



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΣΤΑΘΜΩΝ ΤΑΧΕΙΑΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ  
ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ  
ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΚΑΙ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σωτήριος Γ. Θανόπουλος

**Επιβλέπων :** Χατζηαργυρίου Νικόλαος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Απρίλιος 2014





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΣΤΑΘΜΩΝ ΤΑΧΕΙΑΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ  
ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ  
ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΚΑΙ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Σωτήριος Γ. Θανόπουλος

**Επιβλέπων :** Χατζηαργυρίου Νικόλαος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 15<sup>η</sup> Απριλίου 2014

.....

Χατζηαργυρίου Νικόλαος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Παπαθανασίου Σταύρος

Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Γεωργιάκης Παύλος

Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Απρίλιος 2014

.....  
Σωτήριος Γ. Θανόπουλος

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

Copyright © Σωτήριος Θανόπουλος, 2014

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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



*Αυτή την εργασία την αφιερώνω στη Θένια που με  
τόση υπομονή με στήριξε αυτούς τους μήνες.....*

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στις μέρες μας ο πληθυσμός των ηλεκτρικών οχημάτων παρουσιάζει ραγδαία αύξηση παγκοσμίως, κυρίως λόγω της φιλικότητάς τους προς το περιβάλλον και του χαμηλότερου κόστους καθημερινής χρήσης σε σχέση με τα οχήματα που λειτουργούν με συμβατικά καύσιμα. Ωστόσο, υπάρχει η ανάγκη δημιουργίας των κατάλληλων υποδομών φόρτισης έτσι ώστε να επιτευχθεί η αυξανόμενη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στην παγκόσμια αγορά. Επομένως, η κατάλληλη τοποθέτηση των Σταθμών Ταχείας Φόρτισης (ΣΤΦ) ηλεκτρικών οχημάτων και των Μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής (ΜΔΠ) σε ένα δίκτυο διανομής, είναι υψίστης σημασίας προκειμένου να μεγιστοποιηθούν τα οφέλη που προκύπτουν από την ένταξή τους στο δίκτυο.

Σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί αρχικά, η εύρεση της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης των Μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής και στη συνέχεια της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης των Σταθμών Ταχείας Φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σε ένα δίκτυο διανομής με βάση τεχνικά κριτήρια. Η εύρεση αυτών των βέλτιστων θέσεων, επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης του Γενετικού Αλγορίθμου (ΓΑ) σε συνδυασμό με τη Ροή Φορτίου (ΡΦ) και τη Βέλτιστη Ροή Φορτίου (ΒΡΦ). Πιο συγκεκριμένα, μέσω της βέλτιστης τοποθέτησης των Σταθμών Ταχείας Φόρτισης στο δίκτυο επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος και η βελτίωση του προφίλ τάσης.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, υλοποιήθηκε αλγόριθμος σε περιβάλλον MATLAB, που επιλύει τα εν λόγω προβλήματα χρησιμοποιώντας και κάποια στοιχεία από το λογισμικό πακέτο MATPOWER το οποίο είναι λογισμικό σε MATLAB και υπολογίζει Ροές Φορτίου και Βέλτιστες Ροές Φορτίου.

Στο Κεφάλαιο 1 αυτής της εργασίας γίνεται αναφορά στη Διεσπαρμένη Παραγωγή (ΔΠ), παρουσιάζοντας τα βασικότερα είδη διεσπαρμένων πηγών, τις χρήσεις, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Ακόμα, γίνεται μια εισαγωγή στα ηλεκτρικά οχήματα και τους σταθμούς φόρτισης, παρουσιάζονται οι τεχνολογίες των ηλεκτρικών οχημάτων, οι κατηγορίες και τα επίπεδα φόρτισής τους και παραθέτονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της διείσδυσής τους στην παγκόσμια αγορά. Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφεται ο Γενετικός Αλγόριθμος και παρουσιάζονται τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται. Στο Κεφάλαιο 3 αναλύεται το πρόβλημα της Ροής Φορτίου και της Βέλτιστης Ροής Φορτίου και ακόμα παρουσιάζεται το λογισμικό MATPOWER που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση αυτών των δύο ροών. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η διατύπωση των προβλημάτων, ενώ στο Κεφάλαιο 5 παραθέτονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που υλοποιήθηκαν για την βέλτιστη εγκατάσταση των Μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής και των Σταθμών Ταχείας Φόρτισης. Ακόμα, στο ίδιο κεφάλαιο μελετάται και η ανάλυση ευαισθησίας του αλγορίθμου. Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτή την ανάλυση.

## **ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ**

Διεσπαρμένη Παραγωγή (ΔΠ), δίκτυο διανομής, ηλεκτρικά οχήματα, Βέλτιστη Ροή Φορτίου (ΒΡΦ), Ροή Φορτίου (ΡΦ), Γενετικός Αλγόριθμος (ΓΑ), Σταθμοί Ταχείας Φόρτισης (ΣΤΦ), απώλειες ενεργού ισχύος, προφίλ τάσης, συντελεστές βαρύτητας, χωρητικότητα σταθμών.





## **ABSTRACT**

Nowadays the population of electric vehicles has been increasing rapidly worldwide, mainly because of their friendliness to the environment and their lower cost of daily use compared to vehicles which use conventional fuels. However, there is a need to create the appropriate charging infrastructures in order to achieve increased penetration of electric vehicles. Therefore, the optimal placement of Fast Charging Stations (FCS) and of Distributed Generation Units (DGU) in a distribution grid, is crucial in order to maximize the benefits derived from their joining the grid.

The aim of the present thesis is initially to find the optimal location of Distributed Generation Units and then the optimal location of Fast Charging Stations in a distribution grid, based on technical criteria. Finding these optimal locations, is being achieved by utilizing the Genetic Algorithm (GA) in conjunction with Power Flow (PF) and Optimal Power Flow (OPF). More precisely, this thesis through optimal placement of charging stations in the grid seeks to minimize the active power losses and improve the voltage profile.

As part of this diploma thesis, an algorithm in MATLAB environment was implemented in order to solve these problems, by using some features of the MATPOWER suite which is a software in MATLAB and it calculates Power Flows and Optimal Power Flows.

Chapter 1 of this thesis refers to Distributed Generation (DG), by presenting an overview of the main types of distributed resources, their use, their advantages and disadvantages. In addition, this chapter gives an introduction to electric vehicles and charging stations, presents the technologies of electric vehicles, the categories and levels of charging and lists the advantages and disadvantages of their penetration in the global market. Chapter 2 describes the Genetic Algorithm and presents the main parts of which it is composed. Chapter 3 analyzes the problem of Power Flow and Optimal Power Flow and even presents the MATPOWER suite which was used to perform these two flows. Chapter 4 presents the formulation of these problems, while Chapter 5 lists the results of simulations carried out for the optimal placement of Distributed Generation Units and Fast Charging Stations. Furthermore, the same chapter performs a sensitivity analysis of the algorithm. Finally, Chapter 6 summarizes the main conclusions drawn from this analysis.

## **KEYWORDS**

Distributed Generation (DG), distribution grid, electric vehicles, Optimal Power Flow (OPF), Power Flow (PF), Genetic algorithm (GA), Fast Charging Stations (FCS), active power losses, voltage profiles, weighting factors, capacity of stations.



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας δράττομαι της ευκαιρίας να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή του ΕΜΠ κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου για την ευκαιρία που μου έδωσε μέσα από την ανάθεσή της, να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Επίσης, θα επιθυμούσα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Ευάγγελο Καρφόπουλο, για το άριστο κλίμα συνεργασίας κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας, τις συμβουλές, τις υποδείξεις και τις καίριες επισημάνσεις του.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου που με στήριξαν και με ενθάρρυναν όλα αυτά τα χρόνια της φοιτητικής μου προσπάθειας, καθώς και τους φίλους μου που στάθηκαν δίπλα μου όλες αυτές τις στιγμές.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>1</b>
1.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.2	ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ.....	2
1.2.1	Παρουσίαση τεχνολογιών Διεσπαρμένης Παραγωγής.....	4
1.2.2	Πλεονεκτήματα Διεσπαρμένης Παραγωγής.....	12
1.2.3	Μειονεκτήματα Διεσπαρμένης Παραγωγής.....	13
1.3	ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΦΟΡΤΙΣΗΣ.....	14
1.3.1	Τεχνολογίες ηλεκτρικών οχημάτων.....	15
1.3.2	Κατηγορίες και επίπεδα φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων.....	18
1.3.3	Πλεονεκτήματα ηλεκτρικών οχημάτων.....	21
1.3.4	Μειονεκτήματα ηλεκτρικών οχημάτων.....	22
.....		
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b>	<b>ΔΥΑΔΙΚΟΣ ΓΕΝΕΤΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ.....</b>	<b>25</b>
2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	25
2.2	ΒΑΣΙΚΑ ΜΕΡΗ ΤΟΥ ΔΥΑΔΙΚΟΥ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ.....	25
2.2.1	Επιλογή των μεταβλητών σχεδίασης της αντικειμενικής συνάρτησης.....	27
2.2.2	Αποκωδικοποίηση των μεταβλητών σχεδίασης των χρωμοσωμάτων.....	28
2.2.3	Πληθυσμός.....	29
2.2.4	Επιλογή των χρωμοσωμάτων που θα παραμείνουν για διασταύρωση....	30
2.2.5	Μέθοδος επιλογής γονέων.....	31
2.2.6	Διασταύρωση.....	33
2.2.7	Μετάλλαξη.....	34
2.2.8	Επόμενες γενιές.....	36
2.2.9	Σύγκλιση Γενετικού Αλγορίθμου.....	38
.....		
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</b>	<b>ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΚΑΙ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ MATPOWER.....</b>	<b>41</b>
3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	41
3.2	ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	41
3.2.1	Ροή Φορτίου AC.....	42
3.2.2	Ροή Φορτίου DC.....	43
3.3	ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ (ΒΡΦ).....	44
3.3.1	Μαθηματική περιγραφή του προβλήματος της ΒΡΦ .....	44
3.3.2	Μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος της ΒΡΦ.....	46
.....		

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΣΤΑΘΜΩΝ ΤΑΧΕΙΑΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΜΕ ΓΕΝΕΤΙΚΟ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ ΚΑΙ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ.....57**

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	57
4.2 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	58
4.2.1 Ορισμός αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος.....	58
4.2.2 Επίλυση του προβλήματος για βέλτιστη τοποθέτηση ΜΔΠ.....	60
4.2.3 Επίλυση του προβλήματος για βέλτιστη τοποθέτηση Σταθμών Ταχείας Φόρτισης.....	62
.....	.....

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ.....71**

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	71
5.2 ΔΙΚΤΥΟ 69 ΖΥΓΩΝ.....	71
5.2.1 Δεδομένα δικτύου 69 ζυγών.....	71
5.2.2 Μορφή αντικειμενικής συνάρτησης για το δίκτυο των 69 ζυγών.....	74
5.2.3 Διερεύνηση επίδρασης παραμέτρων Γενετικού Αλγορίθμου στα αποτελέσματα για το δίκτυο των 69 ζυγών.....	77
5.2.4 Διερεύνηση επίδρασης των διάφορων solvers του MATPOWER στα αποτελέσματα για το δίκτυο των 69 ζυγών.....	85
5.3 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ 69 ΖΥΓΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΕΧΝΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ .....	87
5.3.1 Τοποθέτηση δύο ΜΔΠ στο δίκτυο των 69 ζυγών.....	87
5.3.2 Τοποθέτηση τριών ΜΔΠ στο δίκτυο των 69 ζυγών.....	88
5.3.3 Τοποθέτηση τεσσάρων ΜΔΠ στο δίκτυο των 69 ζυγών.....	89
5.4 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΣΤΑΘΜΩΝ ΤΑΧΕΙΑΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ 69 ΖΥΓΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΕΧΝΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ.....	91
.....	.....

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....103**

6.1 ΣΥΝΟΨΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	103
6.1.1 Βέλτιστη διαστασιολόγηση Μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής.....	103
6.1.2 Βέλτιστη τοποθέτηση Σταθμών Ταχείας Φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων.....	104
.....	.....

**Βιβλιογραφία.....111**







# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

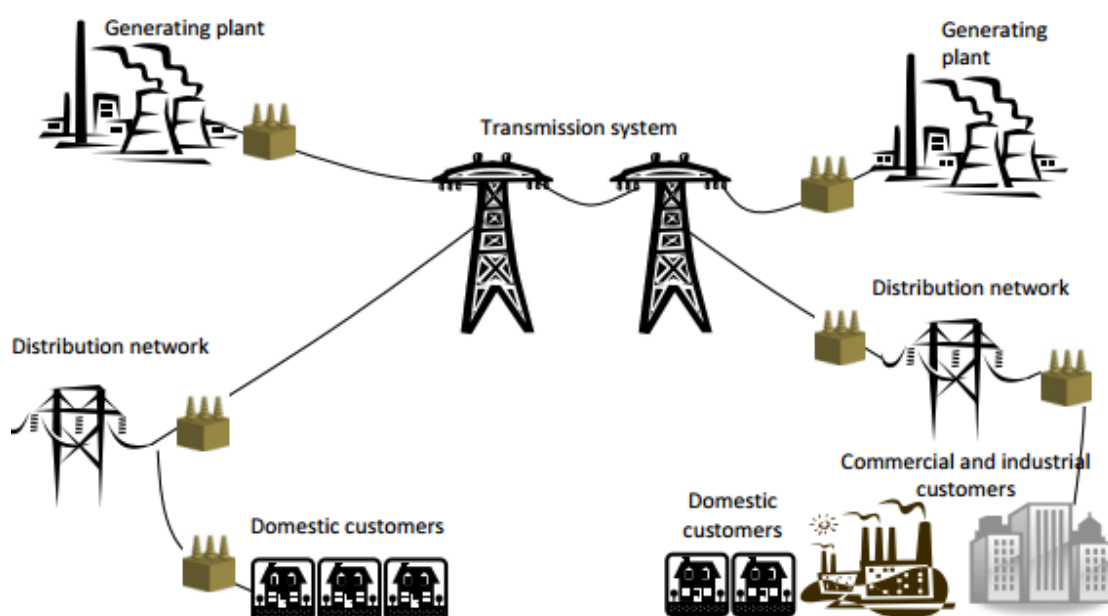
## **1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί μια μορφή ενέργειας, που συνδέεται με την ύπαρξη και την κίνηση ηλεκτρικών φορτίων. Θεωρείται μια πολύ χρήσιμη μορφή ενέργειας, καθώς μπορεί αποδοτικά και εύκολα να μετατραπεί σε άλλες μορφές. Τα τελευταία χρόνια έχει προστεθεί στη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας, ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα που είναι η σχετικά εύκολη μετατροπή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως είναι η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, σε ηλεκτρική με τη χρήση ανεμογεννητριών ή φωτοβολταϊκών στοιχείων αντίστοιχα. Λόγω των πλεονεκτημάτων της, παρατηρείται μια συνεχώς αυξανόμενη χρήση της για την κάλυψη των αναγκών της ανθρώπινης κοινωνίας και κυρίως των αστικών αναγκών. Στην Ελλάδα η ηλεκτρική ενέργεια καλύπτει σήμερα το 20% των συνολικών αναγκών σε τελική κατανάλωση, ενώ πριν 30 χρόνια το ποσοστό αυτό υπολογιζόταν στο 15%. Αποκορύφωμα της αυξανόμενης διείσδυσης της ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί η αύξηση των πωλήσεων που παρατηρείται στα ηλεκτρικά οχήματα τα τελευταία χρόνια, καθώς και ο συνεχώς αυξανόμενος αριθμός εγκατάστασης σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων στα μεγάλα αστικά κέντρα.

