομαστικό κύκλωμα Π . Γενικά μπορεί να είναι συνδεδεμένες στο ζυγό k μία ή περισσότερες γραμμές ή και μετασχηματιστές. Στο ζυγό k είναι επίσης συνδεδεμένη μια εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα y_k , που παριστάνει οποιοδήποτε συνδυασμό πυκνωτών, αυτεπαγωγών ή φορτίων με σταθερή αγωγιμότητα. Η γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό k εγχέει ρεύμα I_{Gk} , ενώ το αντίστοιχο φορτίο S_{Dk} απορροφά ρεύμα I_{Dk} . Η τάση στο ζυγό k συμβολίζεται με V_k , ενώ η τάση στο ζυγό m με V_m .

Το ρεύμα I_{km} που ρέει στη γραμμή από το ζυγό k στο ζυγό m ισούται με:

$$I_{km} = (y_{skm} + y_{kn}) \cdot V_k - y_{km} \cdot V_m \quad (1.6)$$

Το ρεύμα που απορροφάται από την εγκάρσια αγωγιμότητα y_k ισούται με $y_k \cdot V_k$.

Εφαρμόζοντας το νόμο ρευμάτων Kirchoff στο ζυγό k προκύπτει:

$$I_k = I_{Gk} - I_{Dk} = y_k \cdot V_k + \sum_{m \in A(k)} I_{km}, \quad (1.7)$$

όπου $A(k)$ είναι το σύνολο που περιέχει τους αριθμούς των ζυγών που είναι διασυνδεδεμένοι με τον ζυγό k .

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (1.6) στην (1.7) προκύπτει:

$$I_k = \left[y_k + \sum_{m \in A(k)} (y_{skm} + y_{kn}) \right] \cdot V_k - \sum_{m \in A(k)} y_{km} \cdot V_m \quad (1.8)$$

Ορίζοντας τις παραμέτρους:

$$Y_{kk} = y_k + \sum_{m \in A(k)} (y_{skm} + y_{kn}) \quad (1.9)$$

$$Y_{km} = -y_{km} \quad (1.10)$$

η εξίσωση (1.8) γράφεται ως εξής:

$$I_k = Y_{kk} \cdot V_k + \sum_{m \in A(k)} Y_{km} \cdot V_m \quad (1.11)$$

Το σύστημα των εξισώσεων ρευμάτων-τάσεων (1.11) γράφεται σε μητρική μορφή:

$$[\bar{I}] = [Y] \cdot [\bar{V}] \quad (1.12)$$

όπου:

$[\bar{I}]$, $[\bar{V}]$ τα διανύσματα ρευμάτων και τάσεων όλων των ζυγών n , διαστάσεως $n \times 1$,

$[Y]$ η μήτρα σύνθετων αγωγιμοτήτων ζυγών του συστήματος, διαστάσεως $n \times n$.

Έτσι, τα στοιχεία Y_{kk} και Y_{km} της εξίσωσης (1.11) αποτελούν τα διαγώνια και μη διαγώνια στοιχεία τις μήτρας σύνθετων αγωγιμοτήτων, αντίστοιχα.

Στις μελέτες ροής φορτίου, οι γνωστές ή ζητούμενες ποσότητες σε κάθε ζυγό είναι οι μιγαδικές ισχύεις παραγωγής S_{Gk} και φορτίσεων S_{Dk} . Οι μιγαδικές αυτές ισχύεις δίνονται στο ανά μονάδα σύστημα από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} S_{Gk} &= V_k \cdot I_{Gk}^* \\ S_{Dk} &= V_k \cdot I_{Dk}^* \end{aligned} \quad (1.13)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (1.11) και (1.13) παίρνουμε:

$$S_k = S_{Gk} - S_{Dk} = Y_{kk}^* \cdot V_k^2 + V_k \cdot \sum_{m \in A(k)} Y_{km}^* \cdot V_m^* \quad (1.14)$$

Η εξίσωση (1.14) εκφράζει το ισοζύγιο ισχύος στον ζυγό k . Για ένα σύστημα n ζυγών, μπορούν να γραφούν n εξισώσεις του τύπου (1.14). Οι n αυτές εξισώσεις αποτελούν τις μιγαδικές εξισώσεις ροής φορτίου.

Εν συνεχεία, χρησιμοποιούμε τον συμβολισμό:

$$\begin{aligned} \bar{V}_k &= V_k \cdot e^{j\delta_k} \\ Y_{km} &= G_{km} + jB_{km} \end{aligned} \quad (1.15)$$

Αντικαθιστώντας τις αγωγιμότητες και τις τάσεις από την (1.15) στην εξίσωση (1.14) και ξεχωρίζοντας πραγματικά και φανταστικά μέρη, παίρνουμε τις εξισώσεις ροής φορτίου σε πραγματική μορφή:

$$P_k = P_{Gk} - P_{Dk} = V_k^2 \cdot G_{kk} + V_k \cdot \sum_{m \in A(k)} V_m \cdot [G_{km} \cdot \cos(\delta_k - \delta_m) + G_{km} \cdot \sin(\delta_k - \delta_m)] \quad (1.16)$$

$$Q_k = Q_{Gk} - Q_{Dk} = -V_k^2 \cdot B_{kk} + V_k \cdot \sum_{m \in A(k)} V_m \cdot [G_{km} \cdot \sin(\delta_k - \delta_m) - B_{km} \cdot \cos(\delta_k - \delta_m)] \quad (1.17)$$

Για ένα σύστημα n ζυγών υπάρχουν n εξισώσεις ενεργού και άεργου ισχύος της μορφής (1.16) και (1.17) αντίστοιχα. Οι $2n$ αυτές εξισώσεις αποτελούν τις εξισώσεις ροής φορτίου με πραγματικές μεταβλητές. Ας σημειωθεί ότι η μορφή (1.16) - (1.17) δεν είναι η μοναδική, αφού αντί για την πολική μορφή των τάσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί η καρτεσιανή, και αντιστρόφως, αντί για την καρτεσιανή μορφή των αγωγιμοτήτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί η πολική.

1.4 ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ

Θεωρώντας τη γενική περίπτωση ενός ζυγού του συστήματος, με παραγωγή και φορτίο που εκφράζονται ως ισχύεις, διακρίνουμε τα ακόλουθα 6 μεγέθη:

- P_G : παραγόμενη ενεργός ισχύς
- Q_G : παραγόμενη άεργος ισχύς
- P_D : ενεργός ισχύς φορτίου
- Q_D : άεργος ισχύς φορτίου
- V : μέτρο τάσης του ζυγού
- δ : φασική γωνία τάσης του ζυγού

Τα ηλεκτρικά αυτά μεγέθη αποτελούν τις μεταβλητές του προβλήματος και είναι 6 ανά ζυγό. Σε ένα σύστημα με n ζυγούς υπάρχουν συνολικά $6n$ μεταβλητές, οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις ομάδες.

Τα φορτία, ή μεταβλητές ζήτησης (P_D, Q_D) χαρακτηρίζονται και σαν μεταβλητές διαταραχής και μπορούν να αποτελέσουν τα στοιχεία ενός διανύσματος διάστασης $2n$. Είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος.

Οι ισχύεις παραγωγής (P_G, Q_G) χαρακτηρίζονται σαν μεταβλητές ελέγχου και μπορούν επίσης να θεωρηθούν σαν στοιχεία ενός άλλου διανύσματος $2n$. Ονομάζονται έτσι γιατί οι μονάδες παραγωγής αποτελούν τα κύρια μέσα ελέγχου της λειτουργίας του συστήματος.

Οι τάσεις και οι γωνίες των ζυγών ανήκουν στις μεταβλητές κατάστασης και είναι εξαρτημένες. Οπότε μπορούν να αποτελέσουν τα στοιχεία ενός διανύσματος κατάστασης, διάστασης $2n$.

Η εγχυόμενη ενεργός και άεργος ισχύς σε ένα ζυγό k ορίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} P_i &= P_{Gi} - P_{Di} \\ Q_i &= Q_{Gi} - Q_{Di} \end{aligned} \tag{1.18}$$

και έχει χαρακτήρα παραγωγής όταν εισέρχεται στο δίκτυο ή χαρακτήρα φορτίου όταν εξέρχεται από αυτό.

Οι ζυγοί ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες:

- Ζυγός Φορτίου (PQ), στον οποίο θεωρούνται γνωστές η ενεργός και άεργος ισχύς φορτίου και κατά συνέπεια οι εγχύσεις ενεργού και άεργου ισχύος ($P_i = -P_{Di}$, $Q_i = -Q_{Di}$). Ενώ, άγνωστα θεωρούνται το μέτρο και η γωνία τάσης του ζυγού.

- Ζυγός παραγωγής (PV), στον οποίο είναι γνωστά η παραγόμενη ενεργός ισχύς και το μέτρο της τάσης και άγνωστα η παραγόμενη άεργος ισχύς και η γωνία της τάσης.
- Ζυγός Ταλάντωσης ή Ζυγός Αναφοράς (slack bus), ο οποίος είναι ζυγός παραγωγής που χρησιμοποιείται για να αντισταθμίζει τις άγνωστες εξ αρχής απώλειες του δικτύου και γενικά για άμεση αντιμετώπιση των μεταβολών ισχύος. Στον ζυγό αυτό επιβάλλεται σταθερή τάση κατά μέτρο και γωνία, ενώ προσδιορίζονται η ενεργός και άεργος παραγόμενη ισχύς. Συνήθως, ορίζουμε για το ζυγό ταλάντωσης γωνία τάσης $\delta=0$.

Γενικά, το πρόβλημα προσδιορισμού των ροών φορτίου για ένα σύστημα με n ζυγούς ανάγεται στην επίλυση n μιγαδικών εξισώσεων (1.14) με n αγνώστους. Οι εξισώσεις αυτές συνδέουν ισχύεις, τάσεις και γωνίες, δηλαδή τις τρεις χαρακτηριστικές μεταβλητές του προβλήματος. Τα ρεύματα δεν μας ενδιαφέρουν ποτέ απευθείας και υπολογίζονται εύκολα μετά την εύρεση των τάσεων και των γωνιών. Ωστόσο, το πρόβλημα αυτό παρουσιάζει τις εξής ιδιαιτερότητες:

α) Οι εξισώσεις είναι μιγαδικές: Δεδομένου ότι οι περισσότεροι ηλεκτρονικοί υπολογιστές έχουν τη δυνατότητα επεξεργασίας μιγαδικών αριθμών, η μιγαδική φύση των εξισώσεων ροής φορτίου δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη δυσκολία. Αν δεν υπάρχει αυτή η δυνατότητα, θα πρέπει οι μιγαδικές εξισώσεις (1.14) να μετατραπούν σε πραγματικές εξισώσεις (1.16) – (1.17). Η διαδικασία αυτή ωστόσο διπλασιάζει τον αριθμό των προς επίλυση εξισώσεων σε $2n$.

β) Οι εξισώσεις είναι μη γραμμικές: Ο μη γραμμικός χαρακτήρας των εξισώσεων ροής φορτίου δυσχεραίνει κάπως την αναλυτική επίλυση του προβλήματος. Ωστόσο, με τη βοήθεια ισχυρών ψηφιακών υπολογιστών μπορούμε να επιλύσουμε το πρόβλημα αριθμητικά με επαναληπτικούς αλγορίθμους.

1.5 ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

Είναι ήδη εμφανές ότι ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με ορισμένα φορτία στους ζυγούς του μπορεί να λειτουργήσει με πολλούς τρόπους, ή “καταστάσεις” και να ικανοποιεί τις ζητήσεις. Κύρια επιδίωξη της μελέτης ροών φορτίου αποτελεί η εύρεση της καταλληλότερης - βέλτιστης λύσης, βάσει ορισμένων κριτηρίων και υπό ορισμένους περιορισμούς, που πρέπει να τηρηθούν σε κάθε περίπτωση.

Κατά κανόνα, είναι γνωστή η ζήτηση φορτίου των ζυγών, δηλαδή οι $2n$ μεταβλητές διαταραχής, που αποτελούν τα βασικά δεδομένα του προβλήματος. Στη συνέχεια, ορίζονται $2n$ μεταβλητές από τις ισχύεις και τις τάσεις των ζυγών παραγωγής, οπότε και προσδιορίζονται από την επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου (1.16) – (1.17) οι υπόλοιπες $2n$ άγνωστες μεταβλητές. Η προδιαγραφή των $2n$ μεταβλητών από τις ισχύεις και τις τάσεις των ζυγών παραγωγής διευκολύνεται από τις ακόλουθες συνθήκες και περιορισμούς λειτουργίας του συστήματος.

α) Η οικονομική λειτουργία των μονάδων παραγωγής επιβάλλει ορισμένες τιμές της παραγόμενης ενεργού ισχύος κάθε μονάδας σε κάθε περίπτωση.

β) Για τους ζυγούς φορτίου δεν υπάρχει παραγωγή, δηλαδή $P_G = 0$. Η Q_G είναι είτε μηδενική, είτε έχει ορισμένη τιμή αν προέρχεται από χωρητική αντιστάθμιση.

γ) Τα επίπεδα τάσης ορισμένων ζυγών έχουν στενά όρια τιμών.

δ) Οι διασυνδέσεις με γειτονικά συστήματα επιβάλλουν ορισμένες υποχρεώσεις ανταλλαγών. Από τις τάσεις ζυγών, προδιαγράφονται οι πιο σημαντικές και αφήνονται στις “άγνωστες” οι λιγότερο περιορισμένες. Γενικά, οι περισσότερες από τις $2n$ άγνωστες μεταβλητές είναι οι γωνίες δ , οι οποίες προσδιορίζονται από την επίλυση των εξισώσεων. Τελικά, οι λύσεις που θα προκύψουν πρέπει να ικανοποιούν όρια και περιορισμούς, όπως οι εξής:

1. οι τάσεις των ζυγών: $V_{k,\min} \leq V_k \leq V_{k,\max}$ (1.19)

2. οι γωνιακές διαφορές ορισμένων ζυγών: $|\delta_k - \delta_m| \leq |\delta_k - \delta_m|_{\max}$ (1.20)

3. οι ισχύεις παραγωγής: $P_{Gk,\min} \leq P_{Gk} \leq P_{Gk,\max}$ (1.21)

και $Q_{Gk,\min} \leq Q_{Gk} \leq Q_{Gk,\max}$ (1.22)

4. οι γραμμές μεταφοράς έχουν όρια ευστάθειας και όρια απωλειών ισχύος.

Επιπλέον των ανωτέρω, πρέπει να ληφθούν υπόψη ενδεχόμενες ειδικές συνθήκες σε κάθε περίπτωση. Εάν, η λύση οδηγήσει τελικά σε τιμές μεταβλητών εκτός ορίων, η επίλυση επαναλαμβάνεται προς την κατεύθυνση βελτίωσης των τιμών των αγνώστων μεταβλητών.

1.6 ΨΗΦΙΑΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ

Παλαιότερα για τη μελέτη των ροών φορτίου χρησιμοποιούνταν ομοιώματα δικτύου EP, δηλαδή ειδικοί αναλογικοί υπολογιστές, στους οποίους τα διάφορα τμήματα του συστήματος εξομοιώνονταν αναλογικά με αντίστοιχα ηλεκτρικά στοιχεία σε μικρογραφία. Ωστόσο, από το 1984 οι μελέτες των δικτύων αυτού του είδους γίνονται κυρίως με ψηφιακούς υπολογιστές.

Οι ψηφιακές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς των ροών φορτίου μπορούν να επιλύσουν με ικανοποιητική ακρίβεια τις μη γραμμικές αλγεβρικές εξισώσεις των ροών φορτίου για μεγάλα συστήματα με εκατοντάδες ζυγούς και απώλειες. Οι τρεις βασικές επαναληπτικές μέθοδοι που εφαρμόζονται στις μελέτες ροών φορτίου είναι η μέθοδος Gauss-Seidel, η μέθοδος Newton-Raphson και η ταχεία αποζευγμένη μέθοδος.

Και οι τρεις αυτές μέθοδοι ξεκινούν από μια αρχική λύση και με διαδοχικές ανακυκλώσεις προσεγγίζουν την τελική με τον ακόλουθο τρόπο: Η αρχική λύση χρησιμοποιείται στις εξισώσεις του προβλήματος για να βρεθεί μια καινούρια καλύτερη λύση. Εν συνεχεία, η δεύτερη λύση χρησιμοποιείται για να βρεθεί μια τρίτη ακόμα καλύτερη κ.ο.κ. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται συνεχώς έως ότου η λύση συγκλίνει. Μια τέτοια συγκλίνουσα διαδικασία ονομάζεται μέθοδος ανακυκλώσεως και η ποιότητά της κρίνεται από την ταχύτητα σύγκλισής της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πρόβλημα της οικονομικής κατανομή φορτίου αναφέρεται στη βελτιστοποίηση της κατανομής του συνολικού φορτίου του συστήματος ανάμεσα στις μονάδες παραγωγής. Η παραγωγή (ενεργός και άεργος) των γεννητριών του συστήματος καθορίζεται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται το ελάχιστο συνολικό κόστος λειτουργίας λαμβάνοντας υπόψη τους τεχνικούς περιορισμούς του συστήματος.

Στην ελαχιστοποίηση του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας σημαντικό ρόλο παίζουν οι εξής παράγοντες:

- Η λειτουργική απόδοση των μονάδων
- Το κόστος καυσίμου και
- Οι απώλειες του δικτύου μεταφοράς

Η ανάλυση που ακολουθεί για την οικονομική κατανομή φορτίου βασίστηκε στις αναφορές [2], [3] και [7].

2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΚΑΙ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

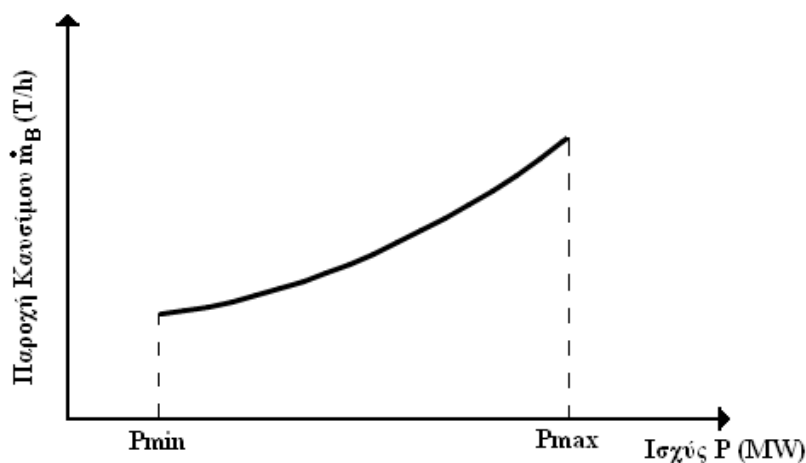
Στην ανάλυση της οικονομικής λειτουργίας των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται ορισμένα χαρακτηριστικά μεγέθη, τα οποία περιγράφονται πιο κατανοητά μέσω κάποιων χαρακτηριστικών καμπυλών εισόδου – εξόδου. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι:

- Η **καμπύλη ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου**, που εκφράζει την παροχή καυσίμου, π.χ. σε (T/h) ή σε (m^3/h) αν πρόκειται για ντίζελ ή φυσικό αέριο αντίστοιχα, ως συνάρτηση της καθαρής ισχύος εξόδου της μονάδας σε MW (Σχήμα 2.1.α).
- Η **καμπύλη διαφορικής κατανάλωσης καυσίμου**, που προκύπτει από την παράγωγο (κλίση) της ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου. Εκφράζει την αύξηση στην παροχή του καυσίμου σε kg/h που απαιτείται για την αύξηση της καθαρής ισχύος εξόδου της μονάδας κατά 1kW (Σχήμα 2.1.β).
- Η **καμπύλη ειδικής κατανάλωσης καυσίμου** (kg/kWh), που εκφράζει το λόγο της ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου προς την καθαρή έξοδο της μονάδας συναρτήσει της παραγόμενης ισχύος εξόδου (Σχήμα 2.1.γ).
- Η **καμπύλη ωριαίας κόστους λειτουργίας**, που εκφράζει το ωριαίο κόστος λειτουργίας σε (€/h) συναρτήσει της ισχύος εξόδου σε (MW) (Σχήμα 2.2.α). Προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου με την τιμή του καυσίμου σε (€/T). Στις οικονομικές μελέτες εκφράζεται

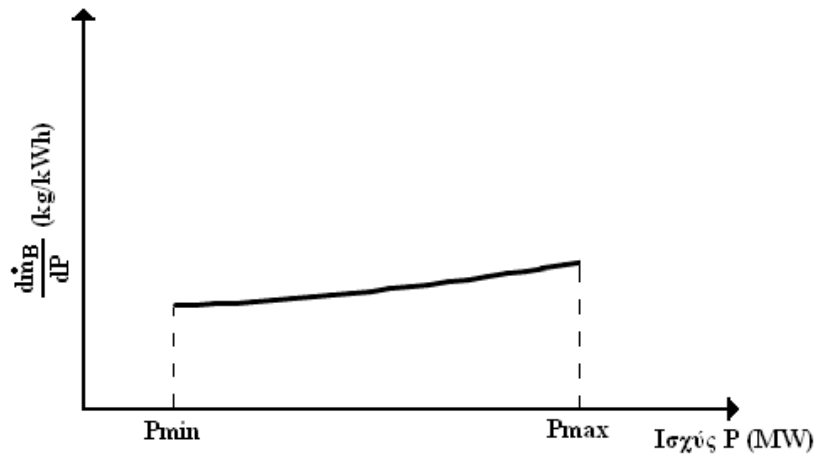
συνήθως ως πολυωνυμική ή τμηματικά γραμμική κυρτή καμπύλη στο διάστημα P_{\min}, P_{\max} .

- Η **καμπύλη διαφορικού κόστους λειτουργίας**, που προκύπτει από την παράγωγο (κλίση) του ωριαίου κόστους λειτουργίας συναρτήσει της ισχύος εξόδου της μονάδας. Εκφράζει την αύξηση του ωριαίου κόστους λειτουργίας σε (€/h), που απαιτείται για την αύξηση της καθαρής ισχύος εξόδου της μονάδας κατά 1kW. Ουσιαστικά, εκφράζει την αύξηση στο κόστος παραγωγής σε (€) που προέρχεται από την παραγωγή μιας πρόσθετης kWh από τη μονάδα. Συνήθως, εκφράζεται ως αύξουσα πολυωνυμική, τμηματικά γραμμική ή βαθμωτή συνάρτηση της ισχύος εξόδου στις οικονομικές μελέτες του συστήματος (Σχήμα 2.2.β).
- Η **καμπύλη ειδικού κόστους λειτουργίας**, που είναι ο λόγος του ωριαίου κόστους λειτουργίας σε (€/h) προς την ισχύ εξόδου σε (MW). Δηλαδή, εκφράζει την τιμή παραγωγής της kWh σε (€/kWh) από τη μονάδα (Σχήμα 2.2.γ).

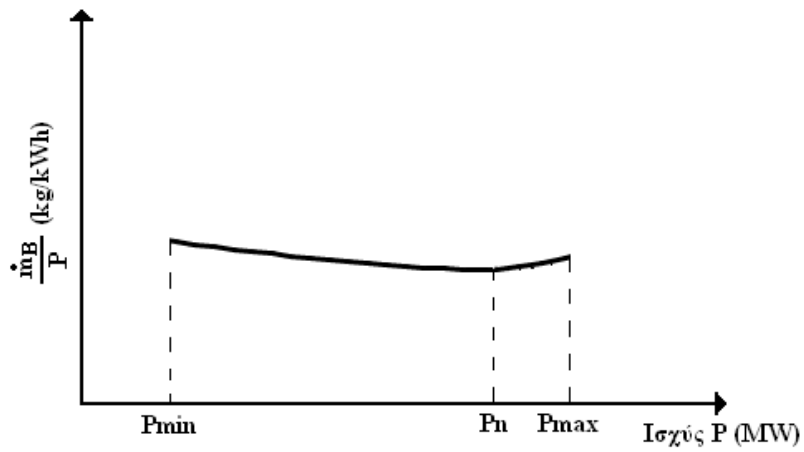
Οι μονάδες παραγωγής σε χαμηλά φορτία λειτουργούν αντιοικονομικά, δηλαδή έχουν μεγάλο ειδικό κόστος. Αντιθέτως, λειτουργούν οικονομικά κοντά στην ονομαστική τους ισχύ, δηλαδή έχουν μικρό ειδικό κόστος.



α) Ωριαία Κατανάλωση Καυσίμου

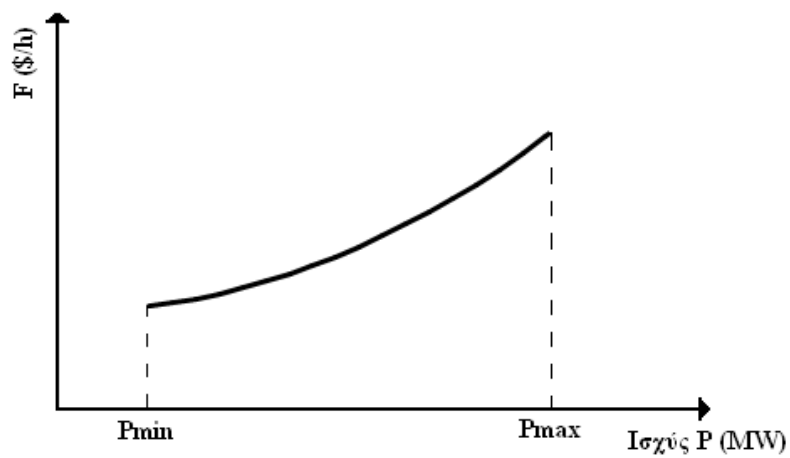


β) Διαφορική Κατανάλωση Καυσίμου

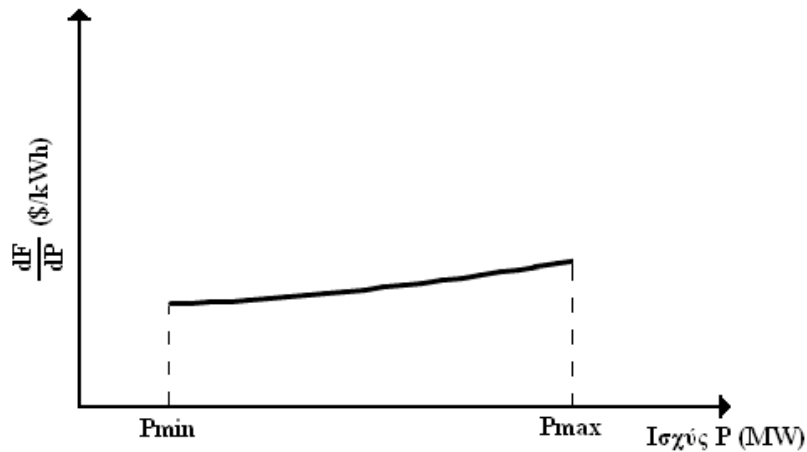


γ) Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου

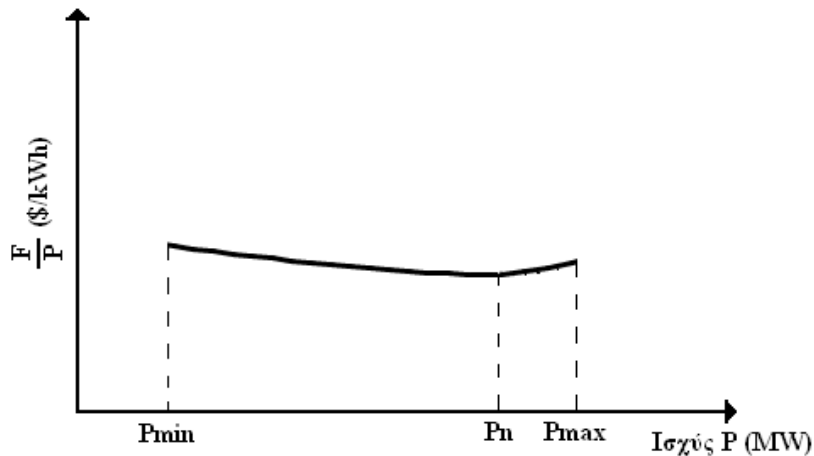
Σχήμα 2.1 Χαρακτηριστικές Καμπύλες Κατανάλωσης Καυσίμου



α) Ωριαίο Κόστος Λειτουργίας



β) Διαφορικό Κόστος Λειτουργίας



γ) Ειδικό Κόστος Λειτουργίας

Σχήμα 2.2 Χαρακτηριστικές Καμπύλες Κόστους Λειτουργίας

2.3 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΧΩΡΙΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Αγνοώντας τα όρια λειτουργίας των μονάδων παραγωγής και τις απώλειες του συστήματος μεταφοράς, η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος έχει ως εξής:

$$\text{Min } F_T(P_1, P_2, \dots, P_n) = F_1(P_1) + F_2(P_2) + \dots + F_n(P_n) = \sum_{i=1}^n F_i(P_i) \quad (2.1)$$

$$\text{Μ.Π. } \Phi(P_1, P_2, \dots, P_n) = P_D - \sum_{i=1}^n P_i = 0 \quad (2.2)$$

όπου τα F_1, \dots, F_n είναι οι συναρτήσεις που εκφράζουν το ωριαίο κόστος λειτουργίας των μονάδων.

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης με εξισωτικό περιορισμό που περιγράφεται από τις σχέσεις (2.1) και (2.2) μπορεί να επιλυθεί σχηματίζοντας τη συνάρτηση LaGrange. Η συνάρτηση LaGrange σχηματίζεται αν προστεθεί στην αντικειμενική συνάρτηση F_T , ο εξισωτικός περιορισμός Φ , αφού πρώτα πολλαπλασιασθεί με τον πολλαπλασιαστή LaGrange λ :

$$L(P_1, \dots, P_n, \lambda) = F_T(P_1, \dots, P_n) + \lambda \cdot \Phi(P_1, \dots, P_n) \quad (2.3)$$

Οι απαραίτητες συνθήκες βέλτιστου για τη συνάρτηση LaGrange είναι ο μηδενισμός των μερικών παραγώγων ως προς τις $n+1$ ανεξάρτητες μεταβλητές P_1, \dots, P_n, λ . Η μερική παράγωγος ως προς τον πολλαπλασιαστή λ δίνει τον εξισωτικό περιορισμό (2.2).

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = \Phi(P_i) = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n P_i = P_D \quad i = 1, \dots, n.$$

Οι μερικές παράγωγοι ως προς τις ισχύεις εξόδου των μονάδων δίνουν:

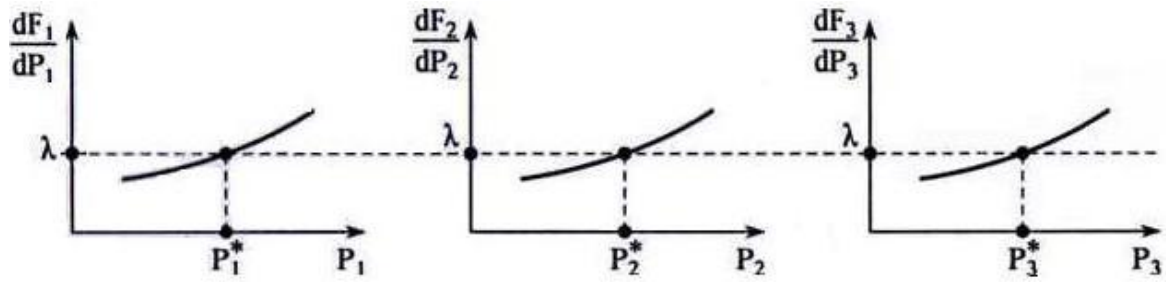
$$\frac{\partial L}{\partial P_i} = \frac{dF_i(P_i)}{dP_i} - \lambda = 0 \Rightarrow \frac{dF_i}{dP_i} = \lambda \quad i = 1, \dots, n \quad (2.4)$$

Διαπιστώνουμε ότι η απαραίτητη συνθήκη για την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους λειτουργίας είναι η εξής: Όλες οι θερμικές μονάδες του συστήματος πρέπει να λειτουργούν με το ίδιο διαφορικό κόστος λειτουργίας (€/kWh), ίσο με τον πολλαπλασιαστή LaGrange, λ .

Οι εξισώσεις (2.4), που ονομάζονται εξισώσεις συνεργασίας, μαζί με την εξίσωση διατήρησης ισχύος (2.2) χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος οικονομικής κατανομής φορτίου.

2.3.1 Γραφική Επίλυση των Εξισώσεων Συνεργασίας

Στη γενική περίπτωση, που το διαφορικό κόστος λειτουργίας των μονάδων δεν είναι γραμμική συνάρτηση της εξόδου, μπορεί να γίνει γραφική επίλυση των εξισώσεων συνεργασίας (2.4), όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3 Σχηματική επίλυση των εξισώσεων συνεργασίας

Για τα διαγράμματα του διαφορικού κόστους λειτουργίας όλων των μονάδων επιλέγεται αρχικά μια τυχαία τιμή για το κοινό διαφορικό κόστος λειτουργίας όλων των μονάδων, λ . Από την τομή των καμπυλών διαφορικού κόστους λειτουργίας με την οριζόντια γραμμή που διέρχεται από την τιμή λ υπολογίζονται οι έξοδοι των μονάδων P_1, \dots, P_n .

Σε περίπτωση που οι έξοδοι των μονάδων ικανοποιούν την εξίσωση διατήρησης ισχύος μέσα στα πλαίσια κάποιας ανοχής ε , δηλαδή αν ισχύει $\left| P_D - \sum_{i=1}^n P_i \right| < \varepsilon$, τότε έχει λυθεί το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου διότι:

- όλες οι μονάδες λειτουργούν με το ίδιο διαφορικό κόστος και
- ικανοποιείται ο περιορισμός διατήρησης ισχύος στο δίκτυο.

Αντίθετα, αν ισχύει $\left| P_D - \sum_{i=1}^n P_i \right| > \varepsilon$, τότε διακρίνονται δύο περιπτώσεις:

α) $\sum_{i=1}^n P_i > P_D$. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να μειωθεί η παραγωγή για να ικανοποιηθεί η εξίσωση διατήρησης ισχύος. Επιλέγεται ένα νέο λ μικρότερο από το αρχικό.

β) $\sum_{i=1}^n P_i < P_D$. Εδώ, πρέπει να αυξηθεί η παραγωγή για να ικανοποιηθεί η εξίσωση διατήρησης ισχύος. Επιλέγεται ένα νέο λ μεγαλύτερο από το αρχικό.

Έτσι, μετά από ορισμένες επαναλήψεις, επιτυγχάνεται η γραφική επίλυση των εξισώσεων συνεργασίας.

2.4 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΟΡΙΑ

Μια πιο ρεαλιστική αντιμετώπιση της οικονομικής κατανομής φορτίου λαμβάνει υπόψη και τα όρια λειτουργίας των μονάδων του συστήματος. Στην περίπτωση αυτή, η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος είναι:

$$\text{Min } F_T(P_1, P_2, \dots, P_n) = F_1(P_1) + F_2(P_2) + \dots + F_n(P_n) = \sum_{i=1}^n F_i(P_i) \quad (2.5)$$

$$\text{Μ.Π.: } \Phi = P_D - \sum_{i=1}^n P_i = 0 \quad (2.6)$$

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \quad i = 1, \dots, n \quad (2.7)$$

Όπως βλέπουμε από τα παραπάνω έχουμε έναν περιορισμό ισότητας (2.6) και 2n περιορισμούς ανισότητας. Οι βασικοί αυτοί περιορισμοί των μονάδων αναλύονται παρακάτω [3]:

Περιορισμοί φορτίσεως κάθε γεννήτριας

Περιορισμοί φορτίσεως των μονάδων παραγωγής επιβάλλονται από διάφορους λόγους και κυρίως από θερμικά όρια και δυνατότητες λεβήτων. Άλλες αιτίες μπορεί να είναι ο χρόνος εκκινήσεως μιας μονάδας και ο ρυθμός απολήψεως φορτίου κατά την εκκίνηση. Το ποσό της ισχύος η οποία μπορεί να μεταφερθεί από τη γεννήτρια στο σύστημα μπορεί επίσης να περιορίζεται από λόγους ευστάθειας. Από απόψεως υπερθερμάνσεως υπάρχουν όρια φορτίσεως και για την πραγματική και για την άεργο ισχύ μιας γεννήτριας.

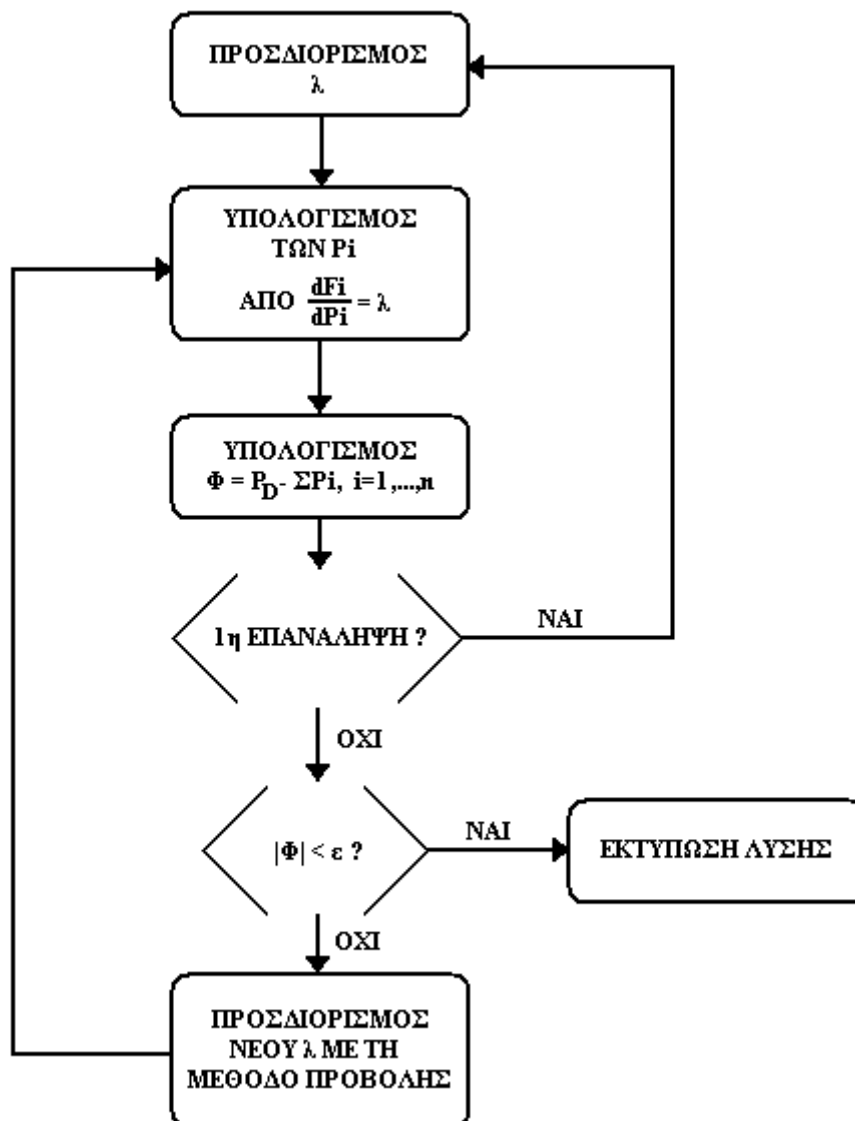
Απαιτήσεις εφεδρείας συστήματος

Για την αντιμετώπιση έκτακτων καταστάσεων ανάγκης, διακοπών και βλαβών των γραμμών, μηχανών κ.λ.π., επιβάλλεται η ύπαρξη εφεδρείας παραγωγής κατά τη λειτουργία του συστήματος. Για τον λόγο αυτόν απαιτείται πάντοτε η διάθεση ορισμένων μονάδων ως στρεφόμενης εφεδρείας. Το μέγεθος της στρεφόμενης εφεδρείας εξαρτάται από τη διάταξη του συστήματος, το πλήθος και την ηλικία των μονάδων, τις διασυνδέσεις του δικτύου κ.λ.π. Οι απαιτήσεις εφεδρείας επιβάλλουν και αυτές ορισμένους περιορισμούς στις λειτουργικές φορτίσεις των μονάδων.

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης (2.5) υπό τον εξισωτικό περιορισμό (2.6) και τους ανισωτικούς περιορισμούς (2.7) μπορεί να επιλυθεί με διάφορους τρόπους. Η απλούστερη προσέγγιση συνίσταται στην

οικονομική κατανομή κάθε φορά του απομένοντος φορτίου μεταξύ των μονάδων οι οποίες δεν έφτασαν ακόμα στην οριακή τους φόρτιση.

Εάν η εφαρμογή του κριτηρίου του ίσου διαφορικού κόστους συνεπάγεται φόρτιση για μια μονάδα η οποία υπερβαίνει κάποιο όριο της, η μονάδα αυτή θα λειτουργήσει στο όριο της αυτό έστω $P_{max,i}$. Το υπόλοιπο φορτίο $P - P_{max,i}$ θα κατανεμηθεί μεταξύ των υπολοίπων μονάδων πάλι με το κριτήριο του ίσου διαφορικού κόστους λ . Το ίδιο επαναλαμβάνεται για κάθε επόμενη μονάδα που φτάνει το όριο της. Παρακάτω ακολουθεί ο αλγόριθμος λάμδα που χρησιμοποιείται για την επίλυση του προβλήματος οικονομικής κατανομής φορτίου σε Η/Υ.



Σχήμα 2.4 Αλγόριθμος επαναλήψεων λ

2.5 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Έως τώρα διατυπώθηκε το πρόβλημα οικονομικής κατανομής φορτίου μη λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες μεταφοράς. Όμως μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση του προβλήματος θα πρέπει να περιλαμβάνει και τις τυχόν απώλειες του δικτύου που οφείλονται κυρίως στις απώλειες γραμμών και μετασχηματιστών.

Με τη συμμετοχή των απωλειών του δικτύου στην οικονομική κατανομή του φορτίου μεταξύ των μονάδων παραγωγής το πρόβλημα γίνεται πολύ πιο σύνθετο. Στην περίπτωση αυτή, το πρόβλημα συνίσταται στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους καυσίμου και διατυπώνεται μαθηματικά ως εξής:

$$\text{Min } F_T(P_1, P_2, \dots, P_n) = F_1(P_1) + F_2(P_2) + \dots + F_n(P_n) = \sum_{i=1}^n F_i(P_i) \quad (2.8)$$

$$\text{Μ.Π.: } \Phi = P_D + P_L(P_1, \dots, P_n) - \sum_{i=1}^n P_i = 0 \quad (2.9)$$

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \quad i = 1, \dots, n$$

Το κριτήριο της βέλτιστης λειτουργίας στην περίπτωση μπορεί να υπολογιστεί και να διατυπωθεί με τη μέθοδο των πολλαπλασιαστών Lagrange

Μέθοδος Πολλαπλασιαστών Lagrange

Όπως βλέπουμε από παραπάνω ζητείται η ελαχιστοποίηση της συναρτήσεως,

$$F_\sigma = \sum_{i=1}^n F_i(P_i) \quad \text{υπό τον περιορισμό} \quad \sum_{i=1}^n P_i - P_D - P_L = 0$$

Ο περιορισμός ισότητας γράφεται ως εξής: $\Phi = \sum_{i=1}^n P_i - P_D - P_L = 0$

και η συνάρτηση Lagrange είναι η $L = F_\sigma - \lambda \cdot \Phi$, όπου λ ο πολλαπλασιαστής Lagrange

Η συνθήκη ελαχιστοποίησης της F_σ στ σημείο βέλτιστου είναι :

$$\frac{\partial L}{\partial P_i} = 0 \Rightarrow \frac{\partial L}{\partial P_i} = \frac{\partial F_i}{\partial P_i} - \lambda \cdot \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_i} \right) = 0 \Rightarrow$$

$$\frac{1}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_i}} \cdot \frac{\partial F_i}{\partial P_i} = \lambda, \quad i = 1, \dots, n \quad (2.10)$$

Όπως προκύπτει από την εξίσωση (2.10) το λ είναι η κοινή τιμή του διαφορικού κόστους $\frac{\partial F_i}{\partial P_i}$ πολλαπλασιασμένου με τον παράγοντα $\frac{1}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_i}}$, ο οποίος καλείται

παράγοντας ποινής (penalty factor, PF).

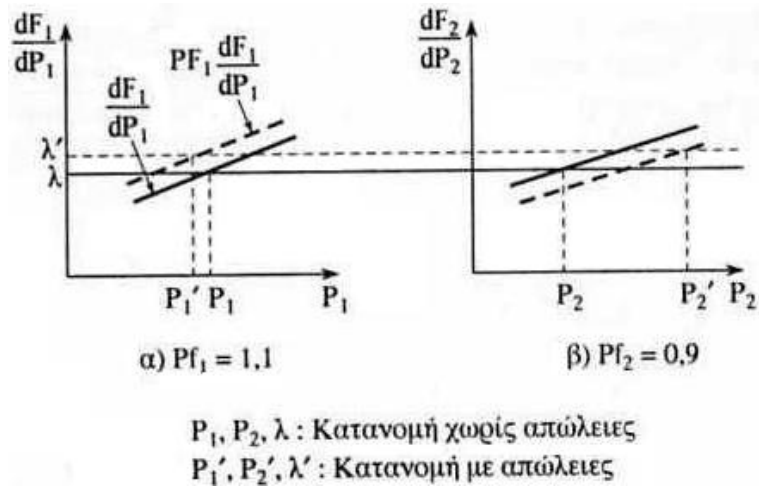
Με την εισαγωγή του παράγοντα ποινής η (2.10) γράφεται ως:

$$(PF_i) \cdot \frac{\partial F_i}{\partial P_i} = \lambda, \quad i = 1, \dots, n \quad (2.11)$$

Οι εξισώσεις (2.11) αποτελούν το κριτήριο βέλτιστης λειτουργίας στην περίπτωση που λαμβάνονται υπόψη και οι απώλειες δικτύου.

Ο συντελεστής ποινής Pf_i έχει την εξής επίδραση:

- όταν $Pf_i > 1$, δηλαδή η αύξηση της παραγόμενης ισχύς P_i αυξάνει τις απώλειες, ο όρος $Pf_i \cdot \frac{\partial F_i}{\partial P_i}$ λειτουργεί με τρόπο που το διαφορικό κόστος $\frac{\partial F_i}{\partial P_i}$ να αυξάνεται, γεγονός που ισοδυναμεί με μετατόπιση τη καμπύλης διαφορικού κόστους προς τα πάνω όπως φαίνεται στο σχήμα (2.5.α).
- όταν $Pf_i < 1$, δηλαδή η αύξηση της παραγόμενης ισχύς P_i μειώνει τις απώλειες, ο όρος $Pf_i \cdot \frac{\partial P_L}{\partial P_i}$ λειτουργεί με τρόπο που το διαφορικό κόστος $\frac{\partial F_i}{\partial P_i}$ να μειώνεται, γεγονός που ισοδυναμεί με μετατόπιση τη καμπύλης διαφορικού κόστους προς τα κάτω όπως φαίνεται στο σχήμα (2.5.β).



Σχήμα 2.5 Διαφορικό κόστος καυσίμου με και χωρίς απώλειες

2.5.1 Διαμόρφωση της Εξίσωσης Απωλειών με τη Μέθοδο των Συντελεστών B

Από την παραπάνω ανάλυση καταλήξαμε στη σχέση () η οποία πρέπει να ισχύει για την επίτευξη της βέλτιστης λειτουργίας. Το πρόβλημα τώρα έγκειται στον προσδιορισμό της εξίσωσης των απωλειών, $P_L(P_1, \dots, P_n)$, συναρτήσεως των ισχύων των μονάδων παραγωγής.

Οι απώλειες εκφράζονται συναρτήσεως των συντελεστών απωλειών B του δικτύου και των ισχύων από εξισώσεις της μορφής:

$$P_L = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n (P_i \cdot B_{ik} \cdot P_k) \quad (2.12)$$

όπου:

B_{ik} οι συντελεστές B ή συντελεστές απωλειών

P_i, P_k οι ισχύεις παραγωγής των γεννητριών

Σε μορφή μητρών η σχέση (2.12) γράφεται $P_L = [P]^T \cdot [B] \cdot [P]$ (2.13)

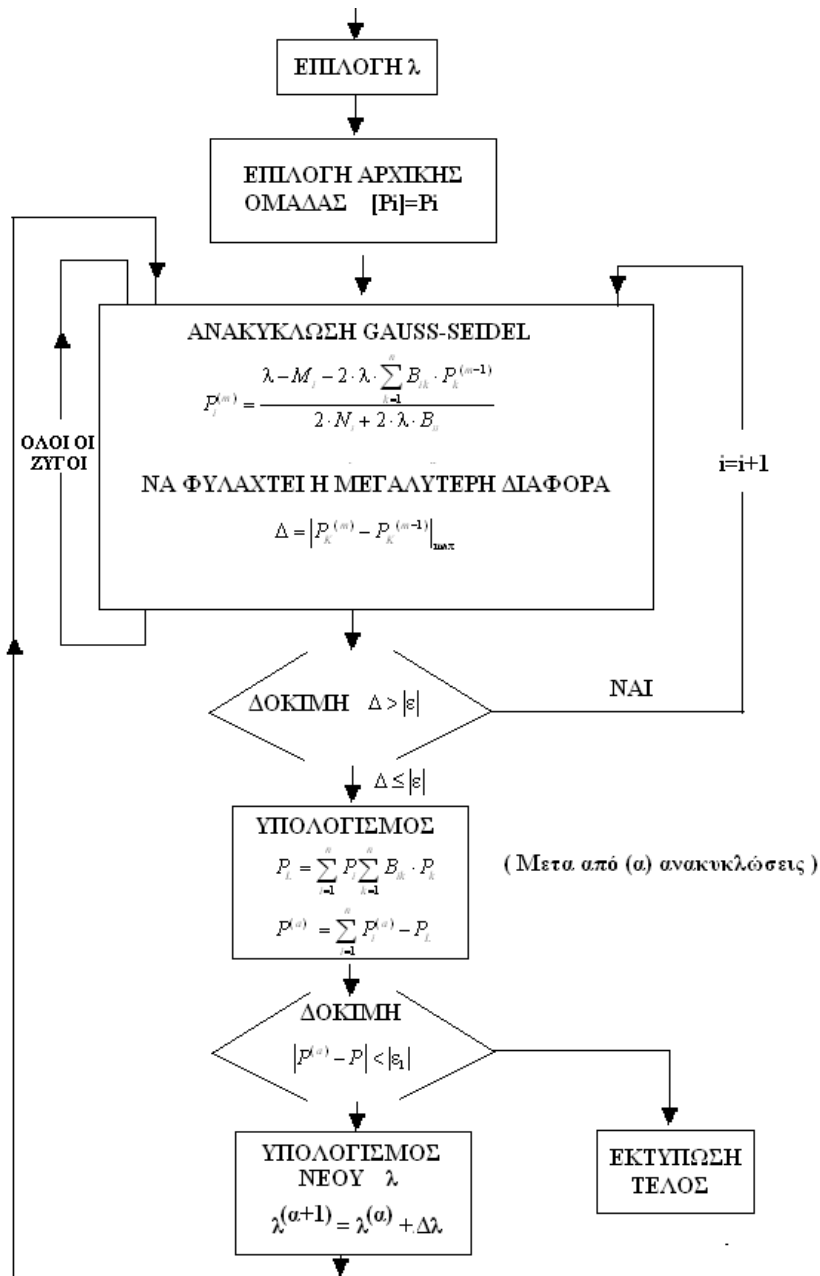
όπου:

$[P]$ = διάνυσμα εξόδου όλων των γεννητριών διάστασης $n \times 1$

$[B]$ = τετραγωνικός πίνακας $n \times n$

Με βάση την παραπάνω σχέση έχουμε $\frac{\partial P_L}{\partial P_i} = 2 \cdot \sum_{k=1}^n B_{ik} \cdot P_k$ (2.14)

οπότε ο παράγοντας ποινής γίνεται: $PF_i = \frac{1}{1 - 2 \cdot \sum_{k=1}^n B_{ik} \cdot P_k}$ (2.15)



Σχήμα 2.6 Αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος οικονομικής κατανομής φορτίου με απώλειες.

Η παρουσία των διαφορετικών απωλειών περιπλέκει την επίλυση των εξισώσεων συνεργασίας (2.14), αφού περιέχει εκτός του όρου P_i και όλους τους όρους P_j .

Στο παραπάνω σχήμα (2.6) απεικονίζεται σε διάγραμμα ροής ο αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος οικονομικής κατανομής φορτίου με απώλειες. Θεωρούμε συναρτήσεις κόστους της μορφής $F(P_i) = A_i + M_i P_i + N_i P_i^2$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η βέλτιστη ροή φορτίου (ΒΡΦ) ορίζεται ως ένα στατικό μη γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης το οποίο καθορίζει τις βέλτιστες τιμές των μεταβλητών ελέγχου, οι οποίες μεγιστοποιούν ή ελαχιστοποιούν την επιθυμητή αντικειμενική συνάρτηση και ταυτόχρονα ικανοποιούν ποικίλους περιορισμούς, όπως όρια τάσεων, ενεργό και άεργο ισχύ, φόρτιση γραμμών. Η ΒΡΦ ορίστηκε για πρώτη φορά το 60' από τον Carpentier και από τότε πολλοί ερευνητές την μελετούν ως ένα ισχυρό εργαλείο για τον σχεδιασμό και τη λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Στις μέρες μας, ο όρος χρησιμοποιείται ως ένα γενικό όνομα για την επίλυση αρκετών ειδών προβλημάτων σχετικών με την βελτιστοποίηση δικτύων.

Στις μέρες μας, τα συστήματα ισχύος λειτουργούν όλο και πιο πολύ στα όρια τους και έτσι κρίνεται απαραίτητο να ενσωματωθούν επιπλέον περιορισμοί στην διατύπωση του προβλήματος. Η προσθήκη περιορισμών ασφαλείας αυξάνει σημαντικά την υπολογιστική δυσκολία της τρέχουσας συγκεντρωμένης ΒΡΦ.

Η ανάπτυξη της Β.Ρ.Φ στις τελευταίες δύο δεκαετίες έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο σε αριθμητικές τεχνικές βελτιστοποίησης και στην τεχνολογία υπολογιστών. Σύγχρονα εμπορικά προγράμματα Β.Ρ.Φ μπορούν να επιλύσουν προβλήματα βελτιστοποίησης για πολύ μεγάλα και πολύπλοκα συστήματα ηλεκτρικής ισχύος σε σύντομο σχετικά χρονικό διάστημα. Πολλές διαφορετικές προσεγγιστικές λύσεις έχουν προταθεί για να επιλυθούν προβλήματα Β.Ρ.Φ.

Το γενικό πρόβλημα της Β.Ρ.Φ, που θα εξεταστεί στο κεφάλαιο αυτό και του οποίου η μελέτη βασίστηκε στις αναφορές [1], [2], [4] και [7], έχει να κάνει με την ελαχιστοποίηση μιας γενικής αντικειμενικής συνάρτησης, ικανοποιώντας ταυτόχρονα κάποιους περιορισμούς για την ασφαλή λειτουργία του συστήματος.

Συγκεκριμένα, το πρόβλημα διατυπώνεται ως εξής:

$$\text{Ελαχιστοποίησε την} \quad F(x,u) \quad (3.1)$$

$$\text{με τους περιορισμούς:} \quad g(x,u) = 0 \quad (3.2)$$

$$h(x,u) \leq 0, \quad (3.3)$$

όπου:

$g(x,u)$ αναπαριστά τους μη γραμμικούς εξισωτικούς περιορισμούς (εξισώσεις ροής φορτίου) και

$h(x,u)$ είναι οι μη γραμμικοί ανισωτικοί περιορισμοί των διανυσμάτων x και u .

Το διάνυσμα x , που περιέχει τις εξαρτημένες μεταβλητές, μπορεί να αποτελείται από:

- τα μέτρα των τάσεων των ζυγών
- τις φασικές γωνίες των τάσεων
- την άεργο ισχύ εξόδου (MVA_r) των γεννητριών, που είναι σχεδιασμένες για τον έλεγχο των τάσεων των ζυγών.

Επιπλέον, το διάνυσμα x μπορεί να περιέχει σταθερές παραμέτρους, όπως:

- τις γωνίες των ζυγών αναφοράς,
- τις μη ελεγχόμενες εξόδους ενεργού (MW) και άεργου (MVA_r) ισχύος των γεννητριών,
- τις παραμέτρους των γραμμών, κ.τ.λ.

Το διάνυσμα u αποτελείται από μεταβλητές ελέγχου που περιλαμβάνουν:

- Ενεργό και άεργο ισχύ παραγωγής
- Φασικές γωνίες μετατόπισης
- Καθαρή ανταλλαγή
- Φορτίο ενεργού και άεργου ισχύος (MW και MVA_r)
- DC ροές μεταφοράς γραμμών
- Ρυθμίσεις ελέγχου τάσης
- Ρυθμίσεις μετασχηματιστών με tap

Ο πίνακας 3.1 δείχνει μια επιλογή αντικειμένων συναρτήσεων και περιορισμών που συναντώνται συχνά κατά τη διατύπωση της Β.Ρ.Φ. Οι σταθερές χρόνου της διαδικασίας ελέγχου συσχετίζονται αρκετά, επιτρέποντας στη υλοποίηση της Β.Ρ.Φ να πετύχει επαρκή βελτιστοποίηση. Η ποιότητα της λύσης εξαρτάται από την ακρίβεια του υπό μελέτη μοντέλου. Είναι, επίσης, σημαντικό να δοθεί εξ' αρχής ο ορισμός του κατάλληλου προβλήματος με ξεκάθαρες καθορισμένες αντικειμενικές συναρτήσεις. Οι εταιρείες συστημάτων ισχύος δεν διαθέτουν το ίδιο είδος συσκευών και τις ίδιες λειτουργικές ανάγκες. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να αναπτυχθεί μια τέτοια μορφή μοντέλου, που να δίνει τη δυνατότητα στο πρόβλημα Β.Ρ.Φ να προσαρμόσει εύκολα την λύση του σε διαφορετικές περιπτώσεις κατά τη μελέτη.

Αντικειμενικές Συναρτήσεις

1. Συναρτήσεις Ενεργού Ισχύος

- Οικονομική κατανομή (ελάχιστες απώλειες κόστους ή απώλειες μεταφοράς, ελάχιστη παραγωγή MW)
- Περιβαλλοντική κατανομή
- Μέγιστη μεταφορά ισχύος

2. Συναρτήσεις Άεργου Ισχύος

(Ελαχιστοποίηση ενεργών MW και άεργων MVar απωλειών)

3. Συναρτήσεις Γενικού Στόχου

- Ελάχιστη απόκλιση από ένα χρονοδιάγραμμα στόχου
- Ελάχιστες αλλαγές ελέγχου για τον περιορισμό των παραβιάσεων

Περιορισμοί

1. Όρια των Μεταβλητών Ελέγχου

- Έξοδος γεννήτριας σε MW
- Όρια μετασχηματιστή με taps
- Έκταση εγκάρσιου πυκνωτή

2. Όρια λειτουργίας σε:

- Ροές γραμμών και μετασχηματιστών (MVA, Amps, MW, MVar)
- Ανταλλαγές MW και MVar
- Περιθώρια προστασίας MW και MVar (σταθερά/δυναμικά)
- Τάση, γωνία (μέτρο, διαφορά φάσης)

3. Παράμετροι Ελέγχου

- Χρήση κανόνων μηχανικών για να προσφερθούν περισσότεροι έλεγχοι για την διαχείριση των παραβιάσεων
- Αποτελεσματικότητα ελέγχου (περισσότερος έλεγχος με επαρκή αποτελέσματα)
- Αλλαγή ρυθμών ελέγχου
- Σταθερότητα τάσης

4. Τοπικοί και μη βέλτιστοι έλεγχοι (τάση γεννήτριας, ενεργός ισχύς γεννήτριας, τάση εξόδου μετασχηματιστή, MVar, εγκάρσιου/SVC έλεγχοι)

Πίνακας 3.1 : Αντικειμενικές Συναρτήσεις & Περιορισμοί της Β.Ρ.Φ

3.2 ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Η ελαχιστοποίηση του κόστους καυσίμου είναι ένα σημαντικό πρόβλημα κατά τον σχεδιασμό και τη λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Συνήθως αναφέρεται σαν οικονομική κατανομή, σκοπός της οποίας είναι να εξασφαλίσει την παραγωγή ενεργού ισχύος των μονάδων που βρίσκονται σε λειτουργία, έτσι ώστε το συνολικό κόστος καυσίμου να ελαχιστοποιηθεί ικανοποιώντας ταυτοχρόνως λειτουργικούς περιορισμούς.

3.2.1 Μοντελοποίηση

Η ελαχιστοποίηση του κόστους καυσίμου απαιτεί την γνώση των καμπυλών κόστους καυσίμου για καθεμιά από τις παραγωγικές μονάδες. Μια ορθή αναπαράσταση των καμπυλών κόστους μπορεί να απαιτεί μια τμηματική πολυωνυμική μορφή, ή μπορεί να προσεγγιστεί με αρκετούς τρόπους, με τους πιο κοινούς να είναι:

- Τμηματικά γραμμική
- Τετραγωνική
- Κυβική
- Τμηματικά γραμμική και τετραγωνική

Μια γραμμική προσέγγιση δεν χρησιμοποιείται συνήθως, ενώ μια τμηματικά γραμμική μορφή χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές γραμμικού προγραμματισμού. Μια τετραγωνική προσέγγιση χρησιμοποιείται στις περισσότερες μη γραμμικές εφαρμογές προγραμματισμού.

Μεταβλητές ελέγχου είναι συνήθως οι ανεξάρτητες μεταβλητές σε μια Β.Ρ.Φ, συμπεριλαμβανομένων:

- Παραγωγής ενεργού ισχύος
- Τάσεων ζυγών των γεννητριών
- Λόγων μετασχηματισμού των Μ/Σ με tap
- Φασικών γωνιών μετατόπισης
- Τιμών μεταβλητών εγκάρσιων πυκνωτών και πηνίων

Η χρήση όλων των παραπάνω σαν μεταβλητών ελέγχου μπορούν να δώσουν την καλύτερη (την λιγότερο ακριβή) λύση.

Για μια συνήθη Β.Ρ.Φ, οι συνηθισμένοι περιορισμοί είναι οι:

- Εξισώσεις ισορροπίας ισχύος του δικτύου σε κάθε κόμβο
- Όρια όλων των μεταβλητών
- Περιορισμοί ροής στις γραμμές και

- Άλλοι, όπως οι λόγοι μετασχηματισμού των παράλληλα συνδεδεμένων Μ/Σ με tap.

Ωστόσο, αυτό μπορεί να μην οδηγήσει στην πιο επιθυμητή λύση, γεγονός που εξαρτάται και από μερικούς άλλους παράγοντες όπως κάποιοι επιπρόσθετοι περιορισμοί.

Οι παρακάτω παραδοχές έχουν γίνει κατά την μοντελοποίηση των αντικειμενικών συναρτήσεων και των περιορισμών:

- Οι καμπύλες κόστους καυσίμου είναι ομαλές και τετραγωνικές
- Μόνο οι παραγωγές ενεργού ισχύος ελέγχονται για την ελαχιστοποίηση του κόστους. Οι λόγοι μετασχηματισμού των Μ/Σ με tap , οι τάσεις παραγωγής των γεννητριών , οι εγκάρσιοι πυκνωτές και τα πηνία διατηρούνται στις ονομαστικές τους τιμές καθ' όλη τη διάρκεια της βελτιστοποίησης.
- Οι ροές ρεύματος ελέγχονται στο περίπου χρησιμοποιώντας περιορισμό στην τάση και την φασική γωνία επί των γραμμών, και
- Αμελούνται τυχόν επιπλέον περιορισμοί

3.2.2 Μαθηματική Περιγραφή Αντικειμενικής Συνάρτησης και Περιορισμών για την Ελαχιστοποίηση Κόστους

Η αντικειμενική συνάρτηση δίνεται από το ακόλουθο μοντέλο κόστους καυσίμου:

$$F(P_g) = \sum_{i=1}^{N_g} (a_i + \beta_i P_{g_i} + \gamma_i P_{g_i}^2) \quad (3.4)$$

υπό τους εξισωτικούς περιορισμούς που αναπαριστούν την ενεργό και άεργο ηλεκτρική ισορροπία του δικτύου:

$$P_i - P_{g_i} + P_{d_i} = 0 \quad i = 1, \dots, N_b \quad i \in \text{γεννήτρια} \quad (3.5)$$

$$Q_i - Q_{g_i} + Q_{d_i} = 0 \quad i = 1, \dots, N_b \quad i \in \text{γεννήτρια/σύγχρονο πυκνωτή} \quad (3.6)$$

όπου:

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^{N_b} V_j Y_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j - \psi_{ij}) \quad i = 1, \dots, N_b \quad (3.7)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^{N_b} V_j Y_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j - \psi_{ij}) \quad i = 1, \dots, N_b \quad (3.8)$$

μαζί με τους ανισωτικούς περιορισμούς:

$$V_{i\min} \leq V_i \leq V_{i\max} \quad i = 1, \dots, N_b \quad (3.9)$$

$$P_{g_i\min} \leq P_{g_i} \leq P_{g_i\max} \quad i = 1, \dots, N_g \quad (3.10)$$

$$Q_{g_i\min} \leq Q_{g_i} \leq Q_{g_i\max} \quad i = 1, \dots, N_{gq} \quad (3.11)$$

Οι μεταβλητές ελέγχου είναι οι έξοδοι ενεργού ισχύος των γεννητριών.

$F(P_g)$ = Συνολικό κόστος καυσίμου συναρτήσει της P_g

P_g = Ενεργός παραγόμενη ισχύς της μονάδας i

a_i, β_i, γ_i = Παράμετροι του κόστους καυσίμου της μονάδας i

N_g = Αριθμός των μονάδων παραγωγής

N_{g_i} = Αριθμός των ζυγών PV, συμπεριλαμβανομένων των γεννητριών και των σύγχρονων πυκνωτών

N_b = Συνολικός αριθμός ζυγών

N_l = Συνολικός αριθμός γραμμών

V_i, V_j = Μέτρο τάσης των ζυγών i και j

θ_i, θ_j = Φασικές γωνίες των ζυγών i και j

P_i = Καθαρή εγχυόμενη ενεργός ισχύς από τον κόμβο i

Q_i = Καθαρή εγχυόμενη άεργος ισχύς από τον κόμβο i

Y_{ij} = Μέτρο του στοιχείου της (i, j) θέσης της σύνθετης μήτρας αγωγιμοτήτων

ψ_{ij} = Φασική γωνία του στοιχείου της (i, j) θέσης της σύνθετης μήτρας αγωγιμοτήτων

$Q_{g_i\min}, Q_{g_i\max}$ = Κατώτερο και ανώτερο όριο της παραγόμενης από τη γεννήτρια άεργου ισχύος στο ζυγό i .

3.3 ΕΠΙΠΡΟΣΘΕΤΟΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

Κατά την λειτουργία των διαφόρων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας παράγονται αέριοι ρύποι. Τέτοιοι ρύποι είναι τα οξείδια του αζώτου NO_x , του θείου SO_x και το διοξείδιο του άνθρακα CO_2 . Οι ρύποι αυτοί έχουν πολλές αρνητικές επιπτώσεις για το περιβάλλον και θεωρείται αναγκαίος ο περιορισμός τους. Για το σκοπό αυτό έχουν παρθεί μια σειρά από μέτρα, τα οποία έχουν την μορφή νομοθετικών διατάξεων αλλά και απλών οδηγιών.

Συγκεκριμένα, με βάση το Εθνικό Σχέδιο Κατανομής Δικαιωμάτων Εκπομπών (ΕΣΚΔΕ) και σύμφωνα με την απόφαση 2002/358/ΕΚ για την έγκριση εξ ονόματος της Ευρωπαϊκής Κοινότητας του Πρωτοκόλλου του Κιότο, η Ελλάδα δεσμεύεται να περιορίσει την αύξηση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου κατά τη περίοδο 2008-2012 στο 25% σε σχέση με τις εκπομπές του έτους βάσης. Επίσης, η Ελλάδα έχει αποκτήσει και Εθνικό Σχέδιο Κατανομής Ρύπων (ΕΣΚΡ) το οποίο εγκρίθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και προβλέπει μείωση των εκπομπών 'κατά 16,7% για τις ρυπογόνες βιομηχανίες'. Πρακτικά πρόκειται για τον καταμερισμό των ρύπων και την συμμετοχή της Ελλάδας στην προσπάθεια μείωσης που επιβάλλει το Πρωτόκολλο του Κιότο

3.3.1 Μοντελοποίηση Περιβαλλοντικών Περιορισμών

Υπάρχουν ποικίλοι τρόποι για να μοντελοποιηθούν οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί. Το μοντέλο που τίθεται εδώ θεωρεί ότι οι εκπομπές των οξειδίων του θείου SO_x , των οξειδίων αζώτου NO_x και του διοξειδίου του άνθρακα CO_2 μπορούν να εκφραστούν ως ξεχωριστές τετραγωνικές συναρτήσεις της εξόδου πραγματικής ενεργού ισχύος των μονάδων παραγωγής.

Οι περιορισμοί της εκπομπής του SO_x μπορούν να εκφραστούν ως:

$$S_i(P_i) \leq ES_{\max}, \quad (3.12)$$

όπου

$$S = \sum_{j \in \Phi} a_j H_j(P_j) \quad (3.13)$$

και

ES_{\max} = Το ανώτατο όριο του SO_x για το υπό μελέτη σύστημα ισχύος

Φ = Το σύνολο των μονάδων

$$H_j(P_j) = \text{Ο ρυθμός θερμότητας της } j \text{ μονάδας, εκφρασμένος με την τετραγωνική μορφή: } H_j(P_j) = a_j P_j^2 + \beta_j P_j + c_j \quad (3.14)$$

P_j = Η ενεργός ισχύς εξόδου της μονάδας j

Με παρόμοιο τρόπο, οι περιορισμοί της εκπομπής των NO_x μπορούν να εκφραστούν ως:

$$N_i(P_i) \leq EN_{\max}, \quad (3.15)$$

όπου

$$N = \sum_{j \in \Phi} \beta_j H_j(P_j) \quad (3.16)$$

Τέλος, οι περιορισμοί της εκπομπής του CO_2 μπορούν να εκφραστούν ως:

$$C_i(P_i) \leq EC_{\max}, \quad (3.17)$$

όπου

$$C = \sum_{j \in \Phi} \gamma_j H_j(P_j) \quad (3.18)$$

3.4 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Οποιαδήποτε τεχνική επίλυσης του προβλήματος της Β.Ρ.Φ και αν εφαρμοστεί, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι παρακάτω απαιτήσεις:

Αξιοπιστία : Οι υπολογισμοί της Β.Ρ.Φ πρέπει να είναι αξιόπιστοι για εφαρμογή σε πραγματικό χρόνο. Πρέπει να συγκλίνουν σε πραγματικές απαντήσεις, αλλιώς αν δεν συγκλίνουν, τότε πρέπει να προταθούν ορθές δικαιολογίες. Όσο πιο βαρύ λειτουργικά είναι το σύστημα ισχύος, τόσο πιο δύσκολη μαθηματικά είναι η λύση του προβλήματος της Β.Ρ.Φ. Η αποδοχή για τη Β.Ρ.Φ βασίζεται στην αξιόπιστη παρουσίασή της όλες τις φορές. Το να αποτύχει σε κάτι τέτοιο, σημαίνει ότι η Β.Ρ.Φ δε θα γίνει αποδεκτή.

Ταχύτητα : Κατά τη Β.Ρ.Φ γίνονται υπολογισμοί μη γραμμικών αντικειμενικών συναρτήσεων και μη γραμμικών περιορισμών με δεκάδες χιλιάδες μεταβλητές. Το γεγονός αυτό, συνεπώς, απαιτεί μεθόδους λύσεων που να συγκλίνουν γρήγορα.

Ευελιξία : Οι μέθοδοι επίλυσης της Β.Ρ.Φ προσομοιώνουν την πραγματική λειτουργία του συστήματος ισχύος και καταστάσεις ελέγχου, και διαρκώς ορίζονται νέες απαιτήσεις για τους υπολογισμούς. Επομένως, γεροί και ευέλικτοι αλγόριθμοι Β.Ρ.Φ πρέπει να εξυπηρετούν και να προσαρμόζουν ένα τεράστιο εύρος μοντέλων αντικειμενικών συναρτήσεων και περιορισμών.

Συντηρησιμότητα : Εξαιτίας της νέας γνώσης των μοντέλων συστημάτων και των αντιληπτών προτεραιοτήτων των αντικειμενικών συναρτήσεων και περιορισμών, ένας αλγόριθμος Β.Ρ.Φ πρέπει να περιλαμβάνει ένα βασισμένο σε κανόνες σχήμα και να διατηρεί εύκολα τα χαρακτηριστικά του για εφαρμογές πραγματικού χρόνου.

Η βέλτιστη ροή φορτίου είναι ένα πολύ μεγάλο και δύσκολο μαθηματικό πρόβλημα προγραμματισμού. Σχεδόν κάθε μαθηματική προσέγγιση προγραμματισμού έχει δοκιμαστεί. Πέρασαν πολλές δεκαετίες μέχρι οι ερευνητές να μπορέσουν να αναπτύξουν κώδικες προγραμματισμού σε Η/Υ, που να μπορούν να επιλύσουν το πολύπλοκο πρόβλημα της Β.Ρ.Φ και που ταυτόχρονα να χαρακτηρίζονται για την αξιοπιστία, την ταχύτητα, την ευελιξία και τη συντηρησιμότητά τους.

Παρακάτω αναφέρονται κάποιες από τις σημαντικότερες τεχνικές επίλυσης της Β.Ρ., που έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς:

- Μέθοδος Gradient
- Μέθοδος Newton
- Γραμμικός Προγραμματισμός (LP)
- Αλγόριθμος Εσωτερικού Σημείου
- Μη Γραμμικός Προγραμματισμός (NLP)
- Τετραγωνικός Προγραμματισμός (QP)
- Μέθοδοι Τεχνητής Νοημοσύνης (AI)

Το πρόβλημα της Β.Ρ.Φ είναι γενικά μη κυρτό. Αυτό συνεπάγεται ότι ενδέχεται να υπάρχει πολλαπλό ελάχιστο που μπορεί να διαφέρει σημαντικά. Ακόμα, οι καμπύλες κόστους των γεννητριών είναι στην πραγματικότητα αρκετά ασυνεχείς αν και συχνά μοντελοποιούνται ως ομαλά πολυώνυμα. Ο χειρισμός αυτών των ασυνεχειών και των μη κυρτώσεων είναι μια πρόκληση για τις υπάρχουσες μεθόδους της Β.Ρ.Φ.

Στην εργασία αυτή η μέθοδος που επιλέξαμε για την επίλυση της ΒΡΦ είναι οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (GA), καθώς είναι σε θέση να λύνουν με ευκολία μη κυρτά και μη γραμμικά προβλήματα και επίσης προσφέρουν μια σειρά από άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα που αναφέρονται λεπτομερώς σε επόμενο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε πολλούς κλάδους της ενέργειας, ένα μεγάλο φάσμα προβλημάτων βελτιστοποίησης έχει αυξηθεί σε μέγεθος και πολυπλοκότητα. Σε μερικές περιπτώσεις, η λύση πολύπλοκων πολυδιάστατων προβλημάτων χρησιμοποιώντας κλασικές τεχνικές βελτιστοποίησης είναι μερικές φορές δύσκολη και/ή ακριβή. Αυτή η διαπίστωση έχει οδηγήσει σε ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για μια ειδική κατηγορία αλγορίθμων αναζήτησης, γνωστών ως εξελικτικοί αλγόριθμοι. Γενικά, αυτοί αναφέρονται ως ‘στοχαστικές’ τεχνικές βελτιστοποίησης και τα θεμέλιά τους βασίζονται στα εξελικτικά πρότυπα που παρατηρούνται στα ζωντανά όντα.

Σε αυτόν τον τομέα της λειτουργικής έρευνας, υπάρχουν διάφοροι βασικοί κλάδοι:

1. Γενετικοί αλγόριθμοι (GA)
2. Εξελικτικός προγραμματισμός (EP), και
3. Εξελικτικές στρατηγικές (ES)

Μέχρι σήμερα ο γενετικός αλγόριθμος είναι η ευρύτερα γνωστή τεχνολογία [4]. Αυτή η τεχνική βελτιστοποίησης έχει εφαρμοσθεί σε πολλά πολύπλοκα προβλήματα στους τομείς της βιομηχανικής και λειτουργικής μηχανικής. Στα ηλεκτρικά συστήματα, οι γνωστές εφαρμογές συμπεριλαμβάνουν δέσμευση μονάδων, οικονομική κατανομή, πρόβλεψη φορτίου, μελέτες αξιοπιστίας, και διάφορα προβλήματα κατανομής πόρων.

4.1.1. Γενική Δομή των Γενετικών Αλγορίθμων

Η τυπική δομή των γενετικών αλγορίθμων έχει περιγραφεί από τον David Goldberg. Ουσιαστικά, οι γενετικοί αλγόριθμοι αναφέρονται ως τεχνικές στοχαστικής αναζήτησης που βασίζονται στην θεωρία του Δαρβίνου περί φυσικής επιλογής και φυσικής γενετικής. Γενικά, οι γενετικοί αλγόριθμοι αρχίζουν με ένα αρχικό σύνολο τυχαίων λύσεων που βρίσκονται στον χώρο των εφικτών λύσεων. Αυτή η τυχαία συστάδα λύσεων ονομάζεται πληθυσμός. Κάθε λύση του πληθυσμού είναι μια πιθανή λύση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης και για αυτό ονομάζεται ‘χρωμόσωμα’. Το χρωμόσωμα είναι μια ακολουθία συμβόλων και με βάση τη μοναδικότητα των δύο καταστάσεων, είναι κυρίως δυαδικές ακολουθίες.

4.2. ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΝΝΟΙΕΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΟΝ ΓΕΝΕΤΙΚΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ

Οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν τις βάσεις τους τόσο στην φυσική βιολογική γενετική όσο και στην σύγχρονη πληροφορική (βλέπε πίνακα 4.1). Ως τέτοιοι, η ονοματολογία που χρησιμοποιείται είναι εγγενώς μια μίξη τόσο φυσικής, όσο και τεχνητής, νοημοσύνης.

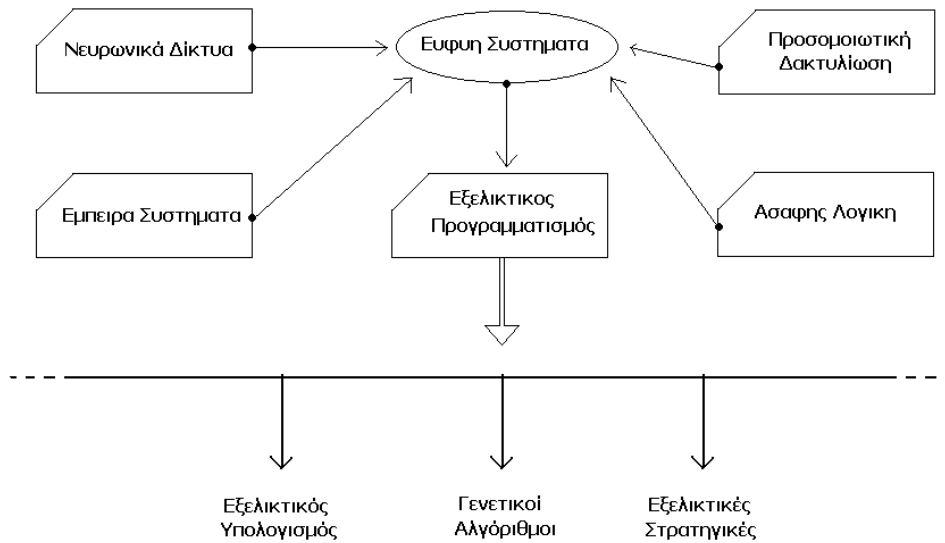
Βιολογικό πρότυπο	Γενετικοί αλγόριθμοι
Γονίδιο	Παράμετρος (μεταβλητή)
Χρωμόσωμα	Υποψήφια λύση (συμβολοσειρά)
Πληθυσμός	Σύνολο υποψήφιας λύσεων
Πιθανότητα επιβίωσης	Συνάρτηση βελτιστοποίησης
Μετάλλαξη	Τυχαία αναζήτηση λύσης
Διασταύρωση	Σύνθεση λύσεων
Γενιά	Ανακύκλωση

Πίνακας 4.1: Ορολογία στους γενετικούς αλγόριθμους

Για να κατανοήσουμε τις ρίζες των γενετικών αλγορίθμων, κοιτάζουμε συνοπτικά τις βιολογικές αναλογίες. Στους βιολογικούς οργανισμούς, ένα χρωμόσωμα μεταφέρει ένα μοναδικό σύνολο πληροφοριών που κωδικοποιεί τα δεδομένα στο πώς είναι κατασκευασμένος ο οργανισμός. Ένα μέρος ή το σύνολο κάποιων χρωμοσωμάτων ονομάζεται φαινότυπος. Και, μέσα σε κάθε χρωμόσωμα υπάρχουν διάφορες ανεξάρτητες δομές που ονομάζονται γονίδια, τα οποία είναι συγκεκριμένα κωδικοποιημένα χαρακτηριστικά του οργανισμού.

4.2.1. Εξελικτικοί Αλγόριθμοι

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι (EA) αντιπροσωπεύουν μια ευρεία κατηγορία συστημάτων που λύνουν προβλήματα βασισμένα σε υπολογιστή. Το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι οι εξελικτικοί μηχανισμοί που είναι στη ρίζα της διατύπωσης και της εφαρμογής. Βεβαίως, οι εξελικτικοί αλγόριθμοι από μόνοι τους αναπαριστούν μια νέα ειδική κατηγορία έξυπνων συστημάτων που χρησιμοποιούνται σε προβλήματα ολικής βελτιστοποίησης. Το σχήμα 4.1 δείχνει τις διάφορες κατηγορίες των ευφών συστημάτων και τη θέση των γενετικών αλγορίθμων ως μια από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές εξελικτικού προγραμματισμού.

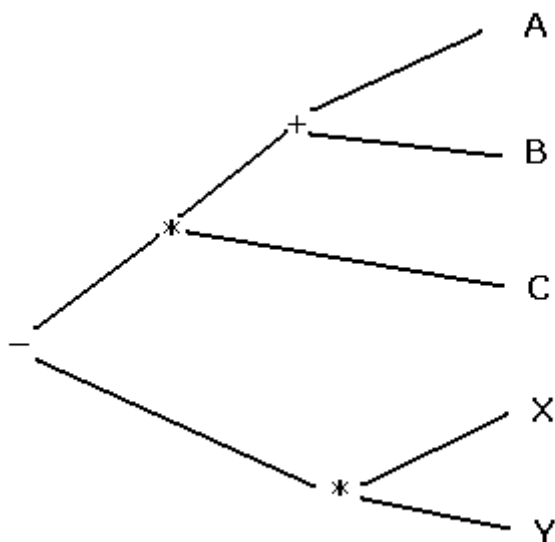


Σχήμα 4.1: Τυπική κατάταξη ευφρών συστημάτων

Συνολικά, οι εξελικτικοί αλγόριθμοι μοιράζονται την κοινή δομή της εξέλιξης κάθε οντότητας μέσα σε ένα ανταγωνιστικό περιβάλλον μέσω της διαδικασίας της επιλογής, μετάλλαξης και αναπαραγωγής. Αυτές οι διαδικασίες είναι συνάρτηση της μιμούμενης απόδοσης κάθε οντότητας, όπως καθορίζεται από το περιβάλλον. Στους εξελικτικούς αλγορίθμους, διατηρείται ένας μοναδικός πληθυσμός δομών βασισμένος στους φορείς αναζήτησης. Οι λειτουργίες αναζήτησης χρησιμοποιούν πιθανοτικούς κανόνες επιλογής στη διαδικασία εξέλιξης, διαβεβαιώνοντας παράλληλα ότι η ακεραιότητα ή η ικανότητα των νέων γενιών βελτιώνεται συνεχώς σε κάθε στάδιο της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Επομένως, ο μηχανισμός αναπαραγωγής επικεντρώνεται κυρίως στην ικανότητα των οντοτήτων του πληθυσμού, ενώ εκμεταλλεύεται την διαθέσιμη πληροφορία. Επιπλέον, αυτοί οι γεροί και ισχυροί προσαρμοστικοί μηχανισμοί αναζήτησης βελτιστοποίησης χρησιμοποιούν επανασύνδεση και μεταλλάξεις για να αλλοιώσουν τις οντότητες (γονείς και απόγονους), ώστε να παράγουν νέες γενιές οι οποίες στη συνέχεια θα αξιολογηθούν και αυτές.

4.2.2. Γενετικός Προγραμματισμός

Ο γενετικός προγραμματισμός είναι μια χρήσιμη επέκταση του γενετικού μοντέλου εκμάθησης και προσαρμογής στον χώρο των προγραμμάτων. Σε αυτόν τον ειδικό τύπο προγραμματισμού, τα αντικείμενα που απαρτίζουν τον πληθυσμό δεν είναι ακολουθίες χαρακτήρων σταθερού μεγέθους που τυπικά κωδικοποιούν εφικτές λύσεις για το πρόβλημα της βελτιστοποίησης. Αντιθέτως, τα αντικείμενα που απαρτίζουν τον πληθυσμό είναι προγράμματα που όταν εκτελούνται παράγουν υποψήφιες λύσεις για την βελτιστοποίηση. Στον γενετικό προγραμματισμό αυτά εκφράζονται ως αραιά δέντρα πάρα ως γραμμές κώδικα. Για παράδειγμα, ένα απλό πρόγραμμα που εκτελεί την πράξη $X*Y-(A+B)*C$ θα αναπαρασταθεί όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2: Απλή δομή που δείχνει την πράξη $X*Y-(A+B)*C$

4.3. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Στο σημείο αυτό θα κάνουμε μία σύντομη ιστορική αναδρομή στις ρίζες και στην εξέλιξη των γενετικών αλγορίθμων. Οι εξελικτικοί-γενετικοί αλγόριθμοι μαζί με τα ασαφή σύνολα-ασαφή λογική και τα νευρωνικά δίκτυα αποτελούν τα τρία δομικά στοιχεία της υπολογιστικής νοημοσύνης [4]. Στις δεκαετίες του 50 και του 60 διάφοροι επιστήμονες υπολογιστών μελέτησαν εξελικτικά συστήματα με τη σκέψη ότι η “εξέλιξη” θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως ένα εργαλείο βελτιστοποίησης σε τεχνολογικά προβλήματα. Το εργαλείο αυτό χρησιμοποιούσε μεθόδους εμπνεόμενες από τη φυσική γενετική.

Τα έτη 1965 και 1973 ο Rechenberg εισήγαγε τις “στρατηγικές εξέλιξης” ως μία μέθοδο βελτιστοποίησης πραγματικών παραμέτρων για κατασκευές όπως τα λεπτά μεταλλικά φύλλα των αεροπλάνων.

Το 1966 οι Fogel, Owens και Walsh ανέπτυξαν τον αποκαλούμενο “εξελικτικό προγραμματισμό”, μία τεχνική στην οποία οι υποψήφια λύσεις σε δεδομένα προβλήματα παραστάθηκαν ως μηχανές πεπερασμένων καταστάσεων, οι οποίες εξελίχθηκαν μεταλλάσσοντας τυχαία τα διαγράμματα μετάπτωσης των καταστάσεών τους και επιλέγοντας το “πλέον ταιριαστό” (fittest). Από κοινού, οι στρατηγικές εξέλιξης, ο εξελικτικός υπολογισμός και οι γενετικοί αλγόριθμοι αποτελούν τη σπονδυλική στήλη του πεδίου του “εξελικτικού υπολογισμού”. Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιήθηκαν επίσης και για μάθηση μηχανής.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι επινοήθηκαν από τον καθηγητή John Holland στο πανεπιστήμιο του Michigan, τη δεκαετία του 60 και αναπτύχθηκαν από τον ίδιο, τους συναδέλφους και μαθητές του τη δεκαετία του 60 και 70. Σε αντίθεση με τις στρατηγικές εξέλιξης και τον εξελικτικό προγραμματισμό, ο αρχικός στόχος του Holland δεν ήταν να κατασκευάσει αλγορίθμους που να λύνουν συγκεκριμένα προβλήματα. Σκοπό είχε 1) να κάνει μια περίληψη αλλά και αυστηρή εξήγηση των διαδικασιών προσαρμογής των φυσικών συστημάτων και 2) να σχεδιάσει τεχνητά συστήματα λογισμικού που διατηρούν τους σημαντικούς μηχανισμούς των φυσικών συστημάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η πρώτη αναφορά του όρου “γενετικός αλγόριθμος” και η πρώτη δημοσιευμένη εφαρμογή του έγιναν το 1967 στην πρωτοποριακή διατριβή του Bagley.

Μόλις τα τελευταία υπάρχει ευρεία αλληλεπίδραση μεταξύ των ερευνητών οι οποίοι μελετούν τις μεθόδους του εξελικτικού υπολογισμού και έτσι τα σύνορα ανάμεσα σε γενετικούς αλγορίθμους, στρατηγικές εξέλιξης και εξελικτικού προγραμματισμού έχουν σπάσει.

Σήμερα με τον όρο “γενετικός αλγόριθμος” περιγράφουμε κάτι πολύ διαφορετικό από αυτό που επινόησε ο Holland. Οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται για βελτιστοποίηση σε πολύπλοκα τεχνολογικά προβλήματα και

βρίσκουν εφαρμογή στην ιατρική, στα μαθηματικά, στη μηχανική (engineering), στις κοινωνικές και πολιτικές επιστήμες.

4.4. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

Μερικά από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα που έχει η χρήση Γ.Α. για την επίλυση προβλημάτων είναι τα εξής [6] :

1) Μπορούν να επιλύουν δύσκολα προβλήματα γρήγορα και αξιόπιστα. Ένας από τους σημαντικούς λόγους χρήσης των Γ.Α. 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 Γ.Α. Είναι δε αξιοσημείωτο ότι συναρτήσεις που παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις και καθιστούν ανεπαρκείς άλλες μεθόδους στην εύρεση των ακρότατων τους, για τους Γ.Α. δεν αποτελούν σημεία δυσχέρειας.

2) Μπορούν εύκολα να συνεργαστούν με τα υπάρχοντα μοντέλα και συστήματα. Οι Γ.Α. προσφέρουν το σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης τους με προσθετικό τρόπο στα μοντέλα που χρησιμοποιούνται σήμερα, μη απαιτώντας την επανασχεδίαση 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 Γ.Α. δεν αντιστέκονται σε αλλαγές, επεκτάσεις και μετεξελίξεις, ανάλογα με την κρίση του σχεδιαστή. Σε πολλές εφαρμογές, έχουν αναφερθεί λειτουργίες των Γ.Α. που δεν είναι δανεισμένες από τη φύση ή που έχουν υποστεί σημαντικές αλλαγές, πάντα προς όφελος της απόδοσης. Παραλλαγές στο βασικό σχήμα δεν είναι απλά αναγκαίες, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις επιβάλλονται.

4) Μπορούν να συμμετέχουν σε υβριδικές μορφές με άλλες μεθόδους. Αν και η ισχύς των Γ.Α. 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 Γ.Α. με άλλη μέθοδο. Αυτό είναι αποτέλεσμα της μεγάλης ευελιξίας των Γ. Α.

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, Γ.Α. 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 κ.τ.λ. Τέτοιου είδους ιδιότητες είναι αδιάφορες για τους Γ. Α. πράγμα που τους κάνει κατάλληλους για μεγάλο φάσμα προβλημάτων.

7) Δεν ενδιαφέρει η σημασία της υπό εξέταση πληροφορίας. Η μόνη "επικοινωνία" του Γ.Α. με το περιβάλλον του είναι η αντικειμενική συνάρτηση. Αυτό εγγυάται την επιτυχία του ανεξάρτητα από την σημασία του προβλήματος. Βέβαια, δεν σημαίνει ότι δεν υπάρχουν άλυτα προβλήματα για τους Γ.Α. 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 Γ.Α. 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 μία 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 το hill climbing 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 Γ.Α. επιτυγχάνουν το βέλτιστο συνδυασμό εξερεύνησης και εκμετάλλευσης, πράγμα που τους κάνει ιδιαίτερα αποδοτικούς και ελκυστικούς.

10) Επιδέχονται παράλληλη υλοποίηση. Οι Γ.Α. 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.

4.5. ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

Η τεχνολογία των Γ.Α., αν και δεν αποτελεί πρόσφατη ανακάλυψη, άρχισε ουσιαστικά να εφαρμόζεται τα τελευταία χρόνια. Η δυσπιστία με την οποία αντιμετώπιζαν οι επιστήμονες το όλο θέμα έχει αρχίσει πλέον να υποχωρεί. Ποιοι είναι όμως οι κυριότεροι λόγοι που ίσως θα μπορούσαν να σταθούν εμπόδιο στην εξάπλωση αυτής της τεχνολογίας;

1) Προβλήματα εξοικείωσης με τη Γενετική. Για τους περισσότερους, που ασχολούνται με την Επιστήμη των Υπολογιστών, οι έννοιες της Εξέλιξης και της Φυσικής Επιλογής μπορεί να μην ηχούν παράξενα, αλλά δεν είναι και από τις πιο οικείες. Η Βιολογία δεν έχει άμεση σχέση με τους υπολογιστές, γι' αυτό και οι γνώσεις σχεδόν όλων είναι σε πολύ γενικό επίπεδο. Εντούτοις, δεν απαιτούνται γνώσεις Γενετικής και Βιολογίας. Εκείνο που συμβαίνει με τους Γ.Α. είναι ότι μιμούνται με αφαιρετικό τρόπο κάποιες διαδικασίες που παρατηρούνται στη φύση, χωρίς να ενδιαφέρει σε μεγάλο βαθμό λεπτομέρειας η λειτουργία τους και χωρίς να είναι απαραίτητο το γνωστικό υπόβαθρο που έχουν οι βιολόγοι για να μελετήσουν αυτά τα φαινόμενα. Οι όροι είναι δανεισμένοι από τη βιολογία με σκοπό την καλύτερη εισαγωγή και κατανόηση του θέματος και όχι την παραπομπή του μελετητή στα άγνωστα πεδία μιας ξένης επιστήμης και, τελικά, τη σύγχυσή του. Θα μπορούσε ίσως, να παραληφθεί η αναφορά στη Γενετική και να γίνει μια παρουσίαση των Γ.Α. ως "προσωπικές διαδικασίες για αναζήτηση και βελτιστοποίηση", αυτό όμως μάλλον θα έκανε τα πράγματα δυσκολότερα. Εξάλλου, είναι συνηθισμένο το φαινόμενο θεωρίες που είναι δανεισμένες από άλλες επιστήμες να διατηρούν την αυθεντική τους ορολογία (π.χ. στα Νευρωνικά Δίκτυα: νευρώνες, συνάψεις, κ.τ.λ.). Επιπλέον, το μέλλον και η εξέλιξη των Γ.Α. δεν εξαρτώνται σε καμία περίπτωση από τις αντίστοιχες θεωρίες της Βιολογίας. Το αρχικό μοντέλο είναι δανεισμένο από εκεί, όμως η εφαρμογή του στα Τεχνητά Συστήματα έγινε με πλήθος διαφοροποιήσεων, προσαρμοσέων και "παρεκτροπών" με στόχο πάντα τη βελτίωση της απόδοσης. Πλέον, μπορούμε να μιλάμε για εξέλιξη και απογόνους των πρώτων Γ. Α. και για μια πορεία τους στο χρόνο που είναι πλήρως ανεξάρτητη και αυτοδύναμη.

2) Το πρόβλημα του χρόνου. Στη φύση ως γνωστό, η εξέλιξη λειτουργεί με ρυθμούς πολύ αργούς. Χρειάζονται να περάσουν χιλιάδες γενιές, άρα και αρκετός χρόνος, για να αλλάξουν τα χαρακτηριστικά των ειδών και να διαφοροποιηθούν οι ικανότητες και η συμπεριφορά τους. Θέτουν έτσι ορισμένοι το ερώτημα: πώς είναι δυνατό ένα μοντέλο αναζήτησης λύσεων να έχει καλές επιδόσεις χρόνου, όταν είναι εμπνευσμένο από μια φυσική διαδικασία που εξελίσσεται με ρυθμούς απίστευτα αργούς; Η απάντηση εδώ είναι απλή. Κατ' αρχήν, ακόμη και στη φύση, η εξέλιξη δεν είναι από μόνη της μια αργή διαδικασία. Εξέλιξη των ειδών συμβαίνει όταν αλλάζει τα περιβάλλον τους και πρέπει να προσαρμοστούν στα καινούργια δεδομένα, ώστε να επιβιώσουν. Αλλαγές όμως του περιβάλλοντος γίνονται με πολύ αργούς ρυθμούς και κατά συνέπεια και η εξέλιξη ακολουθεί αυτούς τους ρυθμούς. Αν οι αλλαγές του

περιβάλλοντος γίνονται με γρηγορότερο τρόπο, τότε επιταχύνεται και η εξέλιξη. Αυτό άλλωστε παρατηρείται και στα βιολογικά εργαστήρια, όπου μικροοργανισμοί αλλάζουν την συμπεριφορά τους αμέσως, όταν τοποθετούνται σε νέες συνθήκες. Επιπλέον, στο πεδίο των υπολογιστών τα άτομα κωδικοποιούνται συνήθως ως συμβολοσειρές και οι συνθήκες του περιβάλλοντος μοντελοποιούνται με απλές μαθηματικές σχέσεις. Έτσι, το μοντέλο με το οποίο δουλεύει ο υπολογιστής δεν παρουσιάζει ιδιαίτερο υπολογιστικό φόρτο, συγκρινόμενο πάντα με αντίστοιχες μεθόδους. Το πλήθος των ατόμων που κάθε φορά εξετάζεται είναι από λίγες δεκάδες έως μερικές χιλιάδες, δηλαδή αρκετές τάξεις μεγέθους κάτω από το πλήθος των γονιδίων των χρωμοσωμάτων μιας έμβιας οντότητας. Ο ρυθμός που μπορούν να ζευγαρώνουν τα άτομα στους πιο γρήγορους υπολογιστές μπορεί να φτάσει το ένα εκατομμύριο ανά δευτερόλεπτο. Όσο μεγάλος και αν είναι ο χώρος που καλείται ο αλγόριθμος να ψάξει, η επεξεργασία μερικών μόνο ατόμων αρκεί, γιατί, όπως θα αναπτυχθεί και παρακάτω, τα άτομα αυτά θεωρούνται αντιπρόσωποι ολόκληρων κλάσεων. Έτσι λοιπόν, οι ταχύτητες που μπορούν να επιτύχουν οι Γ.Α. είναι πολύ υψηλές.

4.6. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

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

1) Οι Γ. Α. δουλεύουν με μια κωδικοποίηση του συνόλου τιμών που μπορούν να λάβουν οι μεταβλητές και όχι με τις ίδιες τις μεταβλητές του προβλήματος. Για παράδειγμα, αναφέρεται το εξής πρόβλημα βελτιστοποίησης: Έστω ένα μαύρο κουτί με πέντε δυαδικούς διακόπτες (on-off). Για κάθε συνδυασμό s 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, καθ' ότι δεν είναι γνωστός ο τύπος της συνάρτησης. Σε ένα Γ.Α. όμως, η πρώτη ενέργεια είναι η κωδικοποίηση των διακοπών ως συμβολοσειρές πεπερασμένου μήκους. Μια απλή κωδικοποίηση θα μπορούσε να γίνει θεωρώντας μια δυαδική συμβολοσειρά μήκους πέντε, όπου η κάθε θέση αναπαριστά ένα διακόπτη. Το 0 αντιστοιχεί στη θέση off και το 1 στη θέση on. 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. Όπως θα φανεί και αργότερα, μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους, αρκετοί από τους οποίους ίσως και να μην είναι προφανείς. Το στοιχείο της κωδικοποίησης, όπως

εξηγείται παρακάτω, είναι εκείνο που επιτρέπει στους Γ. Α. να κάνουν παράλληλη επεξεργασία δεδομένων .

2) Οι Γ.Α. 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 περιοχή τοπικού ακρότατου, που δεν είναι ολικό. Οι Γ.Α. εξαλείφουν αυτόν τον κίνδυνο ενεργώντας ταυτόχρονα πάνω σε ένα ευρύ σύνολο σημείων (σύνολο από συμβολοσειρές). Έτσι μπορούν να "ανεβαίνουν" πολλούς λόφους (hill-climbing) την ίδια στιγμή, ελαχιστοποιώντας την πιθανότητα να βρουν μια λάθος κορυφή. Γυρίζοντας στο παράδειγμα με το μαύρο κουτί, οι κλασσικές 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 Γ.Α. 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 συγκλίνουν προς την επιθυμητή λύση. Διαλέγοντας ένα πληθυσμό που να καλύπτει αντιπροσωπευτικά ένα μεγάλο εύρος τιμών μπορούν να προκύψουν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

3) Οι Γ.Α. χρησιμοποιούν μόνο την αντικειμενική συνάρτηση και καμία επιπρόσθετη πληροφορία. Πολλές μέθοδοι αναζήτησης απαιτούν αρκετές βοηθητικές πληροφορίες για τη συνάρτηση που επεξεργάζονται. Τέτοιου είδους πληροφορίες δεν προαπαιτούνται από τους Γ.Α. Το ψάξιμό τους είναι κατά κάποιο τρόπο "τυφλό". Αξιοποιούν μόνο όση πληροφορία περιέχεται στην αντικειμενική συνάρτηση πράγμα που τους προσδίδει μεγάλη ευελιξία. Έτσι όμως, προκύπτει το ερώτημα αν συμφέρει να αγνοούνται οι βοηθητικές πληροφορίες. Γι' αυτό ακριβώς το λόγο έχουν αναπτυχθεί μορφές Γ.Α. που αξιοποιούν και τέτοιου είδους πληροφορίες (Knowledge-Based Genetic Algorithms).

4) Οι Γ.Α. χρησιμοποιούν πιθανοθεωρητικούς κανόνες μετάβασης και όχι ντετερμινιστικούς. Η χρήση πιθανοτικών κανόνων μετάβασης είναι κυρίαρχο γνώρισμα των Γ.Α., χωρίς αυτό να σημαίνει ότι η όλη διαδικασία βαδίζει στην τύχη. Δε λαμβάνονται αποφάσεις με το "στρίψιμο ενός νομίσματος". Το στοιχείο της τύχης χρησιμοποιείται ως οδηγός για αναζήτηση σε περιοχές που αναμένεται να δώσουν καλά αποτελέσματα.

4.7 ΟΡΟΛΟΓΙΑ

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως οι γενετικοί αλγόριθμοι, για την λειτουργία τους, δανείζονται την ορολογία από το χώρο της βιολογίας και της γενετικής. Ας την δούμε αναλυτικότερα:

Γονίδια και χρωμοσώματα: Ένα χρωμόσωμα αποτελείται από γονίδια, από λειτουργικές ομάδες οι οποίες κάθε μία κωδικοποιεί ένα χαρακτηριστικό. Κάθε γονίδιο είναι τοποθετημένο σε συγκεκριμένη θέση στο χρωμόσωμα. Έτσι και στους γενετικούς αλγόριθμους μία ακολουθία γονιδίων αποτελεί ένα χρωμόσωμα. Ένα συγκεκριμένο χρωμόσωμα (μοναδικό) μπορεί να αποκωδικοποιηθεί σ' ένα σύνολο παραμέτρων που αναπαριστούν μία πιθανή λύση του προβλήματος. Τα χρωμοσώματα μπορούν να κωδικοποιηθούν σαν σειρές πραγματικών αριθμών, δυαδικών αριθμών ή και σε συνδυασμοί των παραπάνω.

Πληθυσμοί και γενεές: Σε κάθε βήμα η συλλογή μίας υπόθεσης, ονομάζεται πληθυσμός (population). Είναι ένα σύνολο λύσεων σε μορφή χρωμοσωμάτων. Οι συνεχείς πληθυσμοί που δημιουργούνται καλούνται γενιές. Από την επιλογή και τον επανασυνδυασμό του πληθυσμού, δηλαδή καθώς η αναπαραγωγή συνεχίζεται, σχηματίζεται μια καινούρια γενιά η οποία θα αντικαταστήσει την προηγούμενη. Τα καταλληλότερα χαρακτηριστικά παράγουν περισσότερα αντίτυπα των εαυτών τους, τα οποία και θα εμφανιστούν στην επόμενη γενιά. Έτσι η λύση του προβλήματος οδηγείται προς την βέλτιστη. Η διαδικασία τερματίζεται είτε με κατώφλι ένα αριθμό των γενεών είτε στο καλύτερο άτομο, (στο άτομο με σφάλμα μικρότερο του ϵ), ή και άλλα κατάλληλα κριτήρια.

Γονείς και τέκνα: Αφότου έχουν δημιουργηθεί τα αρχικά χρωμοσώματα στο γενετικό αλγόριθμο και ο αρχικός πληθυσμός, μια στρατηγική επιλογής καθορίζει ποια χρωμοσώματα θα συμμετάσχουν στη διαδικασία εξέλιξης. Στην συνέχεια επιλέγονται τα ζευγάρια με πιθανότητα ανάλογη της καταλληλότητας τους. Τα ζεύγη αυτά καλούνται γονείς. Τα χρωμοσώματα ζευγαρώνουν το ένα με το άλλο, για να παραγάγουν το νέο απόγονο, του οποίου τα χρωμοσώματα αποτελούνται από το γενετικό υλικό των δύο χρωμοσωμάτων των γονέων. Το ποσό χρωμοσωμάτων σε κάθε γενεά κρατιέται σταθερό. Τα τέκνα δημιουργούνται μέσω της διαδικασίας της διασταύρωσης και της μετάλλαξης. Η διασταύρωση που συνήθως παρουσιάζετε με πιθανότητα p_c επιλέγει ένα ή περισσότερα σημεία διασταύρωσης στο χρωμόσωμα κάθε γονέα. Καταυτό τον τρόπο τα δύο τέκνα μοιράζονται τα χαρακτηριστικά των γονέων τους. Οι μεταλλάξεις είναι τυχαίες αλλαγές χαμηλής πιθανότητας p_m (τυπικά γύρω στο 0,05), οι οποίες μπορούν να εμφανιστούν σε κάποια θέση ενός χρωμοσώματος.

Καταλληλότητα: Η αντικειμενική συνάρτηση η οποία καθορίζει τον στόχο βελτιστοποίησης, ονομάζεται συνάρτηση κόστους ή συνάρτηση καταλληλότητας. Η συνάρτηση κόστους δέχεται ως είσοδο ένα χρωμόσωμα και επιστρέφει έναν αριθμό που υποδηλώνει πόσο κατάλληλο είναι, δηλαδή αναθέτει μία τιμή σε κάθε χρωμόσωμα του πληθυσμού. Η τιμή αυτή αποτελεί κριτήριο για το πόσο ικανοποιητική είναι η λύση που αντιπροσωπεύει το κάθε χρωμόσωμα στην συγκεκριμένη φάση. Συγκεκριμένα το πεδίο τιμών της συνάρτησης είναι συνήθως

από το 0 έως το 1 (ανάλογα με την υλοποίηση αυτό μπορεί να διαφέρει). Τιμή ίση με 1 σημαίνει ότι το συγκεκριμένο χρωμόσωμα είναι τέλειο, δηλαδή ικανοποιεί όλες τις προϋποθέσεις του προβλήματος και αποτελεί αποδεκτή λύση.