Ως σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) αποκαλείται το σύνολο των μέσων και των εγκαταστάσεων (μετασχηματιστές, γεννήτριες, γραμμές μεταφοράς) που ο συνδυασμός τους χρησιμοποιείται για να τροφοδοτηθεί με ηλεκτρική ενέργεια μια περιοχή κατανάλωσης. Τα πρώτα ΣΗΕ παρουσιάστηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1870 και χρησιμοποιήθηκαν από τον G. Lane-Fox και τον Thomas Edison, ώστε να μεταφερθεί για πρώτη φορά ηλεκτρική ενέργεια σε κάποιους πελάτες για τον φωτισμό τους. Το ηλεκτρικό ρεύμα που χρησιμοποιήθηκε από τα πρώτα αυτά ΣΗΕ ήταν συνεχές (ΣΡ) , χαμηλής τάσης και οι πρώτοι κεντρικοί σταθμοί τροφοδοτούσαν περιορισμένες περιοχές, καθώς το συνεχές ρεύμα δεν μπορούσε να μεταφερθεί αποδοτικά σε μεγάλη απόσταση. Στις αρχές της δεκαετίας του 1880 πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή του εναλλασσομένου ρεύματος (ΕΡ) στα ΣΗΕ, καθώς παράλληλα αναπτύχθηκε και η γεννήτρια εναλλασσομένου ρεύματος και ο μετασχηματιστής. Για να θεωρείται πως ένα ΣΗΕ παρουσιάζει καλή λειτουργία, θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να τροφοδοτεί με ηλεκτρική ενέργεια οποιοδήποτε σημείο του δικτύου με το μικρότερο δυνατό κόστος και τις ελάχιστες αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, να διατηρεί τη τιμή της συχνότητας και της τάσης σταθερή, καθώς και η τροφοδότηση των καταναλωτών να παρουσιάζει υψηλή αξιοπιστία.

Κατά την τροφοδοσία των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια η λειτουργία του κάθε ΣΗΕ χωρίζεται σε τρία μέρη: την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή. Η παραγωγή πραγματοποιείται στους σταθμούς παραγωγής, κατά κύριο λόγο σε υδροηλεκτρικούς και θερμικούς σταθμούς. Η μεταφορά από τα εργοστάσια παραγωγής στα σημεία κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας, πραγματοποιείται με γραμμές υψηλής και υπερυψηλής τάσης. Αυτές οι γραμμές τροφοδοτούν με ηλεκτρική ενέργεια κεντρικά σημεία του δικτύου, που ονομάζονται υποσταθμοί και από εκεί και πέρα τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές, μέσω γραμμών χαμηλής τάσης 380/220V (στην Ευρώπη) και υποσταθμών διανομής.

Στις μέρες μας, τα ΣΗΕ που χρησιμοποιούνται είναι κυρίως τριφασικά, εναλλασσομένου ρεύματος και με συχνότητα 50 ή 60 Hz αλλά σε ειδικές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται και ΣΗΕ συνεχούς ρεύματος για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας. Όσον αφορά τις γραμμές μεταφοράς και τις γραμμές διανομής, εκείνες της μέσης τάσης αποτελούνται από τρεις αγωγούς, ενώ εκείνες της χαμηλής τάσης έχουν επιπροσθέτως και έναν ουδέτερο αγωγό. Γραμμές διανομής χαμηλής τάσης υπάρχουν και μονοφασικές, δύο αγωγών. Στα δίκτυα μέσης και υψηλής τάσης συνδέονται κατά κύριο λόγο βιομηχανικοί καταναλωτές (τριφασικές παροχές), ενώ στα δίκτυα χαμηλής τάσης είναι συνδεδεμένοι κυρίως οικιακοί καταναλωτές και το μεγαλύτερο κομμάτι των πελατών εμπορικής χρήσης (μονοφασικές παροχές). Στο παρακάτω Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται η μορφή ενός παραδοσιακού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, όπου φαίνεται το εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Generating plant), το σύστημα μεταφοράς (Transmission system), το δίκτυο διανομής (Distribution network), καθώς και οι οικιακοί (Domestic customers), εμπορικοί (Commercial customers) και βιομηχανικοί καταναλωτές (Industrial customers), που τροφοδοτούνται από το σύστημα αυτό.

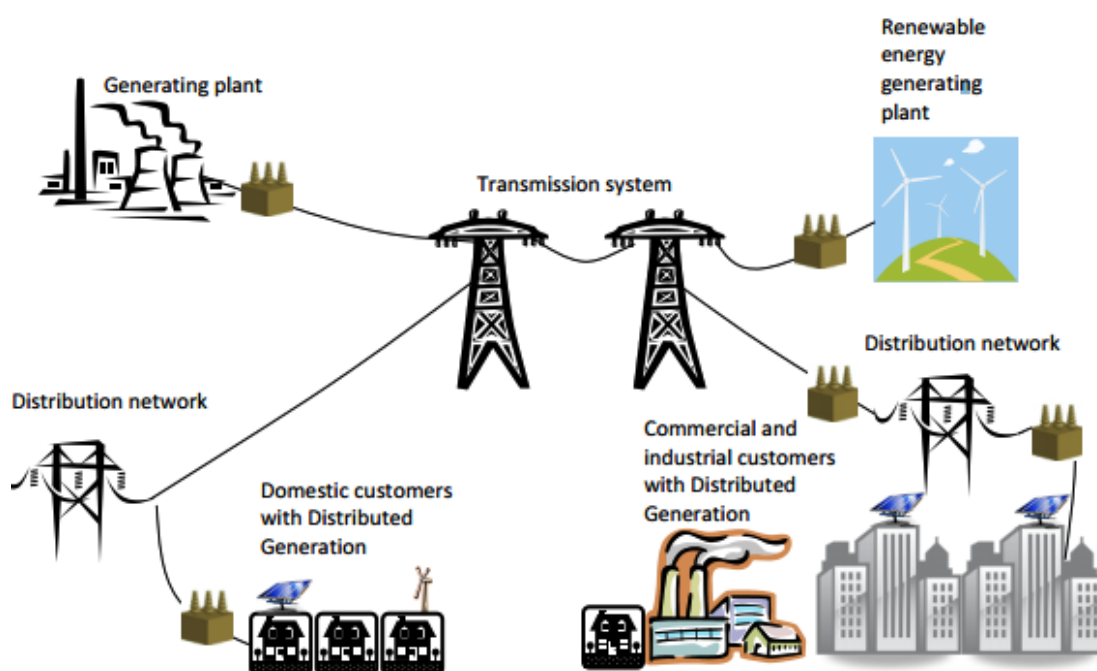


**Σχήμα 1.1:** Παραδοσιακό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας

## 1.2 ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

Η Διεσπαρμένη Παραγωγή (Distributed Generation – DG) και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) έχουν προσελκύσει πολύ μεγάλο ενδιαφέρον παγκοσμίως, τις τελευταίες δεκαετίες. Ως Διεσπαρμένη Παραγωγή (ΔΠ) αναφέρεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, σε μικρή σχετικά κλίμακα, από διάφορες μονάδες παραγωγής που είναι διεσπαρμένες κατά μήκος του δικτύου και συνδέονται με το σύστημα διανομής. Αυτές οι Μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής (ΜΔΠ) εγκαθίστανται αρκετά

κοντά στα σημεία κατανάλωσης (δηλαδή τα φορτία) με τιμές που κυμαίνονται κυρίως από 1kW έως και 100 MW και έτσι μεγάλο μέρος της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας των καταναλωτών, ικανοποιείται από αυτές. Η ανάπτυξη των ΜΔΠ, βασίζεται κατά κύριο λόγο σε οφέλη που προσφέρουν όσον αφορά οικονομικούς, περιβαλλοντικούς και τεχνικούς παράγοντες. Πιο συγκεκριμένα τα τελευταία χρόνια η εγκατάσταση ΜΔΠ παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον κυρίως λόγω των περιορισμών που υπάρχουν στην κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς, των αυξανόμενων απαιτήσεων για αξιόπιστη ενέργεια από τους καταναλωτές, καθώς και της προσπάθειας μείωσης των εκπομπών αερίων, όπως προβλέπει το πρωτόκολλο του Κιότο. Με τη διεύρυνση ΜΔΠ στο επίπεδο της διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας, τα δίκτυα διανομής δεν παρουσιάζουν πια μόνο παθητικό χαρακτήρα, τροφοδοτώντας τα φορτία, αλλά αποκτούν ενεργό ρόλο λόγω των ροών ισχύος και των τάσεων που η παραγωγή και τα φορτία καθορίζουν. Η διεσπαρμένη παραγωγή παρουσιάζει πλεονεκτήματα σε σχέση με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που βασίζεται σε μεγάλα εργοστάσια παραγωγής και σε γραμμές υψηλής τάσης μεγάλης έκτασης, καθώς αποτελεί μια πιο οικονομική και ταχύτερη λύση. Στο παρακάτω Σχήμα 1.2 παρουσιάζεται η μορφή ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας στο οποίο έχουν εγκατασταθεί ΜΠΔ σε διάφορα σημεία του. Παρατηρείται πως σε σχέση με το παραδοσιακό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας που παρουσιάστηκε παραπάνω, υπάρχει επιπλέον μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές (Renewable energy generating plant), και έχουν επίσης εγκατασταθεί ΜΔΠ στους οικιακούς, εμπορικούς και βιομηχανικούς καταναλωτές του συγκεκριμένου δικτύου.

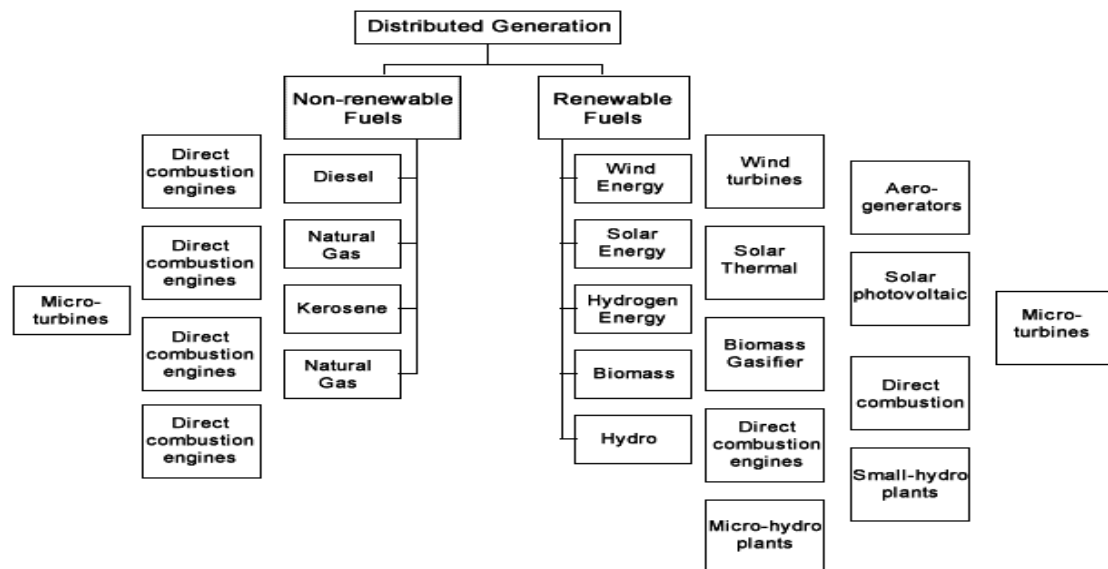


**Σχήμα 1.2:** Δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας με εγκατεστημένες ΜΔΠ

Πριν από την εγκατάσταση μιας ΜΔΠ στο δίκτυο διανομής θα πρέπει να αξιολογηθούν ξεχωριστά τα οφέλη που μπορεί να προσφέρει στο προφίλ της τάσης, στις απώλειες των γραμμών, στο ρεύμα βραχυκύκλωσης, καθώς και στην αξιοπιστία του συστήματος. Η επίτευξη βελτιώσεων στους παραπάνω τομείς, εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τη βέλτιστη τοποθέτηση αυτών των ΜΔΠ στο δίκτυο. Έρευνες έχουν δείξει πως περίπου το 13% της παραγόμενης ενέργειας, καταναλώνεται από τις απώλειες σε επίπεδο διανομής. Τα τελευταία χρόνια πολλές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί σχετικά με τον εντοπισμό των βέλτιστων θέσεων και του ιδανικότερου μεγέθους των ΜΔΠ, βασιζόμενες σε τεχνικούς και οικονομικούς παράγοντες. Στόχος αυτών των μελετών, είναι η επίτευξη της μέγιστης διείσδυσης ΜΔΠ σε ένα δίκτυο διανομής, πετυχαίνοντας παράλληλα το μικρότερο δυνατό κόστος και τον μη κορεσμό του δικτύου. Στην παρακάτω ενότητα θα πραγματοποιηθεί η παρουσίαση και η ανάλυση των τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής.