4.8 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

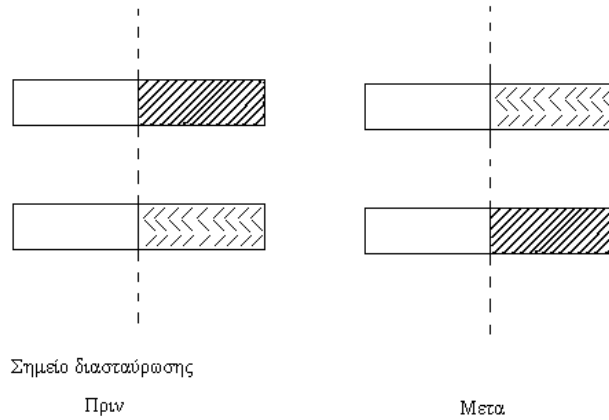
Οι γενετικοί αλγόριθμοι, όπως έχουμε αναφέρει, είναι τεχνικές αναζήτησης γενικού σκοπού που βασίζονται σε αρχές εμπνευσμένες από τους μηχανισμούς γενετικής εξέλιξης που παρατηρούνται σε πληθυσμούς φυσικών συστημάτων και ζωντανών οργανισμών. Τυπικά, υπάρχουν διάφορα στάδια στη διαδικασία βελτιστοποίησης:

- Στάδιο 1. Δημιουργία αρχικού πληθυσμού
- Στάδιο 2. Αξιολόγηση αντικειμενικής συνάρτησης
- Στάδιο 3. Δημιουργία νέων πληθυσμών

4.8.1 Τελεστές

Διάφοροι τελεστές χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση των διαφόρων σταδίων του γενετικού αλγορίθμου: ο τελεστής παραγωγής ή ελιτισμού, ο τελεστής διασταύρωσης, και ο τελεστής μετάλλαξης. Ο τελεστής παραγωγής είναι υπεύθυνος για την παραγωγή αντιγράφων κάθε ατόμου που ικανοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση. Δηλαδή, είτε περνούν το 'τεστ ικανότητας' της αντικειμενικής συνάρτησης είτε αλλιώς εξαλείφονται από τον χώρο των λύσεων.

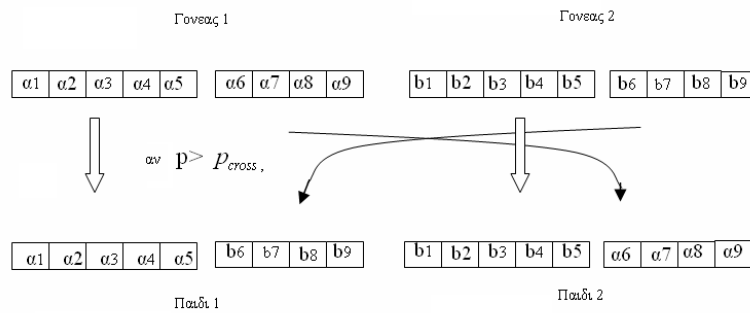
Τελεστής Διασταύρωσης: Ο τελεστής διασταύρωσης χρησιμοποιείται για την ανασύνδεση των ατόμων μέσα στον πληθυσμό. Ο τελεστής επιλέγει δύο άτομα μέσα στην τρέχουσα γενιά και εκτελεί τυχαία ή δεδομένη εναλλαγή μεταξύ των στοιχείων της ακολουθίας κάθε οντότητας (σχήμα 4.3). Σκοπός της διαδικασίας διασταύρωσης είναι η συλλογή στοιχείων από τις ακολουθίες των γονέων που θα προσδώσουν βελτιωμένη απόδοση στους απόγονους. Η βεβαιότητα ότι παράγονται καλύτεροι απόγονοι μέσω της διαδικασίας της διασταύρωσης, αποτελεί ένα σημαντικό πλεονέκτημα των γενετικών αλγορίθμων.



Σχήμα 4.3: Ο τελεστής διασταύρωσης σε ένα ζεύγος συμβολοσειρών.

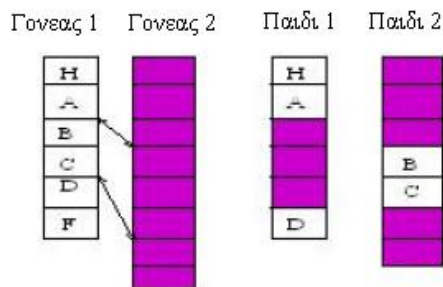
Συνοπτικά αναφέρεται ότι υπάρχουν διάφορες μέθοδοι διασταύρωσης όπως οι εξής:

Διασταύρωση ενός σημείου (simple crossover)



Σχήμα 4.4: Διαδικασία διασταύρωσης ενός σημείου

Αριθμητική διασταύρωση (arithmetical crossover)

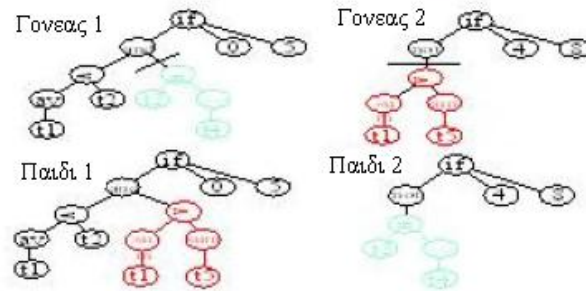


Σχήμα 4.5: Διαδικασία αριθμητικής (γραμμικής) διασταύρωσης

Ευριστική διασταύρωση (heuristic crossover)

Εδώ ο μοναδικός απόγονος, έστω x_3 , προκύπτει από τα χρωμοσώματα x_1 και x_2 από τη σχέση $x_3 = r \cdot (x_2 - x_1) + x_1$, όπου $r \in [0, 1]$.

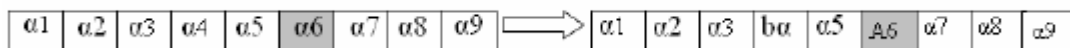
Διασταύρωση δέντρου (tree crossover)



Σχήμα 4.6: Διαδικασία διασταύρωσης δέντρου

Τελεστής Μετάλλαξης: Τέλος, ο τελεστής μετάλλαξης χρησιμοποιείται ως ένας διερευνητικός μηχανισμός που βοηθάει στην εξεύρεση ενός ολικού βέλτιστου στο πρόβλημα της βελτιστοποίησης. Βασικά, χρησιμοποιείται για την τυχαία εξερεύνηση του χώρου των λύσεων, αλλάζοντας τα στοιχεία των ακολουθιών των υποψήφιων λύσεων του πληθυσμού (σχήμα 4.7). Υπάρχει ένας προφανής συμβιβασμός όσο αναφορά την τιμή (πιθανότητα) του τελεστή μετάλλαξης. Εάν η τιμή είναι μεγάλη, τότε ο αλγόριθμος θα καταλήξει σε μια τελείως τυχαία αναζήτηση με αποτέλεσμα την απώλεια σημαντικής πληροφορίας. Από την άλλη μεριά, μια μικρή τιμή του τελεστή μετάλλαξης θα οδηγήσει σε ελλιπή σάρωση του χώρου λύσεων.

$$\text{εαν } p > P_{\text{mutation}}$$



Σχήμα 4.7: Διαδικασία τυχαίας μετάλλαξης

Συνοπτικά αναφέρεται ότι υπάρχουν διάφορες μέθοδοι διασταύρωσης όπως οι εξής:

- Ομοιόμορφη μετάλλαξη (Uniform mutation)
- Οριακή μετάλλαξη (Boundary mutation)
- Ανομοιόμορφη μετάλλαξη (Non-Uniform mutation)

4.8.2 Υλοποίηση απλού γενετικού αλγόριθμου

Κατά τη διάρκεια των διαδοχικών επαναλήψεων, που ονομάζονται γενιές, αξιολογούνται τα χρωμοσώματα με τη χρήση κάποιων μέτρων καταλληλότητας. Για τη δημιουργία νέας γενιάς σχηματίζονται απόγονοι με τους εξής τρόπους:

1. Συγχωνεύονται δύο χρωμοσώματα της τρέχουσας γενιάς με τη χρήση του τελεστή διασταύρωσης
2. Τροποποιείται ένα χρωμόσωμα μέσω του τελεστή μετάλλαξης.

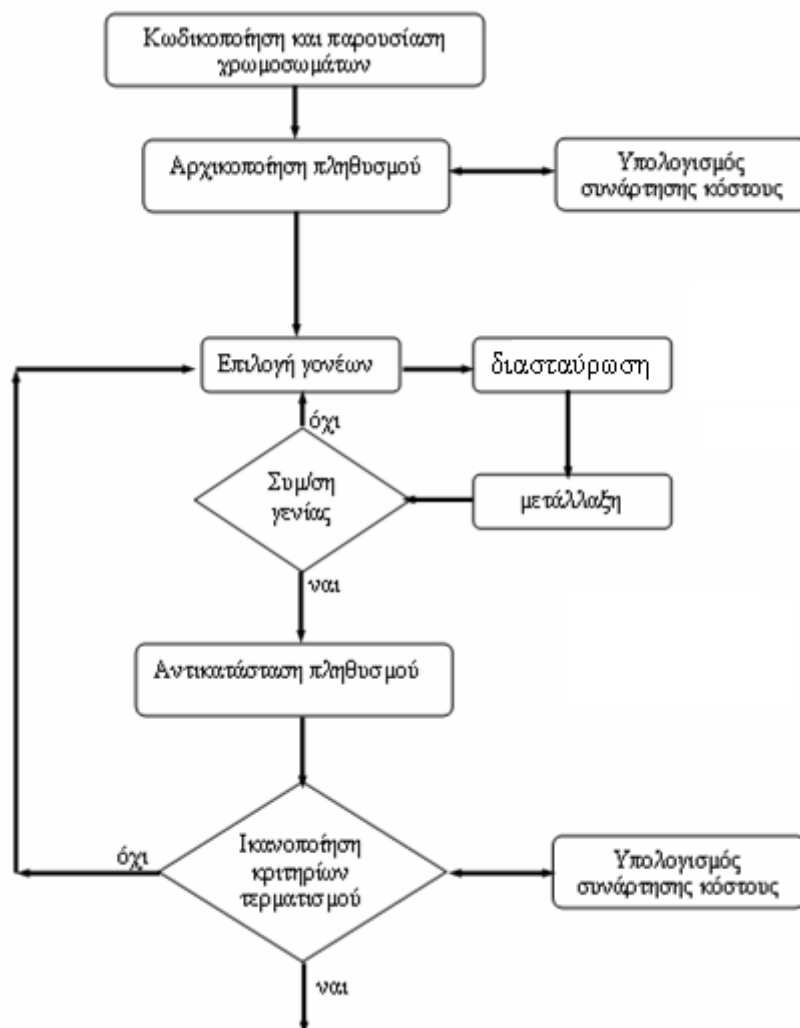
Μια νέα γενιά σχηματίζεται ως εξής:

1. Επιλέγονται, σύμφωνα με τη καταλληλότητα τους, μερικοί από τους γονείς και τους απογόνους και,
2. Απορρίπτονται κάποια χρωμοσώματα ώστε να διατηρηθεί σταθερός ο αριθμός του πληθυσμού. Τα χρωμοσώματα με μεγαλύτερη καταλληλότητα έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες να επιλεγθούν.

Μετά από αρκετές επαναλήψεις, ο αλγόριθμος συγκλίνει στο καταλληλότερο χρωμόσωμα, το οποίο ελπίζουμε να είναι και η βέλτιστη λύση του προβλήματος. Αν θεωρήσουμε τα $P(t)$ και $C(t)$ ως τους γονείς και τους απογόνους αντίστοιχα, για την στιγμή t , τότε η γενική δομή του γενετικού αλγορίθμου φαίνεται στην παρακάτω διαδικασία:

```
Begin  
   $T \leq 0$  :  
    initialize  $P(t)$ ;  
    evaluate  $P(t)$ ;  
    while (not termination condition) do  
      recombine  $P(t)$  to yield  $C(t)$ ;  
      evaluate  $C(t)$ ;  
      select  $P(t)$  to yield  $C(t)$   
       $t = t + 1$ ;  
    end  
end
```

Το διάγραμμα βαθμίδων του παραπάνω αλγορίθμου φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 4.8: Διάγραμμα βαθμίδων γενετικού αλγορίθμου

Στο σημείο αυτό θα περιγράψουμε λίγο πιο αναλυτικά την λειτουργία του γενετικού αλγόριθμου, με τη βοήθεια κιάλας του παραπάνω διαγράμματος.

Όπως βλέπουμε, αρχικά, δημιουργείται τυχαία ένας αριθμός M λύσεων κωδικοποιημένων υπό τη μορφή συμβολοσειρών (συνήθως δυαδικών) που αναπαριστούν τα φυσικά χρωμοσώματα. Η έννοια του πληθυσμού δίνει στους γενετικούς αλγόριθμους μοναδικά χαρακτηριστικά: οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι μέθοδος στοχαστικής βελτιστοποίησης που χρησιμοποιεί πολλές υποψήφιες λύσεις (μεγάλο πληθυσμό υποψήφιων λύσεων) ταυτόχρονα. Μετά τη δημιουργία του αρχικού πληθυσμού, κάθε μέλος του πληθυσμού αποκωδικοποιείται σε μία υποψήφια λύση του προβλήματος και ανατίθεται σε αυτή τη λύση μία τιμή “καταλληλότητας” μέσω μίας συνάρτησης ποιότητας που δίνει ένα μέτρο της ποιότητας της κάθε λύσης.

Στη συνέχεια επιλέγονται κατά ζεύγη μέλη του πληθυσμού για να αναπαραχθούν και να σχηματίσουν απογόνους (νέες λύσεις). Η επιλογή των ζευγών γίνεται πιθανοτικά, έτσι ώστε η πιθανότητα επιλογής της κάθε λύσης να είναι ανάλογη της “καταλληλότητας” της. Αυτό εγγυάται ότι οι λύσεις υψηλής ποιότητας θα επιλεγούν πολλές φορές και θα αποτελέσουν τους “γονείς” για πολλές νέες λύσεις, ενώ οι λύσεις χαμηλής ποιότητας θα συνεισφέρουν λιγότερο στο νέο πληθυσμό, με την πιθανότητα να μην επιλεγούν για αναπαραγωγή.

Όταν επιλεγούν οι δύο λύσεις-γονείς, οι συμβολοσειρές τους ανασυνδυάζονται για την παραγωγή μίας λύσης-απογόνου με τη χρήση των τελεστών που προσομοιώνουν αντίστοιχους γενετικούς μηχανισμούς. Η διασταύρωση ανασυνδυάζει τις συμβολοσειρές των γονέων παράγοντας έναν απόγονο που κληρονομεί χαρακτηριστικά και των δύο γονέων. Η διασταύρωση αν και αποτελεί το βασικό μηχανισμό αναζήτησης νέων λύσεων δεν είναι ωστόσο σε θέση να παράγει πληροφορία που δεν υπάρχει ήδη μέσα στον πληθυσμό. Η μετάλλαξη καλύπτει αυτή την ανάγκη εισάγοντας νέα πληροφορία στο νέο απόγονο. Η μετάλλαξη πραγματοποιείται με την τυχαία αλλαγή συμβόλων του νέου απογόνου. Γενικά η μετάλλαξη θεωρείται ως δευτερεύων, αλλά χρήσιμος τελεστής, ο οποίος δίνει μία μη μηδενική πιθανότητα για έλεγχο και αξιολόγηση, σε κάθε δυνατή λύση.

Όταν παραχθούν M νέες λύσεις, θεωρούνται ως η νέα γενιά και αντικαθιστούν πλήρως τους “γονείς” ώστε να προχωρήσει η εξέλιξη. Πολλές γενιές απαιτούνται ώσπου ο πληθυσμός να συγκλίνει στη βέλτιστη ή σε κοντινή της λύση, με τον αριθμό των γενιών να αυξάνεται ανάλογα με τη δυσκολία του προβλήματος βελτιστοποίησης.

4.9 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΑΔΙΑ ΑΠΛΟΥ Γ.Α.

Όπως βλέπουμε και από το διάγραμμα βαθμίδων του γενετικού αλγορίθμου (σχήμα 4.8) υπάρχουν κάποια βασικά στάδια κατά την εκτέλεσή του. Αυτά είναι τα εξής:

1. Κωδικοποίηση χρωμοσωμάτων
2. Αρχικοποίηση πληθυσμού
3. Υπολογισμός συνάρτησης καταλληλότητας
4. Επιλογή γονέων
5. Διασταύρωση
6. Μετάλλαξη

Από αυτά, οι τελεστές και η συνάρτηση καταλληλότητας έχουν ήδη αναλυθεί προηγουμένως. Στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικότερα η κωδικοποίηση και η επιλογή των γονέων.

4.9.1 Κωδικοποίηση

Κάθε χρωμόσωμα αναπαριστά μια δυνατή λύση του προβλήματος και θα πρέπει να εκφράζεται είτε σε δυαδική είτε σε πραγματική μορφή.

Οι πραγματικές τιμές μπορούν να προσεγγισθούν στον επιθυμητό βαθμό χρησιμοποιώντας δυαδική αναπαράσταση σταθερής υποδιαστολής. Εντούτοις, όταν η σχετική ακρίβεια των παραμέτρων είναι πιο σημαντική από την απόλυτη ακρίβεια, τότε προτιμούμε την χρησιμοποίηση των λογαρίθμων των παραμέτρων.

Οι διακριτές μεταβλητές απόφασης μπορούν να χειριστούν απευθείας μέσω δυαδικής κωδικοποίησης. Όταν αναμένουμε οι συναρτήσεις να είναι τοπικά μονότονες, τότε η χρήση της κωδικοποίησης Gray θεωρείται η καλύτερη δυνατή.

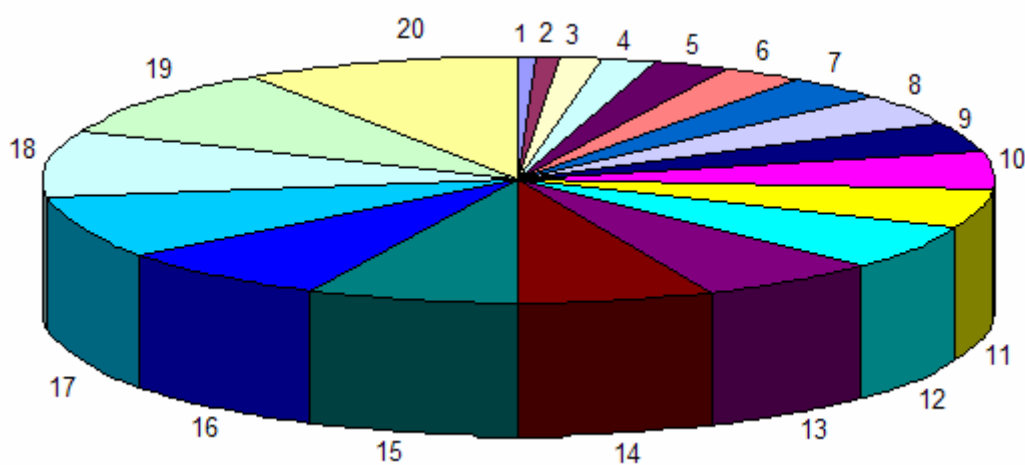
4.9.2 Επιλογή

Η επιλογή εισάγει την επίδραση της συνάρτησης κόστους στη διαδικασία βελτιστοποίησης με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων. Πρέπει να λάβει υπόψη της την τιμή της συνάρτησης κόστους του κάθε χρωμοσώματος καθώς αποτελεί μέτρο του βαθμού ικανοποίησης των κριτηρίων βελτιστοποίησης. Η επιλογή όμως δεν πρέπει να βασίζεται αποκλειστικά στην εκλογή του καλύτερου ατόμου της γενιάς καθώς αυτό μπορεί να μην βρίσκεται κοντά στην βέλτιστη λύση. Επιπρόσθετα πρέπει να επιλέγονται και μη ικανοποιητικές λύσεις έτσι ώστε τα γονίδια τα οποία περιέχουν τα

χρωμοσώματα αυτά να μην χαθούν πρώιμα από τον πληθυσμό. Σε πολλές περιπτώσεις η επιλογή περιλαμβάνει έναν μηχανισμό με τον οποίο συνδυάζεται η τιμή της συνάρτησης κόστους του κάθε χρωμοσώματος με την μέση τιμή της συνάρτησης κόστους του πληθυσμού. Σε κάθε περίπτωση διευκολύνει την αναπαραγωγή των βέλτιστων χρωμοσωμάτων σε σχέση με τα υπόλοιπα. Για την βελτιστοποίηση με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων έχει δημιουργηθεί ένα σύνολο μεθόδων επιλογής, οι οποίες είναι είτε στοχαστικές είτε ντετερμινιστικές. Παρακάτω αναφέρουμε τις πιο σημαντικές αυτές. Οι περιγραφές αυτές δεν καθορίζουν ποια μέθοδος πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε μία διαδικασία βελτιστοποίησης. Επίσης, αναφερόμαστε συχνά στην έννοια αναμενόμενη τιμή ($ExpVal(i,t)$) η οποία εκφράζει πόσες φορές θα επιλεγεί ένα άτομο για αναπαραγωγή.

Μέθοδος της ρουλέτας

Η πιθανότητα να επιλεγεί μία υπόθεση δίνεται από τον λόγο της καταλληλότητας της προς την καταλληλότητα άλλων υποθέσεων του τρέχον πληθυσμού. Συχνά αυτή η μέθοδος αποκαλείται μέθοδος της ρουλέτας. Μπορεί να αντιμετωπισθεί ως ρόδα ρουλέτας που περιέχει όλα τα χρωμοσώματα, στην οποία τα χρωμοσώματα που έχουν μια καλύτερη ικανότητα καταλαμβάνουν μια μεγαλύτερη περιοχή επιφάνειας της ρόδας με αποτέλεσμα να αποκτούν μια μεγαλύτερη πιθανότητα για να επιλεγούν.



Σχήμα 4.9: Σχηματική αναπαράσταση μεθόδου ρουλέτας.

Στο πιο πάνω σχήμα βλέπουμε σχηματικά αναπαράσταση της μεθόδου της ρουλέτας όπου κάθε άτομο καταλαμβάνει εμβαδόν κυκλικού τομέα ανάλογο της καταλληλότητάς του. Γίνεται επιλογή του ατόμου με την μεγαλύτερη δυνατή καταλληλότητα.

Υπάρχουν και άλλες στρατηγικές επιλογής εκτός από την μέθοδο της ρουλέτας, όπως ο αποδεκατισμός πληθυσμού και η μέθοδος των ομίλων. Η μέθοδος

της ρουλέτας έχει σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα με την μέθοδο του αποδεκατισμού πληθυσμού, πράγμα το οποίο θα δούμε αναλυτικότερα πιο κάτω. Η διαφοροποίηση μεταξύ των δύο αυτών μεθόδων είναι ότι με τη μέθοδο της ρουλέτας εξακολουθεί να υπάρχει μια μικρή πιθανότητα, τα άτομα με μικρότερη καταλληλότητα να συμμετέχουν σε κάποιες διασταυρώσεις διατηρώντας έτσι το γενετικό υλικό τους στις μελλοντικές γενιές.

Αποδεκατισμός πληθυσμού (Population Decimation)

Η απλούστερη ντετερμινιστική μέθοδος είναι η επιβίωση των χρωμοσωμάτων με την βέλτιστη τιμή συνάρτησης κόστους, ενώ παράλληλα απομακρύνονται τα άτομα με την χειρότερη τιμή. Ο πληθυσμός αποδεκατίζεται πριν ξαναδημιουργηθεί μέσω της αναπαραγωγής. Τα άτομα κατατάσσονται σύμφωνα με την τιμή της συνάρτησης κόστους από τη μεγαλύτερη στη μικρότερη. Μια αυθαίρετη τιμή επιλέγεται σαν τιμή κατωφλίου και τα χρωμοσώματα με συνάρτηση κόστους χαμηλότερη από αυτή, απομακρύνονται από τον πληθυσμό. Τα υπόλοιπα άτομα χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία της νέας γενιάς, με τυχαίο συνδυασμό και αναπαραγωγή, τα οποία συνεχίζονται μέχρι να συμπληρωθεί η γενιά.

Ο αποδεκατισμός του πληθυσμού χαρακτηρίζεται ως ντετερμινιστική μέθοδος καθώς τα άτομα που αποκλείονται από τον πληθυσμό επιλέγονται βάση κάποιας ντετερμινιστικής σύγκρισης μεταξύ των τιμών της συνάρτησης κόστους και μιας αυθαίρετης τιμής κατωφλίου. Σε μια παραλλαγή της μεθόδου αυτής, μπορούμε να δημιουργήσουμε πριν τον αποδεκατισμό έναν αριθμό ατόμων με τυχαίο ταίριασμα, να τα προσθέσουμε στον πληθυσμό και έπειτα να χρησιμοποιήσουμε τον αποδεκατισμό για να επαναφέρουμε τον πληθυσμό στο αρχικό του μέγεθος. Σε κάθε περίπτωση η επίδραση της συνάρτησης κόστους λαμβάνει μέρος μόνο κατά την διάρκεια της ντετερμινιστικής διαδικασίας αποδεκατισμού.

Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η απλότητα της, ενώ το μειονέκτημα της είναι ότι εάν ένα χρωμόσωμα απομακρυνθεί από τον πληθυσμό, τα γενετικά χαρακτηριστικά που εμπεριείχε έχουν χαθεί για πάντα. Η απώλεια διαφοροποίησης στον πληθυσμό συμβαίνει σε όλες τις μεθόδους επιλογής, απλά στην συγκεκριμένη αυτό συμβαίνει πολύ πριν η διαδικασία εξέλιξης αναγνωρίσει την χρησιμότητα κάποιου συγκεκριμένου χαρακτηριστικού ενός χρωμοσώματος που έχει χαθεί. Δυστυχώς τα καλά γενετικά χαρακτηριστικά μπορεί να μην συνδέονται άμεσα με την τιμή της συνάρτησης κόστους σε πρώιμα στάδια του γενετικού. Όταν ένα χαρακτηριστικό απομακρυνθεί από τον πληθυσμό ο μόνος τρόπος για να επανέλθει σε αυτόν είναι μέσω της μετάλλαξης.

Εξαιτίας των επιζήμιων επιδράσεων της πρώιμης απώλειας των γενετικών χαρακτηριστικών που έχουν οι ντετερμινιστικές μέθοδοι, δημιουργήθηκαν οι στοχαστικές μέθοδοι επιλογής.

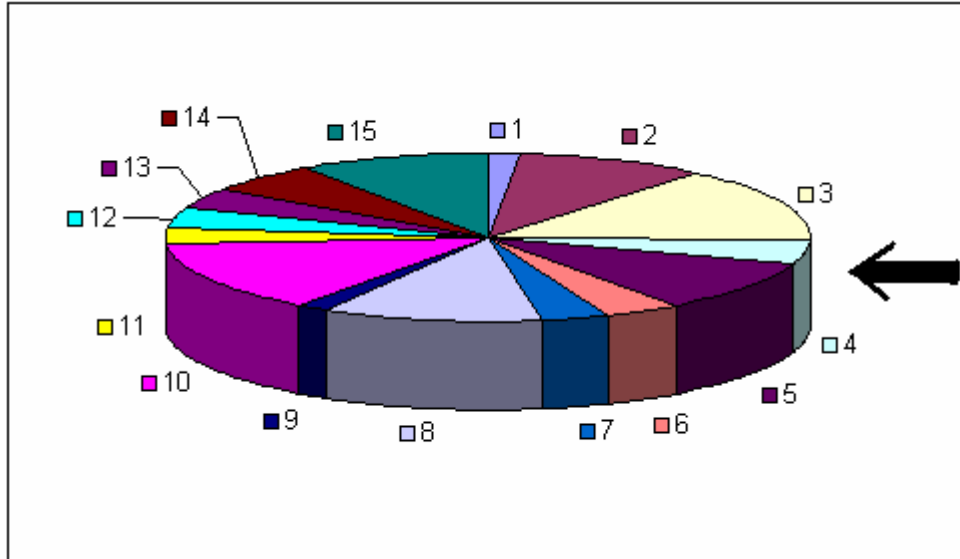
Αναλογική Επιλογή (Proportionate Selection)

Η αναλογική επιλογή αποτελεί την πιο δημοφιλή στοχαστική μέθοδο επιλογής και ονομάζεται αλλιώς επιλογή ρουλέτας. Στην αναλογική επιλογή τα άτομα επιλέγονται βάσει μιας πιθανότητας επιλογής που δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$P_{selection} = \frac{f(parent_i)}{\sum_i f(parent_i)} \quad (4.1)$$

όπου $f(parent_i)$ είναι η τιμή της συνάρτησης κόστους του $i^{\text{οστού}}$ γονέα.

Η πιθανότητα να επιλεγεί ένα άτομο από τον πληθυσμό είναι συνάρτηση της σχετικής τιμής της συνάρτησης κόστους του ατόμου. Χρωμοσώματα με μεγάλη τιμή συνάρτησης κόστους, έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να συμμετέχουν στην δημιουργία του επόμενου πληθυσμού. Αυτό γενικότερα έχει το ίδιο αποτέλεσμα με την απομάκρυνση του χειρότερου χρωμοσώματος στον αποδεκατισμό πληθυσμού, το οποίο είναι, ότι γενετικά χαρακτηριστικά των καλύτερων χρωμοσωμάτων περνάνε στις επόμενες γενιές. Η διαφορά ανάμεσα στις δύο μεθόδους είναι ότι στην αναλογική επιλογή υπάρχει ακόμη μία μικρή πιθανότητα για τα άτομα με μικρή συνάρτηση κόστους, να μετέχουν στην αναπαραγωγική διαδικασία.



Σχήμα 4.10: Μέθοδος αναλογικής επιλογής

Το παραπάνω σχήμα απεικονίζει την μέθοδο της αναλογικής επιλογής, σαν μια ρουλέτα όπου στο κάθε χρωμόσωμα αντιστοιχεί χώρος ανάλογος της σχετικής συνάρτησης κόστους του. Η ρουλέτα “περιστρέφεται” και με τυχαίο τρόπο επιλέγεται το άτομο που θα μετέχει στην αναπαραγωγή του πληθυσμού. Η μέθοδος αυτή έχει σοβαρά στοχαστικά λάθη όταν ο πληθυσμός είναι μικρός. Επιπλέον ήδη από τα

πρώτα στάδια της βελτιστοποίησης κυριαρχούν τα πιο “ισχυρά” χρωμοσώματα, ενώ στα τελευταία στάδια παρουσιάζεται στασιμότητα στη διαδικασία εξαιτίας της αδυναμίας της να αναγνωρίσει τα καλύτερα χρωμοσώματα, όταν όλα τα άτομα έχουν σχεδόν την ίδια συνάρτηση κόστους. Για την αντιμετώπιση των φαινομένων αυτών έχουν δημιουργηθεί διάφορες παραλλαγές της μεθόδου.

Ένας εύκολος τρόπος υλοποίησης της αναλογικής επιλογής πραγματοποιείται σε τρία στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι η επιλογή ενός τυχαίου αριθμού μεταξύ 0 και 1. Το δεύτερο στάδιο είναι ο υπολογισμός της κανονικοποιημένης τιμής της συνάρτησης κόστους για κάθε άτομο του πληθυσμού, η οποία δίνεται από την παραπάνω σχέση. Τέλος αθροίζουμε τις κανονικοποιημένες τιμές της συνάρτησης κόστους, αυξάνοντας παράλληλα έναν δείκτη σε κάθε άθροιση, μέχρι το άθροισμα να γίνει μεγαλύτερο ή ίσο της τυχαίας τιμής που επιλέξαμε στο πρώτο στάδιο. Η τιμή του δείκτη στην οποία έχει σταματήσει η άθροιση μας δείχνει το επιλεγόμενο χρωμόσωμα.

Επιλογή “τουρνουά” (Tournament Selection)

Η μέθοδος “τουρνουά” αποτελεί τη δεύτερη πιο δημοφιλή μέθοδο επιλογής. Σε αυτή N άτομα επιλέγονται τυχαία από τον πληθυσμό. Η επιλογή πραγματοποιείται διαλέγοντας έναν αριθμό από το ένα έως τον αριθμό των ατόμων του πληθυσμού. Ο αριθμός αυτός καθορίζει το χρωμόσωμα που θα πάρει μέρος στο τουρνουά και η διαδικασία συνεχίζει έως ότου να συμπληρώσουμε τα N άτομα της ομάδας. Εναλλακτικά μπορούμε να επιλογή ρουλέτα για να συμπληρώσουμε την ομάδα (Wetzel ranking).

Για κάθε μέλος της ομάδας αυτής έπειτα υπολογίζεται η τιμή της συνάρτησης κόστους και το χρωμόσωμα με τη μεγαλύτερη τιμή κερδίζει το τουρνουά και γίνεται ο επίλεκτος. Τα υπόλοιπα μέλη της ομάδας επιστρέφουν στον αρχικό πληθυσμό και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Η πιο συνηθισμένη μορφή τουρνουά είναι αυτή όπου το N είναι ίσο με δύο δηλαδή η κάθε ομάδα αποτελείται από δύο χρωμοσώματα.

Η ταξινόμηση της ομάδας με βάση τη τιμή της συνάρτησης κόστους, μας βοηθάει να βρούμε το άτομο με την υψηλότερη τιμή και να διαλέξουμε τον γονέα

Η μέθοδος “τουρνουά” όπως και η αναλογική χρησιμοποιούν επιλογή με αντικατάσταση ώστε τα άτομα να παίζουν περισσότερες από μία φορές το ρόλο του γονέα. Κάτι τέτοιο συμβαίνει πολύ συχνά όταν ο πληθυσμός συγκλίνει στη βέλτιστη λύση. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου “τουρνουά” είναι ότι παρουσιάζει καλύτερη σύγκλιση σε μία λύση στα πρώτα στάδια του αλγόριθμου και είναι γενικότερα πιο γρήγορη. Η πολυπλοκότητα χρόνου για την αναλογική είναι $O(n^2)$ ενώ για τη μέθοδο τουρνουά $O(n)$

Ελιτισμός (Elitism)

Τον ελιτισμό εισήγαγε πρώτος ο Kenneth De Jong το 1975 και ανήκει στη κατηγορία των μεθόδων επιλογής που αναγκάζουν τον γενετικό αλγόριθμο να κρατάει έναν αριθμό των καλύτερων ατόμων της κάθε γενιάς. Τα άτομα αυτά μπορεί να καταστραφούν με τη μετάλλαξη και τον επιχιασμό αν επιλεγούν για αναπαραγωγή ή να χαθούν αν δεν επιλεγούν καθόλου, για αυτό και ο αλγόριθμος τα μεταφέρει αυτούσια στην επόμενη γενιά.

Επιλογή βαθμονόμησης (rank selection)

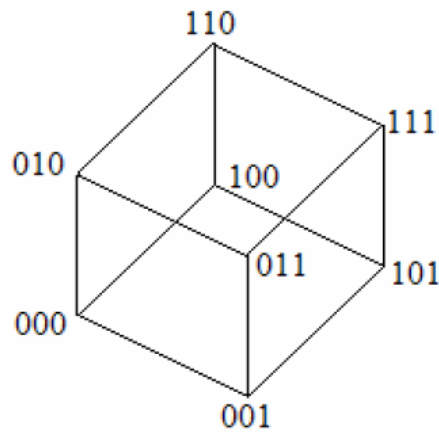
Η εισαγωγή της μεθόδου γραμμικής βαθμονόμησης έγινε με σκοπό την αποτροπή του φαινομένου της πρώιμης σύγκλισης. Η μέθοδος αυτή μειώνει την πίεση της επιλογής όταν η διασπορά των τιμών της συνάρτησης κόστους είναι μεγάλη και την αυξάνει σε αντίθετη περίπτωση. Σύμφωνα με τον Baker(1985) τα άτομα του πληθυσμού βαθμολογούνται σε αναλογία με τη τιμή της συνάρτησης κόστους. Εάν ο πληθυσμός αποτελείται από N άτομα, το λιγότερο κατάλληλο θα βαθμολογηθεί με 1 ενώ το καλύτερο με N . Ο χρήστης επιλέγει την μέγιστη (Max) αναμενόμενη τιμή του καλύτερου χρωμοσώματος της κάθε γενιάς, με βαθμό N , όπου $Max \geq 0$.

Επιλογή σταθερής κατάστασης (Steady-state selection)

Η επιλογή σταθερής κατάστασης αντικαθιστά λίγα άτομα σε κάθε γενιά και όχι όλα όπως πολλές από τις μεθόδους που είδαμε μέχρι τώρα. Ένας μικρός αριθμός των λιγότερο κατάλληλων ατόμων αντικαθίσταται από απογόνους των πιο ισχυρών χρωμοσωμάτων.

4.10 ΘΕΩΡΙΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Δύο προσεγγίσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται για την ερμηνεία της λειτουργίας των γενετικών αλγορίθμων είναι η θεωρία σχημάτων και η υπόθεση δομικών τετραγώνων. Στην θεωρία σχημάτων, σχήμα θεωρείται ένα πρότυπο ομοιότητας περιγράφοντας ένα υποσύνολο των σειρών με τις ομοιότητες σε ορισμένες θέσεις σειράς. Για τη συζήτηση θα περιοριστούμε χωρίς απώλεια γενικότητας στο δυαδικό αλφάβητο. Πιο ακριβές ένα σχήμα είναι οποιαδήποτε σειρά που αποτελείται από μηδενικά, άσσους και από αστερίσκους (*). Το σύμβολο "*" παριστάνει την περίπτωση "δεν με ενδιαφέρει".



Σχήμα 4.11: Τρισδιάστατος (κυβικός) χώρος.

Υποθέτοντας ότι στον τρισδιάστατο (κυβικό) χώρο, η λύση ενός προβλήματος μπορεί να παρασταθεί με τρία δυαδικά ψηφία, τότε η κορυφές του κύβου του σχήματος έχουν τις τιμές 000, 001, 101, 100, 010, 011, 111, 110. Εύκολα παρατηρούμε ότι οι γειτονικές κορυφές διαφέρουν μόνο κατά ένα ψηφίο. Η μια πλευρά του κύβου μπορεί να παρασταθεί από την ειδική ακολουθία 0*. Άρα είναι ένα σχήμα αφού περιέχει ένα ή περισσότερα '*'. Κάθε σχήμα λοιπόν αποτελεί ένα υπερεπίπεδο του χώρου αναζήτησης της λύσης του προβλήματος. Μπορεί να προσαρμόσει 2^r ακολουθίες όπου r είναι ο αριθμός των '*' σ' ένα σχήμα. Κάθε δυαδική παράσταση αποτελεί ένα χρωμόσωμα το οποίο αντιστοιχεί σε μία κορυφή στον υπερκύβο και είναι μέλος των $2^l - 1$ διαφορετικών υπερεπιπέδων. Όπου l είναι το μήκος της δυαδικής κωδικοποίησης (λέξης). Ολόκληρος ο χώρος αναζήτησης μπορεί να ορισθεί από 3^l υπερεπίπεδα.

Έστω ότι η συνάρτηση $m(s,t)$ δείχνει τον αριθμό των περιπτώσεων του σχήματος s στον πληθυσμό στο χρόνο t . Το θεώρημα σχημάτων περιγράφει την αναμενόμενη τιμή των $m(s,t+1)$ υπό μορφή όρων $m(s,t)$ και άλλων ιδιοτήτων των σχημάτων, του πληθυσμού και των παραμέτρων των γενετικών αλγορίθμων.

Ο γενετικός αλγόριθμος είναι μια αναζήτηση (έρευνα) η οποία στηρίζεται σε πληθυσμούς. Ένα πληθυσμός από δειγματικά σημεία παρέχει πληροφορίες για μεγάλο αριθμό υπερεπιπέδων. Στους γενετικούς αλγόριθμους υπάρχει ενδογενής παραλληλισμός. Κάθε φορά καθώς αξιολογείται μια απλή ακολουθία, αξιολογούνται με έμμεσο τρόπο και άλλα διαφορετικά υπερεπίπεδα. Τη στατιστική πληροφορία όμως για οποιοδήποτε συγκεκριμένο υποσύνολο υπερεπιπέδων δίνει το συσσωρευτικό αποτέλεσμα αξιολόγησης ενός πληθυσμού σημείων.

Η εξέλιξη του πληθυσμού στους γενετικούς αλγόριθμους, εξαρτάται από την βήμα επιλογής, το βήμα επανασυνδιασμού και το βήμα μετάλλαξης. Έστω $f(h)$ η καταλληλότητα ενός μεμονωμένου στη σειρά ψηφίου του σχήματος h και $\bar{f}(t)$ η μέση ικανότητα όλων των ατόμων στον πληθυσμό στο χρόνο t . Ακόμα n ο συνολικός αριθμός των ξεχωριστών ψηφίων στον πληθυσμό και ότι το μεμονωμένο h είναι αντιπρόσωπος του σχήματος s και μέλος του πληθυσμού στο χρόνο t . Η $u^{\wedge}(s,t)$

εκφράζει την μέση καταλληλότητα των περιπτώσεων του σχήματος s στον πληθυσμό τη χρονική στιγμή t .

Ενδιαφερόμαστε για τον υπολογισμό της αναμενόμενης αξίας του $m(s, t + 1)$ που μας δίνουν το $E[m(s, t + 1)]$. Μπορούμε να υπολογίσουμε $E[m(s, t + 1)]$ χρησιμοποιώντας τη διανομή πιθανότητας, για την επιλογή που δίνεται στην εξίσωση (4.1), η οποία μπορεί να διατυπώσει την τρέχουσα ορολογία μας ξανά ως εξής:

$$\Pr(h) = \frac{f(h)}{\sum_{i=1}^n f(h_i)} = \frac{f(h)}{n \cdot \bar{f}(h)} \quad (4.2)$$

Επιλέγοντας τώρα ένα μέλος από τον καινούριο πληθυσμό σύμφωνα με αυτήν την διανομή πιθανότητας, τότε η πιθανότητα να επιλεγεί αντιπρόσωπος του σχήματος s είναι:

$$\Pr(h \in s) = \sum_{h \in s \cap p_t} \frac{f(h)}{n \cdot \bar{f}(h)} = \frac{\hat{u}(s, t)}{n \bar{f}(t)} m(s, t) \quad (4.3)$$

Στην συνέχεια από τον καθορισμό ότι:

$$\hat{u}(s, t) = \frac{\sum_{h \in s \cap p_t} f(h)}{m(s, t)} \quad (4.4)$$

η εξίσωση (4.3) δίνει την πιθανότητα μια μόνο υπόθεση θα επιλεγεί από τον ΓΑ να είναι μία εμφάνιση του σχήματος s . Ο αναμενόμενος αριθμός εμφανίσεων του s από n ανεξάρτητα βήματα επιλογής, τα οποία δημιουργούν ολόκληρη την επόμενη γενιά είναι απλά n φορές την πιθανότητα αυτή.

$$E[m(s, t + 1)] = \frac{\hat{u}(s, t)}{\bar{f}(t)} m(s, t) \quad (4.5)$$

Όπως φαίνεται από την εξίσωση (4.5) δηλώνει ότι ο αναμενόμενος αριθμός των εμφανίσεων του σχήματος s στην επόμενη γενιά είναι ανάλογος της μέσης καταλληλότητας $\hat{u}(s, t)$ των περιπτώσεων του συγκεκριμένου σχήματος την χρονική στιγμή t και αντιστρόφως ανάλογος στην μέση καταλληλότητα $\bar{f}(t)$ όλων των μελών του πληθυσμού την ίδια χρονική στιγμή. Στα πιο πάνω η ανάλυση έγινε στηριζόμενη

μόνο στο βήμα επιλογής του γενετικού αλγορίθμου. Πρέπει όμως να ληφθεί υπόψη τόσο το βήμα διασταύρωσης όσο και το βήμα μετάλλαξης.

Το θεμελιώδες θεώρημα των γενετικών αλγορίθμων, στηριζόμενο στην θεωρία σχημάτων όπως διατυπώθηκε από τον Holland είναι:

$$E[m(s, t + 1)] \geq \frac{\hat{u}(s, t)}{\bar{f}(t)} m(s, t) \left(1 - p_{cross} \frac{d(s)}{l-1} \right) (1 - p_{mutation})^{o(s)} \quad (4.6)$$

όπου, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω p_{cross} και $p_{mutation}$ η πιθανότητες διασταύρωσης σ' ένα σημείο και μετάλλαξης αντίστοιχα. $O(s)$ είναι η τάξη του σχήματος ή αλλιώς ο αριθμός των θέσεων, όπου τα 0 και 1 είναι καθορισμένα, ενώ τα * όχι του σχήματος h , $d(s)$ το χαρακτηριστικό μήκος ή αλλιώς η απόσταση σε θέσεις μεταξύ της πρώτης και τελευταίας καθορισμένης θέσης του σχήματος. Το θεώρημα σχημάτων είναι ευρέως αναφερόμενο ως ο κύριος χαρακτηρισμός της εξέλιξης πληθυσμών μέσα στο γενετικό αλγόριθμο. Ένας λόγος για τον οποίο δεν είναι ολοκληρωμένο όμως είναι ότι αποτυγχάνει να εξετάσει τις πιθανές θετικές επίδραση της διασταύρωσης και της μετάλλαξης. Έχουν προταθεί προσφάτως πολυάριθμες θεωρητικές αναλύσεις, συμπεριλαμβανόμενου των αναλύσεων οι οποίες είναι βασισμένες στα Μαρκοβιανά μοντέλα αλυσίδων και στα στατιστικά μηχανικά μοντέλα.

4.11 Εφαρμογές

Παρουσιάζονται στη συνέχεια μερικές αντιπροσωπευτικές εφαρμογές των γενετικών αλγορίθμων.

I. Εύρεση μέγιστης τιμής αριθμητικών συναρτήσεων

Πρόκειται για την πιο καλά μελετημένη εφαρμογή των γενετικών αλγορίθμων. Η εύρεση του μέγιστου μιας συνάρτησης δεν είναι καθόλου εύκολη υπόθεση για συναρτήσεις πολλών μεταβλητών, οι οποίες εμφανίζουν ασυνέχειες, θόρυβο, κλπ. Το πλεονέκτημα που εμφανίζει η εφαρμογή τους σε αυτά τα προβλήματα είναι ότι η συνάρτηση καταλληλότητας είναι δεδομένη.

II. Επεξεργασία εικόνων

Οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση προτύπων, όπως ακμές, επιφάνειες, ακόμη και αντικείμενα, σε ψηφιοποιημένες εικόνες. Το

αποτέλεσμα αυτής της επεξεργασίας μπορεί να αποτελέσει τη βάση για την ψηφιακή όραση.

III. Σχεδίαση

Οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη σχεδίαση κατασκευών και εξαρτημάτων, όπως π.χ. γέφυρες, μηχανολογικά εξαρτήματα, όπου ζητούμενο μπορεί να είναι τόσο η εύρεση μιας λύσης, όσο και η βελτιστοποίηση της. Οι αλγόριθμοι μπορούν να δοκιμάσουν συνδυασμούς και ιδέες που ο ανθρώπινος νους δε θα δοκίμαζε ποτέ, δίνοντας ενίοτε πρωτότυπα αποτελέσματα.

IV. Μηχανική μάθηση

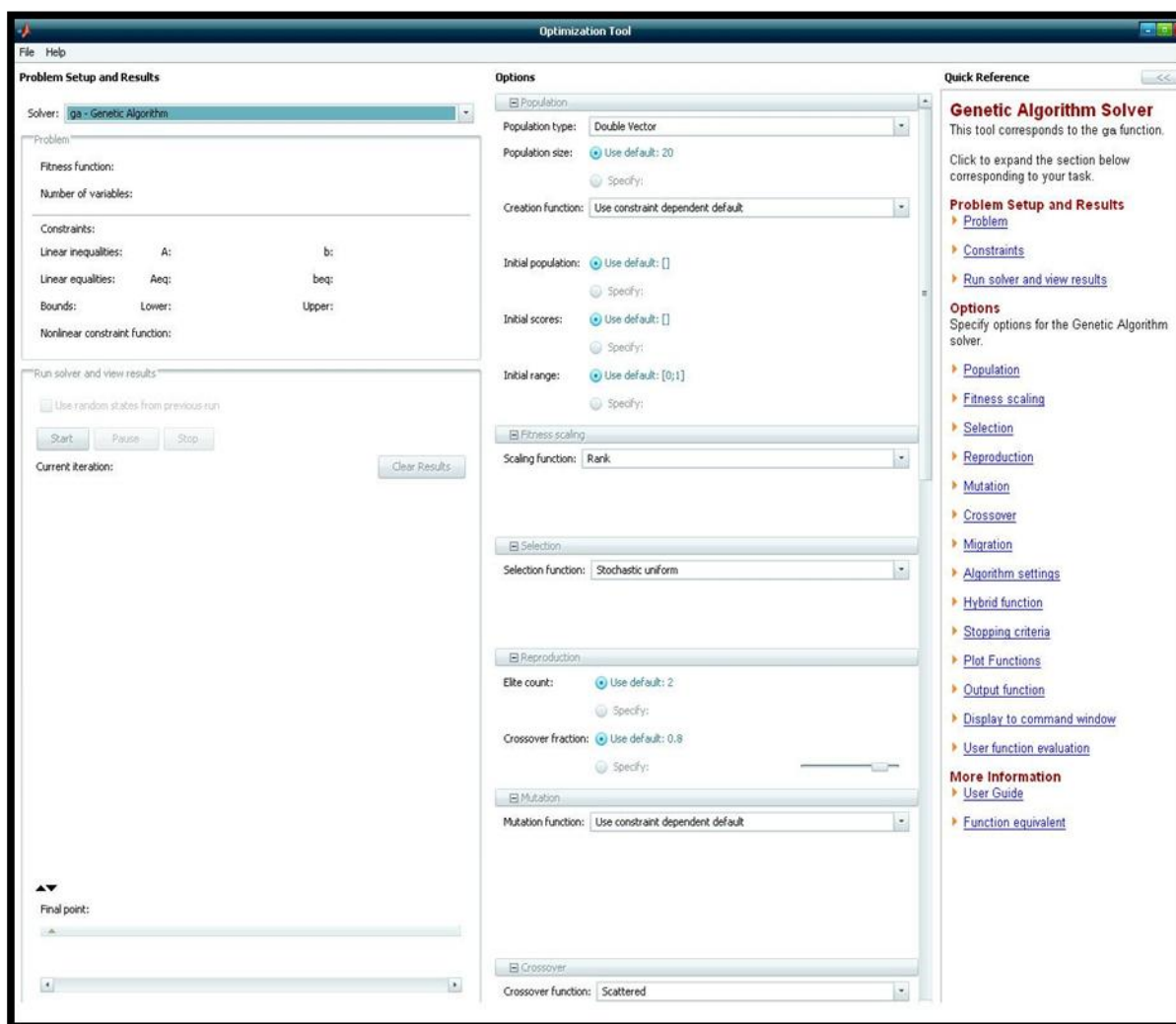
Στα συστήματα μηχανικής μάθησης οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανακάλυψη κανόνων *if...then...* Η πιο γνωστή εφαρμογή είναι αυτή των *συστημάτων κατηγοριοποίησης (classified systems)*, ωστόσο οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν χρησιμοποιηθεί και σε παιχνίδια, επίλυση λαβυρίνθων, καθώς και για πολιτικές και οικονομικές αναλύσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ GA TOOLBOX ΤΗΣ MATLAB ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

5.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ GA TOOLBOX ΤΗΣ MATLAB

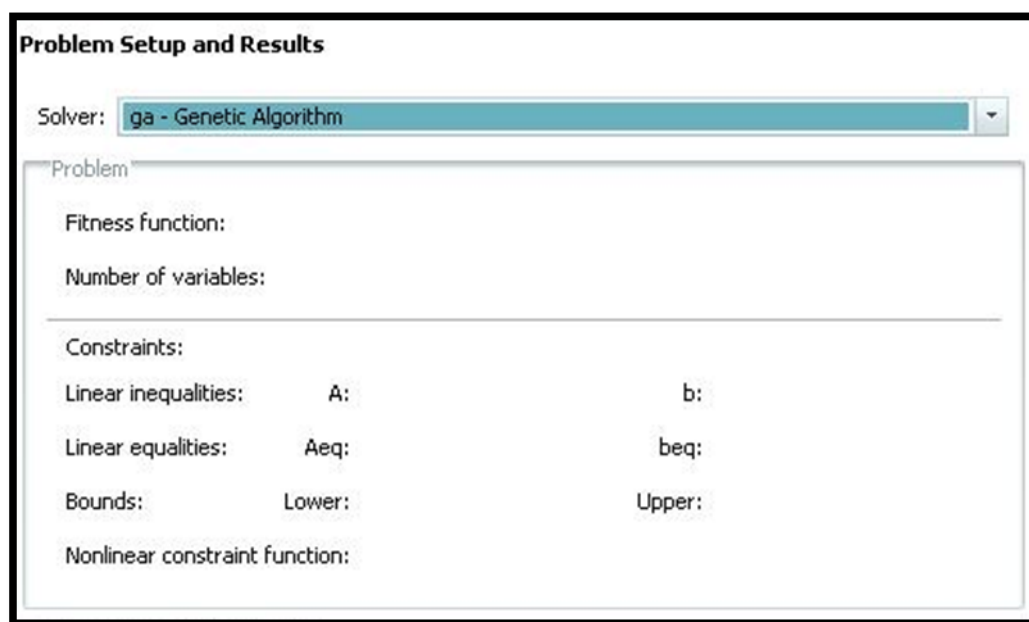
Το MatLab διαθέτει μια σειρά εργαλειοθηκών (toolboxes) με τις οποίες επιτυγχάνει την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Μεταξύ αυτών υπάρχει και το GENETIC ALGORITHM TOOLBOX, η μορφή του οποίου φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 5.1: Εργαλειοθήκη γενετικών αλγορίθμων του MatLab

Όπως φαίνεται και παραπάνω το toolbox αποτελείται από δύο βασικά κομμάτια. Το πρώτο βρίσκεται στο αριστερό μέρος και σε αυτό ορίζουμε την συνάρτηση που θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε καθώς και όλους τους δυνατούς περιορισμούς που μπορεί από τους οποίους μπορεί να αποτελείται το πρόβλημα μας (γραμμικούς και μη γραμμικούς, ισοτικούς και ανισοτικούς).