### 1.2.1 Παρουσίαση τεχνολογιών Διεσπαρμένης Παραγωγής

Οι τεχνολογίες ΔΠ (Distributed Energy Resources – DER) αποτελούνται κατά κύριο λόγο από συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας που εγκαθίστανται πολύ κοντά στον τελικό καταναλωτή και λειτουργούν κυρίως με συμβατικά καύσιμα. Περιλαμβάνουν ένα εκτενές φάσμα τεχνολογιών, όπως είναι οι αεροστρόβιλοι, οι μηχανές εσωτερικής καύσης, οι κυψέλες καυσίμου, οι μικροτουρμπίνες, οι εμβολοφόρες μηχανές, καθώς και οι περισσότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Στο παρακάτω Σχήμα 1.3 παρουσιάζονται οι κυριότερες ΜΔΠ, που διαχωρίζονται ανάλογα με το αν το καύσιμο που χρησιμοποιούν αποτελεί ανανεώσιμη ή μη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.



Σχήμα 1.3: Τεχνολογίες των ΜΔΠ για τα διάφορα είδη καυσίμων

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι πρακτικά ανεξάντλητες, δεν προκαλούν ρύπανση του περιβάλλοντος κατά την χρήση τους και η αξιοποίησή τους εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την ανάπτυξη χρηστικών και αποδεκτών οικονομικά τεχνολογιών. Οι πιο βασικές από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται ως ΜΔΠ είναι οι παρακάτω:

- Αιολική ενέργεια
- Ηλιακή ενέργεια
- Υδροηλεκτρική ενέργεια
- Βιοενέργεια (ενέργεια από βιομάζα)
- Γεωθερμική ενέργεια

Οι προαναφερθείσες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παρουσιάζονται παρακάτω συνοπτικά.

### Αιολική ενέργεια

Τη δεκαετία του 1940 ξεκίνησαν οι πρώτες προσπάθειες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της εκμετάλλευσης του ανέμου και η εξέλιξη των ανεμογεννητριών συνεχίζεται μέχρι και τις μέρες μας. Μέσω των ανεμογεννητριών η κινητική ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Σήμερα, χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο τριπτέρυγοι ανεμοκινητήρες που έχουν διάμετρο μέχρι 100 μέτρα, ύψος περίπου 130 μέτρα και ισχύ από 2 έως και 5 MW. Ο άνεμος αποτελεί μια πηγή ενέργειας που έχει τα πλεονεκτήματα ότι βρίσκεται σε αφθονία στη φύση και δεν προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, ούτε το μολύνει. Το βασικό μειονέκτημα αυτής της πηγής ενέργειας είναι το γεγονός πως ο άνεμος αποτελεί ένα μεταβλητό μέγεθος, με αποτέλεσμα για να υπάρξει βελτίωση της αξιοπιστίας της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται, θα πρέπει να συνδυαστεί με άλλες πηγές ενέργειας.

### Ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή ακτινοβολία είναι μια ενεργειακή πηγή που δεν στερεύει, για το λόγο αυτό η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί την πλέον αξιοποιήσιμη από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, κυρίως στον τομέα της ικανοποίησης των θερμικών αναγκών των καταναλωτών. Βασικά πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης μορφής ενέργειας αποτελούν το μηδαμινό κόστος, καθώς και η μη μόλυνση του περιβάλλοντος, ενώ μειονεκτήματά της αποτελούν η εξάρτησή της από τις καιρικές συνθήκες, το γεγονός πως είναι διαθέσιμη μόνο συγκεκριμένες ώρες της μέρας και η μικρή ένταση ανά μονάδα επιφάνειας που παρουσιάζει. Μια μορφή αξιοποίησής της πραγματοποιείται με την μετατροπή της σε θερμική ενέργεια, η οποία επιτυγχάνεται με χρήση ηλιακών συλλεκτών για την θέρμανση χώρου ή νερού σε επίπεδο καταναλωτών. Ακόμα, μέσω των ηλιακών κυττάρων, που η λειτουργία τους βασίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, πραγματοποιείται απευθείας μετατροπή της ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια.

### Υδροηλεκτρική ενέργεια

Η συγκεκριμένη μορφή ενέργειας βασίζεται στην εκμετάλλευση της μηχανικής ενέργειας του νερού των ποταμών και των λιμνών, καθώς και της μετατροπής της με τη χρήση ηλεκτρογεννητριών και στροβίλων σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι σημαντικότεροι

παράγοντες που καθορίζουν την ποσότητα του ηλεκτρισμού που παράγεται, είναι ο όγκος της ροής του νερού και η υψομετρική διαφορά ανάμεσα στον στρόβιλο και στην ελεύθερη επιφάνεια στη δεξαμενή αποθήκευσης, του νερού. Για αυτούς τους λόγους, τα υδροηλεκτρικά έργα κατασκευάζονται συνήθως σε περιοχές με συχνές βροχοπτώσεις, κατάλληλη γεωλογική διαμόρφωση και πλούσιες πηγές. Τα βασικότερα πλεονεκτήματα της υδροηλεκτρικής ενέργειας είναι το γεγονός πως οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί μπορούν να λειτουργήσουν άμεσα τη στιγμή που αυτό θα ζητηθεί, σε αντίθεση με τους θερμικούς που χρειάζονται αρκετό χρόνο προετοιμασίας, καθώς επίσης και το ότι μέσω των δεξαμενών αποθήκευσης μπορούν να ικανοποιηθούν και ανάγκες άρδευσης, ύδρευσης και δημιουργίας υγροτόπων. Σημαντικά μειονεκτήματα της συγκεκριμένης μορφής ενέργειας αποτελούν το μεγάλο κόστος και ο αρκετός χρόνος που απαιτείται για την κατασκευή των φραγμάτων, αλλά και η σημαντική περιβαλλοντική αλλοίωση που προκαλείται στην χλωρίδα και την πανίδα της περιοχής του έργου.

### Βιοενέργεια (ενέργεια από βιομάζα)

Η συγκεκριμένη μορφή ενέργειας προέρχεται από την ενεργειακή αξιοποίηση των οργανικών υλικών βιολογικής προελεύσεως. Αυτά τα οργανικά υλικά που παράγονται από ζωντανούς οργανισμούς αποτελούν πρώτες ύλες, οι οποίες μέσω της φωτοσύνθεσης μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια που λαμβάνουν μέσω της ακτινοβολίας σε χημική, και ονομάζονται βιομάζα. Ως κύριες πηγές της βιομάζας θεωρούνται τα υπολείμματα της γεωργικής παραγωγής, το ξύλο σε όλες τις μορφές, τα στερεά απορρίμματα νοικοκυριών, τα ενεργειακά φυτά και τα οργανικά βιομηχανικά απόβλητα. Μέσω κατάλληλων θερμοχημικών διεργασιών επεξεργασίας, η βιομάζα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για την παραγωγή ενέργειας. Λόγω των πολλών ειδών βιομάζας, υπάρχουν αρκετές τεχνολογίες μετατροπής τους σε βιοενέργεια και συνήθως διακρίνονται με βάση τον τρόπο με τον οποίο παράγεται το καύσιμο σε χημικές, θερμικές και βιολογικές διεργασίες. Αξίζει να αναφερθεί πως η καύση της βιομάζας και των προϊόντων της, τα οποία προέρχονται από βιολογική ή θερμική επεξεργασία, χωρίς να έχουν υποστεί κάποια περαιτέρω κατεργασία, δεν συνεισφέρει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η βιοενέργεια έχει προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον, λόγω της δυνατότητας άμεσης αξιοποίησης της βιομάζας ως συμπληρωματικό καύσιμο σε ηλεκτρικούς σταθμούς, οι οποίοι χρησιμοποιούν γεωλογικά καύσιμα, με ταυτόχρονη ελάττωση των οξειδίων θείου και αζώτου. Βασικό μειονέκτημα αυτής της μορφής ενέργειας αποτελεί το υψηλό της κόστος, γεγονός που οφείλεται στο ότι κατά κανόνα η ενέργεια της βιομάζας μετατρέπεται μέσω ενδιάμεσων προϊόντων σε ηλεκτρική.

### Γεωθερμική ενέργεια

Η συγκεκριμένη μορφή ενέργειας αποτελείται από την αποθηκευμένη ενέργεια των πετρωμάτων κάτω από την επιφάνεια της γης, υπό τη μορφή θερμότητας. Για την εκμετάλλευσή της απαιτούνται οι κατάλληλες γεωλογικές συνθήκες και έτσι στις συγκεκριμένες περιοχές (γεωθερμικά πεδία) εμφανίζεται επιφανειακά υπό τη μορφή ζεστού νερού, υγρού ατμού ή κορεσμένου ξηρού ατμού και μπορεί να αξιοποιηθεί σε θερμοκήπια, βιομηχανίες και θέρμανση κατοικιών. Με βάση τη θερμοκρασία τους τα γεωθερμικά πεδία χωρίζονται σε πεδία χαμηλής ή μέσης θερμοκρασίας και σε πεδία

υψηλής θερμοκρασίας . Μικρή περιβαλλοντική επίδραση και μικρό κόστος παρουσιάζει η λειτουργία γεωθερμικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια συνοπτική περιγραφή των διαφόρων τύπων ΜΔΠ που λειτουργούν με συμβατικά καύσιμα.

### Αιολικά συστήματα

Οι ανεμογεννήτριες παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω της εκμετάλλευσης του ανέμου και αποτελούνται από δύο μέρη, τον πύργο και την τουρμπίνα με πτερωτές που συνδέεται στην κορυφή του. Το ύψος του πύργου είναι συνήθως αρκετά μεγάλο έτσι ώστε να εκμεταλλεύεται ο χρήστης τη μεγαλύτερη ταχύτητα του ανέμου, χωρίς να επηρεάζεται από την παρεμβολή στην πορεία του εμποδίων, όπως είναι ψηλά κτίρια, ορεινή λόφοι ή δέντρα. Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από μια γεννήτρια, καθώς περιστρέφεται η τουρμπίνα λόγω του ανέμου. Η ισχύς μιας ανεμογεννήτριας κυμαίνεται από λίγα kW έως και πάνω από 5 MW, ανάλογα με την ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται να παραχθεί. Βασικότερη εφαρμογή των ανεμογεννητριών αποτελεί η σύνδεσή τους στο ηλεκτρικό δίκτυο της εκάστοτε χώρας, όπου έχουν εγκατασταθεί. Έτσι λοιπόν, δημιουργούνται συστοιχίες ανεμογεννητριών που ονομάζονται Αιολικά Πάρκα, σε περιοχές που το αιολικό δυναμικό μπορεί να κάνει μια τέτοια επένδυση βιώσιμη και με την χρήση υποσταθμών συνδέονται στο δίκτυο. Επίσης, εφαρμογή των ανεμογεννητριών μπορεί να πραγματοποιηθεί σε αυτόνομα συστήματα, που δεν ηλεκτροδοτούνται από το δίκτυο. Στο παρακάτω Σχήμα 1.4 απεικονίζεται το μεγαλύτερο υπεράκτιο αιολικό πάρκο στον κόσμο, το οποίο βρίσκεται στη Μεγάλη Βρετανία και αποτελείται από 175 ανεμογεννήτριες με συνολική ισχύ 630 MW. Αξίζει να σημειωθεί πως η ισχύς από αιολικά πάρκα συνολικά στη συγκεκριμένη χώρα, φτάνει τα 3.3 GW.



**Σχήμα 1.4:** Το μεγαλύτερο υπεράκτιο αιολικό πάρκο στον κόσμο (London Array)

### Μηχανές εσωτερικής καύσης

Μέσω της μηχανής εσωτερικής καύσης μετατρέπεται σε μηχανική, εκείνη η ενέργεια που περιέχεται σε κάποιο καύσιμο, με σκοπό η παραγόμενη ενέργεια να χρησιμοποιηθεί για την περιστροφή ενός άξονα μέσα στη μηχανή. Η μετατροπή της περιστροφικής κίνησης σε ηλεκτρική ενέργεια, πραγματοποιείται μέσω μιας γεννήτριας που συνδέεται με τη μηχανή εσωτερικής καύσης. Η ισχύς αυτών των μηχανών κυμαίνεται από 5 kW μέχρι και 7 MW. Η λειτουργία μιας μηχανής εσωτερικής καύσης μπορεί να βασίζεται:

- Στον κύκλο του diesel (ντιζελογεννήτριες), όπου χρησιμοποιείται η ανάφλεξη υπό πίεση για την καύση του καυσίμου, το οποίο στη συνέχεια εισάγεται στο θάλαμο καύσης κατά το τελευταίο στάδιο της συμπίεσης
- Στον κύκλο του Otto (βενζινογεννήτριες). όπου ένα μίγμα αέρα και καυσίμου αναφλέγεται μέσω ενός σπινθηριστήρα (μπουζί)
- Στη χρήση φυσικού αερίου, όπου χρησιμοποιούνται πέντε διαφορετικά είδη μηχανών εσωτερικής καύσης φυσικού αερίου, έχοντας ονομαστική ισχύ από 25 έως 500 kW.