Το κομμάτι αυτό παρουσιάζεται μεγεθυμένο παρακάτω:



Σχήμα 5.2: Ορισμός συναρτήσεων και περιορισμών του προβλήματος

Το δεύτερο κομμάτι βρίσκεται στο δεξί μέρος του toolbox και εκεί μπορούμε να ρυθμίσουμε τις διάφορες παραμέτρους του γενετικού αλγόριθμου, κάποιες από τις οποίες αναφέρθηκαν και προηγουμένως. Χαρακτηριστικά αναφέρω ότι μπορούμε να ρυθμίσουμε παραμέτρους που αφορούν τα εξής:

Πληθυσμός: ορίζουμε το είδος του πληθυσμού καθώς και το αρχικό του μέγεθος

Επιλογή: ορίζουμε το πώς επιλέγονται οι γονείς κάθε γενιάς

Διασταύρωση: ορίζουμε τον τρόπο αλλά και το ποσοστό διασταύρωσης των γονέων

Μετάλλαξη: ορίζουμε τον τρόπο μετάλλαξης καθώς επίσης και το ποσοστό αυτής

Τερματισμός: ορίζουμε τα κριτήρια τερματισμού του αλγορίθμου όπως μέγιστος χρόνος, μέγιστος αριθμός επαναλήψεων κτλ

Γραφικές: επιλέγουμε τις γραφικές παραστάσεις που επιθυμούμε όπως αυτή της βέλτιστης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης ή την καλύτερη τιμή της κάθε μεταβλητής συναρτήσεως των επαναλήψεων.

Options

Population

Population type:

Population size: Use default: 20
 Specify:

Creation function:

Initial population: Use default: []
 Specify:

Initial scores: Use default: []
 Specify:

Initial range: Use default: [0;1]
 Specify:

Fitness scaling

Selection

Reproduction

Mutation

Crossover

Migration

Algorithm settings

Initial penalty: Use default: 10
 Specify:

Penalty factor: Use default: 100
 Specify:

Hybrid function

Stopping criteria

Plot functions

Plot interval: 1

Best fitness Best individual Distance

Expectation Genealogy Range

Score diversity Scores Selection

Stopping Max constraint

Σχήμα 5.3: Ρύθμιση επιλογών για την εκτέλεση του γενετικού αλγόριθμου

5.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ Γ.Α. ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΗΣ Β.Ρ.Φ.

Στο τμήμα αυτό παρουσιάζεται η επίλυση της Β.Ρ.Φ για 2 προβλήματα με την βοήθεια του Γ.Α. Το πρώτο είναι ένα απλό πρόβλημα οικονομικής κατανομής φορτίου τεσσάρων γεννητριών. Το δεύτερο είναι ένα πιο σύνθετο πρόβλημα αφού αφορά τη βέλτιστη οικονομική κατανομή για ένα σύστημα εννέα ζυγών με 3 γεννήτριες και 3 φορτία (case9 της IEEE).

5.2.1 Απλό Πρόβλημα Οικονομικής Κατανομής Φορτίου

Έστω ότι έχουμε να λύσουμε το πρόβλημα οικονομικής κατανομής φορτίου τεσσάρων γεννητριών, όπου τα χαρακτηριστικά τους φαίνονται στον Πίνακα 3. Οι συντελεστές a_i , b_i , c_i του Πίνακα 3 είναι οι συντελεστές κατανάλωσης καυσίμου, ενώ η στήλη $Cost_i$ είναι το κόστος καυσίμου κάθε μίας από τις τέσσερις μονάδες παραγωγής. Έστω ότι οι γεννήτριες αυτές καλούνται να καλύψουν ζήτηση $P_D = 50$ MW.

i	Τύπος σταθμού	$P_{i,max}$ [MW]	$P_{i,min}$ [MW]	a_i [t/h ή m ³ /h]	b_i [t/MWh ή m ³ /MWh]	c_i [t/MW ² -h ή m ³ /MW ² -h]	$Cost_i$ [€/t ή €/m ³]
1	Ατμοηλεκτρικός	6,25	4,0	0,0	0,368	0,0	134,9963
2	Φυσικό αέριο	14,75	3,0	2,0938	0,24837	0,002270	360,9685
3	Νηξελοηλεκτρικός	12,28	3,0	0,3667	0,109	0,00425	134,9963
4	Ατμοηλεκτρικός	25,00	16,0	0,4053	0,2210	0,000643	134,9963

Πίνακας 5.1: Δεδομένα γεννητριών.

Η αντικειμενική συνάρτηση που πρέπει να ελαχιστοποιήσουμε είναι της γενικής μορφής που περιγράφηκε παραπάνω. Συγκεκριμένα κατασκευάστηκε το εξής m file:

```
function f=test2(x)

a=[0.0 2.0938 0.3667 0.4053]; % δεδομένα γεννητριών
b=[0.368 0.24837 0.109 0.2210];
c=[0.0 0.00227 0.00425 0.000643];
d=[134.9963 360.9685 134.9963 134.9963];

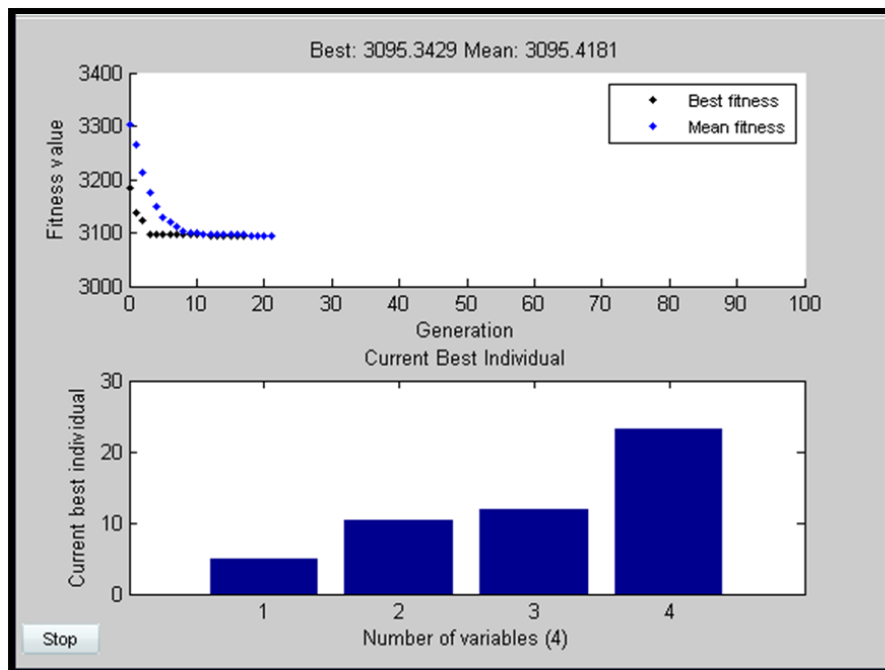
f=(d(1)*(a(1)+b(1)*x(1)+c(1)*x(1)^2)+ %αντικειμενική
    d(2)*(a(2)+b(2)*x(2)+c(2)*x(2)^2)+ %συνάρτηση
    d(3)*(a(3)+b(3)*x(3)+c(3)*x(3)^2)+
    d(4)*(a(4)+b(4)*x(4)+c(4)*x(4)^2));
```

Επίσης τα στοιχεία που καθορίζουν τους απαραίτητους περιορισμούς είναι τα εξής:

A = [1 1 1 1]; % Ισοζύγιο ισχύος
 Pd = 50;
 LB = [4 3 3 16]; % όρια γεννητριών
 UB = [6.25 14.75 12.28 25];

Τα δεδομένα αυτά τα τοποθετούμε στα αντίστοιχα πεδία του GA toolbox και τρέχουμε τον αλγόριθμο τρεις φορές, με διαφορετικές επιλογές κάθε φορά, ώστε να δούμε πως αυτές επηρεάζουν την τελική λύση. Ακολουθούν τα αποτελέσματα με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις.

Για μέγεθος πληθυσμού 20, 20 γενιές-επαναλήψεις και τις υπόλοιπες επιλογές στις προεπιλεγμένες (default) τιμές τους έχουμε τα εξής αποτελέσματα:

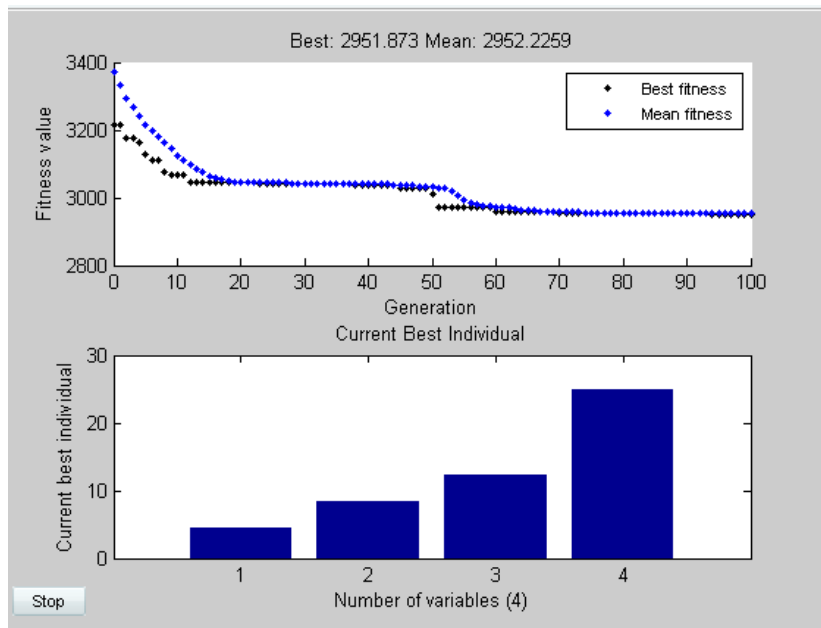


Σχήμα 5.4: Βέλτιστες τιμές για 20 γενιές και πληθυσμό

Από την παραπάνω γραφική παράσταση βλέπουμε ότι το βέλτιστο διάνυσμα λύσης είναι $P=[4,74 \ 10,27 \ 11,78 \ 23,17]$ σε MW και βέλτιστη οικονομικά λύση η :

F=3095.34 ευρώ/h

Για μέγεθος πληθυσμού 100 , 100 γενιές-επαναλήψεις και τις υπόλοιπες επιλογές στις προεπιλεγμένες (default) τιμές τους, έχουμε τα εξής αποτελέσματα:

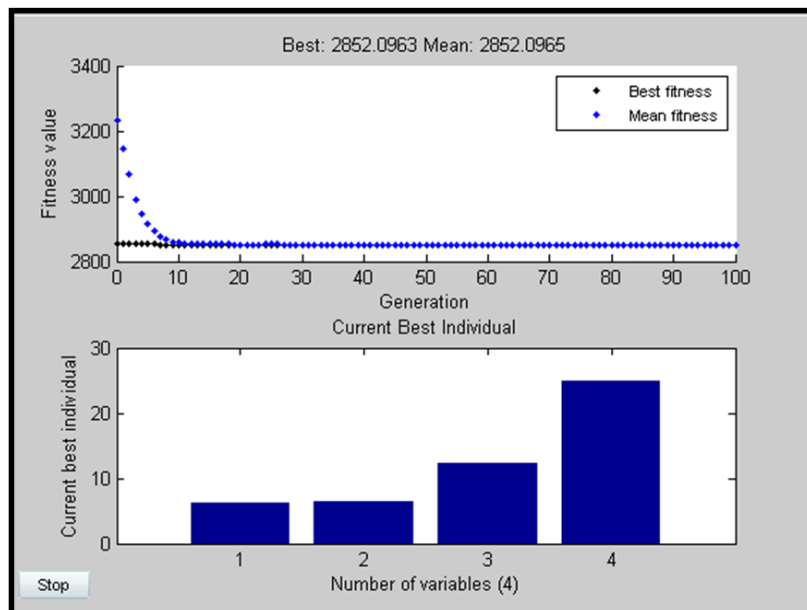


Σχήμα 5.5: Βέλτιστες τιμές για 100 γενιές και πληθυσμό

Από την παραπάνω γραφική παράσταση βλέπουμε ότι το βέλτιστο διάνυσμα λύσης είναι $P=[4,52 \ 8,34 \ 12,26 \ 24,88]$ σε MW και η βέλτιστη οικονομικά λύση η :

$$F= 2951.87 \text{ ευρώ/h}$$

Για μέγεθος πληθυσμού 100, 100 γενιές-επαναλήψεις, πιθανότητα διασταύρωσης 0,87 και αρχικό εύρος πληθυσμού [LB;UB] έχουμε τα εξής αποτελέσματα:



Σχήμα 5.6: Βέλτιστες τιμές για 100 γενιές και πληθυσμό, και $p_c=0.87$

Από την παραπάνω γραφική παράσταση βλέπουμε ότι το βέλτιστο διάνυσμα λύσης είναι $P=[6,25 \ 6,47 \ 12,28 \ 25]$ σε MW και η βέλτιστη οικονομικά λύση η :

$$F= 2852.09 \text{ ευρώ/h.}$$

Για τις τρεις παραπάνω περιπτώσεις τα αποτελέσματα μας συγκρίνονται με τα αντίστοιχα της αναφοράς [5] και φαίνονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα:

	ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1		ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2		ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 3	
	Γ.Α	Γ.Α ΑΝΑΦΟΡΑΣ [5]	Γ.Α	Γ.Α ΑΝΑΦΟΡΑΣ [5]	Γ.Α	Γ.Α ΑΝΑΦΟΡΑΣ [5]
P_1 (MW)	4,74	5,80	4,52	5,20	6,25	6,25
P_2 (MW)	10,27	12,40	8,34	9,27	6,47	6,47
P_3 (MW)	11,78	10,42	12,26	11,04	12,28	12,28
P_4 (MW)	23,17	21,38	24,88	24,49	25,00	25,00
ΚΟΣΤΟΣ (€/h)	3095,34	3278,90	2951,87	3034,70	2852,09	2852,20

Πίνακας 5.2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των τριών περιπτώσεων

Συμπεράσματα

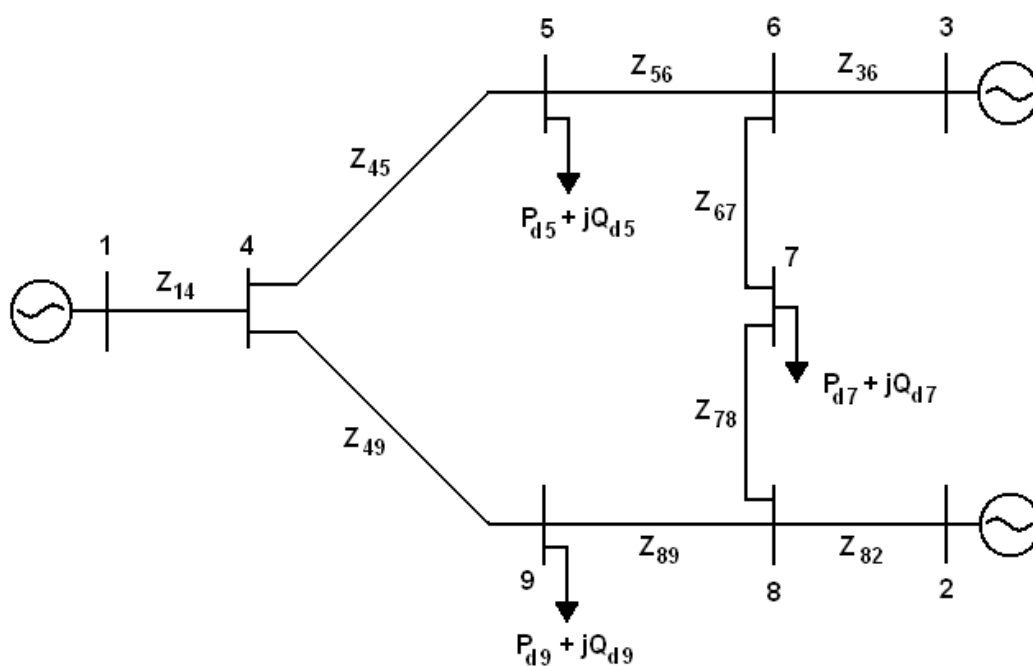
- Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι για μεγαλύτερο πληθυσμό και μεγαλύτερο αριθμό γενιών οδηγούμαστε σε καλύτερα αποτελέσματα.
- Επίσης σημαντικό ρόλο παίζουν και οι επιλογές του αλγορίθμου, αλλά οι ιδανικές τους τιμές διαφέρουν ανάλογα με το πρόβλημα και προκύπτουν ύστερα από δοκιμές.
- Τέλος σε όλες τις περιπτώσεις καλύπτεται η ζήτηση φορτίου ,δηλαδή $P_1+P_2+P_3+P_4=50$ MW, αφού αποτελεί έναν από τους περιορισμούς του προβλήματος.

5.2.2 Προσομοίωση Συστήματος 9 Ζυγών - Μελέτη B.P.Φ

Μετά την εφαρμογή του Γενετικού Αλγορίθμου σε ένα απλό πρόβλημα οικονομικής κατανομής φορτίου, είμαστε πλέον σε θέση να κάνουμε μια πρακτική εφαρμογή σε ένα πιο σύνθετο σύστημα ηλεκτρικής ισχύος, και συγκεκριμένα να μελετήσουμε την εφαρμογή γενετικών αλγορίθμων στη βέλτιστη ροή φορτίου για ένα σύστημα 9 ζυγών το οποίο προτείνεται από την IEEE (case9). Στη συνέχεια, παρατίθενται τα δεδομένα του προβλήματος καθώς και η επίλυσή του με γενετικούς αλγόριθμους.

Δεδομένα Προβλήματος

Δίνεται το παρακάτω δίκτυο 9 ζυγών υψηλής τάσης 345kV, το οποίο αποτελείται από 3 γεννήτριες, 3 φορτία σταθερής ισχύος και 9 κλάδους:



Σχήμα 5.7: Μονογραμμικό διάγραμμα του ηλεκτρικού δικτύου των 9 ζυγών

Οι συναρτήσεις κόστους των γεννητριών είναι τετραγωνικής μορφής, είναι εκφρασμένες σε (€/hour) και έχουν την εξής μορφή:

$$\begin{aligned}
 F_1 &= 0.11P_{g1}^2 + 5P_{g1} + 150 \\
 F_2 &= 0.085P_{g2}^2 + 1.2P_{g2} + 600 \\
 F_3 &= 0.1225P_{g3}^2 + P_{g3} + 335
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

Τα όρια ασφαλούς λειτουργίας των μονάδων παραγωγής σε (MW) δίνονται από τις ακόλουθες ανισότητες:

$$\begin{aligned} 10 \leq P_{g1} \leq 250, & \quad -300 \leq Q_{g1} \leq 300 \\ 10 \leq P_{g2} \leq 300, & \quad -300 \leq Q_{g2} \leq 300 \\ 10 \leq P_{g3} \leq 270, & \quad -300 \leq Q_{g3} \leq 300 \end{aligned} \quad (5.2)$$

Υποθέτουμε ότι σε όλους τους ζυγούς τα όρια ασφαλείας του μέτρου της τάσης κυμαίνονται μεταξύ 0.9 pu και 1.1 pu.

Θεωρούμε το ζυγό 1 ως ζυγό ταλάντωσης και τους ζυγούς 2 και 3 ως PV.

Οι ζυγοί 5, 7 και 9 αποτελούν τους ζυγούς φορτίου (PQ). Τα υπάρχοντα φορτία σταθερής ισχύος στους ζυγούς αυτούς έχουν τις εξής τιμές:

$$S_{d5} = 90 + j30, \quad S_{d7} = 100 + j35 \quad \text{και} \quad S_{d9} = 125 + j50. \quad (5.3)$$

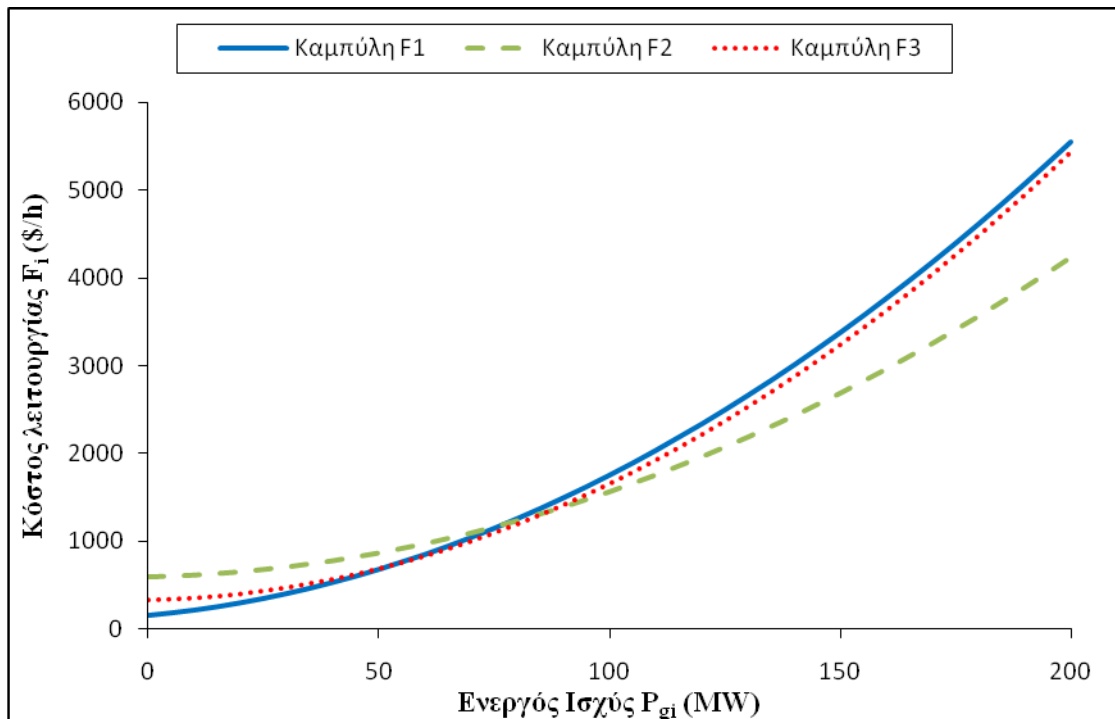
Θεωρούμε ως βασική ισχύ του συστήματος τα 100 MVA.

Στον πίνακα 5.3 παρατίθενται οι pu τιμές στην ισχύ βάσης των σύνθετων αντιστάσεων σειράς των γραμμών μεταφοράς καθώς και οι συνολικές εγκάρσιες αγωγιμότητές τους. Επιπλέον, δίνονται και τα όρια ροής ισχύος των γραμμών

Κλάδοι δικτύου	Αντίσταση σειράς R (p.u)	Αντίδραση σειράς X (p.u)	Συνολική εγκάρσια αγωγιμότητα B _c (p.u)	Όριο φαινόμενης ροής ισχύος των γραμμών (MVA)
1 – 4	0	0.0576	0	250
4 – 5	0.017	0.092	0.158	250
5 – 6	0.039	0.17	0.358	150
3 – 6	0	0.0586	0	300
6 – 7	0.0119	0.1008	0.209	150
7 – 8	0.0085	0.072	0.149	250
8 – 2	0	0.0625	0	250
8 – 9	0.032	0.161	0.306	250
9 – 4	0.01	0.085	0.176	250

Πίνακας 5.3: Δεδομένα των γραμμών μεταφοράς του δικτύου

Οι γραφικές παραστάσεις των συναρτήσεων κόστους των γεννητριών 1, 2 και 3 σε συνάρτηση με τις παραγόμενες ενεργές ισχύεις τους φαίνονται στο σχήμα 5.8.



Σχήμα 5.8 Γραφικές παραστάσεις των συναρτήσεων κόστους των γεννητριών

Η συνάρτηση που θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε είναι η παρακάτω:

```
function f=opf(x)
Pg=(x(1:3));

f= 0.11*(100*Pg(1))^2+5*100*Pg(1)+150 +
0.085*(100*Pg(2))^2+1.2*100*Pg(2)+600 +
0.1225*(100*Pg(3))^2+100*Pg(3)+335 ;
```

Με βάση τον πίνακα 5.3 κατασκευάσουμε τον σύνθετο πίνακα αγωγιμοτήτων, ο οποίος είναι ένας πίνακας 9x9. Στο editor του Matlab φτιάξαμε το m file που φαίνεται στην επόμενη σελίδα.

% Σύνθετος πίνακας αγωγιμοτήτων (9×9)

```

Ybus=[
  0      0      0      0      0      0      0      0      0
  0      0      0      0      0      0      0      0      0
  0      0      0      0      0      0      0      0      0
  0      0      0      3.307 -1.942  0      0      0      -1.365
  0      0      0     -1.942  3.224 -1.282  0      0      0
  0      0      0      0     -1.282  2.437 -1.155  0      0
  0      0      0      0      0     -1.155  2.772 -1.617  0
  0      0      0      0      0      0     -1.617  2.805 -1.188
  0      0      0     -1.365  0      0      0      1.188  2.553
]

+

j*[
-17.361  0      0      17.361  0      0      0      0      0
  0     -16.000  0      0      0      0      0     -16.000  0
  0      0     -17.065  0      0      17.065  0      0      0
 17.361  0      0     -39.309  10.511  0      0      0     11.604
  0      0      0      10.511 -15.841  5.588  0      0      0
  0      0     17.065  0      5.588 -32.154  9.784  0      0
  0      0      0      0      0      9.784 -23.303  13.698  0
  0     16.000  0      0      0      0     13.698 -34.446  5.975
  0      0      0     11.604  0      0      0      5.975 -17.338
];

```

Το πρόβλημα αυτό αποτελείται από 24 μεταβλητές οι οποίες γράφονται σε ένα διάνυσμα 1X24 της μορφής:

$$x = [Pg(1) \quad Pg(2) \quad Pg(3) \quad Qg(1) \quad Qg(2) \quad Qg(3) \quad V(1) \dots V(9) \quad d(1) \dots d(9)];$$

Τα Pg_i και Qg_i αποτελούν τις ενεργές και άεργες παραγωγές των γεννητριών ενώ τα V_i και d_i αποτελούν τα μέτρα και τις γωνίες των τάσεων σε καθένα από τους 9 ζυγούς.

Οι 24 αυτές μεταβλητές υπόκεινται σε κάποια κατώτατα και ανώτατα όρια τα οποία αναπαρίστανται και σε μορφή διανυσμάτων. Τα διανύσματα αυτά αντιστοιχά είναι τα εξής:

```

LB=[0.1 0.1 0.1 -3 -3 -3 0.9...0.9 -20...-20];
UB=[2.5 3.0 2.7 +3 +3 +3 1.1...1.1 +20...+20];

```

Θεωρούμε τον ζυγό 1 ως ζυγό ταλάντωσης οπότε πρέπει να ισχύει $V_1=1$ pu και $d_1=0$. Επίσης για του ζυγούς PV 2 και 3 θεωρούμε $V_2=V_3=1$ pu. Αυτό το γράφουμε στη μορφή $A \cdot x = b$ όπου

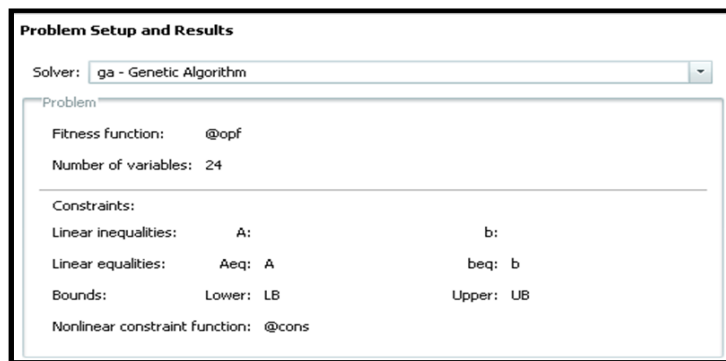
```

A= [0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0];

b= [1;1;1;0];

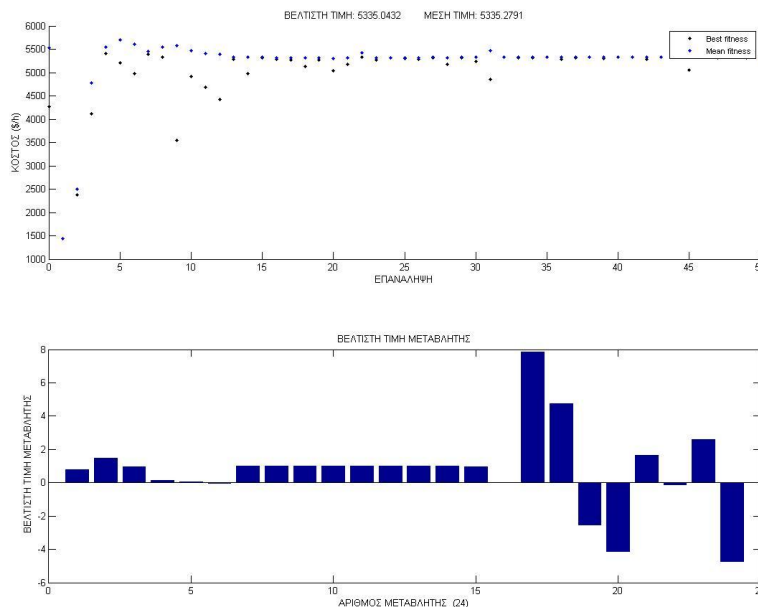
```

Τέλος, υπάρχουν και οι μη γραμμικοί περιορισμοί. Αυτοί προκύπτουν από τις εξισώσεις κάλυψης του ισοζυγίου φορτίου, από τις εξισώσεις ροής ισχύος στο σύστημα καθώς και από τα όρια φαινόμενης ροής ισχύος των γραμμών. Διακρίνονται σε ισοτικούς και ανισοτικούς μη γραμμικούς περιορισμούς. Για την δήλωση τους κατασκευάζουμε μια συνάρτηση που δέχεται ως όρισμα το διάνυσμα x και επιστρέφει δυο διανύσματα c και c_{eq} για τους ανισοτικούς και ισοτικούς αντίστοιχα περιορισμούς. Έτσι δημιουργούμε ένα `m` file (`cons.m`) στο οποίο οι μη γραμμικές ισότητες για το ισοζύγιο ισχύος περιέχονται στο `ceq` και οι μη γραμμικές ανισότητες για τα όρια ροής ισχύος των γραμμών περιέχονται στο `c`. Τα παραπάνω τα περνάμε στο toolbox όπως φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 5.9: Δήλωση δεδομένων του προβλήματος

Ορίζουμε μέγεθος πληθυσμού 50, αριθμό γενιών 50, αρχικό εύρος [LB,UB] και πιθανότητα διασταύρωσης 0,88. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα επόμενα διαγράμματα:



Stop

Σχήμα 5.10: Βέλτιστες τιμές για το σύστημα των 9 ζυγών (case9)

Από την παραπάνω γραφική παράσταση βλέπουμε ότι το βέλτιστο διάνυσμα λύσης είναι το:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pg (MW)	77,71	147,52	93,76						
Qg (MVar)	14,02	6,02	-9,63						
ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu)	1,000	1,000	1,000	0,994	0,985	1,008	0,992	1,002	0,967
ΓΩΝΙΑ ΤΑΣΗΣ δ (°)	0,000	7,848	4,758	-2,565	-4,172	1,650	-0,178	2,589	-4,788

Πίνακας 5.4: Βέλτιστες τιμές για το σύστημα των 9 ζυγών(case9)

Οπότε η βέλτιστη οικονομικά λύση η **F= 5335,2 €/h**

Τα παραπάνω αποτελέσματα καθώς και πληροφορίες για τις απώλειες ισχύος του δικτύου φαίνονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα:

ΖΥΓΟΣ	ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu)	ΓΩΝΙΑ ΤΑΣΗΣ δ (°)	Pg (MW)	Qg (MVar)	Pd (MW)	Qd (MVar)
1	1,000	0,000	77,71	14,02		
2	1,000	7,848	147,52	6,02		
3	1,000	4,758	93,76	-9,63		
4	0,994	-2,565				
5	0,985	-4,172			90	30
6	1,008	1,650				
7	0,992	-0,178			100	35
8	1,002	2,589				
9	0,967	-4,788			125	50
			318,99	10,41	315,00	115,00

ΑΠΟ ΖΥΓΟ	ΠΡΟΣ ΖΥΓΟ	Pij (MW)	Pji (MW)	ΑΠΩΛΕΙΕΣ P (MW)
1	4	77,31	-77,31	0,00
4	5	30,57	-30,40	0,17
5	6	-58,54	59,92	1,38
3	6	93,35	-93,35	0,00
6	7	33,15	-33,00	0,15
7	8	-67,04	67,43	0,39
8	2	-147,03	147,03	0,00
8	9	79,36	-77,32	2,04
9	4	-46,67	46,96	0,29
				4,42

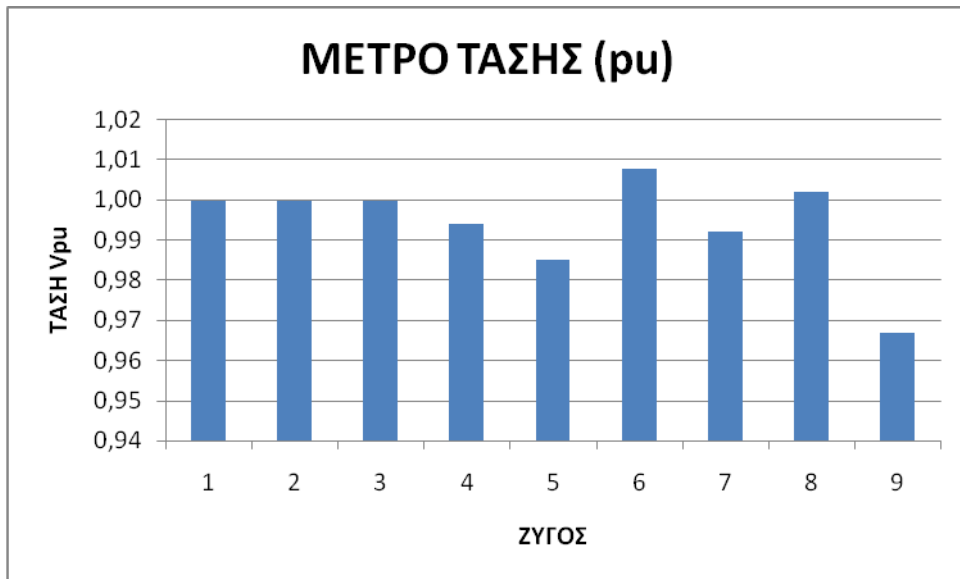
Πίνακας 5.5: Αναλυτικά αποτελέσματα για το σύστημα των 9 ζυγών(case9)

Από τον πίνακα 5.5 διαπιστώνουμε ότι επαληθεύεται ο εξισωτικός περιορισμός της ροής φορτίου αφού η συνολική ενεργός παραγόμενη ισχύς ισούται με το συνολικό ενεργό φορτίο και τις ενεργές απώλειες των γραμμών μεταφοράς.

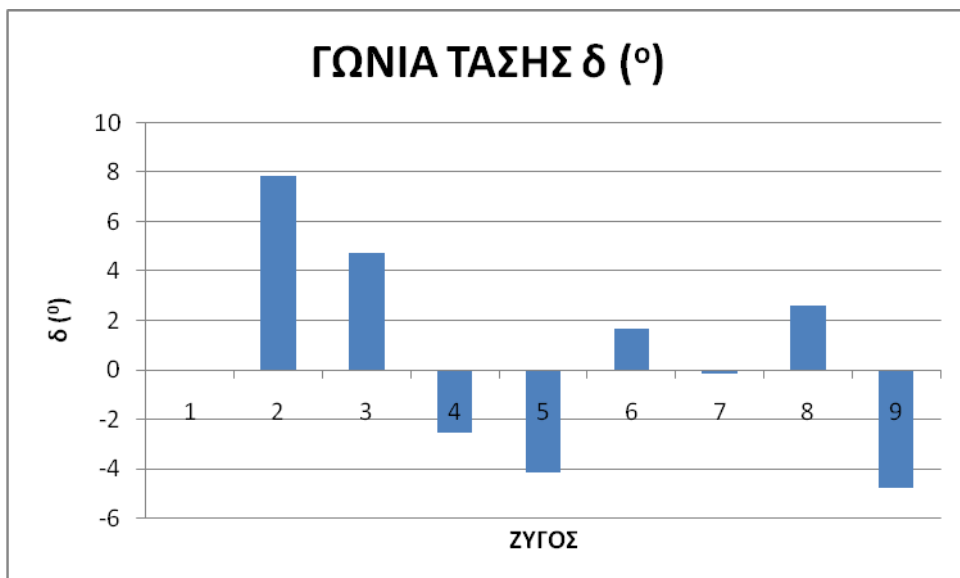
Συγκεκριμένα, από τα αποτελέσματα που προέκυψαν ισχύει:

$$P_{G,tot} = P_{D,tot} + P_{loss} \Rightarrow 318.99[MW] \approx 315 + 4.42[MW]$$

Οι γραφικές παραστάσεις του μέτρου και της γωνίας της τάσης κάθε ζυγού φαίνονται παρακάτω:



Σχήμα 5.11: Ανά μονάδα μέτρο τάσης των ζυγών (case9)



Σχήμα 5.12: Γωνία τάσης των ζυγών (case9)

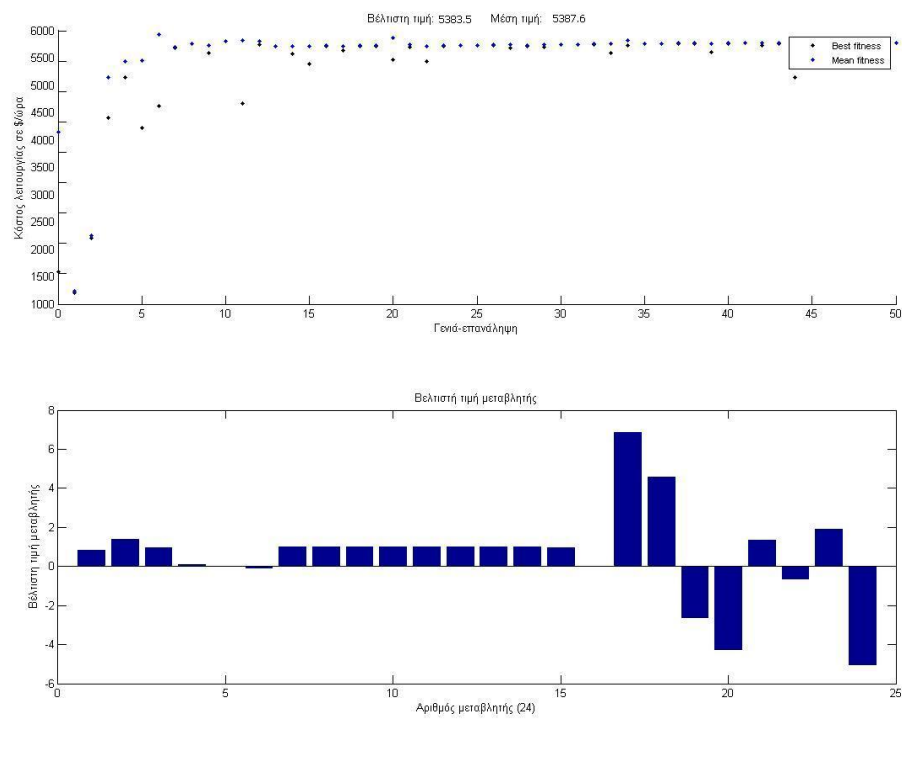
5.2.3 Συμπεριφορά του Συστήματος των 9 Ζυγών για Εξάρτηση της Συνάρτησης Κόστους και από την Άεργο Παραγωγή των Γεννητριών

Στο σημείο αυτό εξετάζουμε πως μεταβάλλεται η βέλτιστη λύση αν υποθέσουμε ότι η προς ελαχιστοποίηση αντικειμενική συνάρτηση κόστους δεν αποτελείται μόνο από κόστη συναρτήσεων των ενεργών ισχύων των γεννητριών αλλά και από κόστη άεργων ισχύων.

Δηλαδή, έστω ότι οι συναρτήσεις κόστους των γεννητριών δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις σε (€/hour):

$$\begin{aligned} F_1(P_{g1}, Q_{g1}) &= 0.11P_{g1}^2 + 0.2Q_{g1}^2 + 5P_{g1} + 150 \\ F_2(P_{g2}, Q_{g2}) &= 0.085P_{g2}^2 + 0.05Q_{g2}^2 + 1.2P_{g2} + 600 \\ F_3(P_{g3}, Q_{g3}) &= 0.1225P_{g3}^2 + 0.3Q_{g3}^2 + P_{g3} + 335 \end{aligned} \quad (5.4)$$

Ορίζουμε μέγεθος πληθυσμού 50, αριθμό γενιών 50, αρχικό εύρος [LB,UB] και πιθανότητα διασταύρωσης 0,88. Τα υπόλοιπα δεδομένα παραμένουν ίδια, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση. Τα αποτελέσματα μας φαίνονται στα επόμενα διαγράμματα:



Σχήμα 5.13 Βέλτιστες τιμές για το σύστημα των 9 ζυγών και εξάρτηση κόστους από Q.

Παραπάνω βλέπουμε το βέλτιστο διάνυσμα λύσης, το οποίο πιο αναλυτικά γράφεται :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pg (MW)	86,96	138,66	93,22						
Qg (MVar)	16,03	5,90	-8,26						
ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu)	1,000	1,000	1,000	0,993	0,983	1,007	0,991	1,001	0,967
ΓΩΝΙΑ ΤΑΣΗΣ δ (°)	0	6,403	3,903	-2,877	-4,681	0,808	-1,191	1,451	-5,397

Πίνακας 5.6: Βέλτιστες τιμές για το σύστημα των 9 ζυγών και εξάρτηση κόστους από Q.

Οπότε στην περίπτωση αυτή το κόστος λειτουργίας είναι **F=5383,5 €/h**

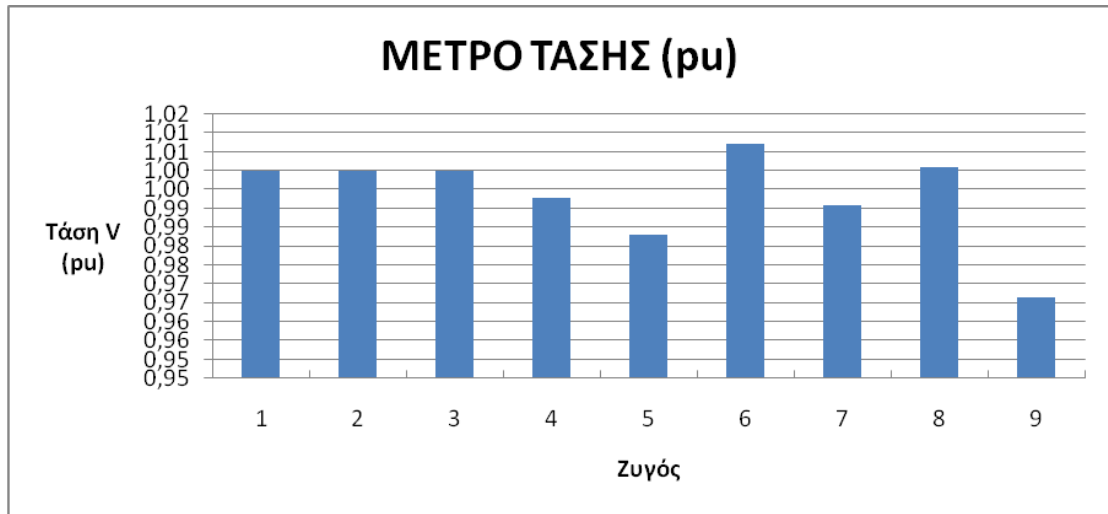
Τα παραπάνω αποτελέσματα καθώς και πληροφορίες για τις απώλειες ισχύος του δικτύου φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

ΖΥΓΟΣ	ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu)	ΓΩΝΙΑ ΤΑΣΗΣ δ (°)	Pg (MW)	Qg (MVar)	Pd (MW)	Qd (MVar)
1	1,000	0,000	86,96	16,03		
2	1,000	6,403	138,66	5,9		
3	1,000	3,903	93,22	-8,26		
4	0,993	-2,877				
5	0,983	-4,681			90	30
6	1,007	0,808				
7	0,991	-1,191			100	35
8	1,001	1,451				
9	0,967	-5,397			125	50
			318,84	13,67	315	115

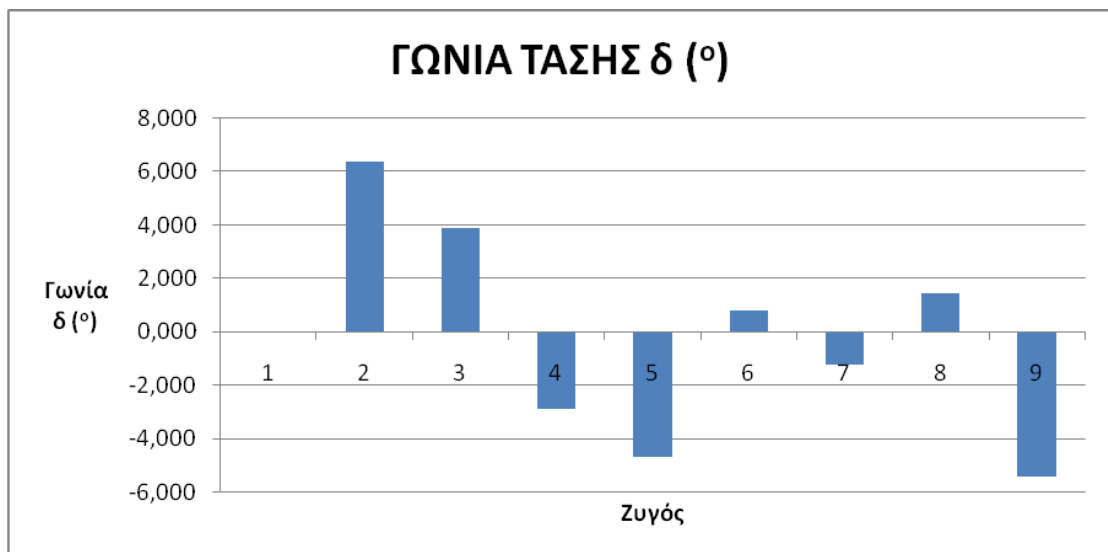
ΑΠΟ ΖΥΓΟ	ΠΡΟΣ ΖΥΓΟ	Pij (MW)	Pji (MW)	ΑΠΩΛΕΙΕΣ P (MW)
1	4	86,66	-86,66	0,00
4	5	34,31	-34,10	0,21
5	6	-55,40	56,64	1,24
3	6	92,92	-92,92	0,00
6	7	36,04	-35,86	0,18
7	8	-64,08	64,44	0,36
8	2	-138,39	138,39	0,00
8	9	73,85	-72,07	1,78
9	4	-52,33	52,68	0,35
				4,12

Πίνακας 5.7: Αναλυτικά αποτελέσματα για το σύστημα των 9 ζυγών και εξάρτηση κόστους από Q

Οι γραφικές παραστάσεις του μέτρου και της γωνίας της τάσης κάθε ζυγού φαίνονται παρακάτω:



Σχήμα 5.14: Ανά μονάδα μέτρο τάσης των ζυγών(case9Q)



Σχήμα 5.15: Γωνία τάσης των ζυγών(case9Q)

Συμπεράσματα-Σύγκριση Εφαρμογών

- Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η εξάρτηση της αντικειμενικής συναρτησης από την άεργο ισχύ οδηγεί σε μεγαλύτερο κόστος λειτουργίας , αν και πρόκειται για πολύ μικρή αύξηση. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού η άεργος ισχύς επιδρά προσθετικά, και κατά θετική τιμή (είναι υψωμένη στο τετράγωνο) στην συνάρτηση κόστους.
- Επίσης αλλάζει και κατά κάποιο πόσο και τις άεργες παραγωγές ισχύος των γεννητριών καθώς και τις άεργες απώλειες των γραμμών μεταφοράς, γεγονός αναμενόμενο αφού στη συνάρτηση που θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε υπεισέρχεται και η άεργος παραγωγή Q .
- Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο που παρατηρούμε είναι ότι, τόσο η ενεργός παραγωγή των γεννητριών όσο και οι ενεργές απώλειες των γραμμών, καθώς και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του δικτύου δεν μεταβλήθηκαν σχεδόν καθόλου.
- Τέλος από τα σχήματα και τους πίνακες των αποτελεσμάτων παρατηρούμε ότι και στις δύο εφαρμογές δεν παραβιάζονται τα όρια ισχύος των γραμμών, καθώς ούτε και τα όρια για το μέτρο και την γωνία της τάσης κάθε ζυγού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Β.Ρ.Φ ΥΠΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει σε προηγούμενο κεφάλαιο το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου είναι ιδιαίτερα σημαντικό για το σχεδιασμό και το χειρισμό των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Σκοπός είναι να προσδιοριστεί ο βέλτιστος συνδυασμός των ισχύων εξόδου όλων των θερμικών μονάδων παραγωγής, που ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος, ικανοποιώντας ταυτόχρονα τη ζήτηση φορτίου και τους περιορισμούς λειτουργίας.

Ωστόσο, η τυπική λειτουργία στο απόλυτο ελάχιστο κόστος καυσίμου μπορεί να μην αποτελεί τη μοναδική βάση για την κατανομή της ηλεκτρικής ισχύος. Είναι γνωστό ότι οι βιομηχανίες παραγωγής ισχύος εκπέμπουν αρκετούς αέριους ρύπους. Εξαιτίας των καταστροφικών και βλαβερών συνεπειών τους στο περιβάλλον, τις περισσότερες σημαντικές εκπομπές αποτελούν τα οξειδία του θείου (SO_x), τα οξειδία του αζώτου (NO_x) και το διοξείδιο του άνθρακα CO_2 . Η εκπομπή αυτών των ρύπων επηρεάζει όχι μόνο το ανθρώπινο είδος, αλλά ζημιώνει και τα άλλα είδη ζωής, καθώς επίσης εγκυμονεί μεγάλο κίνδυνο σε υλικά και στην παγκόσμια θέρμανση του πλανήτη.

Για να αντιμετωπιστεί ως ένα βαθμό το οικολογικό αυτό πρόβλημα, οι εκάστοτε κυβερνήσεις αναγκάζονται να λάβουν ιδιαίτερος αυστηρά μέτρα όσον αφορά την προστασία του περιβάλλοντος. Επομένως, οι υπηρεσίες ηλεκτρισμού είναι υποχρεωμένες να μειώσουν τη μόλυνση την προερχόμενη από τις βιομηχανίες ισχύος είτε με σχέδιο είτε με λειτουργικές στρατηγικές. Κάτι τέτοιο, όμως, οδηγεί σε μια αξιοσημείωτη αύξηση του κόστους λειτουργίας τους. Πρέπει, επομένως, να εξαιρεθεί αυτή η σύγκρουση που υπάρχει μεταξύ του ελάχιστου κόστους καυσίμου και της μείωσης των εκπομπών βλαβερών ρύπων και να βρεθεί μια μέση λύση.

Λόγω των προαναφερθέντων, το πρόβλημα περιβαλλοντικής-οικονομικής κατανομής φορτίου έχει τραβήξει το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών και μελετητών. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να ληφθούν υπόψη οι εκπομπές στο πρόβλημα κατανομής φορτίου. Ένας από αυτούς είναι το να διαχειρίζονται οι εκπομπές ως επιπρόσθετοι περιορισμοί. Άλλος εναλλακτικός τρόπος είναι το να ενσωματωθούν και οι εκπομπές, μαζί με το κόστος καυσίμου, στην αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος. Στην περίπτωση αυτή προκύπτει πρόβλημα πολυαντικειμενικής περιβαλλοντικής-οικονομικής κατανομής φορτίου, για την επίλυση του οποίου προτείνεται μια προσεγγιστική λύση που βασίζεται σε μια αποτελεσματική τεχνική διαδοχικού γραμμικού προγραμματισμού.

Παραδοσιακά, διάφορες προσεγγιστικές λύσεις έχουν αναπτυχθεί για τη επίλυση του προβλήματος περιβαλλοντικής-οικονομικής κατανομής. Αυτές οι μέθοδοι είναι τεχνικές μη γραμμικού προγραμματισμού με πολύ μεγάλη ακρίβεια, αλλά ο χρόνος εκτέλεσής τους είναι αρκετά μεγάλος και έτσι δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε λειτουργίες συστημάτων ενέργειας πραγματικού χρόνου.

6.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Πριν περάσουμε στην ανάπτυξη και μελέτη του προβλήματος περιβαλλοντικής-οικονομικής κατανομής φορτίου, για την οποία χρησιμοποιήθηκαν οι αναφορές [1], [2], [4], και [9], συγκεντρώνουμε συνοπτικά στον πίνακα 6.1 τις ονοματολογίες που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια.

Ονοματολογία	
P_g	Διάνυσμα παραγόμενης ενεργού ισχύος
$F(P_g)$	Ολική συνάρτηση κόστους καυσίμου
$E(P_g)$	Ολική συνάρτηση εκπομπής
$F_i(P_g)$	Ολική αντικειμενική συνάρτηση
y	Σύνολο μεταβλητών κατάστασης και ελέγχου
$g(y)$	Σύνολο εξισωτικών περιορισμών
$h(y)$	Σύνολο ανισοτικών περιορισμών
N	Αριθμός ζυγών του δικτύου
N_g	Αριθμός θερμικών μονάδων του δικτύου
N_l	Αριθμός ζυγών φορτίου του δικτύου
a_i, b_i, c_i	Συντελεστές της συνάρτησης κόστους της γεννήτριας i
$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \omega_i, \mu_i$	Συντελεστές της συνάρτησης εκπομπής της γεννήτριας i
h	Συντελεστής βαρύτητας
λ	Συνοδευόμενη τιμή με τους αέριους ρύπους
P_i, Q_i	Εγχυόμενη ενεργός και άεργος ισχύς στο ζυγό i
P_{gi}, Q_{gi}	Παραγόμενη ενεργός και άεργος ισχύς της μονάδας i
P_{di}, Q_{di}	Ζήτηση ενεργού και άεργου ισχύος στο ζυγό i
V_i, θ_i	Πλάτος και γωνία τάσης στο ζυγό i
B'	Πίνακας ευαισθησίας
G_{ij}	Αγωγιμότητα του στοιχείου ij του σύνθετου πίνακα αγωγιμοτήτων
B_{ij}	Ευαισθησία του στοιχείου ij του σύνθετου πίνακα αγωγιμοτήτων

$P_{gi\ min}, P_{gi\ max}$	Κατώτερο και ανώτερο όριο της παραγόμενης ενεργού ισχύος στο ζυγό i
$Q_{gi\ min}, Q_{gi\ max}$	Κατώτερο και ανώτερο όριο της παραγόμενης άεργου ισχύος στο ζυγό i
$V_{i\ min}, V_{i\ max}$	Κατώτερο και ανώτερο μέτρο τάσης του ζυγού i
P_{ij}	Ενεργός φόρτιση της γραμμής μεταφοράς $i-j$
$P_{ij\ max}$	Ανώτερο όριο της ενεργού φόρτισης γραμμής μεταφοράς $i-j$

Πίνακας 6.1: Ονοματολογία για το πρόβλημα B.P.Φ υπό περιβαλλοντικούς περιορισμούς

Σκοπός του προβλήματος, είναι να ελαχιστοποιηθούν οι δύο συγκρουόμενες αντικειμενικές συναρτήσεις, οι οποίες είναι το κόστος καυσίμου και η εκπομπή ρύπων, ικανοποιώντας ταυτόχρονα τους περιορισμούς λειτουργίας και φόρτισης.

6.2.1 Αντικειμενικές Συναρτήσεις

Ελαχιστοποίηση του κόστους καυσίμου

Οι καμπύλες κόστους των γεννητριών του συστήματος αναπαρίστανται με τετραγωνικές συναρτήσεις. Το συνολικό κόστος καυσίμου $F(P_g)$ σε €/h μπορεί να εκφραστεί ως άθροισμα των μοντέλων τετραγωνικού κόστους της κάθε γεννήτριας του δικτύου, δηλαδή:

$$F(P_g) = \sum_{i=1}^{N_g} (a_i + b_i P_{gi} + c_i P_{gi}^2) \quad (6.1)$$

Ελαχιστοποίηση των εκπομπών

Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι που προκαλούνται από τα καυσαέρια των θερμικών μονάδων μπορούν να μοντελοποιηθούν ξεχωριστά. Ωστόσο, σε αυτήν την εφαρμογή, θεωρείται μόνο η μείωση της εκπομπής οξειδίων αζώτου NO_x , εφόσον είναι περισσότερο βλαβερά από άλλους ρύπους. Η συνολική εκπομπή $E(P_g)$ σε ton/h αυτών των ρύπων μπορεί να εκφραστεί ως:

$$E(P_g) = \sum_{i=1}^{N_g} 10^{-2} \cdot (a_i + b_i P_{gi} + c_i P_{gi}^2) + \omega_i \exp(\mu_i P_{gi}) \quad (6.2)$$

Συνολική Αντικειμενική Συνάρτηση

Η οικονομική συνάρτηση και η συνάρτηση εκπομπής συνδυάζονται με διαφορετικές βαρύτητες σε μια και μόνο συνάρτηση. Για μια συγκεκριμένη ζήτηση μπορεί τότε να προκύψει μια trade-off καμπύλη. Η συνολική αντικειμενική συνάρτηση F_t περιγράφεται ως:

$$F_t(P_g) = h \cdot F(P_g) + (1-h) \cdot \lambda \cdot E(P_g) \quad (6.3)$$

όπου:

- h είναι ο συντελεστής βαρύτητας, που μπορεί να κυμαίνεται ανάμεσα στο 0 και 1,
- λ είναι η συνοδευόμενη τιμή με τους αέριους ρύπους.

Οι τιμές του h φανερώνουν τη σχετική σημασία μεταξύ των δύο συναρτήσεων. Με τη μεταβολή της τιμής του h , το trade-off μεταξύ του κόστους καυσίμου και του περιβαλλοντικού κόστους υποβιβασμού μπορεί να αποφασιστεί πέρα του εύρους του h .

Αν $h = 1$, η λύση είναι αυτή του ελάχιστου κόστους, ενώ αν $h = 0$ η λύση είναι οι ελάχιστες εκπομπές.

Η συνοδευόμενη τιμή με τους ρύπους αναπαριστά το βαθμό της βλαβερότητας αυτού του τύπου εκπομπής. Ο καθορισμός μια τιμής στις εκπομπές εξαρτάται από τις βιολογικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις τους. Στην εργασία αυτή μόνο ένας τύπος εκπομπών έχει θεωρηθεί (NO_x) με τη σχετική τιμή $\lambda = 1$.

6.2.2 Περιορισμοί της Αντικειμενικής Συνάρτησης

Εξισωτικοί περιορισμοί ισορροπίας ισχύος:

Η συνολική παραγωγή ισχύος πρέπει να καλύπτει τη συνολική ζήτηση ισχύος και τις απώλειες ισχύος. Αυτό υποδηλώνει τη λύση του προβλήματος ροής φορτίου, το οποίο έχει εξισωτικούς περιορισμούς όσον αφορά την ενεργό και την άεργο ισχύ σε κάθε ζυγό ως εξής:

$$P_i = P_{gi} - P_{di} = \sum_{j=1}^N \left[V_i V_j \left(G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij} \right) \right] \quad (6.4)$$
$$Q_i = Q_{gi} - Q_{di} = \sum_{j=1}^N \left[V_i V_j \left(G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij} \right) \right]$$

όπου $i = 1, 2, \dots, n$ και $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$.

Περιορισμοί ικανότητας παραγωγής:

Για σταθερή λειτουργία, η έξοδος ενεργού και άεργου ισχύος κάθε γεννήτριας περιορίζεται από κατώτερα και ανώτερα όρια ως εξής:

$$\begin{aligned} P_{gi,\min} &\leq P_{gi} \leq P_{gi,\max}, & i = 1, 2, \dots, N_g \\ Q_{gi,\min} &\leq Q_{gi} \leq Q_{gi,\max}, & i = 1, 2, \dots, N_g \end{aligned} \quad (6.5)$$

Περιορισμοί ασφάλειας:

Για ασφαλή λειτουργία, η ενεργός ροή της γραμμής μεταφοράς P_{ij} περιορίζεται από ένα ανώτατο όριο. Επιπλέον το πλάτος των τάσεων των ζυγών φορτίου περιορίζεται μεταξύ κατώτερου και ανώτερου ορίου:

$$|S_{ij}| \leq S_{ij,\max}, \quad i = 1, 2, \dots, N_l \quad (6.6)$$

$$V_{i,\min} \leq V_i \leq V_{i,\max}, \quad i = 1, 2, \dots, N_l \quad (6.7)$$

Το μέτρο της φαινόμενης ροή της γραμμής μεταφοράς S_{ij} δίνεται από τη σχέση:

$$|S_{ij}| = |Y_{ij}| * \sqrt{(|V_i|^2 - V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j))^2 + (V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j))^2} \quad (6.8)$$

6.2.3 Διατύπωση του Προβλήματος

Αθροίζοντας τις αντικειμενικές συναρτήσεις και τους περιορισμούς, το πρόβλημα οικονομικής-περιβαλλοντικής κατανομής μπορεί μαθηματικά να διατυπωθεί ως ένα μη γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, ως εξής:

$$\text{Ελαχιστοποίησε την} \quad F_f(P_g) \quad (6.9)$$

Με περιορισμούς:

$$g(y) = 0 \quad (6.10)$$

$$h(y) \leq 0$$

Στην επόμενη ενότητα ακολουθεί αριθμητική εφαρμογή που βασίζεται στην έως τώρα διατύπωση του προβλήματος.

6.3 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ Γ.Α ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΗΣ Β.Ρ.Φ ΥΠΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ

Στο σημείο αυτό εκτελούμε μια σειρά από αριθμητικές εφαρμογές προβλημάτων βέλτιστης ροής φορτίου υπό περιβαλλοντικούς περιορισμούς. Οι εκπομπές ρύπων της κάθε γεννήτριας δίνονται από την σχέση 6.3 ενώ οι συναρτήσεις κόστους είναι οι αυτές της εφαρμογής στο κεφάλαιο 5.

Στον πίνακα 6.2 που ακολουθεί φαίνονται οι συντελεστές των συναρτήσεων εκπομπών κάθε γεννήτριας [7].

ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	a	b	c	ω	μ
1	4,091	-5,554	6,49	2,00E-04	2,857
2	2,543	-6,047	5,638	5,00E-04	3,333
3	4,258	-5,094	4,586	1,00E-06	8,000

Πίνακας 6.2: συντελεστές συναρτήσεων εκπομπών

Διακρίνουμε 3 περιπτώσεις ανάλογα με το ποσοστό συμμετοχής της συνάρτησης κόστους και της συνάρτησης εκπομπών στην συνολική αντικειμενική συνάρτηση που πρόκειται να ελαχιστοποιήσουμε.

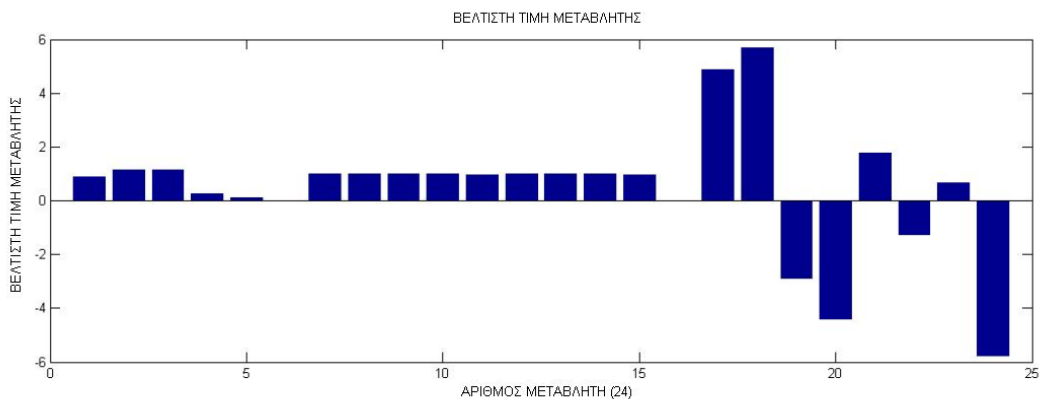
Περίπτωση 1

Για $h=1$ το πρόβλημα μας ανάγεται στο πρόβλημα 2 το οποίο λύθηκε προηγουμένως. Με βάση το διάλυμα λύσης που βρέθηκε, οι εκπομπές NOx υπολογίζονται στους **0,203 ton/h**.

Περίπτωση 2

Για $h=0$ το πρόβλημα μας λαμβάνει υπόψη μόνο την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης εκπομπών (σχέση 6.2) και βάσει της οποίας ελαχιστοποίησης προκύπτει το διάλυμα λύσης x . Με δεδομένο το διάλυμα λύσης x μπορούμε να υπολογίσουμε το αντίστοιχο κόστος λειτουργίας.

Ορίζουμε μέγεθος πληθυσμού 50, αριθμό γενιών 50, αρχικό εύρος [LB,UB] και πιθανότητα διασταύρωσης 0,88. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 6.1 Βέλτιστες τιμές για το σύστημα των 9 ζυγών για $h=0$.

Παραπάνω βλέπουμε το διάνυσμα λύσης, που πιο αναλυτικά φαίνεται παρακάτω:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pg (MW)	87,26	116,26	116,08						
Qg (MVar)	25,98	10,57	-0,22						
ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu)	1,000	1,000	1,000	0,988	0,973	1,002	0,984	0,995	0,957
ΓΩΝΙΑ ΤΑΣΗΣ δ (°)	0,000	4,867	5,668	-2,993	-4,428	1,761	-1,276	0,668	-5,784

Πίνακας 6.3 Βέλτιστες τιμές για το σύστημα των 9 ζυγών για $h=0$.

Οπότε στην περίπτωση αυτή το κόστος λειτουργίας είναι **F=5414,0 €/h** και οι εκπομπές είναι **E=0,156 ton/h**

Τα παραπάνω αποτελέσματα καθώς και πληροφορίες για τις απώλειες ισχύος του δικτύου φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

ΖΥΓΟΣ	ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu)	ΓΩΝΙΑ ΤΑΣΗΣ δ (°)	Pg (MW)	Qg (MVar)	Pd (MW)	Qd (MVar)
1	1,000	0,000	87,26	25,98		
2	1,000	4,867	116,26	10,57		
3	1,000	5,668	116,08	-0,22		
4	0,988	-2,993				
5	0,973	-4,428			90,00	30,00
6	1,002	1,761				
7	0,984	-1,276			100,00	35,00
8	0,995	0,668				
9	0,957	-5,784			125,00	50,00
			319,60	36,33	315,00	115,00

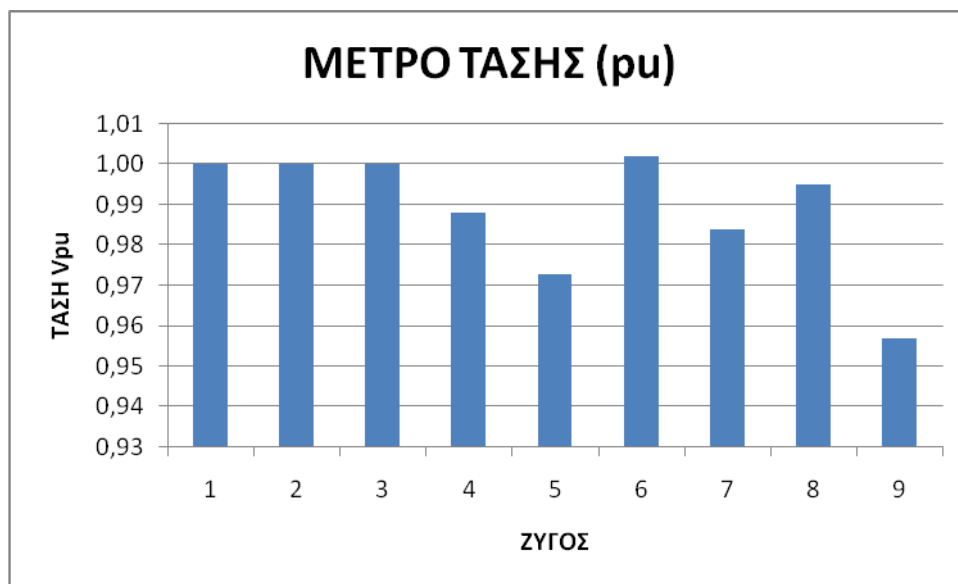
ΑΠΟ ΖΥΓΟ	ΠΡΟΣ ΖΥΓΟ	P _{ij} (MW)	P _{ji} (MW)	ΑΠΩΛΕΙΕΣ P (MW)
1	4	87,47	-87,47	0,00
4	5	28,78	-28,62	0,16
5	6	-61,59	63,15	1,56
3	6	116,39	-116,39	0,00
6	7	53,33	-52,97	0,36
7	8	-47,15	47,35	0,20
8	2	-116,45	116,45	0,00
8	9	69,11	-67,51	1,60
9	4	-58,00	58,42	0,42
				4,30

Πίνακας 6.4: Αναλυτικά αποτελέσματα για το σύστημα των 9 ζυγών για h=0.

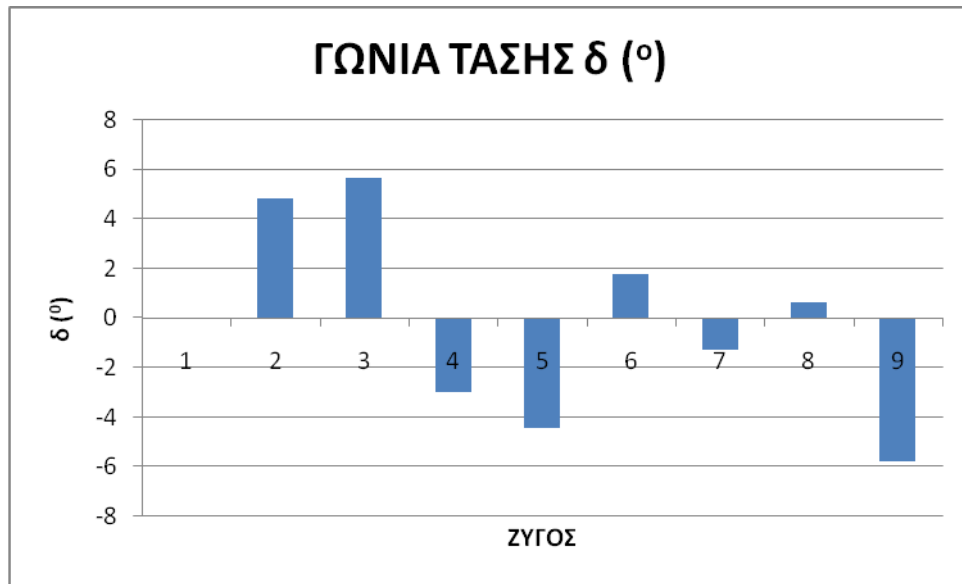
Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι επαληθεύεται ο εξισωτικός περιορισμός της ροής φορτίου αφού η συνολική ενεργός παραγόμενη ισχύς ισούται με το συνολικό ενεργό φορτίο και τις ενεργές απώλειες των γραμμών μεταφοράς. Συγκεκριμένα, από τα αποτελέσματα που προέκυψαν ισχύει:

$$P_{G,tot} = P_{D,tot} + P_{loss} \Rightarrow 319.60[MW] \approx 315 + 4.30[MW]$$

Οι γραφικές παραστάσεις του μέτρου και της γωνίας της τάσης κάθε ζυγού φαίνονται παρακάτω:



Σχήμα 6.2: Ανά μονάδα μέτρο τάσης των ζυγών για h=0

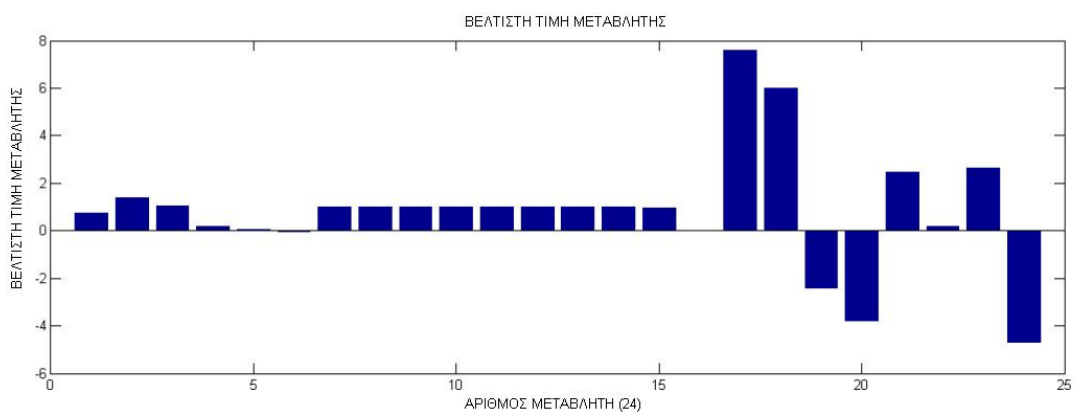


Σχήμα 6.3: Γωνία τάσης των ζυγών για $h=0$

Περίπτωση 3

Για $h=0,5$ το πρόβλημα μας λαμβάνει υπόψη κατά το ήμισυ την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους και κατά το άλλο ήμισυ την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης εκπομπών. Βάσει αυτών των υποθέσεων προκύπτει το διάνυσμα λύσης x . Με δεδομένο το διάνυσμα λύσης x μπορούμε να υπολογίσουμε το αντίστοιχο κόστος λειτουργίας και τις εκπομπές NO_x .

Ορίζουμε μέγεθος πληθυσμού 50, αριθμό γενιών 50, αρχικό εύρος $[LB,UB]$ και πιθανότητα διασταύρωσης 0,88. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα επόμενα διαγράμματα:



Σχήμα 6.4 Βέλτιστες τιμές για το σύστημα των 9 ζυγών για $h=0,5$.

Παραπάνω βλέπουμε το διάνυσμα λύσης ,που πιο αναλυτικά φαίνεται παρακάτω :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pg (MW)	73,99	139,19	106,14						
Qg (MVar)	18,62	7,18	-6,71						
ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu)	1,000	1,000	1,000	0,991	0,981	1,007	0,990	1,000	0,964
ΓΩΝΙΑ ΤΑΣΗΣ δ (°)	0,000	7,597	5,990	-2,459	-3,832	2,464	0,178	2,625	-4,731

Πίνακας 6.5 Βέλτιστες τιμές για το σύστημα των 9 ζυγών για h=0,5.

Οπότε στην περίπτωση αυτή το κόστος λειτουργίας είναι **F=5357,0 €/h** και οι εκπομπές είναι **E= 0,184 ton/h**

Τα παραπάνω αποτελέσματα καθώς και πληροφορίες για τις απώλειες ισχύος του δικτύου φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

ΖΥΓΟΣ	ΜΕΤΡΟ ΤΑΣΗΣ (pu)	ΓΩΝΙΑ ΤΑΣΗΣ δ (°)	Pg (MW)	Qg (MVar)	Pd (MW)	Qd (MVar)
1	1,000	0,000	73,99	18,62		
2	1,000	7,597	139,19	7,18		
3	1,000	5,990	106,14	-6,71		
4	0,991	-2,459				
5	0,981	-3,832			90	30
6	1,007	2,464				
7	0,990	0,178			100	35
8	1,000	2,625				
9	0,964	-4,731			125	50
			319,32	19,10	315	115

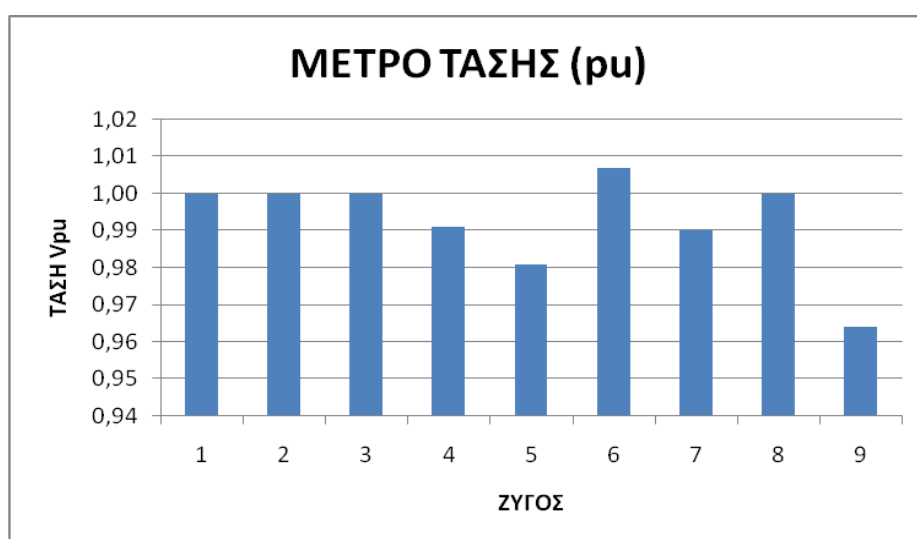
ΑΠΟ ΖΥΓΟ	ΠΡΟΣ ΖΥΓΟ	Pij (MW)	Pji (MW)	ΑΠΩΛΕΙΕΣ P (MW)
1	4	73,94	-73,94	0,00
4	5	26,57	-26,44	0,13
5	6	-63,06	64,67	1,61
3	6	105,79	-105,79	0,00
6	7	40,94	-40,72	0,22
7	8	-59,36	59,67	0,31
8	2	-138,84	138,84	0,00
8	9	79,00	-76,96	2,04
9	4	-47,41	47,72	0,31
				4,62

Πίνακας 6.6: Αναλυτικά αποτελέσματα για το σύστημα των 9 ζυγών για h=0,5.

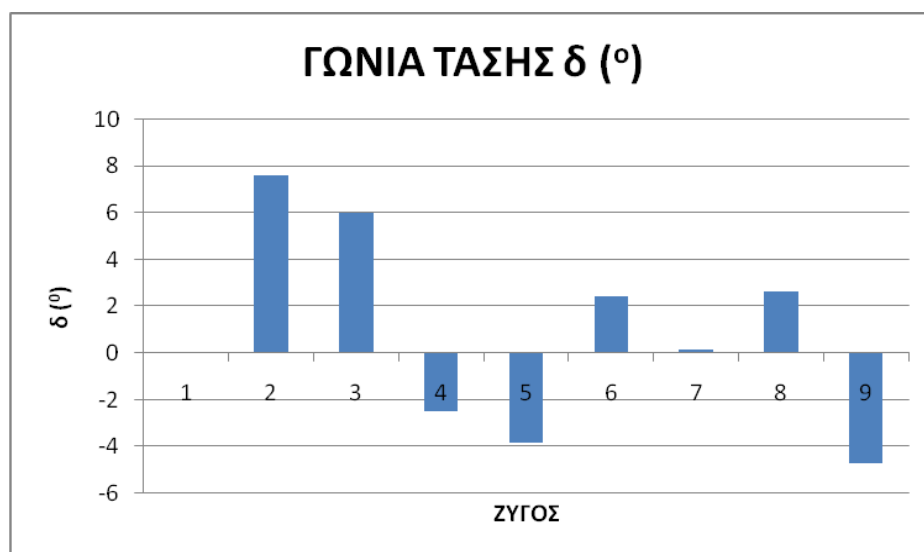
Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι επαληθεύεται ο εξισωτικός περιορισμός της ροής φορτίου αφού η συνολική ενεργός παραγόμενη ισχύς ισούται με το συνολικό ενεργό φορτίο και τις ενεργές απώλειες των γραμμών μεταφοράς. Συγκεκριμένα, από τα αποτελέσματα που προέκυψαν ισχύει:

$$P_{G,tot} = P_{D,tot} + P_{loss} \Rightarrow 319.32[MW] \approx 315 + 4.62[MW]$$

Οι γραφικές παραστάσεις του μέτρου και της γωνίας της τάσης κάθε ζυγού φαίνονται παρακάτω:



Σχήμα 6.5: Ανά μονάδα μέτρο τάσης των ζυγών για h=0,5



Σχήμα 6.6: Γωνία τάσης των ζυγών για h=0,5

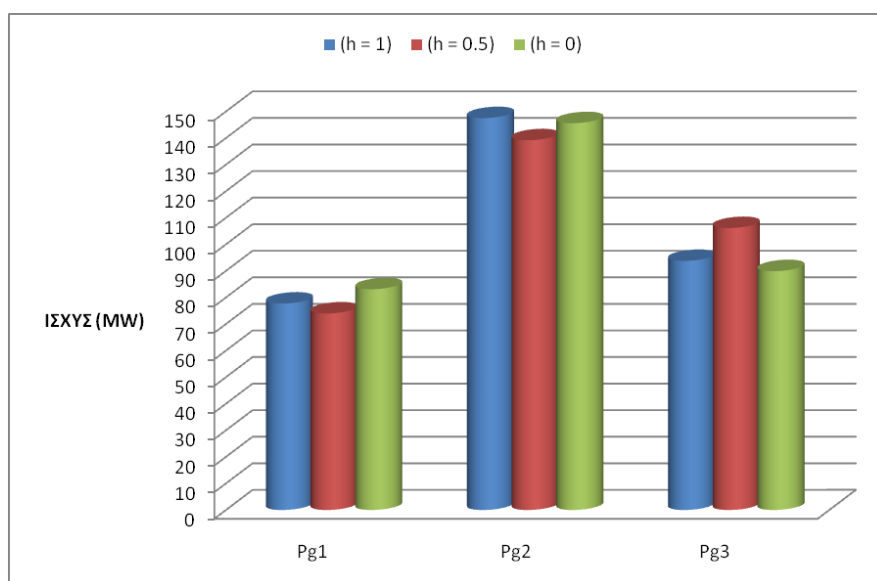
Τα αποτελέσματα μας για τις τρεις παραπάνω περιπτώσεις ($h=1$, $h=0$, $h=0,5$) φαίνονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα:

	(h = 1)	(h = 0.5)	(h = 0)
P_{g1} (MW)	77,71	73,99	83,11
P_{g2} (MW)	147,52	139,19	145,61
P_{g3} (MW)	93,76	106,14	89,91
F (€/h)	5335,2	5357	5414
E (ton/h)	0,203	0,184	0,156
P_{loss} (MW)	4,42	4,29	4,3
Χρόνος (sec)	404,06	395,61	396,26

Πίνακας 6.7: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα και για τις 3 περιπτώσεις.

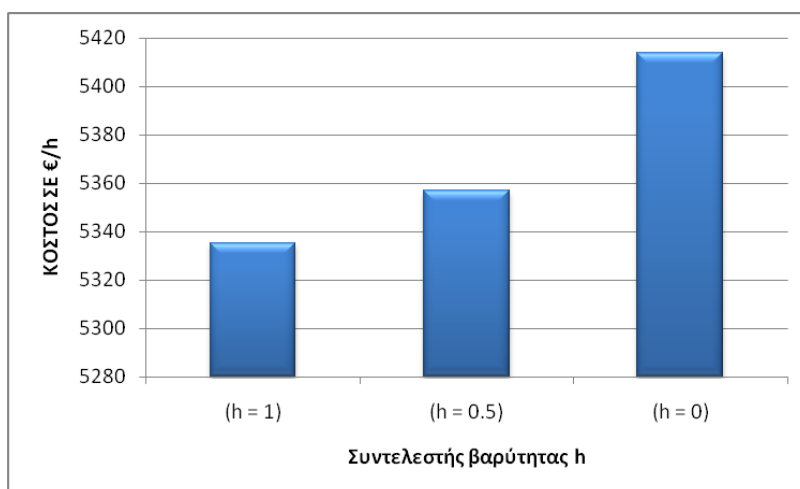
Με έντονα γράμματα φαίνονται τα βέλτιστα αποτελέσματα κόστους και εκπομπών σε κάθε περίπτωση.

Στη γραφική παράσταση που ακολουθεί φαίνεται η κατανομή της παραγόμενης ενεργού ισχύος των γεννητριών και για τις 3 περιπτώσεις

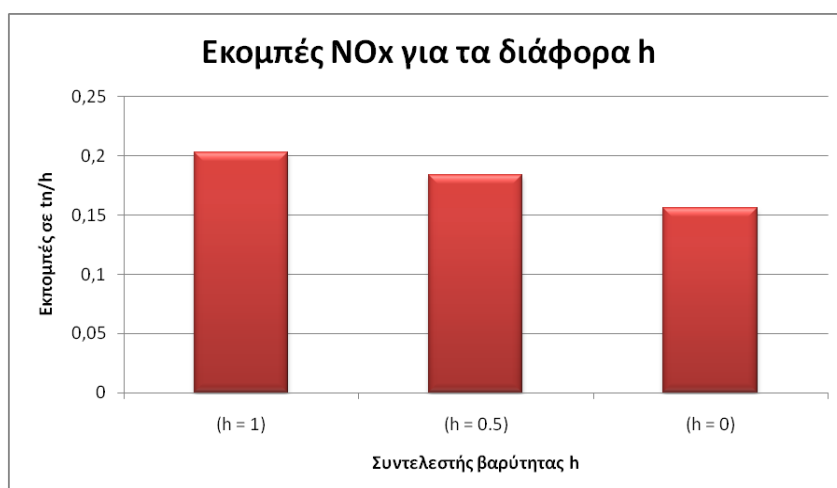


Σχήμα 6.7: Κατανομή της παραγόμενης ενεργού ισχύος των γεννητριών και για τις 3 περιπτώσεις

Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνεται η μεταβολή του κόστους και των εκπομπών για τις διαφορες τιμές του συντελεστή βαρύτητας.



Σχήμα 6.8: Μεταβολή κόστους για τις διάφορες τιμές του h



Σχήμα 6.9: Εκπομπές NOx για τις διάφορες τιμές του h

Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις

- Με βάση τον παραπάνω πίνακα, παρατηρούμε ότι για $h=1$ προκύπτουν τα χαμηλότερα λειτουργικά κόστη, γεγονός αναμενόμενο αφού ελαχιστοποιούμε την συνάρτηση κόστους. Αντίθετα για $h=0$ προκύπτουν οι ελάχιστες εκπομπές καυσαερίων. Τέλος για $h=0,5$ προκύπτουν λειτουργικά κόστη και εκπομπές

που βρίσκονται στο διάστημα μεταξύ των προηγούμενων τιμών, αποτέλεσμα λογικό αν αναλογιστούμε ότι η αντικειμενική μας συνάρτηση είναι το ημιάθροισμα των συναρτήσεων κόστους και εκπομπών. Συνοψίζοντας, από τα παραπάνω φαίνεται ότι το κόστος καυσίμων και οι εκπομπές είναι συγκρουόμενοι στόχοι. Οι εκπομπές έχουν μέγιστη τιμή όταν το κόστος είναι ελάχιστο, και αντίστροφα.

- Επίσης, από τα παραπάνω βλέπουμε ότι οι απώλειες ενεργούς ισχύος είναι περίπου ίδιες σε όλες τις περιπτώσεις, και συγκεκριμένα είναι αρκετά μικρές ,περίπου το 1,25% της παραγωγής.
- Ένα άλλο στοιχείο που βλέπουμε είναι, ότι οι χρόνοι εκτέλεσης είναι αρκετά μεγάλοι σε σχέση με άλλες μεθόδους, ωστόσο δεν είναι απαγορευτικοί αφού είναι της τάξης των 6-7 λεπτών. Αυτή η καθυστέρηση είναι αναμενόμενη, αν σκεφτούμε ότι έχοντας πληθυσμό 50, σε μια επανάληψη οι $24 \cdot 50 = 1200$ μεταβλητές εξετάζονται αν επαληθεύουν τους 36 μη γραμμικούς περιορισμούς. Οπότε για 50 επαναλήψεις είναι λογικό να έχουμε τέτοιους χρόνους.
- Τέλος, σε γενικές γραμμές, τα αποτελέσματα και για τις τρεις περιπτώσεις εμφανίζουν μικρές αποκλίσεις μεταξύ τους.

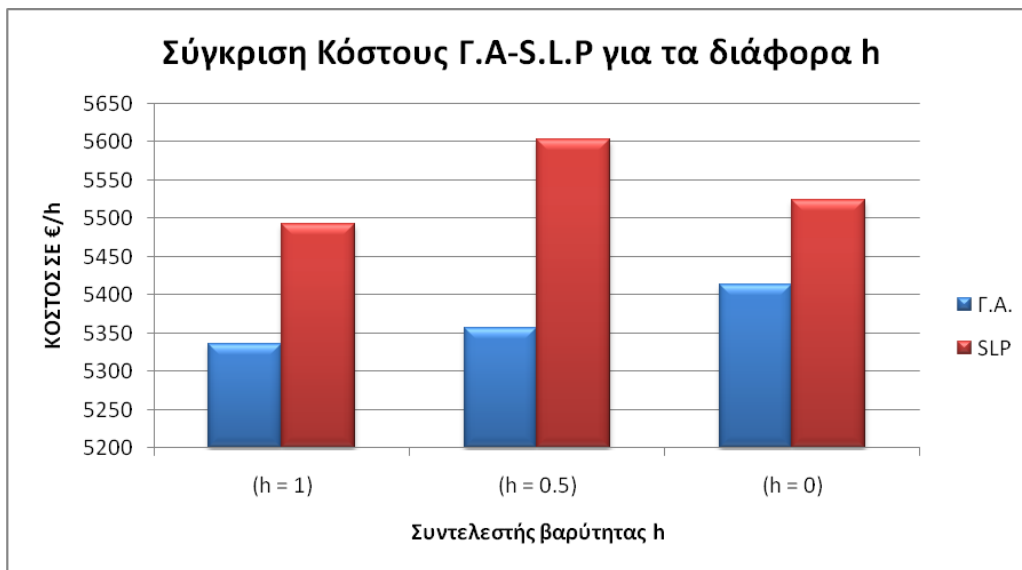
6.3.1 Μέθοδος Γ.Α. -Μέθοδος SLP

Παραπάνω είδαμε ότι ο Γ.Α ανταποκρίνεται με επιτυχία σε προβλήματα βέλτιστης ροής φορτίου. Στο σημείο αυτό συγκρίνουμε τα αποτελέσματα μας με αυτά της αναφοράς [7] ,τα οποία προήλθαν με την μέθοδο του διαδοχικού γραμμικού προγραμματισμού (SLP), έτσι ώστε να φανεί η αποτελεσματικότητά τους. Για τις τρεις παραπάνω περιπτώσεις τα συγκριτικά αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 6.8.

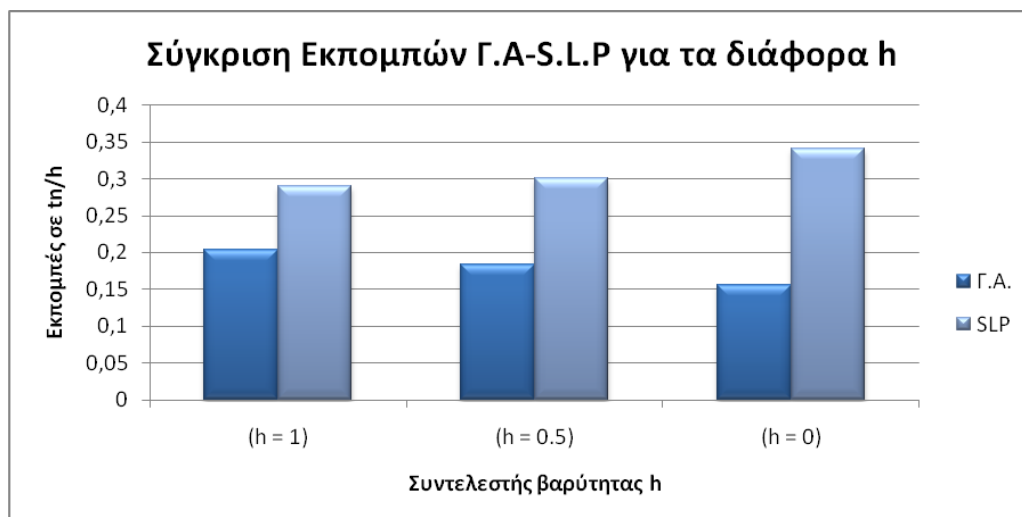
	(h=1)		(h=0.5)		(h=0)	
	Γ.Α.	SLP	Γ.Α.	SLP	Γ.Α.	SLP
P_{g1} (MW)	77,71	66,83	73,99	64,07	83,11	58,28
P_{g2} (MW)	147,52	168,3	139,19	171,04	145,61	176,78
P_{g3} (MW)	93,76	85,1	106,14	85,26	89,91	85,64
F (€/h)	5335,2	5492,3	5357	5524,5	5414	5602,6
E (ton/h)	0,203	0,29	0,184	0,3	0,156	0,34
P_{loss} (MW)	4,42	5,22	4,29	5,37	4,3	5,7

Πίνακας 6.8: Σύγκριση μεθόδων Γ.Α και S.L.P

Τα αποτελέσματα αυτά φαίνονται γραφικά στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 6.10: Σύγκριση κόστους μεταξύ Γ.Α και SLP για τα διάφορα h



Σχήμα 6.11: Σύγκριση εκπομπών μεταξύ Γ.Α και SLP για τα διάφορα h

Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις

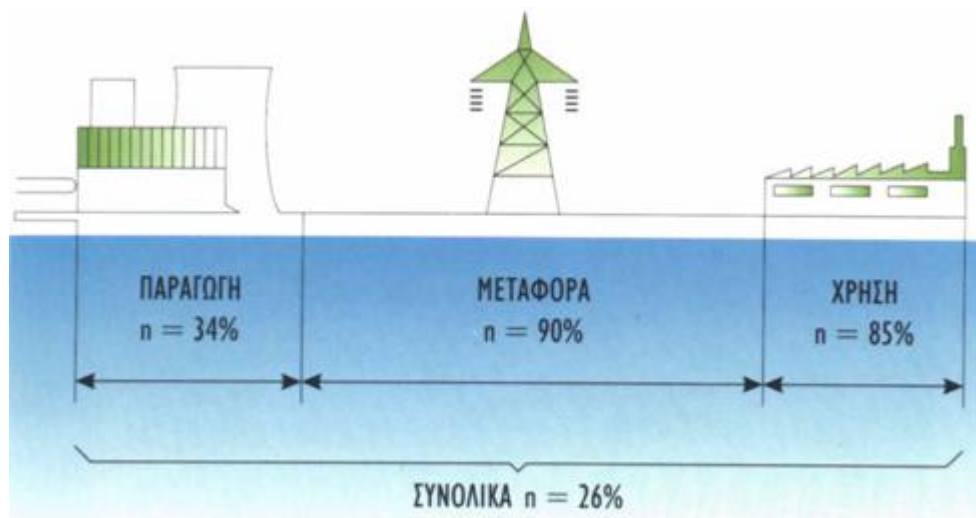
- Με βάση τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι με τον Γ.Α οδηγούμαστε σε καλύτερα αποτελέσματα και στις 3 περιπτώσεις. Συγκεκριμένα το κόστος είναι μειωμένο κατά **2,86-3,37 %**, οι εκπομπές καυσαερίων μειωμένες κατά **30-54,2 %**, και τέλος οι απώλειες ενεργού ισχύος είναι μειωμένες κατά **15,33-24,56 %**.
- Ωστόσο, ο Γ.Α. από την φύση του αναμένεται να είναι πιο αργός από την SLP, όπως εξηγήθηκε και προηγουμένως. Πράγματι, παρόλο που δεν έχουμε στοιχεία για τον χρόνο εκτέλεσης της S.L.P, βλέπουμε ότι οι χρόνοι εκτέλεσης του Γ.Α είναι της τάξης των λεπτών, οπότε κατά πάσα πιθανότητα μεγαλύτεροι από τους αντίστοιχους της S.L.P.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ- ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ (Σ.Η.Θ.)

7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

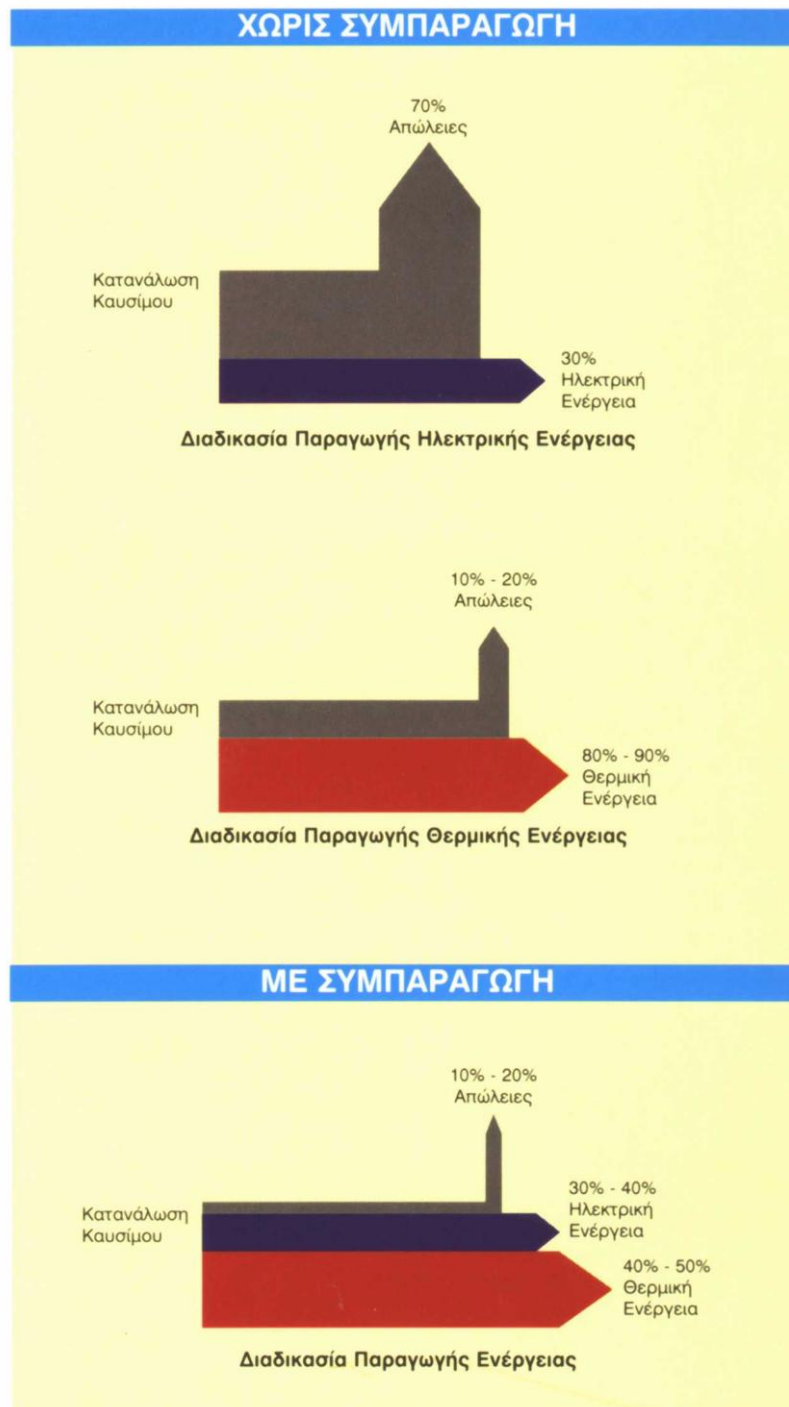
Συμπαραγωγή είναι η συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρικής ή μηχανικής και θερμικής ενέργειας από την ίδια αρχική πηγή ενέργειας [14],[15]. Η ιδέα της συμπαραγωγής είναι αρκετά παλαιά και αναπτύχθηκε λόγω του χαμηλού βαθμού απόδοσης των συμβατικών συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής (σχήμα 7.1). Τα συστήματα συμπαραγωγής έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό τους την ανάκτηση του μεγαλύτερου μέρους της παραγόμενης θερμικής ενέργειας, η οποία αν δεν μεσολαβήσει κάποια άλλη διεργασία, αποτελεί απλώς απώλεια προς το περιβάλλον, επιτυγχάνοντας με τον τρόπο αυτόν εξοικονόμηση πόρων και βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (σχήμα 7.2).



Σχήμα 7.1: Ο βαθμός απόδοσης του συμβατικού συστήματος παροχής ηλεκτρικής ενέργειας

Κάτω από προϋποθέσεις, η οικονομία που επιτυγχάνεται με την επιλογή της λύσης της Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού-Θερμότητας (Σ.Η.Θ.) στο συνολικό ενεργειακό κόστος, μπορεί να είναι ιδιαίτερα αξιόλογη στις περιπτώσεις εκείνες, που απαιτούνται ταυτοχρόνως μεγάλες ποσότητες θερμικών και ηλεκτρικών φορτίων. Η υψηλή ενεργειακή απόδοση των συστημάτων συμπαραγωγής έχει ως εύλογο αποτέλεσμα την υψηλή οικονομική τους απόδοση. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων, κυρίως σε βιομηχανικές εφαρμογές, μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του ενεργειακού κόστους έως και 40%, ενώ η περίοδος αποπληρωμής τους κυμαίνεται από 3 έως 5 έτη. Όταν λειτουργούν παράλληλα με το ηλεκτρικό δίκτυο, τα συστήματα συμπαραγωγής εξασφαλίζουν υψηλή αξιοπιστία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Το πλεονέκτημα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για καταναλωτές με απαίτηση συνεχούς και απρόσκοπτης παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως είναι οι βιομηχανίες αλλά και κτιριακά συγκροτήματα όπως τα νοσοκομεία. Αν

μάλιστα χρησιμοποιηθεί ως καύσιμη ύλη το φυσικό αέριο, τότε η Σ.Η.Θ. προκύπτει ως ένας από τους οικονομικότερους και αποδοτικότερους τρόπους μείωσης του ενεργειακού κόστους μιας διεργασίας.



Σχήμα 7.2: Η ανάκτηση της απορριπτόμενης ενέργειας

Το φυσικό αέριο παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα συγκρινόμενο με άλλα καύσιμα, όπως το ελαφρύ και το βαρύ πετρέλαιο (μαζούτ), όπως η καθαρότητα και η ποιότητα του, που συντελούν στην πιο αξιόπιστη και αποδοτική λειτουργία, της μονάδας, με ευνοϊκές επιπτώσεις στη διάρκεια ζωής της και στις δαπάνες συντήρησης. Επιπλέον με την χρήση του φυσικού αερίου λύνονται τα προβλήματα προμήθειας και αποθήκευσης που παρουσιάζονται με την χρησιμοποίηση άλλων καυσίμων, υγρών και στερεών, καθόσον το φυσικό αέριο διανέμεται στα σημεία κατανάλωσης με ευθύνη της εταιρείας αερίου. Τέλος, το φυσικό αέριο αναμιγνύεται εύκολα με τον ατμοσφαιρικό αέρα πράγμα που το καθιστά σχεδόν ακίνδυνο, ενώ τα προϊόντα της καύσεως του είναι ελεύθερα θείου που σε συνδυασμό με την εξοικονόμηση ενέργειας που επέρχεται με τη μέθοδο της συμπαραγωγής, οδηγούν σε σημαντική μείωση των αέριων ρυπαντών, όπως NO_x , SO_x , CO_2 .

Η συμπαραγωγή δεν απαρτίζει μία συγκεκριμένη τεχνολογία, αλλά εφαρμογή τεχνολογικών ιδεών που αποβλέπει στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Η παραδοσιακή διαδικασία παραγωγής ηλεκτρισμού είναι ανεπαρκής, αφού μετατρέπει μόνο το 1/3 των χρησιμοποιούμενων καυσίμων σε αξιοποιήσιμη ενέργεια. Η σημαντική αύξηση στην αποδοτικότητα λόγω της συμπαραγωγής συμβάλλει στην κατανάλωση μικρότερων ποσοτήτων καυσίμων και στη συνεπαγόμενη μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων.

Υπάρχουν τέσσερις κύριοι τομείς εφαρμογής της συμπαραγωγής:

α. Σύστημα ηλεκτρισμού της χώρας (Δ.Ε.Η.). Σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής μπορούν να μετατραπούν σε μονάδες συμπαραγωγής και να καλύψουν τις θερμικές ανάγκες παρακείμενων πόλεων, οικισμών, βιομηχανιών, κ.λ.π.

β. Βιομηχανικός τομέας. Σημαντικό δυναμικό παρουσιάζουν οι κλάδοι τροφίμων και ποτών, οι κλωστοϋφαντουργίες, οι βιομηχανίες χάρτου, οι χημικές βιομηχανίες, τα διυλιστήρια, τα εργοστάσια τσιμέντου, οι βασικές μεταλλουργικές βιομηχανίες.

γ. Εμπορικός - κτιριακός τομέας. Διακρίνεται σε τρεις κύριους υποτομείς: ξενοδοχεία - νοσοκομεία, μεγάλα συγκροτήματα κατοικιών και κτίρια γραφείων. Ο καθένας τους χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερη μορφή της καμπύλης φορτίου. Άλλου είδους κτίρια (πανεπιστήμια, εμπορικά κέντρα κ.λ.π.) έχουν καμπύλες φορτίου, που προκύπτουν με συνδυασμό των τριών αυτών υποτομέων.

δ. Αγροτικός τομέας. Τα υπολείμματα αγροτικών διεργασιών χρησιμοποιούνται ως καύσιμο και η ανακτώμενη θερμότητα μπορεί να διοχετευτεί σε μία σειρά από γεωργικές διαδικασίες, όπως ξήρανση γεωργικών προϊόντων, θέρμανση αγροτικών οικημάτων, θερμοκηπίων, κ.λ.π.

7.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Η συμπαραγωγή μπορεί να έχει τόσο θετικές όσο και αρνητικές επιπτώσεις στην εξάντληση μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, στο σύστημα ηλεκτρισμού της χώρας, στο περιβάλλον, στην κοινωνία. Οι πιθανές αρνητικές επιπτώσεις μπορούν να μετριασθούν και να εξαλειφθούν με σωστή επιλογή του είδους και της χωροταξικής ένταξης του συστήματος συμπαραγωγής, την προσεκτική ένταξή του στο ευρύτερο ενεργειακό σύστημα της περιοχής ή της χώρας και με την επιμελημένη συντήρηση κατά τη διάρκεια της ζωής του. Ακολουθεί αναλυτικότερη παρουσίαση των επιπτώσεων αυτών.