**Σχήμα 1.4:** Μηχανή εσωτερικής καύσης

### Μικροτουρμπίνες

Οι μικροτουρμπίνες αποτελούν μια μορφή περιστροφικών μηχανών, μέσω των οποίων παράγεται ενέργεια από τη ροή αερίου υπό πίεση. Αποτελούνται από μια τουρμπίνα και ένα συμπιεστή, που συνδέονται μεταξύ τους μέσω ενός θαλάμου καύσης και λειτουργούν είτε με τη μέθοδο της ανάκτησης θερμότητας, είτε με τη μέθοδο του απλού κύκλου. Σε ένα στρόβιλο απλού κύκλου δίχως ανάκτηση, προστίθεται ενέργεια στο ρεύμα αερίου μέσα στον καυστήρα και καθώς ο αέρας αναμιγνύεται με το καύσιμο, επιτυγχάνεται η ανάφλεξη. Η καύση προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας, της πητικότητας και του όγκου του αερίου και στη συνέχεια το συγκεκριμένο αέριο κατευθύνεται προς τις λεπίδες της τουρμπίνας, προκαλώντας την περιστροφή της και ακολούθως την ενεργοποίηση του συμπιεστή. Όσον αφορά τις μονάδες ανάκτησης θερμότητας, χρησιμοποιείται ένας εναλλάκτης θερμότητας



κατασκευασμένος από φύλλα μετάλλου, που βασική του λειτουργία αποτελεί η ανάκτηση ενός τμήματος της θερμότητας από το ρεύμα αέρα το οποίο έχει κατεύθυνση προς την εξάτμιση και στη συνέχεια, η μεταβίβαση του στο εισερχόμενο κρύο ρεύμα αέρα. Αξίζει ακόμα να αναφερθεί, πως οι μικροτουρμπίνες απλού κύκλου παρουσιάζουν χαμηλότερο κόστος και υψηλότερη αξιοπιστία εν συγκρίσει με τις μονάδες ανάκτησης θερμότητας.



**Σχήμα 1.5:** Μικροτουρμπίνα

### Φωτοβολταϊκά συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια, μετατρέποντάς τη σε ηλεκτρική και αποτελούνται από κατάλληλα επεξεργασμένους δίσκους πυριτίου (ηλιακά κύτταρα-solar cells), οι οποίοι βρίσκονται περιτυλιγμένοι από πλαστική ύλη έτσι ώστε να προστατεύονται από τις εναλλαγές των καιρικών συνθηκών και κατά κύριο λόγο από την υγρασία. Όσον αφορά την μπροστινή τους όψη, υπάρχει τοποθετημένο ανθεκτικό γυαλί και το πάχος τους δεν ξεπερνά τα τέσσερα με πέντε χιλιοστά. Η λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων στηρίζεται στο γεγονός πως η πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας προκαλεί τη δημιουργία ηλεκτρικής τάσης και μέσω της κατάλληλης σύνδεσης σε κάποιο φορτίο, παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Βασικό τους πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός πως πραγματοποιούν τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική χωρίς να προκαλούν περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αθόρυβα και με σημαντικό βαθμό αξιοπιστίας. Στο παρακάτω Σχήμα 1.6 απεικονίζεται το φωτοβολταϊκό πάρκο του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών (ΔΑΑ), μέσω του οποίου εντός ενός έτους παράγονται πάνω από 12 εκατομμύρια κιλοβατώρες (kWh) και έτσι καλύπτεται το 9% της συνολικής ετήσιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας του αεροδρομίου. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί πως μέσω του συγκεκριμένου πάρκου που καλύπτει έκταση 160 στρεμμάτων, αποτρέπεται η παραγωγή άνω των 10.000 τόνων διοξειδίου του άνθρακα.



**Σχήμα 1.6:** Φωτοβολταϊκό πάρκο του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών

### Κυψέλες καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν ηλεκτροχημικές συσκευές που χρησιμοποιώντας το οξυγόνο και το υδρογόνο ως καύσιμα μετατρέπουν τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια, θερμότητα και νερό. Το υδρογόνο που χρειάζεται για να λειτουργήσουν οι κυψέλες παράγεται συνήθως από βιοαέριο ή φυσικό αέριο μέσω μίας διατάξεως μετατροπέα. Αξίζει να αναφερθεί, πως στις περιπτώσεις που ως καύσιμο χρησιμοποιείται το βιοαέριο, η παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα είναι πρακτικά μηδενική.

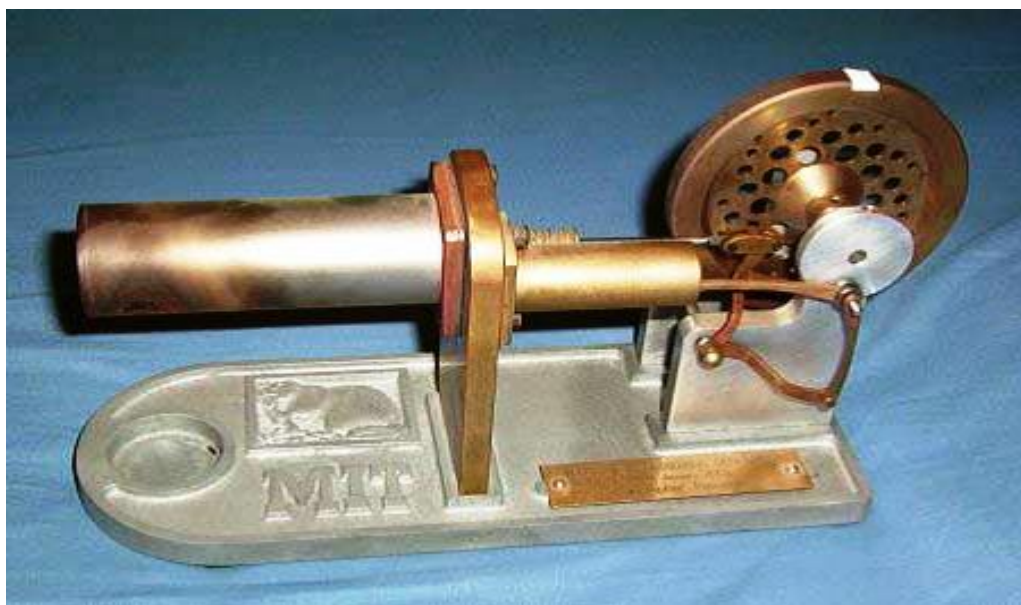


**Σχήμα 1.6:** Συστήματα μικρής ισχύος, κυψελών καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια, δηλαδή την άνοδο και την κάθοδο, που διαχωρίζει ένας ηλεκτρολύτης. Ένα από τα καύσιμα που προαναφέρθηκαν εισάγεται μέσω της πλευράς της ανόδου, όπου τα ηλεκτρόνια του υδρογόνου ελευθερώνονται και αρχίζουν να κινούνται σε ένα εξωτερικό κύκλωμα, παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα. Ο ηλεκτρολύτης διαπερνάται από τα θετικά φορτισμένα ιόντα του υδρογόνου, τα οποία στη συνέχεια φτάνοντας στην κάθοδο ενώνονται με το οξυγόνο και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, παράγοντας μέσα από αυτή τη διαδικασία νερό. Βασικό πλεονέκτημα των συστημάτων ισχύος με κυψέλες καυσίμου είναι το γεγονός πως αποτελούν αποδοτικά τοπικά συστήματα παραγωγής που δεν χρησιμοποιούν την καύση για την παραγωγή ηλεκτρισμού, καθώς επίσης και το ότι είναι αθόρυβα.

### Μηχανές Stirling

Οι μηχανές Stirling θεωρούνται μηχανές εξωτερικής καύσης και θέτονται σε λειτουργία από ένα αδρανές αέριο. Λόγω της εξωτερικής καύσης και του κλειστού κύκλου λειτουργίας, αποτρέπεται η έκθεση των κινούμενων μερών του κινητήρα στα προϊόντα της καύσης, ελαχιστοποιώντας με αυτό τον τρόπο τις φθορές. Απαιτούνται στεγανωτικές διατάξεις, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η αποφυγή διαρροής τόσο του λιπαντικού λαδιού προς το εσωτερικό του κυλίνδρου, όσο και του αερίου υψηλής πίεσης προς το εξωτερικό του κυλίνδρου. Βασικό μειονέκτημα των μηχανών αυτών αποτελεί το υψηλό κόστος που απαιτείται για την κατασκευή αποτελεσματικών διατάξεων, με ικανοποιητική διάρκεια ζωής. Είναι διαθέσιμες σε μικρά μεγέθη, της τάξεως το πολύ των 25 kW και παράγονται για εξειδικευμένες χρήσεις στη διαστημική και τη θαλάσσια βιομηχανία.



**Σχήμα 1.7:** Μηχανή Stirling

## 1.2.2 Πλεονεκτήματα Διεσπαρμένης Παραγωγής

Η Διεσπαρμένη Παραγωγή (ΔΠ) παρουσιάζει ένα σημαντικό αριθμό εμπορικών, λειτουργικών και περιβαλλοντικών πλεονεκτημάτων, για το λόγο αυτό και αναπτύσσεται με πολύ γρήγορους ρυθμούς τα τελευταία χρόνια. Τα βασικότερα οφέλη που προσφέρει η εγκατάσταση μίας ή περισσότερων ΜΔΠ στο δίκτυο παρουσιάζονται παρακάτω.

### Περιβαλλοντικά, οικονομικά και λειτουργικά οφέλη

- Η εισαγωγή της τοπικής παραγωγής σε επιχειρήσεις και κοινότητες, μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη ευαισθητοποίηση σε σχέση με τα ενεργειακά θέματα.
- Το γεγονός πως η λειτουργία των ΜΔΠ δεν βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα, κάνει τη διεσπαρμένη παραγωγή βιώσιμη μακροπρόθεσμα και λόγω της μη εκπομπής ρύπων δεν επιβαρύνεται το περιβάλλον. Ακόμα μέσω της χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ως ΔΠ μειώνονται οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, καθώς και οι εκπομπές οξειδίων του θείου και του αζώτου. Επομένως, η χρήση ΜΔΠ συμβάλλει σε πολύ σημαντικό βαθμό στην προστασία του περιβάλλοντος και στον περιορισμό των παγκόσμιων κλιματολογικών αλλαγών.
- Η χρήση μονάδων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, όπου η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται ως υποπροϊόν της παραγωγής θερμότητας, μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερες αποδόσεις σε σχέση με την περίπτωση όπου η θερμότητα και ο ηλεκτρισμός παράγονται ανεξάρτητα.
- Η ΔΠ καλύπτει ένα πολύ ευρύ φάσμα τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένου μεγάλου αριθμού ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι οποίες παρέχουν μικρής κλίμακας ισχύ και είναι τοποθετημένες κοντά στους καταναλωτές, δηλαδή κοντά στα φορτία. Η εισαγωγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας προκαλεί μικρότερο ρίσκο στις επενδύσεις, προσφέροντας πιο προβλέψιμο ενεργειακό κόστος. Μέσα από τη χρήση όλων αυτών των τεχνολογιών δημιουργούνται νέες ευκαιρίες στην αγορά, καθώς και αυξημένος βιομηχανικός ανταγωνισμός.
- Το γεγονός πως η ενέργεια μέσω των ΜΔΠ παράγεται κοντά στην τοποθεσία στην οποία χρησιμοποιείται, έχει ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση των απωλειών μεταφοράς της, καθώς επίσης και τη μείωση του κόστους μεταφοράς που αποτελεί ένα πολύ σημαντικό κομμάτι του συνολικού κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας.
- Μέσω της εγκατάστασης ΜΔΠ προσφέρεται ενέργεια σε απομακρυσμένες περιοχές, όπου δεν είναι δυνατή η επιλογή των παραδοσιακών γραμμών διανομής. Τέτοιες περιοχές όπως απομακρυσμένα χωριά ή θαλάσσιες πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου χρησιμοποιούν τη ΔΠ ως βασική πηγή ενέργειας, καθώς βρίσκονται εκτός του ηλεκτρικού δικτύου.
- Η χρήση ΜΔΠ σε ένα δίκτυο, επιτρέπει την πιο αποτελεσματική οικονομική διαχείριση της ενέργειας και του φορτίου.