7.2.1 Επιπτώσεις στην κατανάλωση καυσίμων

Όλα τα συστήματα συμπαραγωγής εξοικονομούν καύσιμο διότι έχουν υψηλότερο βαθμό απόδοσης από τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας. Για παράδειγμα, ένα σύστημα συμπαραγωγής ατμοστροβίλου μειώνει την κατανάλωση καυσίμου κατά 15% περίπου (σε σύγκριση με τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρισμού με μονάδα ατμοστροβίλου και θερμότητας με λέβητα), ένα σύστημα συμπαραγωγής με κινητήρα Diesel τη μειώνει κατά 25% (σε σύγκριση με τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρισμού με ντιζελοκίνητη ηλεκτρογεννήτρια και θερμότητας με λέβητα), κλπ.

Μία πρόσθετη βελτίωση του βαθμού εκμετάλλευσης των καυσίμων οφείλεται στο ότι τα συστήματα συμπαραγωγής βρίσκονται συνήθως πιο κοντά στους καταναλωτές απ' ό,τι οι κεντρικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής. Έτσι, περιορίζονται οι απώλειες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, που είναι της τάξεως του 8-10%.

7.2.2 Επιπτώσεις στο σύστημα ηλεκτρισμού της χώρας

Προκειμένου να αντιμετωπισθεί η μελλοντική αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας, απαιτείται η κατασκευή νέων σταθμών ηλεκτροπαραγωγής. Η διάδοση της συμπαραγωγής αυξάνει το δυναμικό ηλεκτροπαραγωγής και περιορίζει τις ανάγκες κατασκευής νέων κεντρικών σταθμών, προσφέροντας έτσι σημαντική εξοικονόμηση επενδύσεων κεφαλαίων της εταιρίας ηλεκτρισμού (Δ.Ε.Η.).

Καθώς τα συστήματα συμπαραγωγής έχουν μικρότερο μέγεθος και μικρότερο χρόνο εγκατάστασης από τους μεγάλους κεντρικούς σταθμούς, προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία και προσαρμοστικότητα σε τυχόν μη προβλέψιμες μελλοντικές μεταβολές της ζήτησης ηλεκτρισμού. Ο μικρός χρόνος εγκατάστασης συντελεί επίσης

σε περιορισμό του χρηματοοικονομικού κόστους, που συμβάλλει με τη σειρά του στη μείωση του μοναδιαίου κόστους παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας.

Πολλές μικρές μονάδες συμπαραγωγής που λειτουργούν παράλληλα με τους κεντρικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, αυξάνουν την αξιοπιστία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά είναι ενδεχόμενο να δημιουργήσουν προβλήματα ευστάθειας του δικτύου. Τα προβλήματα αυτά περιορίζονται ή και αποφεύγονται, όταν το σύστημα συμπαραγωγής και η σύνδεσή του με το δίκτυο πληρούν ορισμένες προδιαγραφές. Η συνεννόηση με τις αρμόδιες υπηρεσίες της Δ.Ε.Η. είναι απαραίτητη προς το σκοπό αυτόν.

7.2.3 Οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις

Οι οικονομικές επιπτώσεις της συμπαραγωγής στο σύστημα ηλεκτρισμού της χώρας έχουν αναφερθεί προηγουμένως. Μία πρόσθετη ευνοϊκή επίδραση στην εθνική οικονομία προκύπτει όταν η συμπαραγωγή μειώνει το σύνολο των δαπανών για εισαγόμενα καύσιμα.

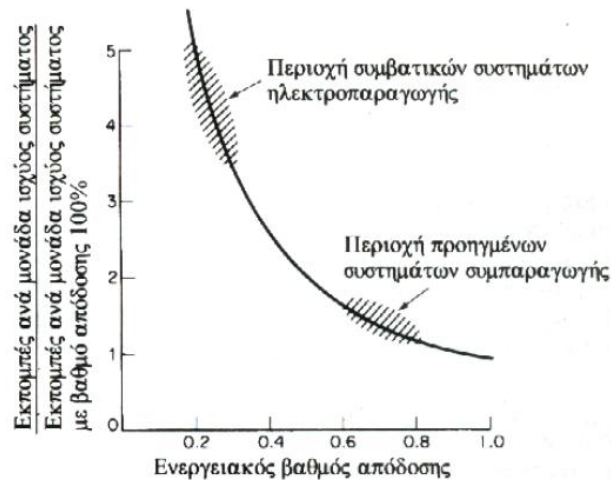
Είναι γνωστό ότι οι κεντρικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής κατασκευάζονται σε μεγάλα μεγέθη και εγκαθίστανται σε απομακρυσμένες περιοχές. Η κατασκευή και λειτουργία των σταθμών προκαλεί τη μετακίνηση προς τις περιοχές αυτές μεγάλου αριθμού εργαζομένων. Αντίθετα, οι μονάδες συμπαραγωγής συνήθως είναι μικρότερου μεγέθους και εγκαθίστανται πιο κοντά σε κατοικημένες περιοχές. Η διασπορά τους σε διάφορες πόλεις της χώρας δημιουργεί νέες θέσεις εργασίας στην κάθε περιοχή, συγκρατεί εκεί το εργατικό δυναμικό και συμβάλλει στην οικονομική ανάπτυξη του τόπου με την ανάπτυξη νέων δραστηριοτήτων, που σχετίζονται με την κατασκευή, συντήρηση και λειτουργία των μονάδων.

Η συμπαραγωγή αυξάνει την αξιοπιστία ηλεκτροδότησης των καταναλωτών. Επίσης, προκαλεί αποκέντρωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με επακόλουθο την αποκέντρωση της λήψεως σχετικών αποφάσεων και την ενδυνάμωση του ρόλου της τοπικής αυτοδιοίκησης.

7.2.4 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Χάρη στην αποδοτικότερη εκμετάλλευση του καυσίμου, η συμπαραγωγή συντελεί σε άμεση μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων, όπως πολύ παραστατικά δείχνει το Σχήμα 7.3, με την προϋπόθεση ότι το καύσιμο που χρησιμοποιεί δεν είναι κατώτερης ποιότητας από εκείνο της χωριστής συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας. Η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου συνοδεύεται επίσης και από μια έμμεση μείωση ρύπων από τον υπόλοιπο κύκλο καυσίμου: εξόρυξη, επεξεργασία,

μεταφορά, αποθήκευση. Η ποσοτικοποίηση του κόστους αυτού είναι δύσκολη και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες: τεχνολογία, καύσιμο, τοπικές συνθήκες, κ.λπ.



Σχήμα 7.3: Εκπομπή χημικών ρύπων ως συνάρτηση του βαθμού απόδοσης συστημάτων

Στον παρακάτω πίνακα 7.1 παρουσιάζονται μερικά παραδείγματα σύγκρισης εκπομπών μεταξύ συμβατικών μονάδων και μονάδων συμπαραγωγής. Εντυπωσιακή είναι η μείωση εκπομπών CO₂: 50–100 kg ανά 100 kWh ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή σε κάθε TWh ηλεκτρικής ενέργειας, που παράγεται με συμπαραγωγή, αντιστοιχεί μείωση τουλάχιστον 500000 τόνων CO₂. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την εξοικονόμηση καυσίμου δικαιολογεί τη θέσπιση κινήτρων για τη διάδοση της συμπαραγωγής.

Ρύπος	Συνδυασμοί συστήματος συμπαραγωγής - συστημάτων χωριστής παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας											
	1 - A		1 - B		2 - A		2 - B		3 - A		3 - B	
	gr	%	gr	%	gr	%	gr	%	gr	%	gr	%
CO ₂	- 51024	- 46,2	- 88458	- 59,9	- 62454	- 52,0	- 99888	- 63,4	- 70791	- 46,7	- 108225	- 57,2
NO _x	+ 812	+255,3	+ 802	+244,5	- 290	- 85,3	- 300	- 85,7	- 283	- 68,7	- 293	- 69,4
CO	+ 320	+524,6	+ 357	+1487	- 33	- 52,4	+ 4	+ 15,4	- 68	-100,0	- 31	-100,0
HC	+ 375	+1875	+ 388	+5543	- 15	- 75,0	- 2	- 28,6	+ 4	+ 18,2	+ 17	+188,9
SO _x	- 208	- 95,9	- 794	- 98,9	- 273	- 99,3	- 859	- 99,8	- 415	- 90,0	- 1001	- 95,6
Σωματίδια	- 44	- 91,7	- 40	- 90,9	- 51	- 91,1	- 47	- 90,4	- 77	- 91,7	- 73	- 91,3
Συστήματα συμπαραγωγής 1. Κινητήρας Diesel διπλού καυσίμου (90% της ενέργειας από φυσικό αέριο, 10% από καύσιμο Diesel) με $\eta_e = \eta_h = 0,35$ (PHR = 1). 2. Νέος αεριοστρόβιλος φυσικού αερίου με $\eta_e = 0,35$, $\eta_h = 0,45$, (PHR = 0,778). 3. Νέος ατμοστρόβιλος φυσικού αερίου με $\eta_e = 0,25$, $\eta_h = 0,55$, (PHR = 0,455). Συστήματα χωριστής παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας Α. Αεριοστρόβιλος με καύσιμο Diesel και βιομηχανικός ατμολέβητας με καύσιμο μαζούτ. Β. Νέος ατμοστρόβιλος με καύσιμο άνθρακα και βιομηχανικός ατμολέβητας με καύσιμο μαζούτ.												
Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει μείωση εκπομπών με τη συμπαραγωγή. Τα ποσοστά προσδιορίστηκαν με βάση αναγωγή τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας.												

Πίνακας 7.1: Παραδείγματα σύγκρισης εκπομπών μεταξύ συστημάτων συμπαραγωγής και συμβατικών τρόπων παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (Οι τιμές αναφέρονται σε παραγωγή 100 kWh ηλεκτρικής ενέργειας)

7.3 Η ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Η Συμπαράγωγή στην Ελλάδα ξεκινά από τις αρχές του 20ου αιώνα, όταν στο Βόλο και ειδικότερα στην κεραμοποιεία Τσαλαπάτα εγκαταστάθηκε, από Βέλγους μηχανικούς, σύστημα Συμπαράγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας για τις ανάγκες της, που λειτούργησε μέχρι και τα τέλη της δεκαετίας του 70 [16]. Σε ευρύτερη κλίμακα, οι πρώτες μονάδες Συμπαράγωγής εγκαταστάθηκαν σε μεγάλες ελληνικές βιομηχανίες στις αρχές της δεκαετίας του '70. Σήμερα, λειτουργούν μονάδες Συμπαράγωγής σε βιομηχανίες ζάχαρης και χάρτου, δυλιστήρια πετρελαίου, κλωστοϋφαντουργίες, κ.λπ. Επίσης, ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες της ΔΕΗ έχουν τροποποιηθεί κατάλληλα, ώστε να καλύπτουν τις θερμικές ανάγκες αστικών περιοχών με τα δίκτυα τηλεθέρμανσης, όπως τα δίκτυα της Κοζάνης, της Πτολεμαΐδας, του Αμυνταίου και της Μεγαλόπολης.

Αναλύοντας τα στοιχεία των εγκαταστάσεων μέχρι σήμερα φαίνεται ότι από το 1990 και μετά έχουμε σημαντικές βελτιώσεις στις εγκαταστάσεις ΣΗΘ στις ελληνικές βιομηχανίες. Η βελτίωση δεν ήταν μόνον ποιοτική αλλά και ποσοτική (αύξηση εγκατεστημένης ισχύος) σε επίπεδο βιομηχανίας. Μετά τα μέσα της δεκαετίας του 1990, η άφιξη του φυσικού αερίου στην Ελλάδα και οι δυνατότητες που προσφέρει η τεχνολογία της Συμπαράγωγής, οδήγησαν στη δραστηριοποίηση ενός σημαντικού αριθμού εταιρειών ή οργανισμών, με στόχους την ενημέρωση του επιχειρηματικού κόσμου, την παροχή συμβουλευτικών υπηρεσιών για τη μελέτη και κατασκευή εγκαταστάσεων συμπαράγωγής με το "κλειδί στο χέρι", τη συντήρηση, λειτουργία και εκμετάλλευση εγκαταστάσεων συμπαράγωγής.

Αν και αρκετές νέες εγκαταστάσεις κατασκευάστηκαν την τελευταία δεκαετία, παίρνοντας μάλιστα χρηματοδότηση από τα υπάρχοντα επενδυτικά προγράμματα, πολλές από τις εγκαταστάσεις ΣΗΘ με φυσικό αέριο έχουν βγει εκτός λειτουργίας. Αυτό οφείλεται στη σχετικά υψηλή τιμή αγοράς του φυσικού αερίου και τη χαμηλή τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, όπου οι δύο αυτές παράμετροι παίζουν καθοριστικό ρόλο για την βιωσιμότητα επενδύσεων ΣΗΘ.

Γενικά η αγορά της Συμπαράγωγής μέχρι και σήμερα, παρ' όλα τα θετικά βήματα που έγιναν από το ΥΠΑΝ (π.χ. Ν.2773/99, Ν.346806, επιδοτήσεις σε συστήματα ΣΗΘ τόσο από το Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Ενέργειας, ΕΠΕ, του Β' ΚΠΣ όσο και από το Επιχειρησιακό Πρόγραμμα 'Ανταγωνιστικότητα' του Γ' ΚΠΣ, κ.λπ.), παραμένει δύσπιστη και σε κατάσταση αναμονής, γιατί έχει συναντήσει έναν αριθμό εμποδίων:

- Αύξηση των τιμών του πετρελαίου και κατά συνέπεια του φυσικού αερίου που λειτουργεί εις βάρος της ΣΗΘ.
- Δυσκολία στον προσδιορισμό των βασικών μεγεθών για οικονομικοτεχνικές αναλύσεις στον ενεργειακό τομέα.

- Έλλειψη ανταγωνιστικής τιμολογιακής πολιτικής για Συμπααραγωγή στον τριτογενή τομέα.
- Έλλειψη ανταγωνιστικής τιμολογιακής πολιτικής για Συμπααραγωγή στον βιομηχανικό τομέα. Η υπάρχουσα τιμολόγηση φυσικού αερίου για ΣΗΘ και του τρόπου υπολογισμού της τιμής του ανακοινώθηκε από τη ΔΕΠΑ τον Οκτώβριο του 1999, αλλά λόγω της αβεβαιότητας και της καθυστέρησης οδήγησε σημαντικά ενεργειακά έργα ΣΗΘ, που επιλέχθηκαν για επιδότηση από το ΕΠΕ του Β' ΚΠΣ, στην απένταξη.
- Δυσκολίες για την περαιτέρω ανάπτυξη του δικτύου διανομής φυσικού αερίου.
- Αδυναμία της ΔΕΠΑ για την τήρηση του προβλεπόμενου χρονοδιαγράμματος για τη σύνδεση μεγάλων βιομηχανιών.
- Έλλειψη εμπειρίας στην ενεργειακή διαχείριση και αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων.

Σαν συνέπεια των παραπάνω, η συμμετοχή της ΣΗΘ στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι σήμερα της τάξης του 2% και στην εγκατεστημένη ισχύ είναι επίσης της τάξης του 2%, σε αντίθεση με τις άλλες Ευρωπαϊκές χώρες, όπου 11 χώρες παράγουν πάνω από το 20% της ηλεκτρικής τους ενέργειας από ΣΗΘ και 4 χώρες πάνω από 50%. Ο Ευρωπαϊκός μέσος όρος είναι γύρω στο 10%. Από τη συμπααραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια το 40% παράγεται από καύση φυσικού αερίου, το 19% από καύση άνθρακα και το 10% από ΑΠΕ.

7.4 ΤΡΟΠΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΟΝΑΔΩΝ Σ.Η.Θ.

Οι κυριότεροι τρόποι λειτουργίας ενός συστήματος συμπααραγωγής, δηλαδή οι τρόποι ρύθμισης της ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος σε κάθε χρονική στιγμή, είναι οι ακόλουθοι:

- Παραγωγή θερμότητας ίσης με το θερμικό φορτίο (“heat match”). Εάν παράγεται ηλεκτρική ενέργεια περισσότερη από το φορτίο, η περίσσεια πωλείται στο εθνικό δίκτυο. Εάν η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι μικρότερη από το φορτίο, το έλλειμμα συμπληρώνεται από το δίκτυο.
- Παραγωγή ηλεκτρισμού ίσου με το ηλεκτρικό φορτίο (“electricity match”). Βοηθητικός λέβητας συμπληρώνει τις πρόσθετες ανάγκες σε θερμότητα ,εάν χρειασθεί. Επίσης, είναι απαραίτητη η εγκατάσταση ψυγείων ικανών να αποβάλλουν την περίσσεια θερμότητα, εάν προκύψει ανάγκη.

- Μικτός τρόπος, δηλαδή παρακολούθηση άλλοτε του θερμικού φορτίου (τρόπος α΄) και άλλοτε του ηλεκτρικού φορτίου (τρόπος β΄).
- Πλήρης κάλυψη του θερμικού και ηλεκτρικού φορτίου σε κάθε χρονική στιγμή χωρίς σύνδεση με το εθνικό δίκτυο. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας απαιτεί επαρκή εφεδρεία ισχύος και επομένως περίπλοκο σύστημα συμπαραγωγής. Είναι η πιο ακριβή λύση, τουλάχιστον από πλευράς αρχικού κόστους.

Γενικά, χωρίς όμως να λείπουν οι εξαιρέσεις, ο πρώτος από τους τρόπους αυτούς προσφέρει την υψηλότερη ενεργειακή και οικονομική απόδοση για συστήματα στο βιομηχανικό και εμπορικό-κτιριακό τομέα. Για σταθμούς συμπαραγωγής του συστήματος ηλεκτρισμού της χώρας, η επιλογή του τρόπου λειτουργίας, εξαρτάται από τις ευρύτερες ανάγκες του δικτύου, τις διαθέσιμες μονάδες και τις υποχρεώσεις απέναντι στους καταναλωτές ηλεκτρισμού και θερμότητας.

Είναι φανερό ότι ο τρόπος λειτουργίας εξαρτάται από και επηρεάζει τον σχεδιασμό του συστήματος. Κρίσιμη για την οικονομικότητα του είναι η διαστασιολόγηση των κύριων μηχανημάτων, πχ αν θα είναι το σύστημα ικανό να καλύπτει το φορτίο αιχμής, το φορτίο βάσης ή κάποιο άλλο φορτίο.

Η επιλογή του είδους του συστήματος, η διαστασιολόγησή του και ο τρόπος λειτουργίας του σε κάθε χρονική στιγμή είναι θέματα που πρέπει να αντιμετωπίζονται με προσεκτική μελέτη και βελτιστοποίηση για την κάθε συγκεκριμένη εφαρμογή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα περισσότερα συστήματα συμπαραγωγής μπορούν να χαρακτηριστούν είτε ως συστήματα «κορυφής» (topping systems) είτε ως συστήματα «βάσης» (bottoming systems) [14],[15]. Στα συστήματα κορυφής, ρευστό υψηλής θερμοκρασίας χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρισμού, ενώ η αποβαλλόμενη θερμότητα χαμηλής θερμοκρασίας χρησιμοποιείται σε θερμικές διεργασίες, θέρμανση χώρων ή ακόμη και για την παραγωγή πρόσθετης ηλεκτρικής ενέργειας.

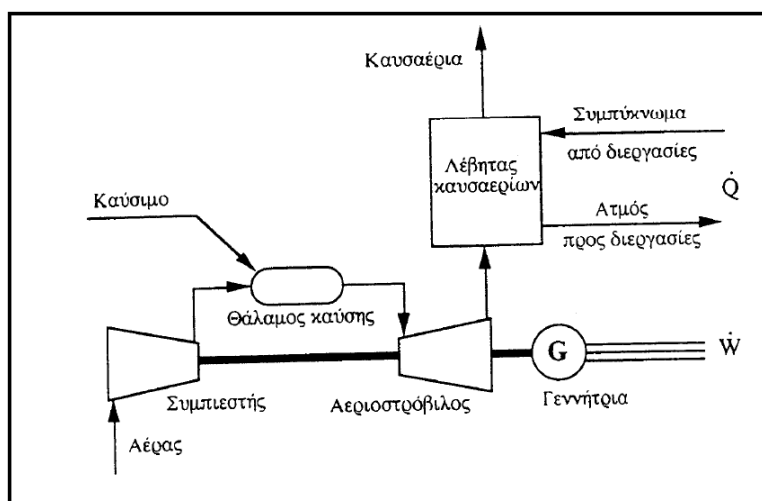
Στα συστήματα βάσης, παράγεται πρώτα θερμική ενέργεια υψηλής θερμοκρασίας και κατόπιν τα θερμά αέρια διοχετεύονται συνήθως σε λέβητα ανακομιδής θερμότητας, όπου παράγεται ατμός που κινεί αμμοστροβιλογεννήτρια. Επίσης, είναι δυνατόν τα θερμά αέρια να διοχετευτούν σε αεριοστρόβιλο, που κινεί την ηλεκτρογεννήτρια χωρίς την παρεμβολή λέβητα.

8.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

Υπάρχουν δύο βασικές διατάξεις: ανοικτού και κλειστού κύκλου.

8.2.1 Συστήματα αεριοστρόβιλου ανοικτού κύκλου

Οι περισσότερες αεριοστροβιλικές μονάδες είναι ανοικτού τύπου: αέρας αναρροφάται από την ατμόσφαιρα, συμπιέζεται και οδηγείται στο θάλαμο καύσης. Τα καυσαέρια αποτονώνονται στον αεριοστρόβιλο (που κινεί τη γεννήτρια), από τον οποίο βγαίνουν με θερμοκρασία 300-600 °C. Η σημαντική ισχύς που απαιτείται για την κίνηση του συμπιεστή και η υψηλή θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων είναι οι κύριες αιτίες του μικρού βαθμού απόδοσης ενός τέτοιου συστήματος ηλεκτροπαραγωγής (25-35% και σε σύγχρονες προηγμένες μονάδες 40%).



Σχήμα 8.1: Σύστημα συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο ανοικτού κύκλου

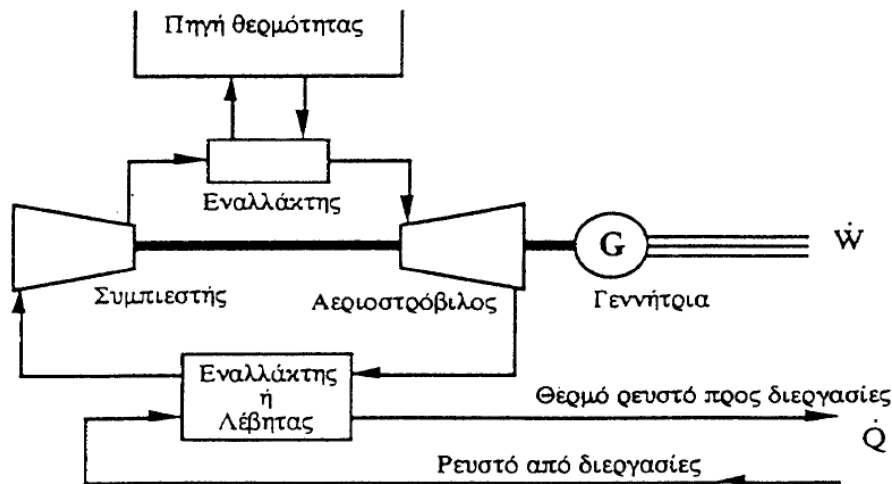
Η υψηλή θερμοκρασία των καυσαερίων κάνει τις μονάδες αυτές ιδανικές για συμπαραγωγή αυξάνοντας το βαθμό απόδοσης στο 60-80%. Αυτή ακριβώς η εκμετάλλευση της θερμότητας των καυσαερίων στηρίζεται είτε σε άμεση χρήση σε θερμικές διεργασίες(θέρμανση, ξήρανση, κ.λ.π.), είτε σε διοχέτευση αυτών σε λέβητα ανακομιδής θερμότητας(λέγεται και λέβητας καυσαερίων). Εκεί παράγεται ατμός υψηλών χαρακτηριστικών, που είναι κατάλληλος όχι μόνο για θερμικές διεργασίες αλλά και για την κίνηση ατμοστροβίλου συνδεδεμένου με γεννήτρια ή άλλο μηχάνημα (σύστημα συνδυασμένου κύκλου).

Τα συστήματα συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο ανοικτού κύκλου έχουν ισχύ 100kW-100MW. Λειτουργούν συνήθως με φυσικό αέριο ή ελαφρά αποστάγματα πετρελαίου, ενώ ευοίωνες παρουσιάζονται οι προοπτικές για χρήση γαιανθράκων σε εξαεριωμένη μορφή.

Ο χρόνος εγκατάστασης των συστημάτων συμπαραγωγής αεριοστροβίλων είναι 9-14 μήνες για ισχύεις μέχρι 7MW και φθάνει τα δύο έτη για μεγαλύτερες μονάδες. Η αξιοπιστία προσεγγίζει το 95% και η μέση διαθεσιμότητα το 90-95%. Η χρήσιμη διάρκεια ζωής είναι 15-20 έτη και μπορεί να μειωθεί σημαντικά από καύσιμο κακής ποιότητας ή ανεπαρκή συντήρηση. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης είναι της τάξεως του 40%, ενώ ο ολικός βαθμός απόδοσης κυμαίνεται στην περιοχή του 60-80%. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης είναι υψηλότερος τόσο στο πλήρες φορτίο όσο και σε μερικό φορτίο, αλλά η μείωσή του σε μερικό φορτίο είναι πιο έντονη από εκείνη των συστημάτων ατμοστροβίλου. Τέλος, ο λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα είναι υψηλότερος.

8.2.2 Συστήματα αεριοστροβίλου κλειστού κύκλου

Στα συστήματα αεριοστροβίλου κλειστού κύκλου, το εργαζόμενο ρευστό (συνήθως ήλιο ή αέρας) κυκλοφορεί σε κλειστό κύκλωμα. Θερμαίνεται μέχρι την κατάλληλη θερμοκρασία σε εναλλάκτη θερμότητας, πριν από την είσοδο στον αεριοστρόβιλο, και ψύχεται μετά την έξοδό του από αυτόν. Καθώς το ρευστό δεν συμμετέχει στην καύση διατηρείται καθαρό και έτσι αποφεύγεται η μηχανική και χημική διάβρωση του αεριοστροβίλου από τα προϊόντα της καύσης. Η εξωτερική καύση επιτρέπει τη χρήση οποιουδήποτε καυσίμου στα συστήματα αυτά: άνθρακα, απόβλητα βιομηχανιών ή πόλεων, βιομάζα, υγρά ή αέρια καύσιμα παραγόμενα από βιομάζα, κ.λ.π.. Πυρηνική ή ηλιακή ενέργεια μπορούν επίσης να αποτελέσουν πηγή θερμότητας.



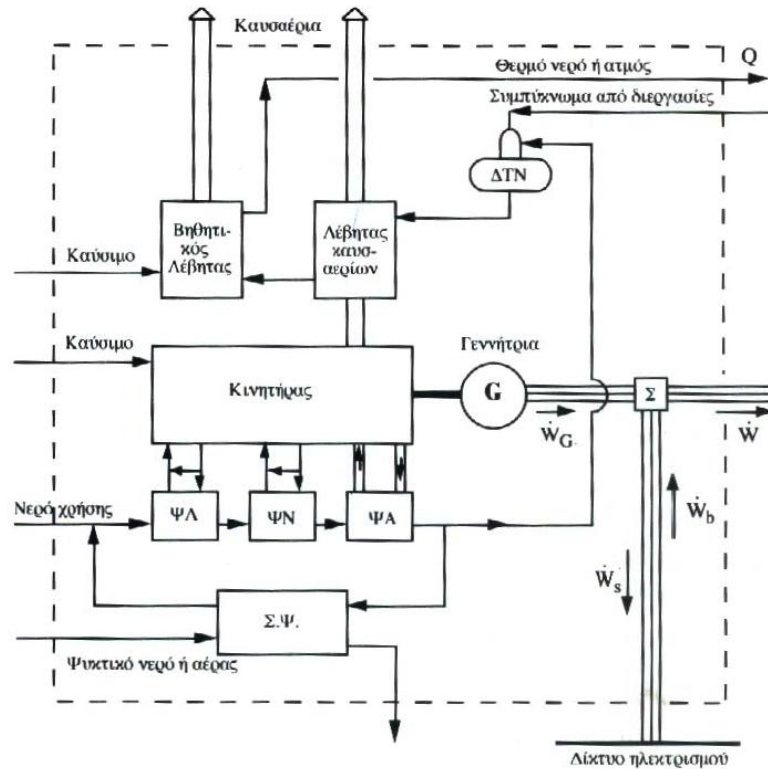
Σχήμα 8.2: Σύστημα συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο κλειστού τύπου

Η αξιοπιστία των συστημάτων κλειστού τύπου προβλέπεται ότι θα είναι τουλάχιστον ίση με εκείνη των συστημάτων ανοικτού κύκλου, ενώ η διαθεσιμότητα θα είναι υψηλότερη χάρη στις μικρότερες απαιτήσεις συντήρησης, που οφείλονται στην καθαρότητα του εργαζόμενου ρευστού. Ο βαθμός απόδοσης και ο λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα βρίσκονται περίπου στα ίδια επίπεδα με εκείνα των συστημάτων ανοικτού κύκλου. Τα συστήματα κλειστού κύκλου έχουν το πλεονέκτημα ότι ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης δεν μειώνεται σε μερικό φορτίο.

8.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

Διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- μονάδες μικρής κλίμακας με αεριομηχανή (15-1000kW) ή κινητήρα Diesel(75-1000kW)
- συστήματα μέσης ισχύος(100-6000kW) με αεριομηχανή ή κινητήρα Diesel
- συστήματα μεγάλης ισχύος(άνω των 6000kW) με κινητήρα Diesel



$\Psi\Lambda$: ψυγείο λαδιού

ΨN : ψυγείο νερού

ΨA : ψυγείο αέρα υπερπλήρωσης

$\Sigma\text{.}\Psi.$: συμπληρωματικό ψυγείο είτε νερού είτε αέρα

ΔTN : δεξαμενή τροφ. νερού

Σ : σύνδεση με το δίκτυο ηλεκτρισμού

Σχήμα 8.3: Σύστημα συμπαραγωγής με παλινδρομική μηχανή εσωτερικής καύσης

Τα καυσαέρια των κινητήρων βρίσκουν είτε άμεση είτε έμμεση χρήση. Η θερμοκρασία των καυσαερίων είναι 300-400 °C, δηλαδή αισθητά χαμηλότερη από εκείνη του αεριοστρόβιλου, γι' αυτό και κάνει πιο συχνή την ανάγκη για συμπληρωματική θερμότητα. Αυτή αποκτάται είτε με τοποθέτηση καυστήρα και προσαγωγή αέρα για καύση συμπληρωματικού καυσίμου στο λέβητα καυσαερίων, είτε με εγκατάσταση βοηθητικού λέβητα.

Το σχήμα 8.3 απεικονίζει ένα γενικό διάγραμμα ροής ενός τέτοιου συστήματος, χωρίς να αποτελεί τη μόνη δυνατή διάταξη. Ο κινητήρας κινεί τη γεννήτρια. Τέσσερις εναλλάκτες ανακτούν θερμότητα από ρευστά που έχουν σχέση με τη λειτουργία της μηχανής: ψυγείο λαδιού, ψυγείο νερού(του κλειστού

κυκλώματος του κινητήρα), ψυγείο αέρα υπερπλήρωσης και εναλλάκτης ανακομιδής θερμότητας από τα καυσαέρια του κινητήρα(ή λέβητας καυσαερίων). Με τη θερμότητα αυτή θερμαίνεται το νερό που προορίζεται για διάφορες χρήσεις.

Η συγκέντρωση ισχύος του κινητήρα αυξάνει με υπερπλήρωση του θαλάμου καύσης. Ο στροβιλοπληρωτής (λέγεται και ζεύγος υπερπλήρωσης) αποτελείται από αεριοστρόβιλο που κινείται με τα καυσαέρια του κινητήρα και κινεί φυγοκεντρικό αεροσυμπιεστή. Για να αυξηθεί ο βαθμός πληρότητας των κυλίνδρων, ο αέρας ψύχεται σε ειδικό ψυγείο προσφέροντας θερμότητα στο νερό χρήσης.

Διακρίνονται δύο περιπτώσεις από πλευράς θερμοκρασίας εξόδου του αέρα από το ψυγείο: χαμηλή θερμοκρασία(περίπου 45 °C) ή υψηλή θερμοκρασία(περίπου 90 °C). Η χαμηλή θερμοκρασία συντελεί σε υψηλότερο βαθμό πληρότητας και επομένως υψηλότερη συγκέντρωση ισχύος. Όμως, η ανακτώμενη θερμότητα βρίσκει περιορισμένη χρήση, διότι το νερό στην έξοδο του ψυγείου έχει χαμηλή θερμοκρασία. Η λύση αυτή μπορεί να επιλεγεί όταν υπάρχει ανάγκη προθέρμανσης νερού, που έρχεται στο σύστημα με θερμοκρασία 20-25 °C. Εάν το νερό έρχεται στο σύστημα με θερμοκρασία 60-70 °C, τότε η λύση της υψηλής θερμοκρασίας είναι προτιμότερη από πλευράς εκμεταλλεύσεως της ενέργειας του καυσίμου, καθώς αυξάνει τον ολικό βαθμό απόδοσης του συστήματος κατά 3-5%.

Με ανάκτηση θερμότητας από τα τρία ψυγεία, το νερό θερμαίνεται μέχρι τους 75-80 °C. Κατόπιν έρχεται στον εναλλάκτη ανακομιδής θερμότητας των καυσαερίων, όπου θερμαίνεται μέχρι τους 85-90 °C ή και ατμοποιείται.

Η ελάχιστη επιτρεπτή θερμοκρασία των καυσαερίων στην έξοδο του εναλλάκτη εξαρτάται από την περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο. Για καύσιμο Diesel, το όριο είναι 160-170 °C, ενώ για φυσικό αέριο είναι 90-100 °C.

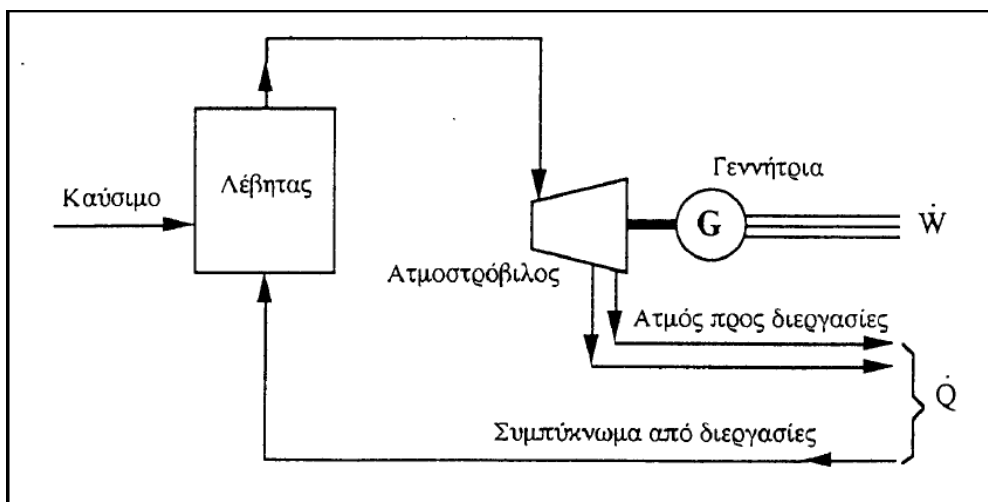
Ο βαθμός απόδοσης μικρών και μεσαίων κινητήρων είναι 35-45%, ενώ σε σύγχρονους μεγάλους κινητήρες φθάνει το 50%. Ο βαθμός απόδοσης ενός συστήματος συμπαραγωγής με εμβολοφόρο κινητήρα εσωτερικής καύσης βρίσκεται στην περιοχή του 80%.

Η διάρκεια ζωής είναι 15-20 έτη και εξαρτάται από το μέγεθος της μονάδας, την ποιότητα του καυσίμου και την ποιότητα της συντήρησης. Οι παλινδρομικοί κινητήρες απαιτούν τακτικότερη συντήρηση απ' ό,τι τα άλλα συστήματα με αποτέλεσμα μικρότερη μέση ετήσια διαθεσιμότητα:80-90%.

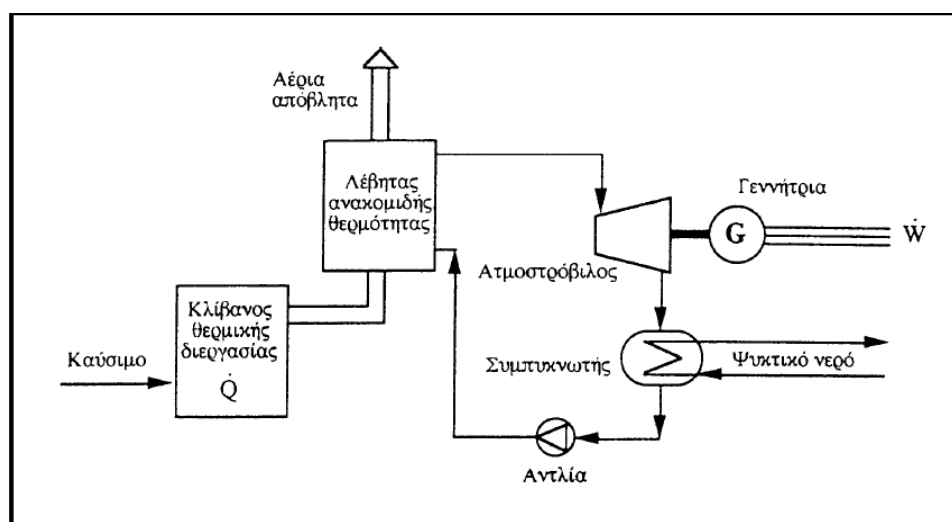
8.4 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

Είναι τα πιο διαδεδομένα συστήματα συμπαραγωγής, κατάλληλα για ισχύεις 500kW-100MW ή και μεγαλύτερες. Μπορούν να χρησιμοποιήσουν οποιοδήποτε καύσιμο. Ακόμη και στερεά απόβλητα καίγονται σε ειδικούς λέβητες εφοδιασμένους με συστήματα κατακράτησης ή και εξουδετέρωσης ρύπων και τοξικών ουσιών, που δημιουργούνται κατά την καύση. Ο βαθμός απόδοσης φθάνει το 60-85% και δεν πέφτει έντονα κατά τη λειτουργία σε μερικό φορτίο. Όμως, ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης είναι χαμηλός, που συντελεί σε μικρό λόγο ηλεκτρισμού προς θερμότητα.

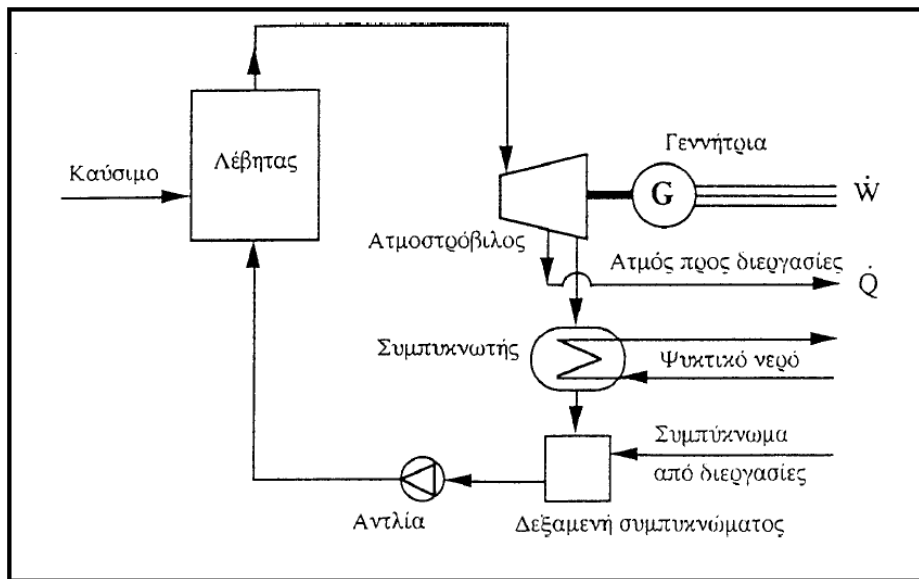
Υπάρχουν τρεις βασικές διατάξεις συστημάτων της κατηγορίας αυτής :



Σχήμα 8.4: Σύστημα συμπαραγωγής με ατμοστρόβιλο αντίθλιψης



Σχήμα 8.5: Σύστημα συμπαραγωγής με κύκλο βάσης ατμού



Σχήμα 8.6: Σύστημα συμπαραγωγής με ατμοστρόβιλο απομάστευσης

Τα συστήματα ατμοστρόβιλου έχουν υψηλή αξιοπιστία, που φτάνει το 95%, υψηλή διαθεσιμότητα(90-95%) και μεγάλη διάρκεια ζωής (25-35 έτη). Όμως, ο χρόνος εγκατάστασης είναι σχετικά μεγάλος: 12-18 μήνες για μικρές μονάδες και μέχρι τρία έτη για μεγαλύτερα συστήματα.

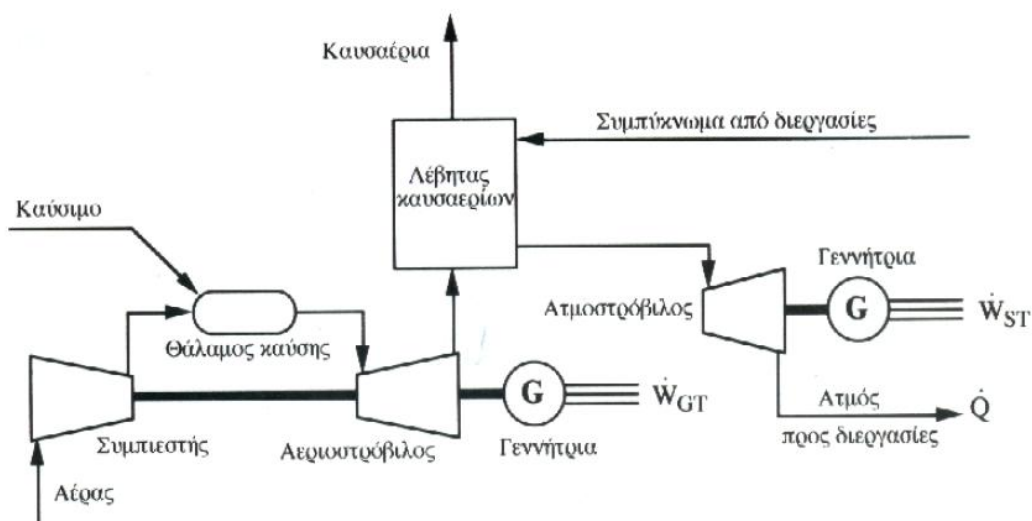
8.5 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΟΥ

Ο όρος «συνδυασμένος κύκλος» αναφέρεται σε συστήματα με δύο θερμοδυναμικούς κύκλους, οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με κάποιο εργαζόμενο ρευστό και λειτουργούν σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Ο κύκλος υψηλής θερμοκρασίας (κορυφής) αποβάλλει θερμότητα, που ανακτάται και χρησιμοποιείται από τον κύκλο χαμηλής θερμοκρασίας (βάσης) για την παραγωγή πρόσθετης ηλεκτρικής ή μηχανικής ενέργειας, αυξάνοντας έτσι τον βαθμό απόδοσης.

Τα πιο διαδεδομένα συστήματα συνδυασμένου κύκλου είναι εκείνα με συνδυασμό αεριοστρόβιλου-ατμοστρόβιλου (κύκλοι Joule-Rankine). Το σχήμα 8.7 δείχνει τα βασικά στοιχεία ενός τέτοιου συστήματος.

Η υψηλή περιεκτικότητα οξυγόνου στα καυσαέρια του αεριοστρόβιλου (περίπου 17%) επιτρέπει την καύση συμπληρωματικού καυσίμου στον λέβητα καυσαερίων, εάν κριθεί αναγκαία για την αύξηση ισχύος του συστήματος. Η συμπληρωματική καύση αυξάνει το βαθμό απόδοσης του συστήματος κατά τη

λειτουργία σε μερικό φορτίο, αλλά κάνει την εγκατάσταση (και ιδιαίτερα τις διατάξεις ρύθμισης και ελέγχου) πιο περίπλοκη.



Σχήμα 8.7: Σύστημα συμπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου

Η ισχύς των συστημάτων συνδυασμένου κύκλου κυμαίνεται συνήθως στην περιοχή 20-400MW, ενώ κατασκευάζονται επίσης μικρότερες μονάδες με ισχύ 4-11MW.

Ο χρόνος εγκατάστασης είναι 2-3 έτη. Είναι δυνατή η ολοκλήρωση της εγκατάστασης σε δύο στάδια: εγκαθίσταται πρώτα η μονάδα αεριοστρόβιλου, που μπορεί να είναι έτοιμη για λειτουργία σε 12-18 μήνες. Ενώ αυτή λειτουργεί, συμπληρώνεται το σύστημα με τη μονάδα του ατμοστρόβιλου.

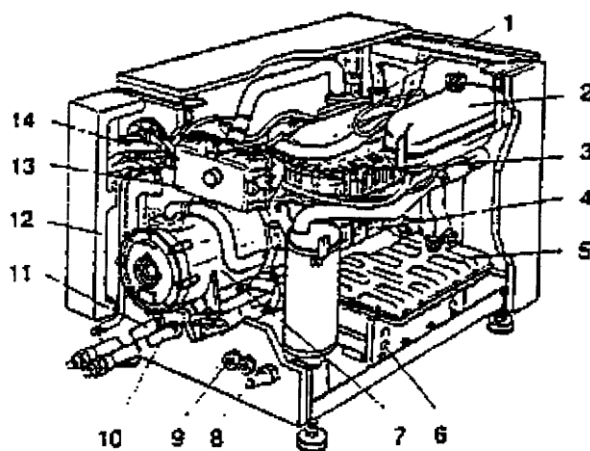
Η αξιοπιστία των συστημάτων συνδυασμένου κύκλου είναι 80-85%, η μέση ετήσια διαθεσιμότητα 77-85% και ο οικονομικός χρόνος ζωής 15-25 έτη. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης βρίσκεται συνήθως στην περιοχή του 35-45%, ενώ ο ολικός βαθμός απόδοσης είναι 70-88%. Λειτουργία σε μερικό φορτίο έχει αρνητική επίδραση στο βαθμό απόδοσης του συστήματος.

8.6 ΤΥΠΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ (ΠΑΚΕΤΑ)

Μεγάλη ώθηση στη διάδοση της συμπαραγωγής αναμένεται ότι θα δώσει η μαζική παραγωγή τυποποιημένων μονάδων σε μορφή πακέτου με ηλεκτρική ισχύ 10-100kW, που έχουν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- χαμηλό κόστος
- μικρό όγκο
- εύκολη εγκατάσταση(το μόνο που απαιτείται είναι η σύνδεσή τους με τα υδραυλικά και ηλεκτρικά δίκτυα)
- αυτοματοποιημένη λειτουργία χωρίς τη συνεχή παρακολούθηση από εξειδικευμένο προσωπικό

Οι μονάδες αυτές συνήθως έχουν κινητήρα Diesel, ενώ σε ισχύεις μεγαλύτερες των 600kW είναι δυνατή η χρήση αεριοστρόβιλου. Μπορούν να λειτουργούν με υγρό ή αέριο καύσιμο. Το φυσικό αέριο είναι ιδιαίτερα κατάλληλο καύσιμο για τις μονάδες αυτές χάρη στην καθαρότητα, την έλλειψη ανάγκης αποθήκευσης και τη χαμηλή του τιμή. Το σχήμα 8.8 δείχνει μία μονάδα μικρής ισχύος.



- | | |
|-------------------------------|-------------------------------|
| 1 Κινητήρας Fiat 127 | 8 Εξαγωγή καυσαερίου |
| 2 Δοχείο νερού | 9 Ηλεκτρική σύνδεση |
| 3 Εναλλάκτης καυσαερίων/νερού | 10 Εξαγωγή θερμού νερού |
| 4 Εναλλάκτης λαδιού/νερού | 11 Εισαγωγή κρύου νερού |
| 5 Ελαιολεκάνη | 12 Θερμική και ηχητική μόνωση |
| 6 Εναλλάκτης νερού/νερού | 13 Εισαγωγή αέρα |
| 7 Ηλεκτρογεννήτρια | 14 Εισαγωγή φυσικού αερίου |

Σχήμα 8.8: Τυποποιημένη μονάδα συμπαραγωγής Fiat TOTEM 15kW

Από σχετικές μελέτες έχει υπολογιστεί ότι η διαθεσιμότητα κυμαίνεται στο 79% με τυπική απόκλιση 22,9%. Στις μονάδες-πακέτα, το 27-35% της ενέργειας του καυσίμου μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό και το 50-55% σε θερμότητα. Επομένως, ο λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα είναι 0,5-0,7, ενώ ο ολικός βαθμός απόδοσης φθάνει το 80%. Μικροεπεξεργαστές, εγκατεστημένοι στο χώρο όπου βρίσκεται η μονάδα, παρακολουθούν τις τιμές κρίσιμων παραμέτρων και μεταβιβάζουν τις σχετικές πληροφορίες, μέσω αποκλειστικής τηλεφωνικής γραμμής, σε κεντρικό υπολογιστή. Όταν η εξέλιξη των τιμών ορισμένων παραμέτρων δείχνει επερχόμενη βλάβη, ειδοποιείται η ομάδα συντήρησης, που επεμβαίνει πριν ακόμη η βλάβη εκδηλωθεί.

8.7 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

Τα κυριότερα από τα χαρακτηριστικά, που προαναφέρθηκαν για τα πιο διαδεδομένα συστήματα συμπαραγωγής, παρουσιάζονται συγκεντρωμένα, για λόγους εποπτείας, στον πίνακα 8.1. Επιπλέον των ενεργειακών στοιχείων, ο πίνακας αναφέρει και τη μέση ετήσια διαθεσιμότητα, δηλαδή το ποσοστό του χρόνου (8760 ώρες) κατά το οποίο το σύστημα μπορεί να λειτουργεί ικανοποιητικά.

Σύστημα	Ηλεκ. Ισχύς	Μέση ετήσια διαθεσιμότητα	Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης %		Ολικός βαθμός απόδοσης	Λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα
	MW	%	Πλήρες φορτίο	Φορτίο 50%	%	
Ατμοστροβίλου	0,5 - 100*	90 - 95	14 - 30	12 - 25	60 - 85	0,1 - 0,3
Αεριοστροβίλου ανοικτού κύκλου	0,1 - 100	90 - 95	20 - 35	15 - 29	60 - 80	0,5 - 0,8
Αεριοστροβίλου κλειστού κύκλου	0,5 - 100	90 - 95	30 - 35	30 - 35	60 - 80	0,5 - 0,8
Συνδυασμένου κύκλου αεριο/ατμοστροβίλου	4 - 100*	77 - 85	35 - 45	25 - 35	70 - 88	0,6 - 1,1
Κινητήρα Diesel	0,07 - 40	80 - 90	35 - 45	32 - 40	60 - 80	1,2 - 2,4
Πακέτο με παλινδρομικό κινητήρα	0,015 - 2	80 - 85	27 - 35	25 - 32	60 - 80	0,5 - 0,7
Κυψέλες καυσίμου	0,04 - 50	90 - 92	37 - 45	37 - 45	85 - 90	0,8 - 1,0
Μηχανές Stirling	0,003-1,5	85 - 90 (αναμενόμενη)	35 - 50	34 - 49	60 - 80	1,2 - 1,7

(*) Η τιμή των 100 MW είναι το πιο συνηθισμένο άνω όριο σε βιομηχανικές εφαρμογές. Συστήματα του είδους αυτού κατασκευάζονται και με μεγαλύτερες ισχύεις.

Πίνακας 8.1: Κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά συστημάτων συμπαραγωγής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

9.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αυξανόμενη ζήτηση για ισχύ και θερμότητα οδήγησε στην ύπαρξη μονάδων συμπαραγωγής που παράγουν ταυτόχρονα ισχύ και θερμότητα. Ο στόχος του προβλήματος οικονομικής κατανομής φορτίου σε συμβατικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας είναι να βρεθεί το βέλτιστο σημείο για την παραγωγή ισχύος έτσι ώστε η συνολική ζήτηση να ταιριάζει με την παραγωγή, με το ελάχιστο κόστος καυσίμων. Εντούτοις, ο στόχος του προβλήματος οικονομικής κατανομής φορτίου σε μονάδες συμπαραγωγής ισχύος και θερμότητας (CHPED) είναι να βρεθεί το βέλτιστο σημείο παραγωγής ισχύος και θερμότητας με το ελάχιστο κόστος καυσίμων έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις θερμότητας και ισχύος, ενώ ταυτόχρονα οι μονάδες συμπαραγωγής να λειτουργούν εντός των λειτουργικών τους ορίων. Οι αμοιβαίες εξαρτήσεις της παραγωγής ισχύος και θερμότητας εισάγουν μια περιπλοκή στην ένταξη των μονάδων συμπαραγωγής στο πρόβλημα της οικονομικής κατανομής.

9.2 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ ΜΟΝΑΔΕΣ Σ.Η.Θ.