### Οφέλη ως προς το δίκτυο

- Μέσω της χρήσης ΜΔΠ επιτυγχάνεται μείωση των ηλεκτρικών απωλειών που αναπτύσσονται σε ένα σύστημα μεταφοράς ή διανομής. Η τιμή αυτών των απωλειών εξαρτάται από την αντίσταση και το ηλεκτρικό ρεύμα που ρέει κατά μήκος μίας γραμμής του δικτύου. Η σύνδεση των ΜΔΠ στο δίκτυο προκαλεί τη μείωση του ρεύματος που ρέει από την πηγή έως τη θέση της διεσπαρμένης παραγωγής, καθώς μέσω αυτών των μονάδων τροφοδοτείται το φορτίο με μια ποσότητα ενεργού και αέργου ισχύος και επομένως με τον τρόπο αυτό οι ηλεκτρικές απώλειες στο δίκτυο, μειώνονται. Αξίζει να αναφερθεί, πως αν η διαστασιολόγηση και η τοποθέτηση των ΜΔΠ δεν γίνει με τον βέλτιστο τρόπο, η διείσδυση των ΜΔΠ στο δίκτυο υπάρχει περίπτωση να προκαλέσει αύξηση των ηλεκτρικών απωλειών. Επίσης, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και ο συντελεστής ισχύος των ΜΔΠ, καθώς μείωση των απωλειών προκαλείται από τη χρήση γεννητριών με επαγωγικούς συντελεστές ισχύος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η ΜΔΠ υποστηρίζει την άεργο ισχύ που απαιτείται από το φορτίο και έτσι οι τιμές των ρευμάτων που ρέουν στις γραμμές του δικτύου μέχρι τη θέση της, μειώνονται.
- Η διείσδυση της ΔΠ σε ένα δίκτυο μπορεί να προκαλέσει μειώσεις στη διακύμανση της τάσης των διαφόρων ζυγών που το αποτελούν και με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται βελτίωση του προφίλ της τάσης. Αυτό εξηγείται από το γεγονός πως ένα μέρος του φορτίου τροφοδοτείται από τη ΔΠ και επομένως μειώνεται η ισχύς που απαιτείται από την πηγή, προκαλώντας μικρότερες πτώσεις τάσεις κατά μήκος των γραμμών του δικτύου. Αξίζει να σημειωθεί πως κατά γενικό κανόνα, το σημείο τοποθέτησης της ΜΔΠ στο οποίο επιτυγχάνεται το βέλτιστο αποτέλεσμα όσον αφορά το προφίλ της τάσης δεν ταυτίζεται με το σημείο τοποθέτησης της ΜΔΠ, όπου επιτυγχάνονται οι μικρότερες δυνατές ηλεκτρικές απώλειες. Η μη ταύτιση των δύο αυτών σημείων έχει οδηγήσει στην εκτεταμένη μελέτη του προβλήματος, έτσι ώστε να προκύψει η θέση σύνδεσης της ΜΔΠ με τα μέγιστα δυνατά οφέλη για το δίκτυο.
- Η βέλτιστη διαστασιολόγηση και τοποθέτηση των ΜΔΠ σε ένα δίκτυο, μπορεί να επιφέρει σημαντική μείωση στην τιμή της ισχύος αιχμής του, καθώς η ΔΠ εξυπηρετεί ένα μέρος του φορτίου, παρέχοντας ισχύ στο συγκεκριμένο δίκτυο. Ακόμα με την κατάλληλη διαστασιολόγηση και τοποθέτηση των ΜΔΠ μπορεί να επιτευχθεί μείωση στην ολική αρμονική παραμόρφωση ενός δικτύου

### **1.2.3 Μειονεκτήματα Διεσπαρμένης Παραγωγής**

Παρά το μεγάλο αριθμό πλεονεκτημάτων της ΔΠ που προαναφέρθηκαν, υπάρχουν και κάποια προβλήματα τεχνικής ή οικονομικής φύσεως που προκύπτουν κατά την εγκατάσταση και τη χρήση των ΜΔΠ που παρουσιάζονται παρακάτω.

- Ένα από τα κύρια μειονεκτήματα των ΜΔΠ, ίσως και το σημαντικότερο, αποτελεί το υψηλό κόστος κεφαλαίου ανά kW εγκαταστημένης ισχύος εν

συγκρίσει με το αντίστοιχο κόστος της ισχύος που προέρχεται από τα μεγάλα κεντρικά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

- Η αυξανόμενη διείσδυση της ΔΠ στην εγκαταστημένη παραγωγή μειώνει τα περιθώρια επιλογής μεταξύ των βασικών καυσίμων, έχοντας ως άμεσο επακόλουθο τη μείωση της διαφοροποίησης των πρωταρχικών αποθεμάτων ενέργειας. Με βάση το γεγονός πως ο μεγαλύτερος αριθμός τεχνολογιών ΔΠ βασίζεται κυρίως στο φυσικό αέριο, αναμένεται να εμφανιστεί αυξημένη ζήτηση, αλλά ταυτόχρονα και εξάρτηση από αυτό.
- Σημαντικό ρόλο παίζει επίσης και το κόστος για την πρωταρχική παροχή καυσίμου στη ΔΠ, το οποίο είναι αρκετά μεγαλύτερο από ότι για την κεντρική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Η διείσδυση ΜΔΠ αλλάζει τις ροές ισχύος και ρευμάτων στο σημείο στο οποίο αυτές συνδέονται, γι αυτό θα πρέπει να εξεταστεί αν ξεπερνιούνται τα θερμικά όρια των γραμμών του δικτύου.
- Στην περίπτωση που υπάρχουν πολλές μονοφασικές μονάδες παραγωγής μπορεί να προκληθεί αποσταθεροποίηση της τάσης, επηρεάζοντας με αυτό τον τρόπο την ποιότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.
- Η διείσδυση της ΔΠ σε ένα δίκτυο μπορεί να επιφέρει μείωση της αποτελεσματικότητας των κυκλωμάτων προστασίας του. Στο ενδεχόμενο μιας διακοπής ηλεκτροδότησης από το δίκτυο, οι καταναλωτές που επιθυμούν να εξακολουθήσουν να λαμβάνουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω της ΔΠ θα πρέπει να λάβουν σοβαρά υπόψη τους κατά κύριο λόγο την ασφάλεια του δικτύου. Τη στιγμή που το δίκτυο διανομής θα επανέλθει στην κανονική του λειτουργία, θα πρέπει η ΔΠ να συγχρονιστεί και πάλι με την τάση του δικτύου.
- Μέσα από έναν αυξημένο αριθμό ΜΔΠ μπορεί να προκληθούν αντίστροφες ροές φορτίου, δηλαδή από την μεριά της χαμηλής προς εκείνη της μέσης τάσης. Με τα κατάλληλα μέσα προστασίας και στα δύο επίπεδα τάσης, αυτές οι ροές μπορούν να αποφευχθούν.

### 1.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Στις μέρες μας οι περισσότερες μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες παγκοσμίως, έχουν κυκλοφορήσει ή έχουν προγραμματισμένη την άμεση κυκλοφορία κάποιου ηλεκτρικού οχήματος, ενώ ταυτόχρονα κατευθύνονται προς την ανάδειξη τεχνολογιών ηλεκτρικής κίνησης οι οποίες θα επιτρέψουν την ομαλότερη και ταχύτερη μετάβαση από τα οχήματα που λειτουργούν με μηχανές εσωτερικής καύσης σε εκείνα που εκπέμπουν μηδενικούς ρύπους. Ο πληθυσμός των ηλεκτρικών οχημάτων έχει αυξηθεί ταχύτατα τα τελευταία χρόνια κυρίως λόγω της φιλικότητάς τους προς το περιβάλλον, καθώς και λόγω του χαμηλότερου κόστους καθημερινής χρήσης σε σχέση με τα οχήματα που λειτουργούν με συμβατικά καύσιμα. Η επικράτηση στις αστικές πόλεις οχημάτων που λειτουργούν με βάση την ηλεκτρική ενέργεια, αποτελεί πολύ σημαντική συμβολή στη μείωση της εξάρτησης από το πετρέλαιο, στην ελάττωση της ηχορύπανσης, καθώς επίσης και στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Ο διευθύνων σύμβουλος γαλλικών εταιρειών αυτοκινητοβιομηχανίας (Renault-Nissan), Carlos Ghosn δήλωσε πως έως το 2020 το ποσοστό πωλήσεων ηλεκτρικών αυτοκινήτων θα έχει ανέλθει στο 10% των συνολικών πωλήσεων οχημάτων. Οι βασικοί λόγοι που

καθυστέρησαν την εξάπλωσή τους μέχρι σήμερα, αφορούν την πολύ ακριβή τιμή τους, τη μη ύπαρξη δικτύου φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, καθώς και το γεγονός πως εκφράζονταν επιφυλάξεις σχετικά με τον χρόνο αυτονομίας τους. Την αναζωπύρωση του ενδιαφέροντος για τα ηλεκτρικά οχήματα προκάλεσε σε μεγάλο βαθμό από το 2007 και μετά, η προσπάθεια επίτευξης των στόχων που τέθηκαν από το Πρωτόκολλο του Κιότο. Πολλές χώρες όπως ο Καναδάς, η Δανία, η Αυστραλία, το Ισραήλ και οι ΗΠΑ κινούμενες προς αυτή την κατεύθυνση, υιοθετούν προγράμματα υποστήριξης ηλεκτρικών οχημάτων. Στις παρακάτω ενότητες παρουσιάζονται οι βασικές κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται τα ηλεκτρικά οχήματα, τα πλεονεκτήματά τους, καθώς και τα κυριότερα μειονεκτήματά τους. Στο παρακάτω Σχήμα 1.8 απεικονίζεται το ηλεκτρικό Smart Fortwo που μέσα στο 2014 θα πωλείται και στην χώρα μας και το οποίο απαιτεί 7 ώρες για την πλήρη φόρτισή του, ενώ οι επιδόσεις του όσον αφορά την τελική ταχύτητα και την αυτονομία της μπαταρίας του είναι 125 km/h και 145km αντίστοιχα.



**Σχήμα 1.8:** Ηλεκτρικό Smart Fortwo κατά τη φόρτισή του

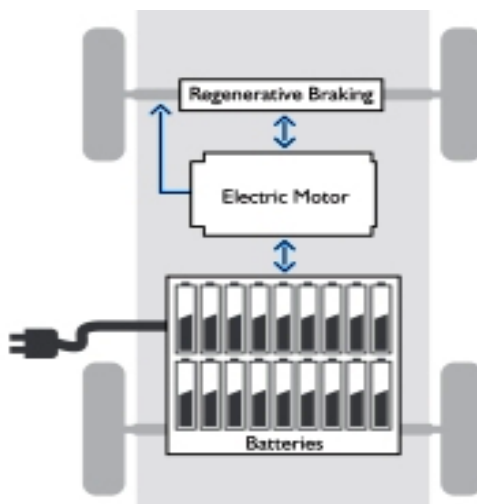
### 1.3.1 Τεχνολογίες ηλεκτρικών οχημάτων

Τα ηλεκτρικά οχήματα (Electric Vehicles – Evs), χωρίζονται στις παρακάτω επιμέρους κατηγορίες ανάλογα με την τεχνολογία κίνησης που χρησιμοποιούν.

#### Ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία

Τα ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας λειτουργούν αποκλειστικά με την ηλεκτρική ενέργεια, η οποία αποθηκεύεται σε εγκατεστημένους συσσωρευτές εντός του οχήματος. Αυτή η ηλεκτρική ενέργεια συνήθως προσλαμβάνεται είτε από το δίκτυο, είτε από μια εξωτερική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής. Σημαντικό ρόλο παίζουν και οι

τεχνικές φόρτισης των συσσωρευτών (αναπαραγωγικό φρενάρισμα), οι οποίες αξιοποιούν τη θερμότητα που παράγεται κατά το φρενάρισμα του οχήματος. Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος παρουσιάζουν το μικρότερο κόστος, όμως οι μπαταρίες ιόντων λιθίου, πολυμέσων ιόντων λιθίου και υβριδίου μετάλλων νικελίου εμφανίζονται εξίσου ανταγωνιστικές λόγω του μικρότερου μεγέθους και βάρους τους, καθώς και λόγω της μεγαλύτερης διάρκειας ζωής τους. Ευρέως χρησιμοποιούνται ορισμένοι τύποι ηλεκτρικών οχημάτων, όπως είναι τα ηλεκτρικά οχήματα γειτονιάς, τα χαμηλής ταχύτητας, καθώς και τα οχήματα που αποτελούν τον εξοπλισμό εδάφους ενός αεροδρομίου.

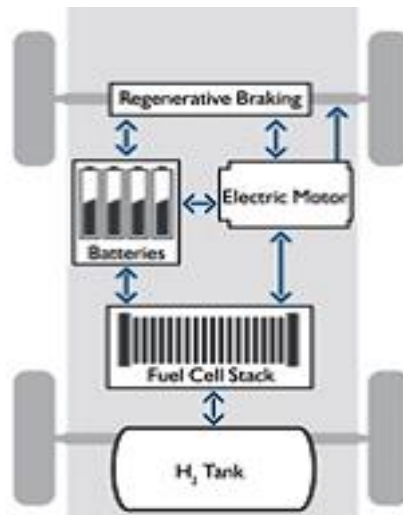


**Σχήμα 1.9:** Ηλεκτρικό όχημα μπαταρίας

#### Ηλεκτρικά οχήματα με κυψέλες καυσίμου

Τα ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου λειτουργούν αποθηκεύοντας ενέργεια με τη μορφή υδρογόνου, το οποίο σε συνδυασμό με το ατμοσφαιρικό οξυγόνο τροφοδοτεί μια κυψέλη καυσίμου, παράγοντας ηλεκτρισμό μέσω της διαδικασίας της ηλεκτρόλυσης, με μοναδικά παραπροϊόντα τη θερμότητα και το νερό. Αξίζει να αναφερθεί πως η παραγωγή ηλεκτρισμού δεν προκαλεί την παραγωγή ρύπων. Κάποιοι από τους διάφορους τρόπους αποθήκευσης ή παραγωγής υδρογόνου πάνω στο ίδιο το όχημα είναι η δέσμευσή του σε μέταλλα, η συμπίεση του αερίου υδρογόνου, καθώς και η παραγωγή του από μεθανόλη, φυσικό αέριο ή βενζίνη. Οχήματα κυψελών καυσίμου χρησιμοποιούνται κυρίως ως φορτηγά διανομής, λεωφορεία και στρατιωτικά οχήματα. Σημαντικά προβλήματα της συγκεκριμένης τεχνολογίας οχημάτων αποτελούν, η απαιτούμενη υποδομή διανομής του υδρογόνου, οι απώλειες μετατροπής, καθώς και η αποθήκευση του υδρογόνου επί του οχήματος. Αυτοί οι προβληματισμοί δημιουργούν αρκετά ερωτήματα σχετικά με το κατά πόσο τα ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου μπορούν να αποτελέσουν μια συμφέρουσα και πρακτική λύση του μέλλοντος.





**Σχήμα 1.10:** Ηλεκτρικό όχημα κυψελών καυσίμου

Ηλεκτρικά οχήματα με μονάδα επέκτασης της αυτονομίας

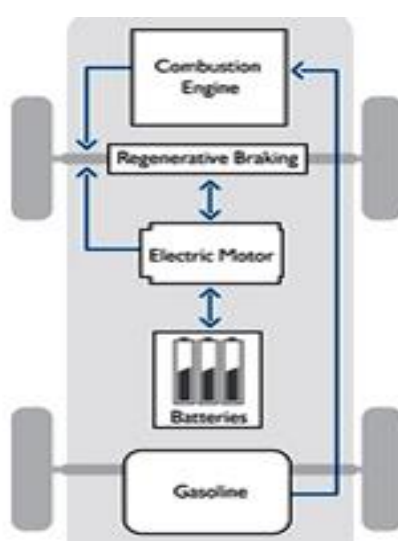
Τα ηλεκτρικά οχήματα της συγκεκριμένης τεχνολογίας, έχουν συσσωρευτές όπως και εκείνα της προηγούμενης κατηγορίας, αλλά διαθέτουν επιπλέον επί του οχήματος μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (γεννήτρια). Η μονάδα αυτή χρησιμοποιείται είτε για την απευθείας τροφοδότηση των ηλεκτροκινητήρων, είτε για την φόρτιση των συσσωρευτών του οχήματος. Τα συγκεκριμένα οχήματα, ανεφοδιάζονται από το δίκτυο με ηλεκτρική ενέργεια, ενώ παράλληλα θα πρέπει να ανεφοδιάζονται και με το είδος καυσίμου που λειτουργεί η γεννήτριά τους.



**Σχήμα 1.10:** Ηλεκτρικό όχημα με μονάδα επέκτασης αυτονομίας (Acr Tzero)

### Επαναφορτιζόμενα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα

Τα ηλεκτρικά οχήματα της συγκεκριμένης τεχνολογίας, χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό κινητήρα εσωτερικής καύσης και ηλεκτροκινητήρα για να επιτύχουν την κίνησή τους. Εκτός από τον ανεφοδιασμό τους με το κατάλληλο συμβατικό καύσιμο του θερμικού κινητήρα τους, έχουν επίσης τη δυνατότητα να φορτίζουν τους συσσωρευτές τους με ηλεκτρική ενέργεια είτε απευθείας από το δίκτυο, είτε από κάποια εξωτερική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής. Κατά την “σειριακή” σχεδίαση ο κινητήρας εσωτερικής καύσης στρέφει μια γεννήτρια, η οποία στη συνέχεια τροφοδοτεί τον ηλεκτροκινητήρα, ενώ στην “παράλληλη” σχεδίαση ο κινητήρας εσωτερικής καύσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετάδοση της κίνησης στο όχημα. Με στόχο τη μέγιστη ευελιξία, υπάρχουν οχήματα που χρησιμοποιούν και τις δύο αυτές αρχιτεκτονικές.



**Σχήμα 1.11:** Επαναφορτιζόμενο υβριδικό ηλεκτρικό όχημα

### **1.3.2 Κατηγορίες και επίπεδα φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων**

Καθώς αυξάνεται συνεχώς ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων, υπάρχει η ανάγκη δημιουργίας των κατάλληλων υποδομών φόρτισης έτσι ώστε να ικανοποιούνται όλοι οι χρήστες. Οι σταθμοί φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων θα πρέπει να εγκατασταθούν εκτεταμένα, ώστε να εξυπηρετούν επαρκώς έναν μεγάλο αριθμό οχημάτων, ειδικά στις αστικές περιοχές. Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται οι κατηγορίες φόρτισης, καθώς και τα επίπεδα φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων.

#### Αγωγή φόρτιση

Στην συγκεκριμένη μέθοδο φόρτισης, χρησιμοποιούνται ηλεκτρικές επαφές που ενώνονται μεταξύ τους ώστε να πραγματοποιηθεί η μετάδοση ισχύος, όπως ακριβώς συμβαίνει και με τις καθημερινές ηλεκτρικές οικιακές συσκευές που συνδέονται στο

δίκτυο. Την αγώγιμη φόρτιση χρησιμοποιούν φορτιστές που είναι ενσωματωμένοι στο όχημα ή συστήματα που τα κυκλώματα φόρτισης και ελέγχου τους, βρίσκονται πάνω στο όχημα. Ανάλογα με το επίπεδο ισχύος φόρτισης, οι σταθμοί φόρτισης με ενσύρματη σύνδεση καλωδίου χωρίζονται στις παρακάτω υποκατηγορίες:

- Μονοφασική (1Φ) AC παροχή: Οι ηλεκτρικές συσκευές καθημερινής οικιακής χρήσης συνδέονται σε αντίστοιχες επαφές, ώστε να ηλεκτροδοτηθούν. Τα χαρακτηριστικά της φόρτισης από μονοφασική παροχή είναι:

230V/16A ~ 3kW, διάρκεια φόρτισης 12 ώρες  
230V/32A ~ 7.4kW, διάρκεια φόρτισης 5 ώρες

- Τριφασική (3Φ) AC παροχή: Η συγκεκριμένη παροχή δίνει τη δυνατότητα μεταφοράς μεγάλης ποσότητας ισχύος, δίχως να απαιτούνται μεγάλες τιμές ρευμάτων ή τάσεων και έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

400V/16A ~ 11kW, διάρκεια φόρτισης 10 ώρες  
400V/32A ~ 22kW, διάρκεια φόρτισης 3 ώρες

- DC παροχή: Στη συγκεκριμένη παροχή, ο φορτιστής της μπαταρίας βρίσκεται εκτός του οχήματος και η τροφοδοσία πραγματοποιείται υπό συνεχές ρεύμα. Μέσω της χρήσης συνεχούς ρεύματος, δίνεται η δυνατότητα μεταφοράς υψηλών τιμών ισχύος της τάξεως των 40 kW, επιτυγχάνοντας διάρκεια φόρτισης μικρότερη των 45 λεπτών.



**Σχήμα 1.12:** Σταθμός ενσύρματης φόρτισης στο Λονδίνο

## Επαγωγική φόρτιση

Στα συστήματα επαγωγικής φόρτισης μεταφέρεται εναλλασσόμενη ισχύς και με τον τρόπο αυτό, δημιουργείται ένα μαγνητικό κύκλωμα ανάμεσα στο πρωτεύον τύλιγμα στη μεριά της τροφοδοσίας και στο δευτερεύον τύλιγμα στη μεριά του οχήματος. Η ισχύς ρέει από το πρωτεύον προς το δευτερεύον, με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως συμβαίνει και σε ένα μετασχηματιστή δύο τυλιγμάτων. Αφού ο συσσωρευτής έχει DC τάση και έχει τη δυνατότητα να φορτιστεί μόνο με DC ρεύμα, το AC ρεύμα εξόδου του δευτερεύοντος πριν φτάσει σε αυτόν ανορθώνεται με την κατάλληλη διάταξη. Τα περισσότερα κυκλώματα ελέγχου και φόρτισης των επαγωγικών φορτιστών βρίσκονται εκτός του οχήματος και επικοινωνούν μέσω ραδιοσυχνοτήτων και υπερύθρων με αυτό. Δύο βασικά πλεονεκτήματα των σταθμών επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων αποτελούν, το γεγονός πως για την φόρτιση του οχήματος δεν απαιτείται καλώδιο κάνοντας έτσι πιο εύκολη και πιο ασφαλής τη φόρτιση, καθώς επίσης και το ότι ο φορτιστής είναι ενσωματωμένος υπόγεια αποκτώντας με τον τρόπο αυτό αντοχή σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες. Στην συγκεκριμένη μέθοδο, η φόρτιση των συσσωρευτών πραγματοποιείται είτε με AC είτε με DC ρεύμα και τα επίπεδα ισχύος φόρτισης είναι τα παρακάτω:

- Επίπεδο 1: Το επίπεδο αυτό περιλαμβάνει τη μονοφασική (1Φ) AC φόρτιση που πραγματοποιείται όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, μέσω των κοινών οικιακών παροχών και παρέχει χαμηλές τιμές ισχύος εν συγκρίσει με τη χωρητικότητα των συσσωρευτών.

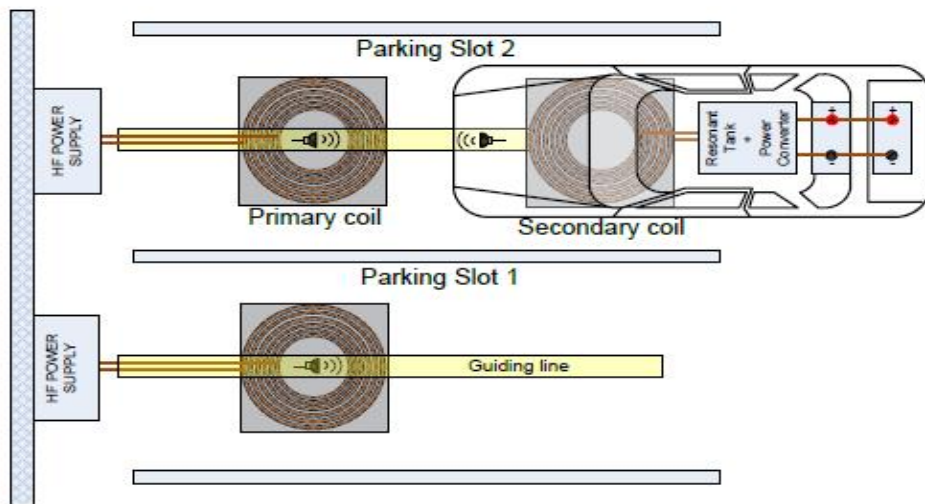
Ισχύς φόρτισης: 3~4 kW (3.6 kW στην περίπτωση των 230V/16A)  
Διάρκεια φόρτισης: 10 ώρες

- Επίπεδο 2: Το επίπεδο αυτό περιλαμβάνει την τριφασική (3Φ) AC φόρτιση και παρέχει ισχύ αρκετά μεγαλύτερη από εκείνη του επιπέδου 1, λόγω της συμβολής των δύο επιπρόσθετων φάσεων. Αξίζει να αναφερθεί πως στο συγκεκριμένο επίπεδο, απαιτείται ιδιαίτερη κατασκευή και καλωδίωση, αλλά η ισχύς καλύπτεται από μια κοινή τριφασική παροχή. Η μονοφασική φόρτιση από ειδικές εγκαταστάσεις, των οποίων τα ρεύματα είναι κατά πολύ αυξημένα σε σχέση με εκείνα των οικιακών, εντάσσονται σε αυτό το επίπεδο φόρτισης.

Ισχύς φόρτισης: 10~20 kW (11kW στην περίπτωση των 3 x 230V/16A)  
Διάρκεια φόρτισης: 2 έως 4 ώρες

- Επίπεδο 3: Λόγω των πολύ υψηλότερων επιπέδων παρεχόμενης ισχύος στην συγκεκριμένη περίπτωση, προσφέρεται γρηγορότερη φόρτιση σε σχέση με τα δύο προηγούμενα επίπεδα. Στο επίπεδο αυτό, μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε τριφασική φόρτιση με τιμές ρευμάτων αρκετά μεγαλύτερες από το επίπεδο 2, είτε απευθείας παροχή DC ρεύματος στο ηλεκτρικό όχημα. Αξίζει να αναφερθεί πως και οι δύο παραπάνω τρόποι απαιτούν ιδιαίτερη μελέτη και εγκατάσταση, αλλά ειδικά η περίπτωση της DC φόρτισης είναι πολλά υποσχόμενη και εξελίξιμη.

Ισχύς φόρτισης: 40 kW και άνω  
Διάρκεια φόρτισης: 45 λεπτά



**Σχήμα 1.13:** Σταθμός ασύρματης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

### 1.3.3 Πλεονεκτήματα ηλεκτρικών οχημάτων

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την αντικατάσταση των οχημάτων που λειτουργούν με τα συμβατικά καύσιμα, από εκείνα που λειτουργούν χρησιμοποιώντας την ηλεκτρική ενέργεια.

- Με τη χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων επιτυγχάνεται ο περιορισμός της ζήτησης πετρελαίου όσον αφορά τον τομέα των μεταφορών, μειώνοντας με τον τρόπο αυτό την ενεργειακή εξάρτηση κυρίως από τις χώρες της μέσης ανατολής. Έτσι μειώνεται σημαντικά το κόστος της καθημερινής χρήσης ενός οχήματος, καθώς τα τελευταία χρόνια η τιμή του πετρελαίου έχει παρουσιάσει πολύ ανοδικές τάσεις.
- Σημαντικό πλεονέκτημα των ηλεκτρικών οχημάτων αποτελεί το γεγονός πως δεν εκπέμπουν ρυπογόνα αέρια, επομένως δε συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Μελέτες έχουν δείξει πως οι ρύποι που δημιουργούνται κατά την ηλεκτροπαραγωγή για τη φόρτιση των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων, είναι μειωμένοι κατά 2/3 σε σχέση με εκείνους των συμβατικών οχημάτων. Επίσης, αξίζει να αναφερθεί πως τα επίπεδα της ηχορύπανσης κατά τη λειτουργία ενός ηλεκτρικού οχήματος, είναι πολύ μικρότερα από εκείνα κατά τη λειτουργία ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης.
- Μέσω της χρήσης ηλεκτρικών οχημάτων αυξάνεται η ενεργειακή απόδοση, καθώς οι υπάρχοντες ηλεκτροκινητήρες αποδίδουν το 75% της χημικής ενέργειας που βρίσκεται αποθηκευμένη στις μπαταρίες τους για την κίνηση των τροχών, σε αντίθεση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης που μετατρέπουν μόνο το 20% της ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στη βενζίνη.
- Ένα ηλεκτρικό όχημα έχει την ευχέρεια να λειτουργεί σε υψηλότερες στροφές από ότι ένας βενζινοκινητήρας, καθώς μπορεί να φτάσει ακόμα και έως τις

14.000 στροφές/λεπτό. Ακόμα ένα σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός πως τα ηλεκτρικά οχήματα επιτυγχάνουν σχεδόν σταθερή ροπή από την ακινησία έως και το μέγιστο όριο στροφών λειτουργίας τους.

- Υπάρχει η δυνατότητα σχεδίασης των ηλεκτρικών οχημάτων με τέτοιο τρόπο, ώστε να αυτοφορτίζονται κατά την επιβράδυνσή τους βελτιώνοντας ακόμα περισσότερο το δείκτη κατανάλωσης.