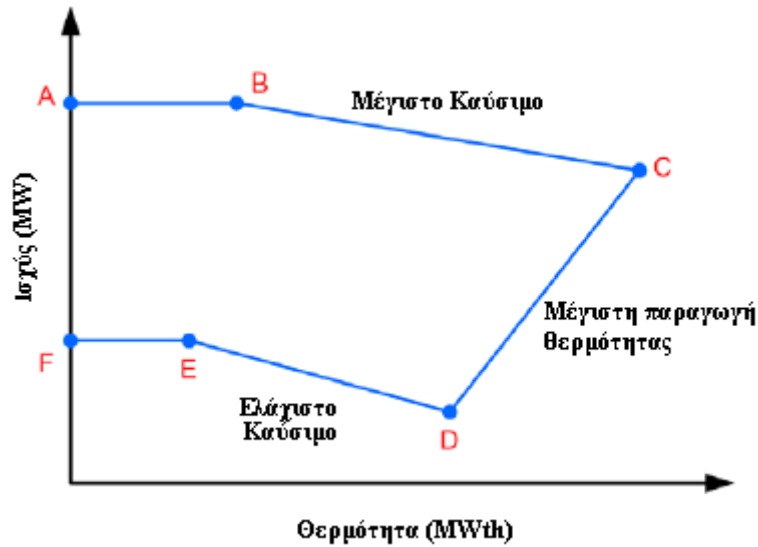
9.2.1 Απλή Οικονομική Κατανομή Φορτίου

Ο στόχος του προβλήματος οικονομικής κατανομής σε μονάδες συμπαραγωγής ισχύος και θερμότητας (CHPED) είναι να βρεθεί η παραγωγή ισχύος και θερμότητας, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το κόστος καυσίμου, και να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις θερμότητας και ισχύος καθώς και οι διάφοροι άλλοι περιορισμοί.

Θεωρούμε ότι για την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος χρησιμοποιούμε συμβατικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρισμού, μονάδες παραγωγής θερμότητας (λέβητες) και μονάδες συμπαραγωγής. Για τις συναρτήσεις κόστους της κάθε μονάδας θεωρούμε τα εξής:

- Η συνάρτηση κόστους μιας συμβατικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος δίνεται από την σχέση $C_{p,i}(p_i) = a_i + b_i p_i + c_i p_i^2$ όπου η ισχύς εξόδου έχει όρια τα $p_i^{\min} \leq p_i \leq p_i^{\max}$.
- Η συνάρτηση κόστους ενός λέβητα παραγωγής θερμότητας δίνεται από την σχέση $C_{h,i}(h_i) = a_i + d_i h_i + e_i h_i^2$ όπου η θερμότητα εξόδου έχει όρια τα $h_i^{\min} \leq h_i \leq h_i^{\max}$.
- Η συνάρτηση κόστους μιας μονάδας συμπαραγωγής είναι μια κυρτή πολυωνυμική συνάρτηση δύο μεταβλητών και δίνεται από την σχέση

$C_{chp,i}(p_i, h_i) = a_i + b_i p_i + c_i p_i^2 + d_i h_i + e_i h_i^2 + z_i p_i h_i$. Τα όρια παραγωγής μιας μονάδας συμπαραγωγής φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 9.1: Περιοχή εφικτής λειτουργίας μονάδας συμπαραγωγής

όπου το ημιεπίπεδο που ορίζει η κάθε γραμμή δίνεται από την σχέση $a_{ji} \cdot p_i + b_{ji} \cdot h_i \geq c_{ji}$ με $j=1, n_i$

Οι συντελεστές των συναρτήσεων κόστους έχουν μονάδες €/h, €/MWh, €/MW²h αντίστοιχα ώστε το συνολικό κόστος να είναι εκφρασμένο σε €/h.

Με βάση τα παραπάνω το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου έγκειται στην ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους, δηλαδή το άθροισμα των συναρτήσεων κόστους κάθε μονάδας που δίνεται από την εξής σχέση:

$$C_{\text{cost}} = \sum_{i \in p} c_{p,i} + \sum_{i \in chp} c_{chp,i} + \sum_{i \in h} C_{h,i} \quad (9.1)$$

Οι ισωτικοί περιορισμοί του προβλήματος είναι:

$$\begin{aligned} \sum_{i \in p} p_i + \sum_{i \in chp} p_i &= P_D \\ \sum_{i \in h} h_i + \sum_{i \in chp} h_i &= H_D \end{aligned} \quad (9.2)$$

Οι ανισωτικοί περιορισμοί του προβλήματος είναι:

$$\begin{aligned} p_i^{\min} &\leq p_i \leq p_i^{\max} \\ h_i^{\min} &\leq h_i \leq h_i^{\max} \\ a_{ji} \cdot p_i + b_{ji} \cdot h_i &\geq c_{ji} \end{aligned} \quad (9.3)$$

9.2.2 Οικονομική Κατανομή Φορτίου με Περιβαλλοντικούς Περιορισμούς

Από κάθε μονάδα παραγωγής ισχύος, κατά την λειτουργία της, εκλύονται κάποια καυσαέρια, τα κυριότερα από τα οποία είναι τα οξείδια του θείου SO_x , τα οξείδια του αζώτου NO_x , και το διοξείδιο του άνθρακα CO_2 . Οι ποσότητες των αερίων αυτών ρύπων προσεγγίζονται από τις εξής σχέσεις:

$$\begin{aligned}SO_x &= \gamma_S \cdot p \\NO_x &= \gamma_N \cdot p \\CO_2 &= \gamma_C \cdot p\end{aligned}\quad (9.4)$$

Το γ (t/MWh) είναι ο συντελεστής εκπομπών και διαφέρει η τιμή του ανάλογα με το είδος του καυσίμου και την τεχνολογία που διαθέτει κάθε σταθμός παραγωγής, και p (MW) η ισχύς που παράγει η κάθε μονάδα.

Η ύπαρξη των παραπάνω καυσαερίων εισάγει νέα δεδομένα στο πρόβλημα καθώς μεταβάλλεται η αντικειμενική συνάρτηση και εισάγονται επιπλέον περιορισμοί παραγωγής. Συγκεκριμένα η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος αποτελείται από το άθροισμα κάθε συνάρτησης κόστους και κάθε συνάρτησης έκλυσης ρύπων, πολλαπλασιασμένες με έναν συντελεστή βαρύτητας w . Έτσι η αντικειμενική συνάρτηση έχει την εξής μορφή:

$$F_{total} = w_{cost} \cdot C_{cost} + w_{SO_x} \cdot SO_x + w_{NO_x} \cdot NO_x + w_{CO_2} \cdot CO_2 \quad (9.5)$$

$$\text{με} \quad w_{cost} + w_{SO_x} + w_{NO_x} + w_{CO_2} = 1$$

Ανάλογα με την πολιτική μείωσης εκπομπών κάθε χώρας θέτονται τα όρια εκπομπής καθενός από τους παραπάνω ρύπους, και έτσι εισάγονται περιορισμοί της εξής μορφής:

$$\begin{aligned}SO_x &\leq SO_x^{\max} \\NO_x &\leq NO_x^{\max} \\CO_2 &\leq CO_2^{\max}\end{aligned}\quad (9.6)$$

9.2.3 Οικονομική κατανομή φορτίου σε απελευθερωμένη αγορά ενέργειας

Στην απελευθερωμένη αγορά ενέργειας μας δίνεται η δυνατότητα είτε να αγοράσουμε είτε να πουλήσουμε ηλεκτρική ισχύ. Έτσι στην αντικειμενική συνάρτηση εισάγεται η μεταβλητή $-P_{sell}$, που αντιστοιχεί στο πλεόνασμα ισχύος που

παράγουμε, πολλαπλασιασμένη επί την τιμή πώλησης στο δίκτυο και η μεταβλητή $+P_{buy}$, που αντιστοιχεί στο έλλειμμα ισχύος, πολλαπλασιασμένη επί την τιμή αγοράς από το δίκτυο. Προφανώς η τιμή πώλησης είναι πάντα μικρότερη από την τιμή αγοράς. Επίσης, για το πλεόνασμα ισχύος που παράγουμε δεν μας ενδιαφέρει το ποσοστό συμμετοχής της κάθε μονάδας στην παραγωγή του, αλλά μας αρκεί να ξέρουμε πόσο είναι το πλεόνασμα ισχύος στο σύνολο του.

Η αντικειμενική συνάρτηση και η ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος διαμορφώνονται ως εξής:

$$C_{cost} = \sum_{i \in p} c_{p,i} + \sum_{i \in chp} c_{chp,i} + \sum_{i \in h} C_{h,i} + buy - sell \quad (9.7)$$

$$\sum_{i \in p} p_i + \sum_{i \in chp} p_i + P_{buy} - P_{sell} = P_D \quad (9.8)$$

9.2.4 Οικονομική κατανομή φορτίου και δικαιώματα εκπομπής ρύπων

Παράλληλα με την υλοποίηση των τριών ευέλικτων μηχανισμών του Πρωτοκόλλου του Κιότο σε διεθνή κλίμακα, η ΕΕ προχώρησε στο δικό της εσωτερικό σύστημα εμπορίας εκπομπών (Οδηγία 2003/87/ΕΚ) [10],[11]. Σύμφωνα με το σύστημα εμπορίας εκπομπών της ΕΕ, τα Κράτη Μέλη της καθορίζουν όρια για τις εκπομπές CO₂ από ενεργοβόρες επιχειρήσεις και εκδίδουν άδειες δικαιωμάτων για τις ποσότητες CO₂ που επιτρέπεται να εκλύουν οι εν λόγω επιχειρήσεις σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Ο συνολικός αριθμός εκπομπών για κάθε κλάδο και κάθε συγκεκριμένη εγκατάσταση προσδιορίζεται από το Εθνικό Σχέδιο Κατανομής Δικαιωμάτων Εκπομπών (ΕΣΚΔΕ). Τέλος, με τα παραπάνω μέτρα δίνεται η δυνατότητα σε χώρες είτε να αγοράζουν είτε να πουλάνε μέρος των δικαιωμάτων τους με στόχο να επιτύχουν τις δεσμεύσεις του Κιότο [17].

Στα πλαίσια της διπλωματικής μου εργασίας θεώρησα ότι, αν κατά τη λειτουργία των μονάδων παράγεται λιγότερη ποσότητα καυσαερίων CO₂ από τον περιορισμό που τίθεται, τότε τη διαφορά αυτή να μπορούμε να την πουλάμε σε τρίτους που έχουν ανάγκη από δικαιώματα ρύπων, έτσι ώστε να μειώνεται το κόστος και να ελαχιστοποιούμε ακόμα περισσότερο την συνάρτηση κόστους.

Στην περίπτωση αυτή προστίθεται στην αντικειμενική συνάρτηση ο όρος $-\lambda \cdot (CO_2^{\max} - CO_2)$, όπου λ (€/tn) η τιμή πώλησης των ρύπων CO₂. Η αντικειμενική συνάρτηση διαμορφώνεται ως εξής:

$$F_{total} = w_{cost} \cdot \left[C_{cost} - \lambda \cdot (CO_2^{\max} - CO_2) \right] + w_{SO_x} \cdot SO_x + w_{NO_x} \cdot NO_x + w_{CO_2} \cdot CO_2 \quad (9.9)$$

και οι περιορισμοί είναι της μορφής (9.2),(9.3),(9.6)

9.3 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ Σ.Η.Θ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ Γ.Α.

Προηγουμένως περιγράφηκαν κάποιες παραλλαγές στο πρόβλημα οικονομικής κατανομής φορτίου με μονάδες Σ.Η.Θ. Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποιες αριθμητικές εφαρμογές των προβλημάτων αυτών, ώστε αφενός να δοθεί η βέλτιστη λύση στα προβλήματα αυτά και αφετέρου να φανεί η αποτελεσματικότητα του γενετικού αλγορίθμου στην επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Σε όλες τις εφαρμογές θεωρούμε ότι οι συμβατικές μονάδες λειτουργούν με λιγνίτη, οι μονάδες συμπαραγωγής με φυσικό αέριο και οι λέβητες με πετρέλαιο. Σε περίπτωση αλλαγής καυσίμου αυτό θα αναφέρεται.

9.3.1 Εφαρμογή 1

Στο πρόβλημα αυτό θεωρούμε ότι έχουμε μια συμβατική μονάδα παραγωγής ισχύος, δύο μονάδες συμπαραγωγής και μια μονάδα παραγωγής θερμότητας. Η ζήτηση ενεργού ισχύος του συστήματος είναι $P_D=200$ MW και η ζήτηση θερμικής ισχύος είναι $H_D=115$ MW.

Τα οικονομικά στοιχεία για την περιγραφή των συναρτήσεων κόστους κάθε μονάδας προέρχονται από την αναφορά [13].

Στον πίνακα 9.1 φαίνονται οι συντελεστές της συνάρτησης κόστους της συμβατικής μονάδας παραγωγής, καθώς και τα όρια παραγωγής.

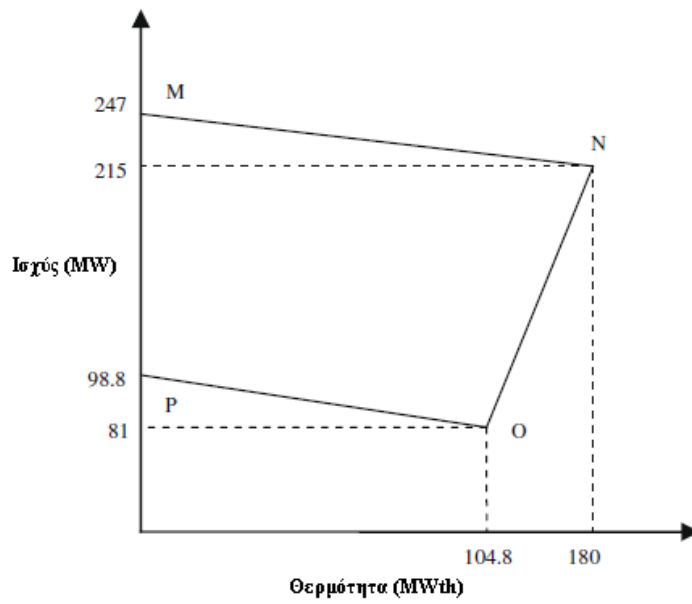
Μονάδα	a	b	c	p^{\min}	p^{\max}
1	0	50	0	0	150

Πίνακας 9.1: Δεδομένα συμβατικών μονάδων παραγωγής ισχύος

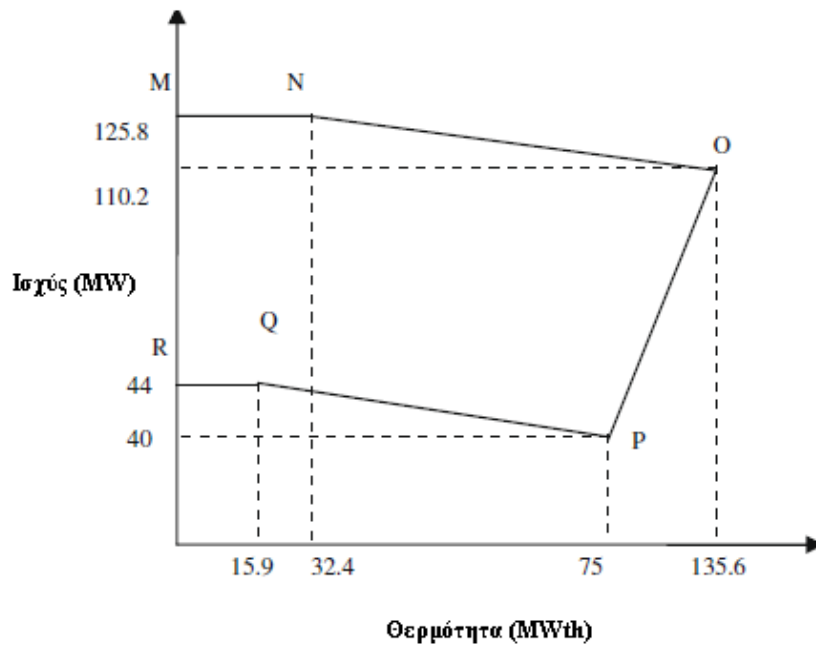
Στον πίνακα 9.2 φαίνονται οι συντελεστές των συναρτήσεων κόστους των δύο μονάδων συμπαραγωγής ενώ στα σχήματα 9.2 και 9.3 φαίνονται τα αντίστοιχα λειτουργικά τους όρια.

Μονάδα	α	b	c	d	e	z
2	2650	14,5	0,0345	4,2	0,03	0,031
3	1250	36	0,0435	0,6	0,027	0,011

Πίνακας 9.2: Δεδομένα μονάδων συμπαραγωγής ισχύος



Σχήμα 9.2: Περιοχή εφικτής λειτουργίας της πρώτης μονάδας συμπαραγωγής



Σχήμα 9.3: Περιοχή εφικτής λειτουργίας της δεύτερης μονάδας συμπαραγωγής

Στον πίνακα 9.3 φαίνονται οι συντελεστές της συνάρτησης κόστους της μονάδας παραγωγής θερμότητας, καθώς και τα όρια παραγωγής.

Μονάδα	a	d	e	h^{\min}	h^{\max}
4	0	23,4	0	0	2695,2

Πίνακας 9.3: Δεδομένα μονάδων παραγωγής θερμότητας

Με βάση τα παραπάνω το πρόβλημα μας διαμορφώνεται ως εξής:

$$\min f_{\text{cost}} = C_1(P_1) + \sum_{j=2}^3 C_j(P_j, H_j) + C_4(H_4)$$

όπου οι συναρτήσεις C_i προκύπτουν από τους συντελεστές των παραπάνω πινάκων αντίστοιχα.

Οι ισωτικοί περιορισμοί του προβλήματος είναι :

$$\begin{aligned} Z_1 : P_1 + P_2 + P_3 &= P_d \\ Z_2 : H_2 + H_3 + H_4 &= H_d \end{aligned}$$

Οι ανισωτικοί περιορισμοί του προβλήματος είναι:

$$\begin{aligned} g_1 : 1.781914894H_2 - P_2 - 105.7446809 &\leq 0 \\ g_2 : 0.177777778H_2 + P_2 - 247.0 &\leq 0 \\ g_3 : -0.169847328H_2 - P_2 + 98.8 &\leq 0 \\ g_4 : 1.158415842H_3 - P_3 - 46.88118818 &\leq 0 \\ g_5 : 0.151162791H_3 + P_3 - 130.6976744 &\leq 0 \\ g_6 : -0.067681895H_3 - P_3 + 5.07614213 &\leq 0 \\ g_7 : 0.0 - P_1 &\leq 0 \\ g_8 : P_1 - 150.0 &\leq 0 \\ g_9 : 0.0 - H_4 &\leq 0 \quad \text{and} \\ g_{10} : H_4 - 2695.2 &\leq 0 \end{aligned}$$

Το σύστημα αποτελείται από 6 μεταβλητές, περιορισμούς ισοζυγίου ισχύος και δέκα ανισωτικούς περιορισμούς.

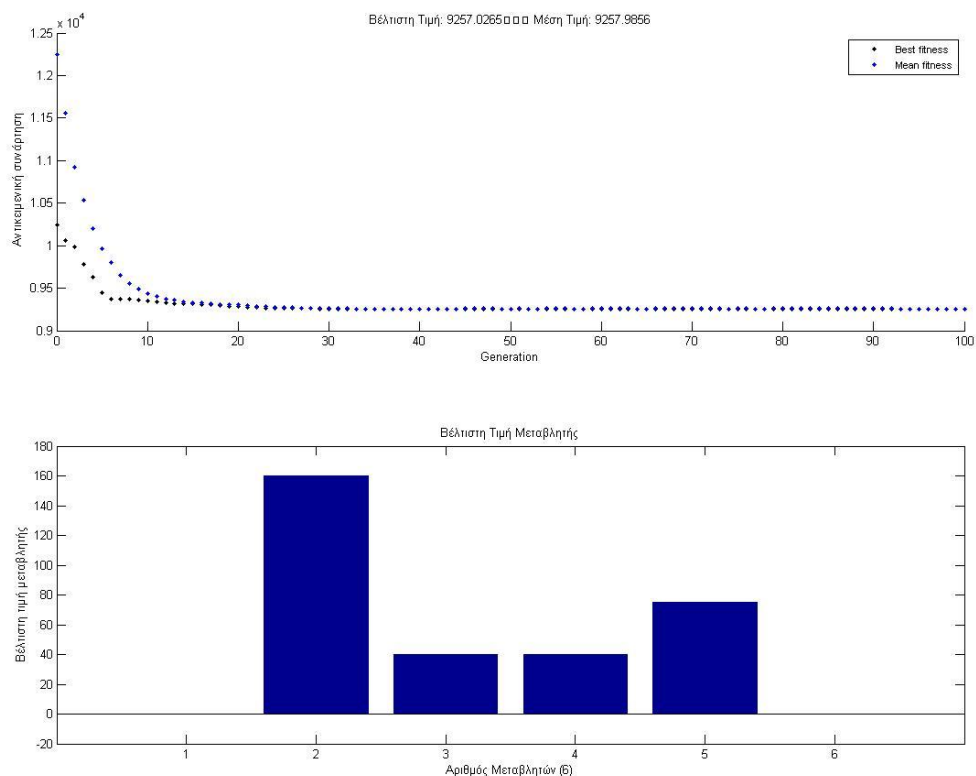
Στο MatLab δημιουργούμε την αντικειμενική συνάρτηση ως εξής:

```
function f=chp(x)
P=(x(1:3));
H(2:4)=(x(4:6));

f1=50*P(1);
f2=2650 + 14.5*P(2) +0.0345*P(2)^2 + 4.2*H(2)+0.03*H(2)^2
+ 0.031*P(2)*H(2);
f3=1250 + 36*P(3) +0.0435*P(3)^2 + 0.6*H(3)+0.027*H(3)^2
+ 0.011*P(3)*H(3);
f4=23.4*H(4);
f=f1+f2+f3+f4;
```

Στο ToolBox εισάγουμε τους περιορισμούς και ρυθμίζουμε τις παραμέτρους του γενετικού αλγορίθμου. Συγκεκριμένα ορίζουμε ως μέγεθος πληθυσμού 75, αριθμό επαναλήψεων 100, πιθανότητα διασταύρωσης 0,88 και ευριστική μέθοδο διασταύρωσης με $r=0.35$.

Εκτελούμε το πρόβλημα και τα αποτελέσματα μας φαίνονται παρακάτω:



Stop

Σχήμα 9.4: Βέλτιστες τιμές της 1^{ης} εφαρμογής

Τα αποτελέσματα μας συγκρίνονται με αυτά άλλων μεθόδων [13] και φαίνονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα 9.4:

Μεταβλητή	Γ.Α.	Lagrange	Branch-bound	ACSA*	GA_PF*	PSO*	EP*	IGAMU*	HS*	SARGA*
P ₁ (MW)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P ₂ (MW)	160,00	160,00	160,00	150,93	159,23	159,43	160,00	160,00	160,00	159,99
H ₂ (MW _{th})	40,00	40,00	40,00	48,84	39,94	39,97	40,00	39,99	40,00	39,99
P ₃ (MW)	40,00	40,00	40,00	49,00	40,77	40,57	40,00	40,00	40,00	40,01
H ₃ (MW _{th})	75,00	75,00	75,00	65,79	75,06	75,03	75,00	75,00	75,00	75,00
H ₄ (MW _{th})	0,00	0,00	0,00	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Κόστος (€/h)	9257,03	9257,10	9257,10	9452,20	9267,28	9265,10	9257,10	9257,09	9257,07	9257,07
Χρόνος (sec)	3,03	3,98	4,27	5,26	4,32	3,09	7,96	5,53	4,21	3,76

Πίνακας 9.4: Αποτελέσματα Εφαρμογής 1

*ACSA: *Ant Colony Search Algorithm*
 GA_PF: *Genetic Algorithm Proportional Fair*
 PSO: *Particle Swarm Optimization*
 EP: *Evolutionary Programming*
 IGAMU: *Improved GA with Multiobjective Update*
 HS: *Harmony Search*
 SARGA: *Self-Adaptive Real-Coded GA*

Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις

- Από τον παραπάνω πίνακα βλέπουμε ότι με τους γενετικούς αλγορίθμους παίρνουμε τα ίδια, ίσως και καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με άλλες μεθόδους που έχουν προταθεί στην αναφορά [13]. Συγκεκριμένα οδηγούμαστε σε καλύτερο αποτέλεσμα και μάλιστα σε μικρότερο χρόνο.
- Επίσης παρατηρούμε ότι τόσο η συμβατική μονάδα ηλεκτρικής ισχύος όσο και η μονάδα παραγωγής θερμότητας δεν συμμετέχουν στην κάλυψη της ζήτησης, οπότε θα μπορούσαμε κάλλιστα να τις παραλείψουμε, αφού παρόλο που δεν έχουν κάποιο σταθερό κόστος λειτουργίας, έχουν ωστόσο κάποιο κόστος αγοράς και συντήρησης.
- Τέλος, από το σχήμα 9.4 παρατηρούμε ότι ο γενετικός αλγόριθμος συγκλίνει στη βέλτιστη λύση από την 30^η περίπου επανάληψη αλλά επιλέξαμε την διεξαγωγή 100 επαναλήψεων για ορθότερα και πιο ακριβή αποτελέσματα μιας και ο χρόνος δεν είναι τόσο απαγορευτικός.

9.3.2 Εφαρμογή 2

Στη συνέχεια διατυπώνουμε ένα νέο πρόβλημα στο οποίο και εφαρμόζουμε τον γενετικό αλγόριθμο με στόχο να επιβεβαιώσουμε την αποτελεσματικότητα του σε προβλήματα βελτιστοποίησης. Το πρόβλημα μας περιλαμβάνει μια συμβατική μονάδα παραγωγής ισχύος, τρεις μονάδες συμπαραγωγής και μία μονάδα παραγωγής θερμότητας.

Τα διάφορα στοιχεία για τις μονάδες και για τους περιορισμούς των εκπομπών προέρχονται από την αναφορά [12] και φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Συγκεκριμένα για την λιγνιτική μονάδα παραγωγής ισχύος, οι συντελεστές της συναρτήσεως κόστους (εδώ μοντελοποιείται από πολυώνυμο 3^{ου} βαθμού) και τα όρια παραγωγής φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 9.5:

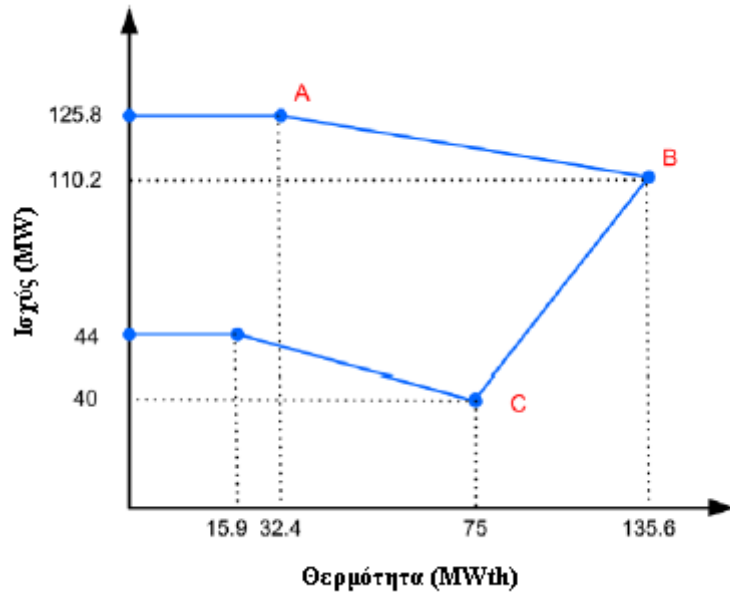
Μονάδα	a	b	c	d	p^{\min}	p^{\max}
1	254,8863	7,6997	0,0172	0,000115	35	135

Πίνακας 9.5: Δεδομένα συμβατικών μονάδων παραγωγής ισχύος

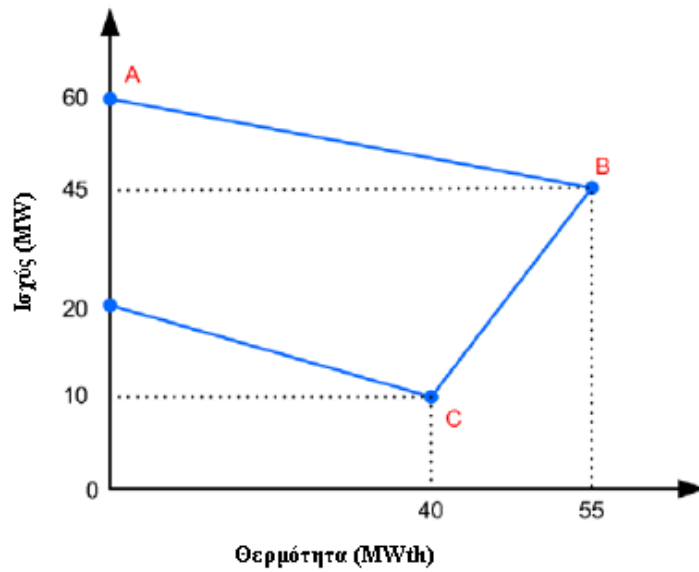
Στον πίνακα 9.6 φαίνονται οι συντελεστές των συναρτήσεων κόστους των τριών μονάδων συμπαραγωγής ενώ στα σχήματα 9.5,9.6,9.7 φαίνονται τα αντίστοιχα λειτουργικά όρια.

Μονάδα	a	b	c	d	e	z
2	1250	36	0,0435	0,6	0,027	0,011
3	2650	34,5	0,1035	2,203	0,0025	0,051
4	1565	20	0,072	2,3	0,02	0,04

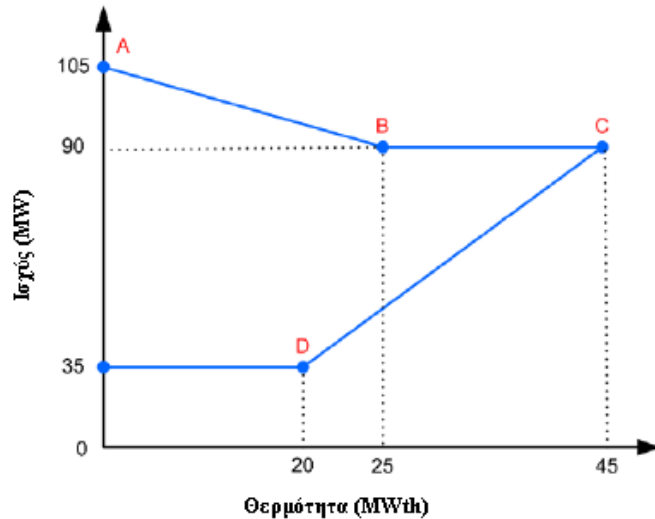
Πίνακας 9.6: Δεδομένα μονάδων συμπαραγωγής ισχύος



Σχήμα 9.5: Περιοχή εφικτής λειτουργίας της πρώτης μονάδας συμπαραγωγής



Σχήμα 9.6: Περιοχή εφικτής λειτουργίας της δεύτερης μονάδας συμπαραγωγής



Σχήμα 9.7. Περιοχή εφικτής λειτουργίας της τρίτης μονάδας συμπαραγωγής

Στον πίνακα 9.7 φαίνονται οι συντελεστές της συνάρτησης κόστους της μονάδας παραγωγής θερμότητας, καθώς και τα όρια παραγωγής της.

Μονάδα	a	d	e	h^{\min}	h^{\max}
5	950	2,0109	0,038	0	60

Πίνακας 9.7: Δεδομένα μονάδων παραγωγής θερμότητας

Οι χαρακτηριστικές συναρτήσεις κόστους των παραπάνω μονάδων παραγωγής καθώς και η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος οικονομικής κατανομής φαίνονται παρακάτω:

$$\min C = \sum_{i=1}^5 c_i \quad i = 1, \dots, 5$$

Όπου:

$$c_1 = 254.8863 + 7.6997p_1 + 0.00172p_1^2 + 0.000115p_1^3$$

$$c_2 = 1250 + 36p_2 + 0.0435p_2^2 + 0.6h_2 + 0.027h_2^2 + 0.011p_2h_2$$

$$c_3 = 2650 + 34.5p_3 + 0.1035p_3^2 + 2.203h_3 + 0.025h_3^2 + 0.051p_3h_3$$

$$c_4 = 1565 + 20p_4 + 0.072p_4^2 + 2.3h_4 + 0.02h_4^2 + 0.04p_4h_4$$

$$c_5 = 950 + 2.0109h_5 + 0.038h_5^2$$

Οι ισωτικοί περιορισμοί είναι:

$$P_D = p_1 + p_2 + p_3 + p_4$$

$$H_D = h_2 + h_3 + h_4 + h_5$$

Οι ανισωτικοί περιορισμοί είναι:

$$P_3 + 0.272727 * H_3 - 60 \leq 0$$

$$-P_3 + 2.333333 * H_3 - 83.333333 \leq 0$$

$$-P_3 - 0.25 * H_3 + 20 \leq 0$$

$$P_4 + 0.6 * H_4 - 105 \leq 0$$

$$-P_4 + 2.2 * H_4 + 9 \leq 0$$

$$-P_4 + 35 \leq 0$$

$$-P_2 + 1.781914 * H_2 - 105.744681 \leq 0$$

$$-P_2 - 0.169847 * H_2 + 98.8 \leq 0$$

$$P_2 + 0.177777 * H_2 - 247.0 \leq 0$$

$$P_1 - 135 \leq 0$$

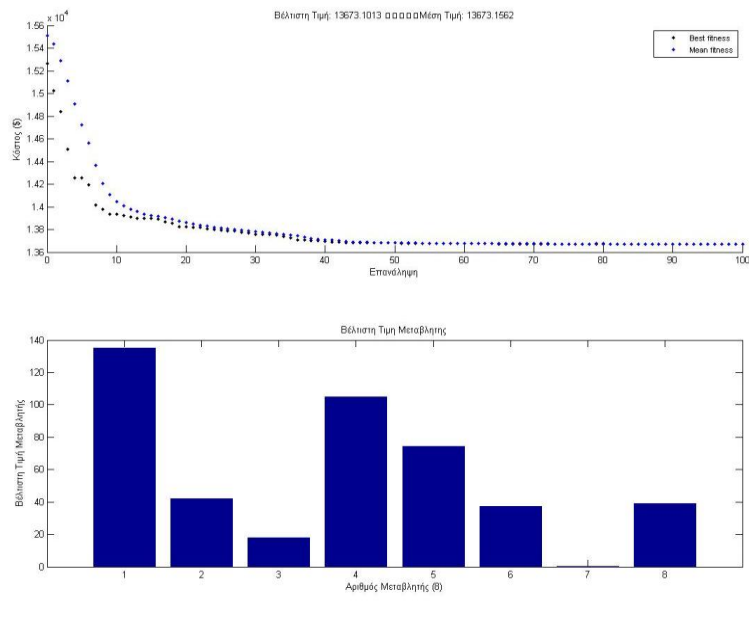
$$-P_1 + 35 \leq 0$$

$$H_5 - 60 \leq 0$$

Επίσης είναι προφανές ότι πρέπει να ισχύει $P, H > 0$

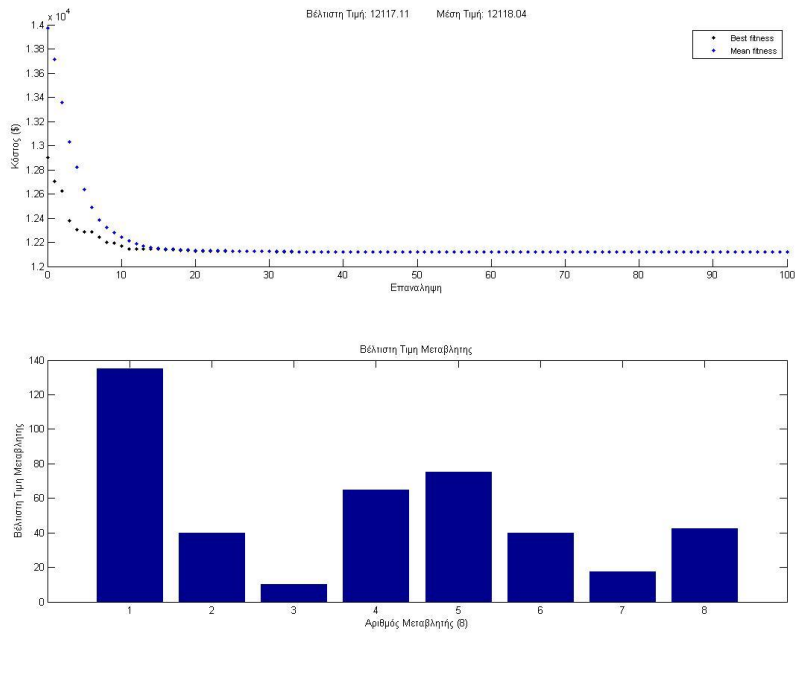
Με βάση τα παραπάνω εκτελούμε το πρόβλημα για τρεις (3) διαφορετικές περιπτώσεις, ανάλογα με τη ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος και θερμότητας.

Για $P_D=300$ MW και $H_D=150$ MW έχουμε τα εξής αποτελέσματα στο MatLab:



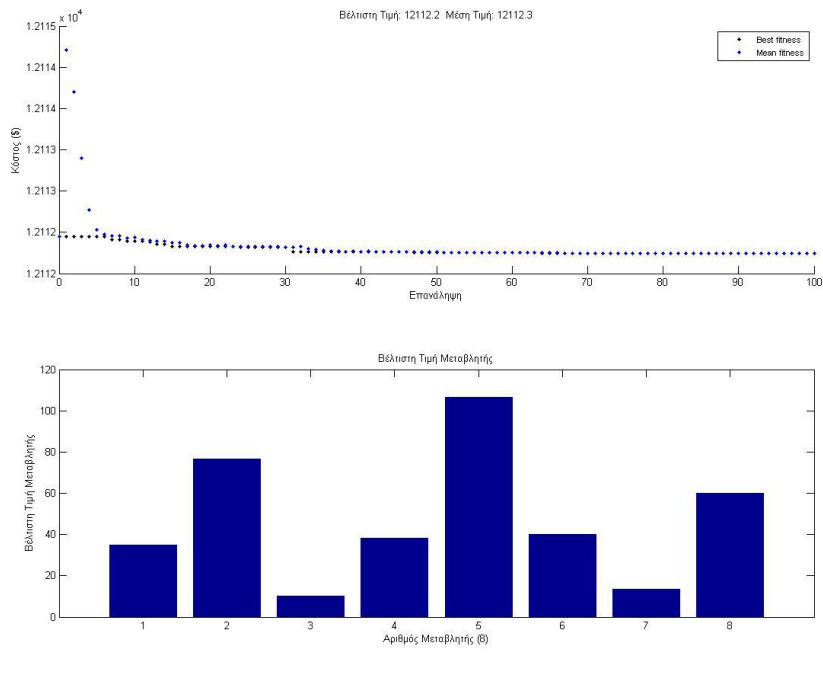
Σχήμα 9.8: Βέλτιστες τιμές για $P_D=300$ MW και $H_D=150$ MW

Για $P_D=250$ MW και $H_D=175$ MW έχουμε τα εξής αποτελέσματα στο MatLab:



Σχήμα 9.9: Βέλτιστες τιμές για $P_D=250$ MW και $H_D=175$ MW

Για $P_D=160$ MW και $H_D=220$ MW έχουμε τα εξής αποτελέσματα στο MatLab:



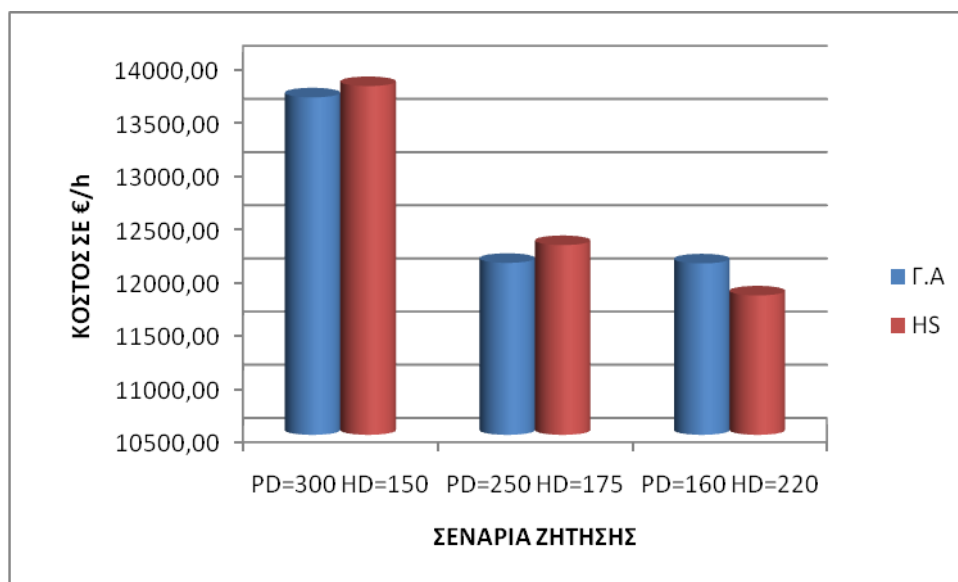
Σχήμα 9.10: Βέλτιστες τιμές για $P_D=160$ MW και $H_D=220$ MW

Τα αποτελέσματα μας συγκρίνονται με αυτά άλλων μεθόδων [12] και φαίνονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα:

		P _D =300 H _D =150		P _D =250 H _D =175		P _D =160 H _D =220	
		Γ.Α	HS	Γ.Α	HS	Γ.Α	HS
ΜΟΝΑΔΑ 1	P ₁ (MW)	135,00	134,74	135,00	134,67	35,00	41,41
ΜΟΝΑΔΑ 2	P ₂ (MW)	40,07	48,20	40,00	52,99	76,70	66,61
	H ₂ (MW)	74,76	81,09	75,00	85,69	106,68	97,73
ΜΟΝΑΔΑ 3	P ₃ (MW)	19,94	16,23	10,00	10,11	10,00	10,59
	H ₃ (MW)	34,16	23,92	40,00	39,73	40,00	40,23
ΜΟΝΑΔΑ 4	P ₄ (MW)	104,99	100,85	65,00	52,23	38,31	41,39
	H ₄ (MW)	0,01	6,29	17,46	4,18	13,32	22,83
ΜΟΝΑΔΑ 5	H ₅ (MW)	41,08	38,70	42,55	45,40	60,00	59,21
ΚΟΣΤΟΣ	F(€/h)	13671,10	13779,50	12117,10	12284,45	12112,20	11810,88
ΧΡΟΝΟΣ	sec	3,41	-	3,27	-	3,15	-

Πίνακας 9.8: Αποτελέσματα Εφαρμογής 2

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται γραφικά η διαφορά στο κόστος μεταξύ των δύο μεθόδων.



Σχήμα 9.11: Σύγκριση κόστους μεταξύ Γ.Α-Η.Σ για τα διάφορα σενάρια ζήτησης ισχύος.

Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις

- Από τον παραπάνω πίνακα βλέπουμε ότι με τους γενετικούς αλγορίθμους παίρνουμε τα ίδια, ίσως και καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με άλλες μεθόδους που έχουν προταθεί στην αναφορά [12]. Συγκεκριμένα στις δύο από τις τρεις περιπτώσεις οδηγούμαστε σε καλύτερο αποτέλεσμα.
- Τέλος, από τα σχήματα 9.8, 9.9, 9.10 παρατηρούμε ότι ο γενετικός αλγόριθμος συγκλίνει στη βέλτιστη λύση από την 40^η περίπου επανάληψη αλλά επιλέξαμε την διεξαγωγή 100 επαναλήψεων για ορθότερα και πιο ακριβή αποτελέσματα μιας και ο χρόνος δεν είναι τόσο απαγορευτικός (3-4 δευτερόλεπτα).

9.3.3 Εφαρμογή 3

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμη η εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου σε ένα πιο σύνθετο πρόβλημα. Συγκεκριμένα, θεωρούμε ότι πρέπει να καλύψουμε ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος ίση με 300MW και ζήτηση θερμότητας ίση με 150MW, έχοντας στη διάθεση μας τις μονάδες της εφαρμογής 2. Επίσης θέτουμε ως περιορισμό τις εκπομπές καυσαερίων NO_x, SO_x και CO₂ που προκύπτουν από την λειτουργία των μονάδων και οι περιορισμοί είναι της μορφής (9.6).

Τα διάφορα στοιχεία για τις μονάδες διατυπώθηκαν στην προηγούμενη εφαρμογή. Επίσης θεωρούμε ότι στη συμβατική μονάδα παραγωγής ισχύος χρησιμοποιούμε ως καύσιμο τον λιγνίτη, στις μονάδες συμπαραγωγής το φυσικό αέριο και στον λέβητα πετρέλαιο. Όπως αναφέραμε και στην παράγραφο 9.2.2 ο συντελεστής εκπομπών γ εξαρτάται από το καύσιμο αλλά και από την τεχνολογία των μονάδων παραγωγής, και συγκεκριμένα από τον συντελεστή απόδοσης ηλεκτρικής ισχύος των μονάδων. Έτσι, στον επόμενο πίνακα φαίνονται οι αποδόσεις των μονάδων που χρησιμοποιούμε στις εφαρμογές μας, καθώς και το καύσιμο λειτουργίας τους. Με βάση τις αναφορές [20], [21], και [22] διαμορφώνονται οι κάτωθι συντελεστές εκπομπών.

	απόδοση	SO _x t/MWh	NO _x t/MWh	CO ₂ t/MWh
Λιγνιτικός σταθμός σύγχρονης τεχνολογίας	45%	0.002	0.0015	0.8
Συμβατικός πετρελαϊκός σταθμός	33%	0.00082	0.001	0.75
Συμβατικός σταθμός με φυσικό αέριο	38%	0.00002	0.0003	0.52
Σταθμός συμπαραγωγής με φυσικό αέριο	38%	0.00002	0.0003	0.52
Πετρελαϊκός λέβητας θερμότητας	85%	0.00034	0.0004	0.31

Πίνακας 9.9: Συντελεστές εκπομπών γ

Επίσης θεωρούμε ότι στην περίπτωση που παράγουμε περισσότερη ενέργεια από ότι χρειαζόμαστε για την κάλυψη της ζήτησης, τότε το τυχόν πλεόνασμα ενέργειας μπορεί να πωληθεί στην αγορά προς 60 €/MWh. Τέλος, θεωρούμε ότι μπορούμε να πουλήσουμε και τα δικαιώματα εκπομπών ρύπων CO₂ προς 25 €/tn, οπότε στην περίπτωση που οι εκπομπές CO₂ από τις μονάδες μας είναι κάτω του μεγίστου επιτρεπτού ορίου τότε πουλάμε το δικαίωμα παραγωγής ρύπων σε τρίτους. Για τα όρια αυτά στη συγκεκριμένη εφαρμογή, κάνουμε την παραδοχή ότι είναι ίσα με 0.5 tn/h για τα SO_x, 0.5 tn/h για τα NO_x και 250 tn/h για τα CO₂.

Για να φανεί η επίδραση των παραπάνω στο αρχικό πρόβλημα τρέχουμε τρεις εκτελέσεις για τις τρεις παρακάτω περιπτώσεις.

Περίπτωση 1''

Αρχικά θεωρούμε ότι στο πρόβλημα έχουμε επιπρόσθετους μόνο τους περιβαλλοντικούς περιορισμούς οπότε η αντικειμενική συνάρτηση είναι της μορφής (9.5) με περιορισμούς της μορφής (9.2-9.3) και (9.6).

Περίπτωση 2''

Έπειτα εντάσσουμε το πρόβλημα στην απελευθερωμένη αγορά ενέργειας με δυνατότητα πώλησης ενέργειας σε τρίτους, οπότε η αντικειμενική συνάρτηση είναι της μορφής (9.7) και οι περιορισμοί της μορφής (9.3) και (9.8). Θεωρούμε ότι πουλάμε το πλεόνασμα ενέργειας στην τιμή των 60 €/MWh.

Περίπτωση 3''

Τέλος προσθέτουμε επιπλέον τη δυνατότητα πώλησης ρύπων οπότε η αντικειμενική συνάρτηση είναι της μορφής (9.9) με περιορισμούς της μορφής (9.2), (9.3) και (9.6).

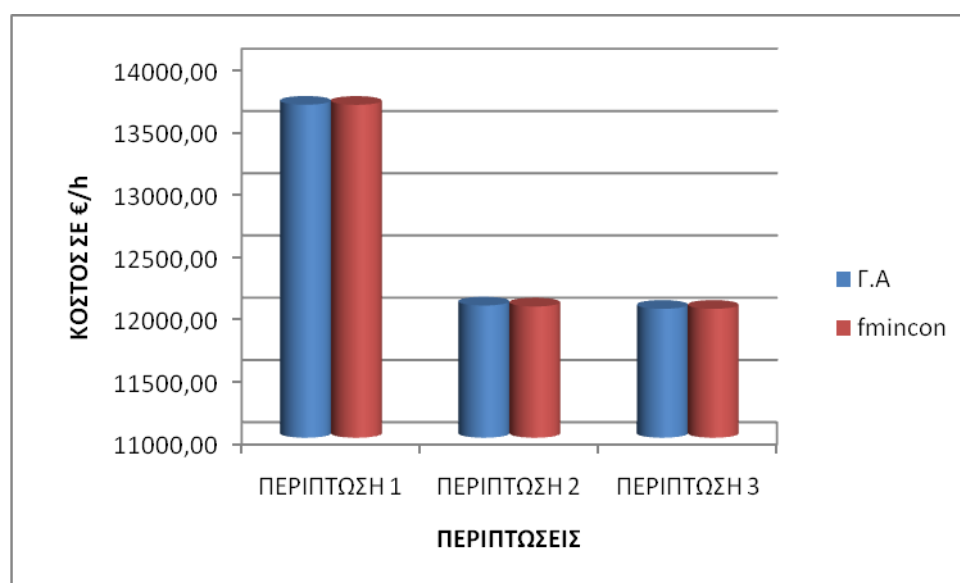
Και για τις τρεις περιπτώσεις επιλέγουμε πληθυσμό ίσο με 50, πιθανότητα διασταύρωσης 0,87, ευριστική μέθοδο διασταύρωσης με $r=0.9$ και 200 επαναλήψεις. Τις επιλογές αυτές τις περνάμε στο ToolBox του MatLab, καθώς επίσης και τους διάφορους πίνακες που ικανοποιούν τους ισωτικούς και ανισωτικούς περιορισμούς για τις διάφορες παραλλαγές του προβλήματος.

Τα αποτελέσματα μας φαίνονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα:

		ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1		ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2		ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 3	
		Γ.Α	fmincon	Γ.Α	fmincon	Γ.Α	fmincon
ΜΟΝΑΔΑ 1	P ₁ (MW)	135,00	135,00	135,00	135,00	135,00	135,00
ΜΟΝΑΔΑ 2	P ₂ (MW)	40,96	41,02	113,28	115,35	108,00	108,04
	H ₂ (MW)	75,07	74,93	114,99	101,54	98,40	98,23
ΜΟΝΑΔΑ 3	P ₃ (MW)	19,04	18,98	51,82	48,65	45,16	45,12
	H ₃ (MW)	38,45	38,54	30,01	41,62	51,60	51,73
ΜΟΝΑΔΑ 4	P ₄ (MW)	105,00	105,00	105,00	105,00	105,00	105,00
	H ₄ (MW)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ΜΟΝΑΔΑ 5	H ₅ (MW)	36,49	36,53	5,00	6,84	0,00	0,00
ΠΩΛΗΣΗ	P _s (MW)	0,00	0,00	105,10	104,00	93,16	93,15
SO _x	(tn/h)	0,29	0,29	0,28	0,28	0,28	0,28
NO _x	(tn/h)	0,27	0,27	0,29	0,29	0,28	0,28
CO ₂	(tn/h)	205,11	205,12	250,00	250,00	242,24	242,24
ΚΟΣΤΟΣ	F(€/h)	13673,50	13673,00	12062,00	12054,00	12035,00	12035,00

Πίνακας 9.10: Αποτελέσματα Εφαρμογής 3

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται γραφικά η διαφορά στο κόστος μεταξύ Γ.Α και fmincon για τις διάφορες περιπτώσεις.



Σχήμα 9.12: Σύγκριση κόστους μεταξύ Γ.Α-fmincon για τις τρεις περιπτώσεις

Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις

- Αρχικά, με βάση τον παραπάνω πίνακα αλλά και με αυτόν της εφαρμογής 2 παρατηρούμε ότι στην περίπτωση που προσθέτουμε περιβαλλοντικούς περιορισμούς το κόστος λειτουργίας αυξάνεται, έστω και κατά λίγο. Όπως αναφέραμε και στην παράγραφο 6.3 το κόστος καυσίμων και οι εκπομπές είναι συγκρουόμενοι στόχοι οπότε με την προσθήκη περιορισμών στις εκπομπές ήταν αναμενόμενο να αυξηθεί το κόστος λειτουργίας.
- Και για τις τρεις περιπτώσεις παρατίθενται και τα αποτελέσματα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Lagrange. Όπως βλέπουμε με τους Γ.Α οδηγούμαστε στα ίδια αποτελέσματα.
- Επίσης από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι όταν εντάξουμε το πρόβλημα στην απελευθερωμένη αγορά ενέργειας τότε είμαστε σε θέση να πουλάμε πλεόνασμα ενέργειας (οι μονάδες 2 και 3 αυξάνουν την παραγωγή τους) με αποτέλεσμα το κόστος να μειώνεται σημαντικά, συγκεκριμένα κατά 11,79% .
- Το ίδιο παρατηρούμε και στην περίπτωση προσθήκης δυνατότητας πώλησης δικαιωμάτων ρύπων CO₂ αφού όπως βλέπουμε από παραπάνω το κόστος λειτουργίας μειώθηκε επιπλέον κατά 0,2%, ποσοστό που ίσως φαίνεται μικρό αλλά αν αναλογιστούμε ότι τα παραπάνω αποτελέσματα αναφέρονται σε ωριαία βάση τότε συμπεραίνουμε ότι πρόκειται για αξιόλογο κέρδος.

9.3.4 Εφαρμογή 4

Στις προηγούμενες εφαρμογές είδαμε ότι ο γενετικός αλγόριθμος είναι σε θέση να χειριστεί με επιτυχία τις διάφορες παραλλαγές του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου. Στην εφαρμογή αυτή παραθέτουμε μια σειρά προβλημάτων με σκοπό κυρίως να δούμε την ταχύτητα του γενετικού αλγορίθμου σε προβλήματα με παραπάνω μεταβλητές. Για το σκοπό αυτό εκτελούμε τα προβλήματα μόνο με τις βασικές επιλογές του αλγορίθμου και έτσι παραλείπουμε τις διάφορες γραφικές παραστάσεις ώστε να πάρουμε τα ίδια αποτελέσματα σε μικρότερο χρονικό διάστημα.

Επίσης, τρέχουμε τα προβλήματα από την γραμμή εντολών του MatLab και όχι από το ToolBox. Αυτό το κάνουμε έτσι ώστε από τη μια μεριά να δείξουμε ότι το MatLab μας δίνει 2 εναλλακτικές για την εκτέλεση του γενετικού αλγορίθμου (ανάλογα με την εξοικείωση του κάθε χρήστη), και από την άλλη μεριά ώστε να μπορέσουμε να μετρήσουμε τον χρόνο εκτέλεσης, όπως θα φανεί παρακάτω.

Πρόβλημα 7 μονάδων

Στο πρόβλημα αυτό θεωρούμε ότι έχουμε στη διάθεσή μας 7 μονάδες, οπότε και περισσότερες μεταβλητές από τις προηγούμενες εφαρμογές, και μας ζητείται η κάλυψη κάποιου ηλεκτρικού και θερμικού φορτίου, 800MW και 350MW αντίστοιχα.

Συγκεκριμένα έχουμε δυο λιγνιτικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος, τέσσερις μονάδες συμπαραγωγής (φυσικό αέριο) και έναν λέβητα (πετρέλαιο). Τα δεδομένα για τις μονάδες αυτές φαίνονται στους παρακάτω πίνακες αντίστοιχα.

ΜΟΝΑΔΑ	a	b	c	p^{\min}	p^{\max}
1	1000	13,5	0,0345	10	250
2	1199	13,2	0,032	0	240

Πίνακας 9.11: Δεδομένα συμβατικών μονάδων παραγωγής ισχύος

ΜΟΝΑΔΑ	a	b	c	d	e	z
3	2650	14,5	0,0345	4,2	0,03	0,011
4	2600	14,4	0,032	4,6	0,023	0,012
5	2700	14,2	0,033	4,4	0,031	0,013
6	2590	14,3	0,031	4,45	0,03	0,016

Πίνακας 9.12: Δεδομένα μονάδων συμπαραγωγής ισχύος

ΜΟΝΑΔΑ	(p_i, h_i)	(p_i, h_i)	(p_i, h_i)	(p_i, h_i)
3	(20,0.1)	(200,0.5)	(195, 120)	(15, 110)
4	(25,0.2)	(225,1.8)	(200, 180)	(20, 120)
5	(30, 1)	(250, 4)	(240, 200)	(25, 180)
6	(28, 2)	(225, 3)	(210, 170)	(22, 160)

Πίνακας 9.13: Συντεταγμένες ορίων λειτουργίας μονάδων συμπαραγωγής ισχύος

ΜΟΝΑΔΑ	a	d	e	h^{\min}	h^{\max}
7	1000	1,35	0,0345	0	200

Πίνακας 9.14: Δεδομένα μονάδων παραγωγής θερμότητας

Για τους συντελεστές εκπομπών γ τα δεδομένα είναι αντίστοιχα με αυτά που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.

Αρχικά εκτελούμε το πρόβλημα έχοντας ως αντικειμενική συνάρτηση μόνο την συνάρτηση κόστους, της μορφής (9.1), και περιορισμούς της μορφής (9.2) και

(9.3), ενώ έπειτα εκτελούμε το πρόβλημα έχοντας ως αντικειμενική συνάρτηση μόνο την συνάρτηση εκπομπών CO₂ και περιορισμούς της μορφής (9.2-9.3).

Και στις δύο περιπτώσεις ορίζουμε πληθυσμό ίσο με 50, ευριστική μέθοδο διασταύρωσης με $r=0.9$, πιθανότητα διασταύρωσης 0,87 και 100 επαναλήψεις.

Τα αποτελέσματα μας παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα

		ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ		ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO ₂	
		Γ.Α.	fmincon	Γ.Α.	fmincon
ΜΟΝΑΔΑ 1	P ₁ (MW)	141,46	141,50	10,00	10,00
ΜΟΝΑΔΑ 2	P ₂ (MW)	157,19	157,24	0,00	0,00
ΜΟΝΑΔΑ 3	P ₃ (MW)	116,71	116,70	130,23	180,38
	H ₃ (MW)	64,33	64,66	64,88	29,99
ΜΟΝΑΔΑ 4	P ₄ (MW)	125,23	125,20	207,70	202,69
	H ₄ (MW)	70,46	70,90	42,19	106,67
ΜΟΝΑΔΑ 5	P ₅ (MW)	126,81	126,79	246,87	200,93
	H ₅ (MW)	53,15	53,47	110,21	106,67
ΜΟΝΑΔΑ 6	P ₆ (MW)	132,60	132,56	205,20	206,00
	H ₆ (MW)	46,20	46,54	132,71	106,67
ΜΟΝΑΔΑ 7	H ₇ (MW)	115,85	114,43	0,00	0,00
SO _x	(tn/h)	0,65	0,65	0,04	0,04
NO _x	(tn/h)	0,64	0,64	0,25	0,25
CO ₂	(tn/h)	535,54	535,54	418,80	418,80
ΚΟΣΤΟΣ	F(€/h)	30862	30862	34080	34080
ΧΡΟΝΟΣ	sec	3,58	0,07	3,56	0,08

Πίνακας 9.15: Αποτελέσματα 7 μονάδων

Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις

- Με βάση τον παραπάνω πίνακα βλέπουμε ότι στην περίπτωση που σκοπός μας είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους, αυτό πράγματι επιτυγχάνεται και έχουμε ένα ικανοποιητικό κόστος λειτουργίας το οποίο επιβεβαιώνεται και από την fmincon.
- Επίσης στην περίπτωση που σκοπός μας είναι η ελαχιστοποίηση των εκπομπών CO₂, αυτό πράγματι επιτυγχάνεται σε μια τιμή που επαληθεύεται και από την fmincon. Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση αυτή το κόστος λειτουργίας αυξάνει γεγονός που ήταν αναμενόμενο, όπως έχουμε εξηγήσει και σε προηγούμενες εφαρμογές.

- Τέλος, παρατηρούμε ότι παρά την αύξηση των μεταβλητών ο χρόνος εκτέλεσης του Γ.Α παραμένει ικανοποιητικός και σχεδόν σταθερός μεταξύ των δύο περιπτώσεων. Βέβαια σε καμιά περίπτωση δε συγκρίνεται με αυτούς της `fmincon`.

Πρόβλημα 14 μονάδων.

Στο σημείο αυτό θεωρούμε ότι έχουμε στη διάθεση μας 14 μονάδες έτσι ώστε να δούμε πως ανταποκρίνεται ο Γ.Α σε ένα πρόβλημα με πολλές μεταβλητές και κυρίως πως ο αριθμός των μεταβλητών επηρεάζει τον χρόνο εκτέλεσης. Στους επόμενους πίνακες φαίνεται το είδος αλλά και τα δεδομένα για τις μονάδες που διαθέτουμε:

ΜΟΝΑΔΑ	a	b	c	p^{\min}	p^{\max}
1	1000	13,5	0,0345	10	250
2	1199	13,2	0,032	0	240
3	1245	13,1	0,033	20	200
4	0	26	0	0	100
5	0	32	0	0	125

Πίνακας 9.16: Δεδομένα συμβατικών μονάδων παραγωγής ισχύος

ΜΟΝΑΔΑ	a	b	c	d	E	z
6	2650	14,5	0,0345	4,2	0,03	0,011
7	2600	14,4	0,032	4,6	0,023	0,012
8	2700	14,2	0,033	4,4	0,031	0,013
9	2590	14,3	0,031	4,45	0,03	0,016

Πίνακας 9.17: Δεδομένα μονάδων συμπαραγωγής ισχύος

ΜΟΝΑΔΑ	(p_i, h_i)	(p_i, h_i)	(p_i, h_i)	(p_i, h_i)
6	(20,0.1)	(200,0.5)	(195, 120)	(15, 110)
7	(25,0.2)	(225,1.8)	(200, 180)	(20, 120)
8	(30, 1)	(250, 4)	(240, 200)	(25, 180)
9	(28, 2)	(225, 3)	(210, 170)	(22, 160)

Πίνακας 9.18: Συντεταγμένες ορίων λειτουργίας μονάδων συμπαραγωγής ισχύος

ΜΟΝΑΔΑ	a	d	e	h^{\min}	h^{\max}
10	1200	4,2	0,02	20	250
11	1100	4,1	0,023	0	200
12	1270	4,5	0,022	20	220
13	0	16	0	0	200
14	0	12,5	0	0	100

Πίνακας 9.19: Δεδομένα μονάδων παραγωγής θερμότητας

Στο πρόβλημα αυτό αγνοούμε τυχόν περιβαλλοντικούς ή άλλους περιορισμούς και απλά στόχος μας είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους. Ορίζουμε πληθυσμό ίσο με 50, ευριστική μέθοδο διασταύρωσης με $r=0.9$, πιθανότητα διασταύρωσης 0,87 και 400 επαναλήψεις.

Τα αποτελέσματα μας για διάφορα σενάρια ζήτησης ισχύος φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

		P_D H_D	P_D H_D	P_D H_D	P_D H_D	P_D H_D
		1200 1000	1300 1100	1400 1150	1450 1200	1450 1250
ΜΟΝΑΔΑ 1	P_1 (MW)	180,27	181,12	196,05	203,12	207,16
ΜΟΝΑΔΑ 2	P_2 (MW)	198,95	199,95	210,07	236,71	233,88
ΜΟΝΑΔΑ 3	P_3 (MW)	194,52	194,91	200,00	199,97	200,00
ΜΟΝΑΔΑ 4	P_4 (MW)	0,01	95,75	100,00	100,00	99,42
ΜΟΝΑΔΑ 5	P_5 (MW)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
ΜΟΝΑΔΑ 6	P_6 (MW)	148,07	148,00	152,13	151,49	150,84
	H_6 (MW)	110,93	110,37	114,38	115,99	117,54
ΜΟΝΑΔΑ 7	P_7 (MW)	155,48	155,87	177,22	183,73	183,32
	H_7 (MW)	130,96	130,31	135,29	144,50	150,89
ΜΟΝΑΔΑ 8	P_8 (MW)	158,41	159,22	184,30	186,62	183,10
	H_8 (MW)	97,21	97,09	96,11	106,48	118,05
ΜΟΝΑΔΑ 9	P_9 (MW)	164,29	165,17	180,22	188,36	192,28
	H_9 (MW)	90,12	92,32	95,36	98,54	110,41
ΜΟΝΑΔΑ 10	H_{10} (MW)	206,96	207,66	221,60	232,73	239,92
ΜΟΝΑΔΑ 11	H_{11} (MW)	182,37	179,96	193,81	199,95	200,00
ΜΟΝΑΔΑ 12	H_{12} (MW)	181,41	184,04	193,49	201,85	213,65
ΜΟΝΑΔΑ 13	H_{13} (MW)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05
ΜΟΝΑΔΑ 14	H_{14} (MW)	0,05	98,27	99,97	99,97	99,50
ΚΟΣΤΟΣ	F(€/h)	49817,00	53667,00	56953,00	58990,00	59674,00
ΧΡΟΝΟΣ	sec	10,86	10,40	10,53	10,32	10,79

Ο υπόλοιπος πίνακας ακολουθεί στην επόμενη σελίδα

		P _D H _D	P _D H _D	P _D H _D	P _D H _D	P _D H _D
		1000 800	800 600	600 450	500 400	450 350
ΜΟΝΑΔΑ 1	P ₁ (MW)	150,08	120,42	91,46	78,98	70,53
ΜΟΝΑΔΑ 2	P ₂ (MW)	167,01	135,32	104,73	90,12	80,56
ΜΟΝΑΔΑ 3	P ₃ (MW)	164,23	132,94	102,21	88,91	79,64
ΜΟΝΑΔΑ 4	P ₄ (MW)	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
ΜΟΝΑΔΑ 5	P ₅ (MW)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ΜΟΝΑΔΑ 6	P ₆ (MW)	121,56	96,70	69,17	53,57	49,93
	H ₆ (MW)	89,52	66,28	52,66	46,27	37,75
ΜΟΝΑΔΑ 7	P ₇ (MW)	128,35	101,57	75,06	60,20	54,35
	H ₇ (MW)	106,45	78,87	55,12	49,44	42,94
ΜΟΝΑΔΑ 8	P ₈ (MW)	132,06	105,73	77,26	64,78	57,08
	H ₈ (MW)	77,74	57,10	42,61	38,28	34,19
ΜΟΝΑΔΑ 9	P ₉ (MW)	136,69	107,32	80,11	63,42	57,91
	H ₉ (MW)	70,61	52,56	37,45	36,92	32,34
ΜΟΝΑΔΑ 10	H ₁₀ (MW)	161,10	127,30	95,37	83,98	69,22
ΜΟΝΑΔΑ 11	H ₁₁ (MW)	147,36	112,37	86,68	75,35	71,65
ΜΟΝΑΔΑ 12	H ₁₂ (MW)	147,22	105,53	80,11	69,77	61,88
ΜΟΝΑΔΑ 13	H ₁₃ (MW)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ΜΟΝΑΔΑ 14	H ₁₄ (MW)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
ΚΟΣΤΟΣ	F(€/h)	42497,78	35906,50	30435,00	28107,00	26807,00
ΧΡΟΝΟΣ	sec	10,56	10,92	10,52	11,08	10,72

Πίνακας 9.20: Αποτελέσματα 14 μονάδων

Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις

- Από τον παραπάνω πίνακα βλέπουμε ότι ο Γ.Α ανταποκρίνεται το ίδιο καλά και σε προβλήματα με παραπάνω μεταβλητές. Όσο για τον χρόνο εκτέλεσης αυτός αυξάνει σε σχέση με τις προηγούμενες εφαρμογές που είχαμε λιγότερες μεταβλητές αλλά παρόλο αυτά παραμένει σε λογικά πλαίσια αφού κυμαίνεται από 10 έως 11 δευτερόλεπτα.
- Επίσης, φαίνεται η επίδραση που έχει στο κόστος λειτουργίας και στις εκπομπές καυσαερίων, η ζήτηση ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος. Όπως είναι λογικό, για μικρότερη ζήτηση έχουμε μικρότερη παραγωγή και επομένως λιγότερες εκπομπές και μικρότερο κόστος.

9.3.5 Εφαρμογή 5

Στην τελευταία αυτή εφαρμογή έχουμε συνδυασμό των διαφόρων παραλλαγών του προβλήματος οικονομικής κατανομής φορτίου και επικεντρωνόμαστε κυρίως στους περιβαλλοντικούς περιορισμούς και στην μείωση του κόστους από πώληση δικαιωμάτων ρύπων CO₂.

Θεωρούμε ότι έχουμε στη διάθεση μας οχτώ από τις δεκατέσσερις προηγούμενες μονάδες και συγκεκριμένα τις τρεις πρώτες από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής ισχύος, όλες τις μονάδες συμπαραγωγής και την δεύτερη από τις μονάδες παραγωγής θερμότητας. Καλούμαστε να καλύψουμε ζήτηση ισχύος $P_D=900$ MW και $H_D=450$ MW

Τα δεδομένα για τις μονάδες διατυπώθηκαν παραπάνω, όπως επίσης και οι συντελεστές εκπομπών γ. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή κάνουμε την παραδοχή ότι οι τρεις συμβατικές μονάδες λειτουργούν με λιγνίτη, πετρέλαιο και φυσικό αέριο αντίστοιχα, οι μονάδες συμπαραγωγής με φυσικό αέριο και τέλος ο λέβητας λειτουργεί με πετρέλαιο.

Αρχικά εκτελούμε το πρόβλημα με στόχο την ελαχιστοποίηση μόνο του κόστους λειτουργίας. Θέτουμε 100 επαναλήψεις, πληθυσμό 50, ευριστική μέθοδο διασταύρωσης με $r=0.9$, πιθανότητα διασταύρωσης 0,87.

Στην εφαρμογή αυτή επιλέγουμε να τρέξουμε το πρόβλημα από την γραμμή εντολών του MatLab, κυρίως για να μετρήσουμε και τον χρόνο εκτέλεσης με τις εντολές tic,toc. Τον ίδιο τρόπο εκτέλεσης ακολουθήσαμε σε όλες τις εφαρμογές που χρειάστηκε να υπολογίσουμε τον χρόνο εκτέλεσης, όπως για παράδειγμα σε αυτές του κεφαλαίου 5,6, καθώς και σε προηγούμενες εφαρμογές αυτού του κεφαλαίου. Τα m files που δημιουργήσαμε στο MatLab για τις αντικειμενικές συναρτήσεις και τα ορίσματα αυτής φαίνονται παρακάτω.

Στο MatLab έχουμε τον εξής κώδικα για την εκτέλεση του προβλήματος:

```
gaoptions = gaoptimset('PopulationSize', 50, 'CrossoverFcn', ...
    (@crossoverheuristic, 1.9), 'CrossoverFraction', 0.87, ...
    'Generations', 100, 'StallGenLimit', 100);
tic;
[x fval] = ga(@chp2, 12, a, d, A, D, LB, [], [], gaoptions);
toc;
```

Η συνάρτηση 'chp2' είναι η αντικειμενική μας συνάρτηση και το m file που δημιουργήσαμε για αυτήν φαίνεται στην επόμενη σελίδα.

```
function f=chp2(x)

p=(x(1:7));
h(4:8)=(x(8:12));

c1=1000+13.5*p(1)+0.0345*p(1)^2;
so1=0.002*p(1); no1=0.0015*p(1); co1=0.8*p(1);

c2=1199+13.2*p(2)+0.032*p(2)^2;
so2=0.00034*h(2); no2=0.0004*h(2); co2=0.31*h(2);

c3=1245+13.1*p(3)+0.033*p(3)^2;
so3=0.00002*p(3); no3=0.0003*p(3); co3= 0.52*p(3);

c4=2650 + 14.5*p(4)+0.0345*p(4)^2 + 4.2*h(4)+0.03*h(4)^2 +...
    0.011*p(4)*h(4);
so4=0.00002*p(4); no4=0.0003*p(4); co4=0.52*p(4);

c5=2600 + 14.4*p(5)+0.032*p(5)^2+ 4.6*h(5)+0.023*h(5)^2+...
    0.012*p(5)*h(5);
so5=0.00002*p(5); no5=0.0003*p(5); co5=0.52*p(5);

c6=2700 + 14.2*p(6)+0.033*p(6)^2+ 4.4*h(6)+0.031*h(6)^2+...
    0.013*p(6)*h(6);
so6=0.00002*p(6); no6=0.0003*p(6); co6=0.52*p(6);

c7=2590 + 14.3*p(7)+0.031*p(7)^2+ 4.45*h(7)+0.03*h(7)^2+...
    0.016*p(7)*h(7);
so7=0.00002*p(7); no7=0.0003*p(7); co7=0.52*p(7);

c8=1100+4.1*h(8)+0.023*h(8)^2;
so8=0.00034*h(8); no8=0.0004*h(8); co8=0.31*h(8);

so=so1+so2+so3+so4+so5+so6+so7+so8;
no=no1+no2+no3+no4+no5+no6+no7+no8;
co=co1+co2+co3+co4+co5+co6+co7+co8;
e=so+no+co;

c=c1+c2+c3+c4+c5+c6+c7+c8;

f=c;
```

Τα ορίσματα της συνάρτησης ga φαίνονται παρακάτω:

```

A=[1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0;0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1];
D=[900;450];

a=[0 0 0 1 0 0 0 -450 0 0 0 0 ; d=[ -25; %%unit4
 0 0 0 -1 0 0 0 -0.0454959 0 0 0 0 ; -20.00454959;
 0 0 0 -1 0 0 0 18 0 0 0 0 ; 1965;
 0 0 0 1 0 0 0 0.41841 0 0 0 0 ; 200.02;

 0 0 0 0 1 0 0 0 -125 0 0 0 ; 0; %%unit5
 0 0 0 0 -1 0 0 0 -0.041736 0 0 0 ; -25.008347;
 0 0 0 0 -1 0 0 0 0 3 0 0 0 ; 340;
 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0.14103 0 0 0 ; 225.2525;

 0 0 0 0 0 1 0 0 0 -73.33 0 0 ; -43.3; %%unit6
 0 0 0 0 0 -1 0 0 0 -0.027777 0 0 ; -30.027;
 0 0 0 0 0 -1 0 0 0 10.75 0 0 ; 1910;
 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0.051 0 0 ; 250.2041;

 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 -197 0 ; -366; %%unit7
 0 0 0 0 0 0 -1 0 0 0 -0.03797 0 ; -28.075979;
 0 0 0 0 0 0 -1 0 0 0 18.8 0 ; 2986;
 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0.08982 0 ; 225.26946;

-1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ; -10; ;%unit1
 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ; 250;

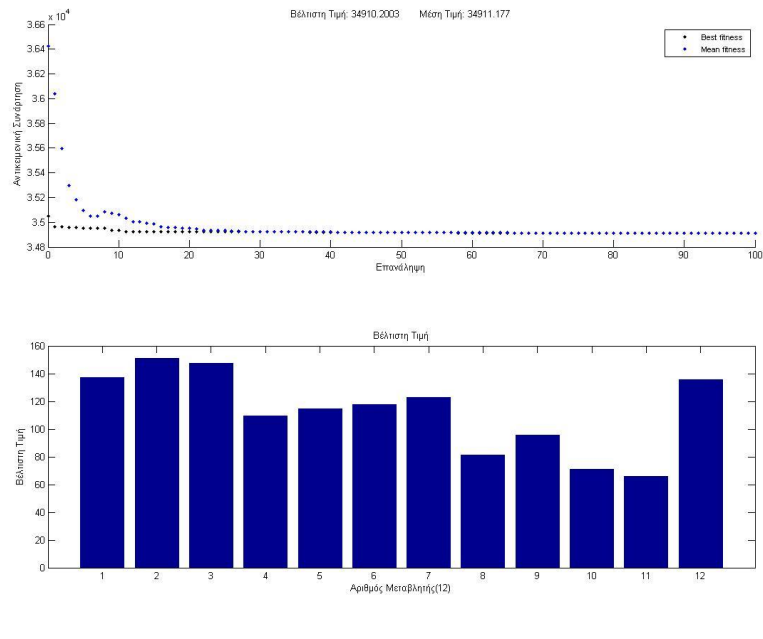
 0 -1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ; 0; %%unit2
 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ; 240;

 0 0 -1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ; -20; %%unit3
 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ; 200;

 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1; 0; %%unit8
 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1;]; 200; ];

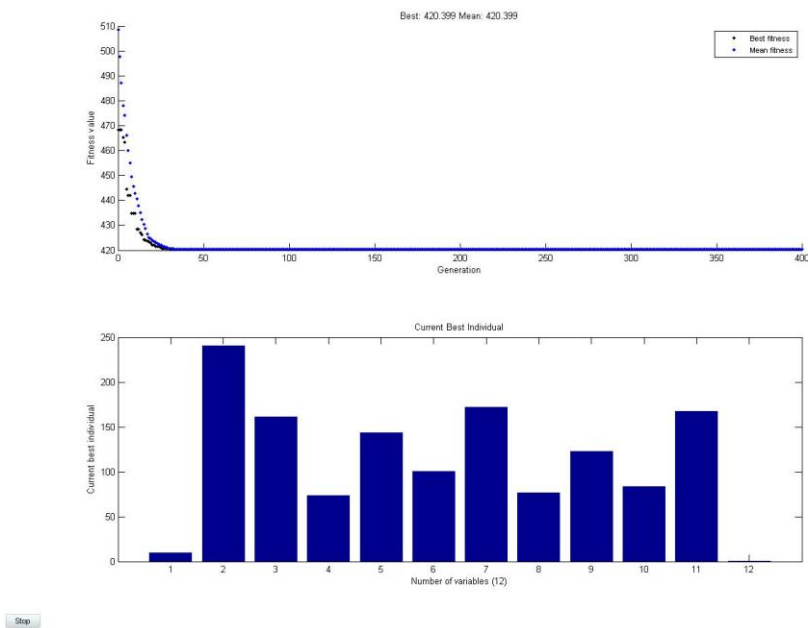
```

Τα αποτελέσματα μας φαίνονται παρακάτω:



Σχήμα 9.13: Ελαχιστοποίηση κόστους λειτουργίας

Στη συνέχεια τρέχουμε το ίδιο πρόβλημα με στόχο την ελαχιστοποίηση των εκπομπών CO₂. Τα αποτελέσματα μας φαίνονται παρακάτω:



Σχήμα 9.14: Ελαχιστοποίηση εκπομπών CO₂

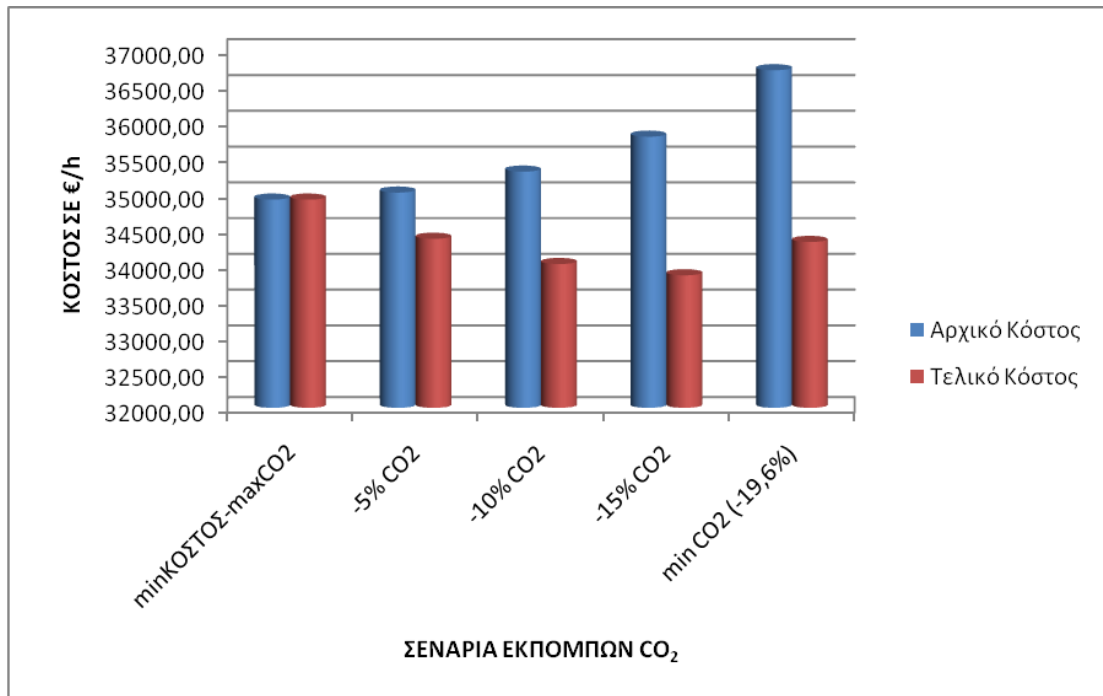
Από τις παραπάνω εκτελέσεις προκύπτουν τα ανώτατα και κατώτατα όρια CO₂ και κόστους κατά την λειτουργία των μονάδων. Στη συνέχεια μειώνουμε τις εκπομπές CO₂ από το ανώτερο έως το κατώτερο όριο με βήμα 5% και θεωρούμε ότι την μείωση αυτή μπορούμε να την πουλήσουμε σε τρίτους στην τιμή των 25€/tn , με στόχο πάντα την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας των μονάδων μας.

Τα αποτελέσματα μας αυτά φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

		ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ	-5% CO ₂	-10% CO ₂	-15% CO ₂	ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ CO ₂ (-19,6%)
		Γ.Α.	Γ.Α.	Γ.Α.	Γ.Α.	Γ.Α.
ΜΟΝΑΔΑ 1	P ₁ (MW)	137,08	107,44	78,60	49,76	10,00
ΜΟΝΑΔΑ 2	P ₂ (MW)	151,27	178,46	205,29	232,12	240,00
ΜΟΝΑΔΑ 3	P ₃ (MW)	147,42	150,51	152,46	154,40	161,11
ΜΟΝΑΔΑ 4	P ₄ (MW)	109,41	109,09	109,50	109,91	73,17
	H ₄ (MW)	81,30	91,55	100,60	109,67	76,71
ΜΟΝΑΔΑ 5	P ₅ (MW)	114,43	114,88	114,63	114,69	143,54
	H ₅ (MW)	95,48	106,83	118,81	130,80	122,43
ΜΟΝΑΔΑ 6	P ₆ (MW)	117,80	118,10	118,31	118,52	100,59
	H ₆ (MW)	71,25	79,96	88,76	97,56	83,52
ΜΟΝΑΔΑ 7	P ₇ (MW)	122,58	121,52	121,21	120,90	171,59
	H ₇ (MW)	66,10	74,97	84,19	93,42	167,34
ΜΟΝΑΔΑ 8	H ₈ (MW)	135,87	96,69	57,63	18,56	0,00
SO _x	(tn/h)	0,38	0,32	0,26	0,20	0,11
Nox	(tn/h)	0,50	0,46	0,41	0,36	0,31
CO ₂	(tn/h)	516,40	490,58	464,76	438,94	420,40
ΚΟΣΤΟΣ	Αρχ.	34910,00	35008,00	35301,00	35789,00	36718,00
F(€/h)	Τελ.	34910,00	34362,50	34009,99	33852,49	34317,91
ΧΡΟΝΟΣ	sec	3,97	3,72	3,83	3,79	3,64

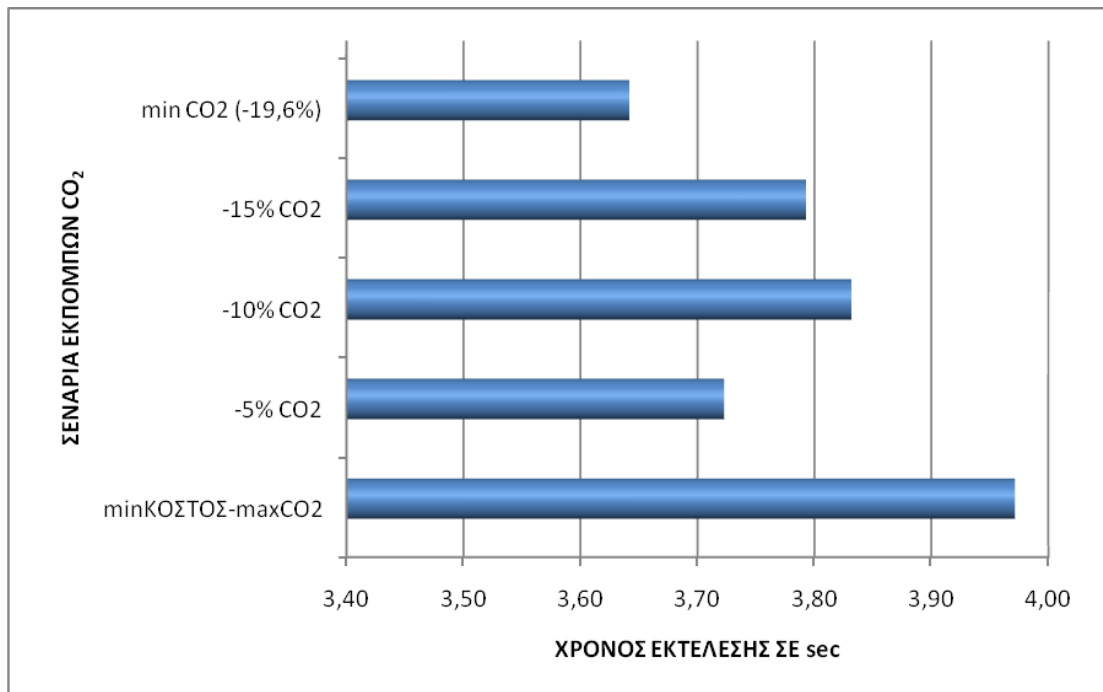
Πίνακας 9.21: Αποτελέσματα Εφαρμογής 5

Ως αρχικό θεωρείται το κόστος που προκύπτει χωρίς την πώληση δικαιωμάτων εκπομπών CO₂ ενώ η ως τελικό κόστος θεωρείται το κόστος μετά την πώληση των δικαιωμάτων σε τρίτους. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται γραφικά πως μεταβάλλεται το κόστος για τις διάφορες περιπτώσεις.



Σχήμα 9.15: Σύγκριση κόστους για τα διάφορα σενάρια περιορισμού του CO₂

Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε τη μεταβολή του χρόνου εκτέλεσης για τις διάφορες περιπτώσεις.



Σχήμα 9.16: Χρόνος εκτέλεσης για τις διάφορες περιπτώσεις.

Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις

- Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι κατά την ελαχιστοποίηση του CO₂ αυξάνεται το κόστος λειτουργίας, γεγονός αναμενόμενο, ενώ το ποσοστό μείωσης του CO₂ σε σχέση με τις εκπομπές κατά την βελτιστοποίηση μόνο του κόστους είναι 19,6%.
- Επίσης παρατηρούμε ότι όταν μειώνουμε τις εκπομπές του CO₂ κατά συγκεκριμένα ποσοστά τότε το συνολικό κόστος μειώνεται αφού τα ποσοστά μείωσης τα πουλάμε σε τρίτους στα πλαίσια της εμπορίας δικαιωμάτων ρύπων.
- Με βάση τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η πιο συμφέρουσα κίνηση είναι η μείωση των ρύπων κατά 15% με ταυτόχρονη πώληση των δικαιωμάτων σε τρίτους. Έτσι επιτυγχάνεται το βέλτιστο κόστος λειτουργίας (**33852,49 €/h**) που είναι μικρότερο κατά 3% του αντίστοιχου βέλτιστου κόστους χωρίς πωλήσεις CO₂. Παράλληλα με την κίνηση αυτή μειώνουμε από την πλευρά μας τις εκπομπές ρύπων.
- Τέλος οι χρόνοι εκτέλεσης κυμαίνονται στο διάστημα των 3-4 δευτερολέπτων, δηλαδή σε αρκετά ικανοποιητικό επίπεδο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

ΕΠΙΛΟΓΟΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Βασικές προϋποθέσεις για την καλή και αξιόπιστη λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) είναι να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε και οποιαδήποτε στιγμή υπάρχει ζήτηση, με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις.

Για την εξασφάλιση της σωστής σχεδίασης, καθώς της καλής και αξιόπιστης λειτουργίας των ΣΗΕ, είναι απαραίτητο να εκπονούνται από λίγο ως πολύ εξειδικευμένες μελέτες. Ένα είδος μελετών ανάλυσης των ΣΗΕ είναι οι μελέτες μόνιμης κατάστασης, οι οποίες περιλαμβάνουν την ανάλυση ροών φορτίου και την οικονομική κατανομή φορτίου.

Με τον όρο ανάλυση ροών φορτίου εννοούμε τον υπολογισμό των τάσεων, ρευμάτων και των ροών ενεργού και άεργου ισχύος στα διάφορα σημεία ενός ΣΗΕ κάτω από πραγματικές ή υποτιθέμενες συνθήκες φόρτισης και λειτουργίας. Οι μελέτες αυτές είναι αναγκαίες τόσο κατά τη διάρκεια της καθημερινής λειτουργίας, όσο και για μελέτες μελλοντικής επέκτασης και ανάπτυξης του συστήματος. Η ανάλυση των ροών φορτίου χρειάζεται επίσης για να προσδιοριστούν οι επιπτώσεις από τις διασυνδέσεις με άλλα συστήματα, την εισαγωγή νέων φορτίων, την εγκατάσταση νέων μονάδων παραγωγής, την κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς, κλπ. Στις μέρες μας, έχουν αναπτυχθεί αρκετές ψηφιακές μέθοδοι επίλυσης των ροών φορτίου με ικανοποιητική ακρίβεια για μεγάλα συστήματα με εκατοντάδες ζυγούς και απώλειες.

Όσον αφορά, τώρα, το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου, αυτό αναφέρεται στη βελτιστοποίηση της κατανομής του συνολικού φορτίου του συστήματος ανάμεσα στις μονάδες παραγωγής. Η ενεργός και άεργος παραγωγή των γεννητριών του συστήματος καθορίζεται, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται το ελάχιστο συνολικό κόστος λειτουργίας λαμβάνοντας υπόψη τους τεχνικούς περιορισμούς του συστήματος. Οι περιορισμοί αυτοί περιλαμβάνουν τα θερμικά όρια των γραμμών μεταφοράς, τα επιθυμητά όρια τάσεων των υποσταθμών, τα όρια ενεργού και άεργου παραγωγής των μονάδων, κ.ά. Στην ελαχιστοποίηση του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας σημαντικό ρόλο παίζουν οι εξής παράγοντες:

- η λειτουργική απόδοση των μονάδων
- το κόστος καυσίμου και
- οι απώλειες του δικτύου μεταφοράς

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής εξετάζεται τόσο η βέλτιστη ροή φορτίου όσο και η οικονομική κατανομή φορτίου. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι η διπλωματική εργασία χωρίζεται σε δύο μέρη.

Πρώτο Μέρος

Στο πρώτο μέρος, διατυπώνεται το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου και παρέχεται το θεωρητικό υπόβαθρο αυτού. Η βέλτιστη ροή φορτίου είναι ένα πολύ μεγάλο και δύσκολο μαθηματικό πρόβλημα προγραμματισμού. Το γενικό πρόβλημα της Β.Ρ.Φ σχετίζεται με τον υπολογισμό των βέλτιστων τιμών των μεταβλητών ελέγχου, οι οποίες θα ελαχιστοποιούν τη γενική αντικειμενική συνάρτηση, ικανοποιώντας ταυτόχρονα κάποιους εξισωτικούς και ανισωτικούς περιορισμούς για την ασφαλή λειτουργία του συστήματος.

Στη συνέχεια εξετάζεται μια συγκεκριμένη αριθμητική εφαρμογή. Συγκεκριμένα μας δίνονται τα δεδομένα της περίπτωσης δικτύου 9 ζυγών με 3 γεννήτριες και 3 φορτία (case9 IEEE). Το πρόβλημα αυτό το λύνουμε με τη χρήση των γενετικών αλγορίθμων. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιούμε είναι το MatLab και ειδικότερα το G.A Toolbox, δηλαδή μια εργαλειοθήκη επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης με τη χρήση Γ.Α.

Τέλος, επιλύουμε το ίδιο πρόβλημα με την προσθήκη περιβαλλοντικών περιορισμών. Όπως έχουμε αναφέρει, κατά τη λειτουργία των γεννητριών εκλύονται καυσαέρια βλαβερά για το περιβάλλον. Έτσι, μιας δημιουργείται η ανάγκη περιορισμού αυτών των ρύπων. Αυτό το επιτυγχάνουμε με την προσθήκη περαιτέρω περιορισμών στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Τα αποτελέσματα μας είναι ενθαρρυντικά αφού παρατηρούμε ότι με μικρό σχετικά κόστος μπορούμε να παράγουμε, 'φιλική' προς το περιβάλλον, ενέργεια.

Μέρος Δεύτερο

Στο δεύτερο μέρος της διπλωματικής εργασίας ασχολούμαστε κυρίως με το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής. Συγκεκριμένα, θεωρούμε το πρόβλημα οικονομικής κατανομής σε μονάδες συμπαραγωγής θερμότητας-ηλεκτρισμού καθώς αποδεδειγμένα είναι πιο αποτελεσματικές μονάδες παραγωγής ισχύος, πιο οικονομικές και πιο φιλικές προς το περιβάλλον.

Έτσι, αφού διατυπώσουμε το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής σε Σ.Η.Θ προχωράμε στην εκτέλεση μια σειράς εφαρμογών, χρησιμοποιώντας πάντα τους γενετικούς αλγορίθμους. Επίσης, προθέτουμε στο πρόβλημα περιβαλλοντικούς περιορισμούς και επικεντρωνόμαστε στην εμπορία ρύπων. Συγκεκριμένα, στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας κάναμε την παραδοχή ότι μπορούμε να πουλάμε δικαιώματα ρύπων CO₂ σε τρίτους με στόχο την περαιτέρω μείωση κόστους. Πράγματι στην εφαρμογή 5 παρατηρούμε ότι, με κατάλληλο ποσοστό μείωσης των

ρύπων CO₂ και ταυτόχρονη πώληση αυτών, οδηγούμαστε σε ακόμη καλύτερα αποτελέσματα και από την περίπτωση βελτιστοποίησης του κόστους.

Μέσα από τις εφαρμογές αυτές ελέγχουμε την αποτελεσματικότητα των γενετικών αλγορίθμων.

Αποτελεσματικότητα Γ.Α

Όπως είπαμε παραπάνω, αλλά και όπως φαίνεται από όλη την διπλωματική εργασία, οι Γ.Α είναι σε θέση να ανταπεξέλθουν με επιτυχία στην επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης, και έτσι καθίστανται ένα αποτελεσματικό εργαλείο για εφαρμογές πάνω σε Σ.Η.Ε.

Σε πολλές από τις εφαρμογές που έχουμε εκτελέσει στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας, τα αποτελέσματα των Γ.Α συγκρίνονται με αυτά άλλων μεθόδων. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, εάν όχι σε όλες, με τους Γ.Α οδηγούμαστε σε καλύτερα αποτελέσματα. Χαρακτηριστικά αναφέρω ότι, οι Γ.Α συγκρινόμενοι με μεθόδους όπως η *fmincon*, η *S.L.P* και η *Harmony Search* δίνουν ίδια ή και καλύτερα αποτελέσματα τουλάχιστον κατά 1%, ποσοστό που ίσως να φαίνεται μικρό αλλά αν αναλογιστούμε την τάξη μεγέθους των χρημάτων αλλά και ότι όλα τα αποτελέσματα είναι σε ωριαία βάση τότε το ποσοστό αυτό αποκτά ιδιαίτερη σημασία.

Από την άλλη μεριά, οι Γ.Α αλγόριθμοι υστερούν στον χρόνο εκτέλεσης. Στις εφαρμογές μας, ακόμα και στις πιο απλές, ο χρόνος αυτός παρόλο που δεν είναι απαγορευτικός, σε καμιά περίπτωση δε συγκρίνεται με αυτόν της *fmincon*.

Τέλος, θα ήθελα να αναφέρω ένα πλεονέκτημα μεταξύ των πολλών των Γ.Α (βλέπε παράγραφο 4.4), το οποίο θεωρώ πολύ σημαντικό. Αυτό είναι ότι οι Γ.Α είναι σε θέση να λύσουν προβλήματα στα οποία, τόσο οι μαθηματικές συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται όσο και οι περιορισμοί του προβλήματος, παίρνουν οποιαδήποτε μορφή και δεν περιορίζονται από αυστηρές απαιτήσεις, όπως π.χ. η γραμμικότητα, η κυρτότητα, η συνέχεια κτλ. Οι Γ.Α, δηλαδή, είναι σε θέση να λύνουν πολύπλοκα προβλήματα χωρίς να είναι απαραίτητη η γνώση μαθηματικών υψηλού επιπέδου.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΚΩΔΙΚΑΣ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΤΟΥ MATLAB [6]

```
function [x,fval,exitFlag,output,population,scores] = ga(fun,nvars,Aineq,  
                                                    ,bineq,Aeq,beq  
                                                    lb,ub,nonlcon,options)  
  
%Ο γενετικός αλγόριθμος λύνει προβλήματα της μορφής:  
  
min F(X)   subject to:  A*X   <= B, Aeq*X   = Beq           (γραμμικοί περιορισμοί)  
    X                C(X) <= 0, Ceq(X) = 0           (μη γραμμικοί περιορισμοί)  
                    LB <= X <= ub  
  
%  
  
%δήλωση προεπιλεγμένων ρυθμίσεων του αλγορίθμου%  
  
defaultopt = struct('PopulationType', 'doubleVector', ...  
    'PopInitRange', [0;1], ...  
    'PopulationSize', 20, ...  
    'EliteCount', 2, ...  
    'CrossoverFraction', 0.8, ...  
    'MigrationDirection','forward', ...  
    'MigrationInterval',20, ...  
    'MigrationFraction',0.2, ...  
    'Generations', 100, ...  
    'TimeLimit', inf, ...  
    'FitnessLimit', -inf, ...  
    'StallGenLimit', 50, ...  
    'StallTimeLimit', inf, ...  
    'TolFun', 1e-6, ...  
    'TolCon', 1e-6, ...  
    'InitialPopulation',[], ...  
    'InitialScores', [], ...  
    'InitialPenalty', 10, ...  
    'PenaltyFactor', 100, ...  
    'PlotInterval',1, ...  
    'CreationFcn',@gacreationuniform, ...  
    'FitnessScalingFcn', @fitscalingrank, ...  
    'SelectionFcn', @selectionstochunif, ...  
    'CrossoverFcn',@crossoversscattered, ...  
    'MutationFcn',{@mutationgaussian 1 1}, ...  
    'HybridFcn',[], ...  
    'Display', 'final', ...  
    'PlotFcns', [], ...  
    'OutputFcns', [], ...  
    'Vectorized','off', ...  
    'UseParallel', 'never');  
  
%έλεγχος αριθμού ορισμάτων εισόδου%  
  
errmsg = nargchk(1,10,nargin);  
if ~isempty(errmsg)  
    error('gads:ga:numberOfInputs',  
        [errmsg, ' GA requires at least 1 input argument.']);  
end
```

```

%σε περίπτωση επιλογής προεπιλεγμένων ρυθμίσεων (default), πέρνα αυτές στο X%

if nargin == 1 && nargout <= 1 && isequal(fun,'defaults')
    x = defaultopt;
    return
end
if nargin < 10, options = [];
    if nargin < 9, nonlcon = [];
        if nargin < 8, ub = [];
            if nargin < 7, lb = [];
                if nargin < 6, beq = [];
                    if nargin < 5, Aeq = [];
                        if nargin < 4, bineq = [];
                            if nargin < 3, Aineq = [];
                                end
                            end
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end
end
end
end
end

% έλεγχος δομής 3ου ορίσματος%

if nargin == 3 && isstruct(Aineq)
    options = Aineq; Aineq = [];
end

if nargin == 1
    if isa(fun,'struct')
        [fun,nvars,Aineq,bineq,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon,rngstate,options] =
separateOptimStruct(fun);
        % επαναφορά γεννήτριας παραγωγής τυχαίων αριθμών%
        resetDfltRng(rngstate);
    else % απλή είσοδος μη κατάλληλης δομής%
        error('gads:ga:invalidStructInput','The input should be a structure with
valid fields or provide at least two arguments to GA.' );
    end
end

% Εάν η fun είναι ένας πίνακας κελιών με επιπλέον ορίσματα πάρε τον έλεγχο της
συνάρτησης %

if iscell(fun)
    FitnessFcn = fun{1};
else
    FitnessFcn = fun;
end

% Έλεγχος συναρτήσεων που είναι ικανές να είναι η FitnessFcn%

if isempty(FitnessFcn) || ~(isa(FitnessFcn,'inline') ||
isa(FitnessFcn,'function_handle'))
    error('gads:ga:needFunctionHandle','Fitness function must be a function
handle.');
```

```

% Έλεγχος αριθμού μεταβλητών %
valid = isnumeric(nvars) && isscalar(nvars)&& (nvars > 0) ...
    && (nvars == floor(nvars));
if ~valid
    error('gads:ga:invalidNvars','Number of variables (NVARs) must be a
positive integer.');
```

```

end
user_options = options;
% Χρησιμοποίησε τις default επιλογές εάν οι αρχικές είναι άδειες%
if ~isempty(options) && ~isa(options,'struct')
    error('gads:ga:optionsNotAstruct','Tenth input argument must be a valid
structure created with GAOPTIMSET.');
```

```

elseif isempty(options)
    options = defaultopt;
end
% επιλογή default τιμών για μη ορισμένες παραμέτρους %
options = gaoptimset(defaultopt,options)

% Όλες οι είσοδοι πρέπει να είναι τύπου double%

try
    dataType = superiorfloat(nvars,Aineq,bineq,Aeq,beq,lb,ub);
    if ~isequal('double', dataType)
        error('gads:ga:dataType', ...
            'GA only accepts inputs of data type double.')
```

```

    end
catch
    error('gads:ga:dataType', ...
        'GA only accepts inputs of data type double.')
```

```

end

[x,fval,exitFlag,output,population,scores,FitnessFcn,nvars,Aineq,bineq,Aeq,beq,l
b,ub,NonconFcn,options,Iterate,type] =
gacommon(nvars,fun,Aineq,bineq,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon,options,user_options);

if exitFlag < 0
    return;
end

% κλήση καταλλήλου επιλυτή προβλημάτων βελτιστοποίησης%

switch (output.problemtype)
    case 'unconstrained'
        [x,fval,exitFlag,output,population,scores] = gaunc(FitnessFcn,nvars, ...
            options,output,Iterate);

    case {'boundconstraints', 'linearconstraints'}
        [x,fval,exitFlag,output,population,scores] = galincon(FitnessFcn,nvars,
...Aineq,bineq,Aeq,beq,lb,ub,options,output,Iterate);

    case 'nonlinearconstr'
        [x,fval,exitFlag,output,population,scores] = gacon(FitnessFcn,nvars, ...
            Aineq,bineq,Aeq,beq,lb,ub,NonconFcn,options,output,Iterate,type);
end

```

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, “ **Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας**”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα 2001
- [2] Κ. Παπαδιάς, “**Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας – Μόνιμη κατάσταση Λειτουργίας (Τόμος 1)**”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα 1985
- [3] Κ. Παπαδιάς, Γ. Κονταξής, “ **Ηλεκτρική Οικονομία**”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα 2003
- [4] James A. Momoh, “**Electric Power System Applications of Optimization**”, Marcel Dekker Inc, New York 2001
- [5] Π.Σ.Α. Γεωργιλάκης, “**Εφαρμογή Γενετικών Αλγορίθμων στην Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας**”, Τεχν. Χρον. Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ, τεύχος 1-2 2004
- [6] MATLAB, “**Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox™ User’s Guide**”, The MathWorks, Inc., Η.Π.Α 2008
- [7] Εμμανουέλα Π. Μαριδάκη, “**Επίλυση Βέλτιστης Ροής Φορτίου σε Σ.Η.Ε υπό τον Περιορισμό των Εκπομπών NOx με την Τεχνική του Διαδοχικού Γραμμικού Προγραμματισμού**”, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα Οκτώβριος 2008.
- [8] Ελευθέριος Σ. Ψαρρόπουλος, “**Σχεδίαση και προσομοίωση κεραιών ESPAR και W-ESPAR με τη χρήση του λογισμικού πακέτου MatLab. Βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών των κεραιών αυτών με τη βοήθεια των γενετικών αλγορίθμων.**” , Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα Ιούλιος 2006.
- [9] R.Petrovic, B. Kralj, “**Economic and Environmental Power Dispatch**”, European Journal of Operational Research, issue 2-11, North-Holland, June 1992.
- [10] ΥΠΕΧΩΔΕ, “**Εθνικό Σχέδιο Κατανομής Δικαιωμάτων Εκπομπών**”, Αθήνα, Απρίλιος 2008.
- [11] WWF Ελλάς, “**Αύσεις για την Κλιματική Αλλαγή: Όραμα Βιωσιμότητας για την Ελλάδα του 2050** ”, Επιστημονική Έκθεση του WWF Ελλάς, Αθήνα Οκτώβριος 2008
- [12] A.Vasebi, M. Fasanghary, S.M.T. Bathaee, “**Combined Heat and Power Economic Dispatch by Harmony Search Algorithm**”, Int J Electrical Power Energy systems 2007;29:713-719

- [13] P.Subbaraj, R.Rengaraj, S.Salivahanan, **“Enhancement of Combined Heat and Power Economic Dispatch using Self-Adaptive Real-Coded Genetic Algorithm”**. Elsevier Applied Energy 2009;86:915-921.
- [14] Εργαστήριο Μεταφοράς Θερμότητας και Μηχανικής Περιβάλλοντος Α.Π.Θ., **“Συμπαραγωγή Θερμότητας-Ηλεκτρισμού”**, Κεφάλαιο 7, 2009.
- [15] Χ.Α. Φραγκόπουλος, Η.Π. Καρυδογιάννης, Γ.Κ. Καραλής, **“ Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας”**, ΕΛΚΕΠΑ, Νοέμβριος 2004.
- [16] **“Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού Θερμότητας”**, 19/11/2008.
<http://www.qualitynet.gr>,
- [17] Ι. Ψαρράς, Κ. Πατλιτζιάνας, **“Διαχείριση Ενέργειας και Περιβαλλοντική Πολιτική”** , ΕΜΠ, Αθήνα 2005
- [18] Γ. Κονταξής, Ν. Χατζηαργυρίου, **“Κέντρα Ελέγχου Ενέργειας”**, ΕΜΠ, Αθήνα 2000
- [19] B.Marti, **“Emissions of Power Delivery Systems”**. Semester thesis, Power Systems Laboratory, ETH Zurich, 2005
- [20] Anke Herold, **“Comparison of CO2 emission factors for fuels used in greenhouse gas inventories and consequences for monitoring and reporting under the EC emissions trading scheme”**, ETC/ACC Technical paper 2003/10, July 2003
- [21] Δ.Ε.Η. ,**“Ο Ρόλος του Άνθρακα στη Στρατηγική Παραγωγής της ΔΕΗ”**
- [22] **“Λιγνίτης και φυσικό αέριο στην ηλεκτροπαραγωγή της χώρας”**, ΤΕΕ, Αθήνα, 9-10 Ιουνίου, 2005