#### 1.3.4 Μειονεκτήματα ηλεκτρικών οχημάτων

Ωστόσο, τα ηλεκτρικά οχήματα χαρακτηρίζονται και από αρκετούς περιορισμούς που προκαλούν επιφυλάξεις στους καταναλωτές σχετικά με την καθημερινή χρήση τους. Χρειάζεται περαιτέρω έρευνα, έτσι ώστε να αντιμετωπιστούν σημαντικές προκλήσεις που αφορούν κυρίως την τεχνολογία των συσσωρευτών, για να επιτευχθεί μακροπρόθεσμα η καθιέρωση της χρήσης των ηλεκτρικών οχημάτων. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά από τα μειονεκτήματα που αφορούν τα ηλεκτρικά οχήματα.

- Το βασικότερο μειονέκτημα των ηλεκτρικών οχημάτων αποτελεί η αυτονομία τους, καθώς με κάθε κύκλο φόρτισης της μπαταρίας τους μπορούν να διανύσουν περιορισμένη χιλιομετρική απόσταση. Κατά το παρελθόν ένα ηλεκτρικό όχημα χρειαζόταν κάθε 60 χιλιόμετρα επαναφόρτιση, ενώ στις μέρες μας τα σύγχρονα μοντέλα παρουσιάζουν αυτονομία ταξιδιού που φτάνει τα 150 χιλιόμετρα στα αυτοκίνητα πόλης και τα 300 χιλιόμετρα αντίστοιχα σε οχήματα μεγάλης ισχύος.
- Σημαντικό εμπόδιο στην εξάπλωση της χρήσης των ηλεκτρικών οχημάτων αποτελεί ο μεγάλος χρόνος επαναφόρτισης τους, που συνήθως φτάνει τις 6 ώρες για μια πλήρη επαναφόρτιση. Αξίζει βέβαια να αναφερθεί πως αρκετά σύγχρονα μοντέλα μπορούν να φορτίσουν κατά το 80% της μπαταρίας τους σε χρόνο μικρότερο της μίας ώρας.
- Τα ηλεκτρικά οχήματα παρουσιάζουν υψηλές δαπάνες κατασκευής, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την υψηλή τιμή πώλησής τους. Η χαμηλή ζήτηση, που προκαλείται από τα χαμηλά ποσοστά διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων μέχρι σήμερα, όπως είναι λογικό οδηγεί στην διατήρηση σε υψηλά επίπεδα της τιμής τους.
- Ο όγκος και το βάρος των μπαταριών ενός ηλεκτρικού οχήματος είναι ένα ακόμα κομμάτι που θα πρέπει να βελτιωθεί τα επόμενα χρόνια, καθώς οι συστοιχίες μπαταριών είναι βαριές και καταλαμβάνουν σημαντικό χώρο στο όχημα. Ακόμα στον όγκο των συσσωρευτών, πρέπει να προστεθεί και ο όγκος των εγκατεστημένων συστημάτων ασφαλείας που αφορούν την προστασία από την εκδήλωση φωτιάς στις μπαταρίες είτε λόγω βραχυκυκλώματος, είτε λόγω υπερθέρμανσης.







## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΔΥΑΔΙΚΟΣ ΓΕΝΕΤΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ**

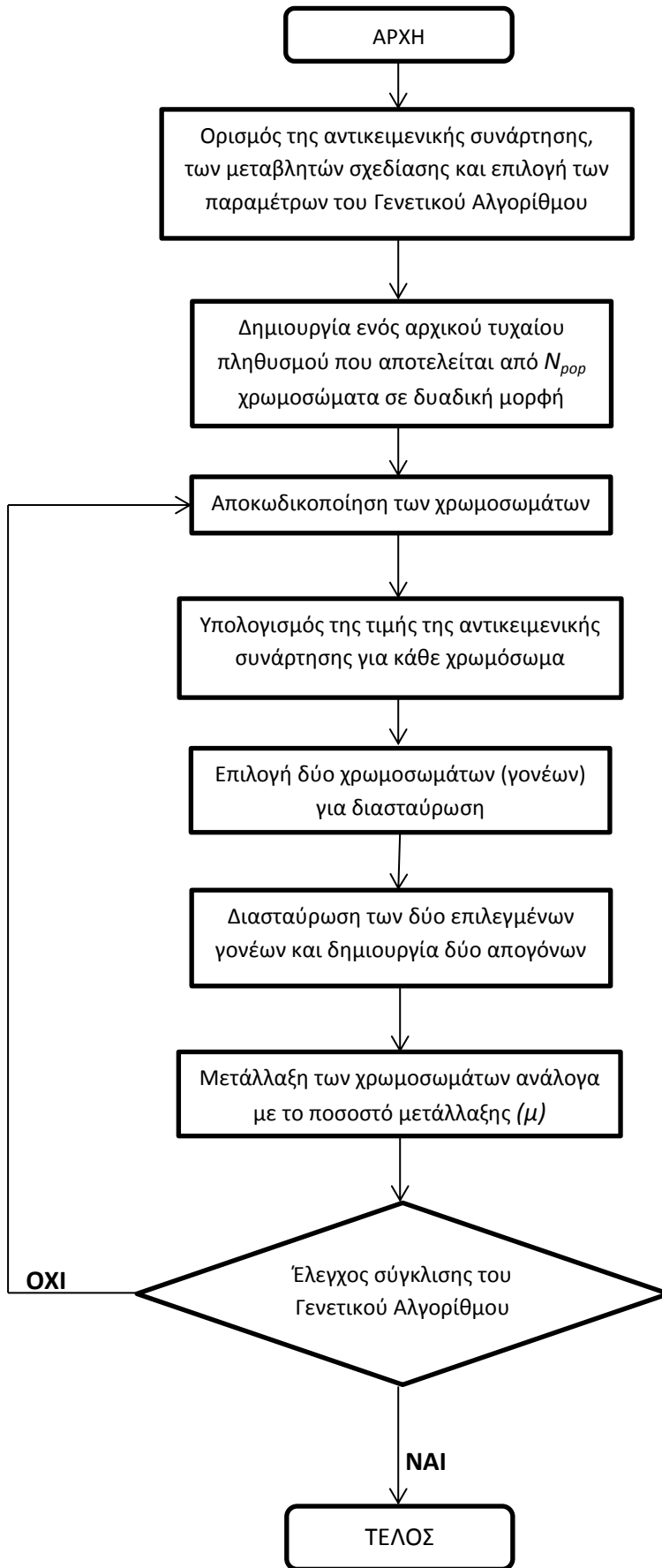
### **2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Από τη δεκαετία του '50 αλλά κατά κύριο λόγο τη δεκαετία του '60 η επιστημονική κοινότητα ασχολήθηκε με την προσπάθεια χρησιμοποίησης της διαδικασίας της εξέλιξης στη φύση, ως εργαλείο βελτιστοποίησης κάποιων προβλημάτων. Ο Γενετικός Αλγόριθμος (Genetic Algorithm - ΓΑ) είναι μια τεχνική βελτιστοποίησης που στηρίζεται στις αρχές της γενετικής και της φυσικής εξέλιξης. Ουσιαστικά τη δεκαετία του '80 ξεκίνησε η μελέτη του Γενετικού Αλγορίθμου, καθώς η μέθοδος αναπτύχθηκε μέσα από το βιβλίο του John Holland: "Adaptation in Natural and Artificial" (1975). Το 1989 η μέθοδος αυτή δημοσιεύθηκε από τον μαθητή του Holland, David Goldberg, που τη χρησιμοποίησε στη διατριβή του, η οποία αφορούσε τον έλεγχο της μεταφοράς πετρελαίου μέσω αγωγών. Σκοπός του Γενετικού Αλγορίθμου είναι να μεγιστοποιήσει το κέρδος (ή αντίστοιχα, να ελαχιστοποιήσει τη συνάρτηση κόστους), αποτέλεσμα που επιτυγχάνεται μέσα από την εξέλιξη ενός πληθυσμού από πολλά άτομα, σύμφωνα με συγκεκριμένους κανόνες επιλογής. Ορισμένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του Γενετικού Αλγορίθμου, τα οποία τον κάνουν κατάλληλο για προβλήματα στα οποία οι παραδοσιακές μέθοδοι βελτιστοποίησης αποτυγχάνουν, είναι τα εξής:

- Μπορεί να επιλύσει δύσκολα προβλήματα γρήγορα και αξιόπιστα,
- Είναι μια μέθοδος που κάνει ταυτόχρονα εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης και εκμετάλλευση της ήδη επεξεργασμένης πληροφορίας,
- Παρέχει ένα σύνολο από βέλτιστες λύσεις και όχι μόνο μια βέλτιστη λύση,
- Μπορεί εύκολα να συνεργαστεί με τα υπάρχοντα μοντέλα και συστήματα,
- Μπορεί να δημιουργήσει μια κωδικοποιημένη μορφή των μεταβλητών, έτσι ώστε η βελτιστοποίηση να γίνεται με τις κωδικοποιημένες μεταβλητές
- Εφαρμόζεται σε πολύ περισσότερα πεδία από κάθε άλλη μέθοδο βελτιστοποίησης,
- Δεν απαιτεί περιορισμούς στις συναρτήσεις που επεξεργάζεται (για παράδειγμα, δεν απαιτεί η αντικειμενική συνάρτηση να είναι παραγωγίσιμη), και
- Έχει από τη φύση του το στοιχείο του παραλληλισμού.

### **2.2 ΒΑΣΙΚΑ ΜΕΡΗ ΤΟΥ ΔΥΑΔΙΚΟΥ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ**

Στο παρακάτω διάγραμμα ροής παρουσιάζονται τα βασικά στάδια του Γενετικού Αλγορίθμου και κάθε ένα από αυτά αναλύεται εκτενέστερα στις επόμενες ενότητες.



Σχήμα 2.1: Διάγραμμα ροής Δυαδικού Γενετικού Αλγορίθμου

Όπως όλοι οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης, έτσι και ο γενετικός ξεκινάει με τον ορισμό της αντικειμενικής συνάρτησης, των μεταβλητών σχεδίασής του και την επιλογή των τιμών των παραμέτρων του. Επίσης τερματίζεται πραγματοποιώντας τον έλεγχο σύγκλισής του, όπως αντιστοίχως συμβαίνει και με κάθε άλλο αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Αυτό όμως που διαφοροποιεί το Γενετικό Αλγόριθμο, είναι τα ενδιάμεσα στάδια από τα οποία αποτελείται.

### 2.2.1 Επιλογή των μεταβλητών σχεδίασης της αντικειμενικής συνάρτησης

Ένα χρωμόσωμα αποτελείται από όλες εκείνες τις μεταβλητές σχεδίασης του εκάστοτε προβλήματος. Μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης παράγεται μια τιμή, η οποία υπολογίζεται αφότου εισάγουμε τις μεταβλητές σχεδίασης στη συνάρτηση αυτή. Μια αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να έχει τη μορφή μιας μαθηματικής συνάρτησης, ενός πειράματος ή ενός παιχνιδιού. Ο σκοπός του Γενετικού Αλγορίθμου είναι η βελτιστοποίηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, μέσα από την εύρεση των καταλληλότερων τιμών των μεταβλητών εισόδου.

Όπως βλέπουμε και στο Σχήμα 2.1 ο Γενετικός Αλγόριθμος ξεκινά με τη δημιουργία ενός πληθυσμού που αποτελείται από  $N_{pop}$  χρωμοσώματα. Αν το κάθε χρωμόσωμα αποτελείται από  $N_{var}$  μεταβλητές σχεδίασης ( $p_1, p_2, \dots, p_{Nvar}$ ) τότε γράφεται ως διάνυσμα γραμμής μεγέθους  $N_{var}$ :

$$\text{Χρωμόσωμα} = [p_1, p_2, p_3, \dots, p_{Nvar}]$$

Για παράδειγμα, αν αναζητάμε το μέγιστο υψόμετρο σε έναν τοπογραφικό χάρτη, χρειαζόμαστε μια αντικειμενική συνάρτηση με μεταβλητές εισόδου το γεωγραφικό μήκος ( $p_1$ ) και το γεωγραφικό πλάτος ( $p_2$ ) οπότε το χρωμόσωμα σε αυτή την περίπτωση γράφεται ως διάνυσμα γραμμής μεγέθους  $N_{var} = 2$ :

$$\text{Χρωμόσωμα} = [p_1, p_2]$$

Επίσης σημαντικό ρόλο παίζει το κόστος του κάθε χρωμοσώματος, το οποίο υπολογίζεται μέσα από την αντικειμενική συνάρτηση  $F$ , η οποία είναι συνάρτηση των μεταβλητών σχεδίασης  $p_1, p_2, \dots, p_{Nvar}$  και γράφεται ως εξής:

$$\text{κόστος} = F(\text{χρωμοσώματος}) = F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_{Nvar})$$

Καθώς προσπαθούμε να βρούμε την κορυφή μιας οροσειράς, η αντικειμενική συνάρτηση γράφεται ως η τιμή του υψομέτρου αλλά με αρνητικό πρόσημο, έτσι ώστε να έχουμε τη μορφή ενός αλγορίθμου ελαχιστοποίησης:

$$\text{κόστος} = F(p_1, p_2) = - [\text{υψόμετρο στο } (p_1, p_2)]$$

Συχνά η αντικειμενική συνάρτηση είναι αρκετά περίπλοκη, οπότε ο χρήστης πρέπει να αποφασίσει ποιές μεταβλητές σχεδίασης του προβλήματος είναι οι πιο σημαντικές. Αν χρησιμοποιηθούν πάρα πολλές μεταβλητές, τότε ο Γενετικός Αλγόριθμος μπορεί να οδηγηθεί σε τέλμα. Μερικές φορές η κατάλληλη επιλογή και ο σωστός αριθμός των μεταβλητών προέρχεται από την εμπειρία του χρήστη ή από κάποιες δοκιμαστικές βελτιστοποιήσεις που πραγματοποιεί εκ των προτέρων.

## 2.2.2 Αποκωδικοποίηση των μεταβλητών σχεδίασης των χρωμοσωμάτων

Δεδομένου ότι στον δυαδικό Γενετικό Αλγόριθμο οι τιμές των μεταβλητών αναπαρίστανται σε δυαδική μορφή (0 ή 1), θα πρέπει να υπάρχει ένας τρόπος μετατροπής των δυαδικών τιμών σε δεκαδικές, καθώς συνήθως η αντικειμενική συνάρτηση χρησιμοποιεί δεκαδικές τιμές.

Έστω η φραγμένη μεταβλητή  $p$ , με  $p_{min} \leq p \leq p_{max}$ . Στην περίπτωση που η δυαδική μορφή της μεταβλητής  $p$  αποτελείται από  $N$  bits, τότε η δεκαδική της μορφή θα υπολογίζεται από τη σχέση :

$$p = p_{min} + (p_{dec} - x_{min}) * \frac{(p_{max} - p_{min})}{(x_{max} - x_{min})} \quad (2.1)$$

Όπου:

$p_{min}$  : το κατώτερο όριο της μεταβλητής  $p$

$p_{max}$  : το ανώτερο όριο της μεταβλητής  $p$

$x_{min}$  : ο κατώτερος δεκαδικός αριθμός που μπορεί να προκύψει από το δυαδικό των  $N$  bits

$x_{max}$  : ο ανώτερος δεκαδικός αριθμός που μπορεί να προκύψει από το δυαδικό των  $N$  bits

$p_{dec}$  : η δεκαδική αναπαράσταση της αντίστοιχης δυαδικής μορφής της μεταβλητής  $p$

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Έστω ότι η δυαδική μορφή της μεταβλητής  $p$  αποτελείται από  $N=8$  bits και είναι φραγμένη μεταξύ των τιμών  $-30$  και  $30$  (δηλαδή  $-30 \leq p \leq 30$ ). Σε αυτή την περίπτωση το  $x_{min}$  και το  $x_{max}$  θα υπολογίζονται ως εξής :

$$x_{min} = (00000000)_{(2)} = 0*2^0 + 0*2^1 + 0*2^2 + 0*2^3 + 0*2^4 + 0*2^5 + 0*2^6 + 0*2^7 = 0 \quad (2.2)$$

$$x_{max} = (11111111)_{(2)} = 1*2^0 + 1*2^1 + 1*2^2 + 1*2^3 + 1*2^4 + 1*2^5 + 1*2^6 + 1*2^7 = 255 \quad (2.3)$$

Αν η κωδικοποιημένη δυαδική μορφή της μεταβλητής είναι:  $p = (10101110)_{(2)}$  τότε η αντίστοιχη δεκαδική της μορφή θα είναι:

$$p_{dec} = 0*2^0 + 1*2^1 + 1*2^2 + 1*2^3 + 0*2^4 + 1*2^5 + 0*2^6 + 1*2^7 = 174 \quad (2.4)$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές που έχουν υπολογιστεί από τις Σχέσεις (2.2), (2.3) και (2.4) στην Σχέση (2.1) προκύπτει ότι η αποκωδικοποιημένη δεκαδική μορφή της μεταβλητής  $p$  είναι:

$$p = -30 + (174 - 0) * \frac{(30+30)}{(255-0)} = 10.94118$$

### 2.2.3 Πληθυσμός

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 2.1 ο Γενετικός Αλγόριθμος ξεκινά με τη δημιουργία ενός αρχικού τυχαίου πληθυσμού που αποτελείται από  $N_{pop}$  χρωμοσώματα σε δυαδική μορφή. Αυτός ο αρχικός πληθυσμός απεικονίζεται σε έναν πίνακα, διαστάσεων  $N_{pop} \times N_{bits}$ , του οποίου τα στοιχεία είναι 0 ή 1 (όπου  $N_{bits}$ , είναι ο αριθμός των bits από τα οποία αποτελείται το κάθε χρωμόσωμα). Για να γεμίσουμε με τυχαίο τρόπο τον πίνακα αυτόν χρησιμοποιούμε την εντολή:

`pop=round(rand(Npop, Nbits));`

όπου η συνάρτηση `rand(Npop, Nbits)` δημιουργεί έναν  $N_{pop} \times N_{bits}$  πίνακα ομοιόμορφων τυχαίων αριθμών με τιμές ανάμεσα στο 0 και το 1. Η συνάρτηση `round` στρογγυλοποιεί τους αριθμούς αυτούς στον πιο κοντινό ακέραιο αριθμό, που στην περίπτωση μας είναι το 0 ή το 1. Έτσι κάθε γραμμή του πίνακα `pop` αποτελεί ένα χρωμόσωμα. Τα χρωμοσώματα αντιστοιχούν σε διακριτές τιμές του γεωγραφικού μήκους και πλάτους. Στη συνέχεια οι μεταβλητές αντικαθιστώνται στην αντικειμενική συνάρτηση και έτσι υπολογίζεται το κόστος του κάθε χρωμοσώματος. Στον Πίνακα 2.1 φαίνεται το παράδειγμα ενός αρχικού πληθυσμού  $N_{pop}=8$  τυχαίων χρωμοσωμάτων και το αντίστοιχο κόστος για καθένα από αυτά. Στην περίπτωση αυτή, το κάθε χρωμόσωμα είναι μεγέθους  $N_{bits}=14$  και αποτελείται από 2 γονείς των 7 bits ο καθένας. Το συγκεκριμένο πρόβλημα αφορά την εύρεση του γεωγραφικού μήκους και πλάτους του σημείου με το μεγαλύτερο υψόμετρο μιας οροσειράς. Όπως αντιλαμβανόμαστε

πρόκειται για ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης, το οποίο θα μετατρέψουμε σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης πολλαπλασιάζοντας την αντικειμενική συνάρτηση με -1.

**Πίνακας 2.1:** Αρχικός πληθυσμός 8 τυχαίων χρωμοσωμάτων, καθώς και οι αντίστοιχες τιμές της αντικειμενικής τους συνάρτησης

Χρωμόσωμα	Κόστος
00101111000110	-12359
11100101100100	-11872
00110010001100	-13477
00101111001000	-12363
11001111111011	-11631
01000101111011	-12097
11101100000001	-12588
01001101110011	-11860

#### 2.2.4 Επιλογή των χρωμοσωμάτων που θα παραμείνουν για διασταύρωση

Η επιβίωση των ισχυρότερων χρωμοσωμάτων έχει ως επακόλουθο την απόρριψη των χρωμοσωμάτων με τις μεγαλύτερες τιμές αντικειμενικής συνάρτησης. Αρχικά τα  $N_{pop}$  χρωμοσώματα ταξινομούνται κατά αύξουσα σειρά, δηλαδή από αυτό με το χαμηλότερο κόστος προς αυτό με το υψηλότερο, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.2.

**Πίνακας 2.2:** Ταξινόμηση αρχικού πληθυσμού κατά αύξουσα σειρά κόστους των χρωμοσωμάτων

Χρωμόσωμα	Κόστος
00110010001100	-13477
11101100000001	-12588
00101111001000	-12363
00101111000110	-12359
01000101111011	-12097
11100101100100	-11872
01001101110011	-11860
11001111111011	-11631

Στη συνέχεια από τα χρωμοσώματα του Πίνακα 2.2, αυτά με τα χαμηλότερα κόστη κρατιούνται ώστε να χρησιμοποιηθούν στη διασταύρωση ενώ αυτά με τα μεγαλύτερα κόστη διαγράφονται. Το ποσοστό του πληθυσμού που διατηρείται από τον χρήστη για το επόμενο στάδιο του Γενετικού Αλγορίθμου που είναι η διασταύρωση, ονομάζεται  $X_{rate}$  και είναι ένα κλάσμα του συνολικού αριθμού των χρωμοσωμάτων  $N_{pop}$ . Ο αριθμός των χρωμοσωμάτων που διατηρείται από κάθε γενιά για διασταύρωση δίνεται από τη σχέση:

$$N_{keep} = X_{rate} * N_{pop}$$

Αντίστοιχα ο αριθμός των χρωμοσωμάτων που θα διαγραφούν από τον αρχικό πληθυσμό, ώστε τη θέση τους να πάρουν τα νέα παιδιά που θα δημιουργηθούν θα είναι:

$$N_{del} = N_{pop} - N_{keep}$$

Ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνεται η απόφαση σχετικά με το πόσα χρωμοσώματα θα διατηρηθούν είναι κάπως αυθαίρετος. Επιτρέποντας μόνο σε λίγα χρωμοσώματα να επιβιώσουν στην επόμενη γενιά περιορίζουμε τους διαθέσιμους γονείς για τους απογόνους. Αντιθέτως αν διατηρηθούν πάρα πολλά χρωμοσώματα, δίνεται η ευκαιρία σε αυτά με τις μεγαλύτερες τιμές κόστους (κακή απόδοση) να συνεισφέρουν τα χαρακτηριστικά τους στην επόμενη γενιά. Τις περισσότερες φορές διατηρούμε τα μισά από τα αρχικά χρωμοσώματα για διασταύρωση (δηλαδή έχουμε  $X_{rate} = 0.5$ ).

Στο παράδειγμά μας, όπου ο αρχικός μας πληθυσμός αποτελείται από  $N_{pop} = 8$ , αν θεωρήσουμε ότι επιλέγουμε  $X_{rate} = 0.5$ , τότε μόνο τα 4 πρώτα χρωμοσώματα θα διατηρηθούν για το επόμενο στάδιο της διασταύρωσης, καθώς ισχύει  $N_{keep} = 4$ . Έτσι αυτά τα 4 χρωμοσώματα με το χαμηλότερο κόστος μεταφέρονται στην επόμενη γενιά, οπότε αποτελούν πιθανούς γονείς. Τα αποτελέσματα αυτής της φυσικής επιλογής των καλύτερων χρωμοσωμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3.

**Πίνακας 2.3:** Τα χρωμοσώματα με το χαμηλότερο κόστος που διατηρούνται στην επόμενη γενιά, αν ισχύει  $X_{rate} = 0.5$

Χρωμοσώματα	Κόστος
00110010001100	-13477
11101100000001	-12588
00101111001000	-12363
00101111000110	-12359

### 2.2.5 Μέθοδος επιλογής γονέων

Ύστερα από την επιλογή των  $N_{keep}$  χρωμοσωμάτων που θα διατηρηθούν και στην επόμενη γενιά, δύο από αυτά τα χρωμοσώματα επιλέγονται να διασταυρωθούν, έτσι ώστε να δημιουργηθούν δύο νέοι απόγονοι. Η διασταύρωση πραγματοποιείται μέχρις ότου δημιουργηθούν  $(N_{pop} - N_{keep})$  απόγονοι, οι οποίοι θα πάρουν τη θέση των απορριφθέντων χρωμοσωμάτων. Η διασταύρωση των χρωμοσωμάτων σε ένα Γενετικό Αλγόριθμο, μπορεί να παρουσιάσει το ίδιο ενδιαφέρον και την ίδια ποικιλία με εκείνη που πραγματοποιείται μεταξύ των μελών του ζωικού βασιλείου.

Η μέθοδος με την οποία πραγματοποιείται η επιλογή των δύο γονέων ονομάζεται σταθμισμένη τυχαία διασταύρωση (weighted random pairing). Στη συγκεκριμένη μέθοδο η πιθανότητα επιλογής κάποιου χρωμοσώματος για διασταύρωση είναι αντιστρόφως ανάλογη με το κόστος του. Έτσι λοιπόν, το χρωμόσωμα με το χαμηλότερο κόστος έχει τις περισσότερες πιθανότητες να επιλεγθεί για διασταύρωση, ενώ το χρωμόσωμα με υψηλότερο κόστος έχει τις λιγότερες πιθανότητες να επιλεγθεί. Ένας τυχαίος αριθμός καθορίζει ποιο από τα χρωμοσώματα θα επιλεγθεί. Για ένα χρωμόσωμα  $n$  βαθμού, η πιθανότητά του να επιλεγθεί για διασταύρωση δίνεται από τη σχέση:

$$P_n = \frac{N_{keep} - n + 1}{\sum_{n=1}^{N_{keep}} n}$$

Επομένως στο παράδειγμά μας, στο οποίο έχουμε θεωρήσει ότι  $N_{keep}=4$ , η πιθανότητα  $P_n$  του χρωμοσώματος  $n$  βαθμού δίνεται από τη σχέση:

$$P_n = \frac{4 - n + 1}{\sum_{n=1}^4 n} = \frac{5 - n}{1 + 2 + 3 + 4} = \frac{5 - n}{10}$$

Στον Πίνακα 2.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα  $N_{keep}=4$  χρωμοσώματα του παραδείγματός μας. Για την επιλογή του χρωμοσώματος που θα διασταυρωθεί χρησιμοποιείται η αθροιστική πιθανότητα, η οποία απεικονίζεται στην τέταρτη στήλη του πίνακα 2.4. Έτσι, δημιουργείται ένας τυχαίος αριθμός με τιμή μεταξύ του μηδέν και του ένα. Ξεκινώντας από την αρχή του πίνακα, το πρώτο χρωμόσωμα του οποίου η αθροιστική πιθανότητα έχει μεγαλύτερη τιμή από τον τυχαίο αριθμό που προαναφέραμε, επιλέγεται για διασταύρωση. Αν για παράδειγμα, αυτός ο τυχαίος αριθμός έχει τιμή  $r=0.676$ , τότε εφόσον ισχύει  $0.4 \leq r \leq 0.7$ , επιλέγεται το δεύτερο χρωμόσωμα του Πίνακα 2.4. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι τη στιγμή που θα επιλεγθούν τόσα χρωμοσώματα όσα απαιτούνται για να δημιουργηθούν ( $N_{pop} - N_{keep}$ ) νέοι απόγονοι. Αν ένα χρωμόσωμα διασταυρωθεί με τον εαυτό του, τότε οι δύο απόγονοι που προκύπτουν έχουν πανομοιότυπα χαρακτηριστικά. Σε περιπτώσεις μικρών πληθυσμών υπάρχει ακόμα μεγαλύτερη πιθανότητα διασταύρωσης ενός χρωμοσώματος με τον εαυτό του.

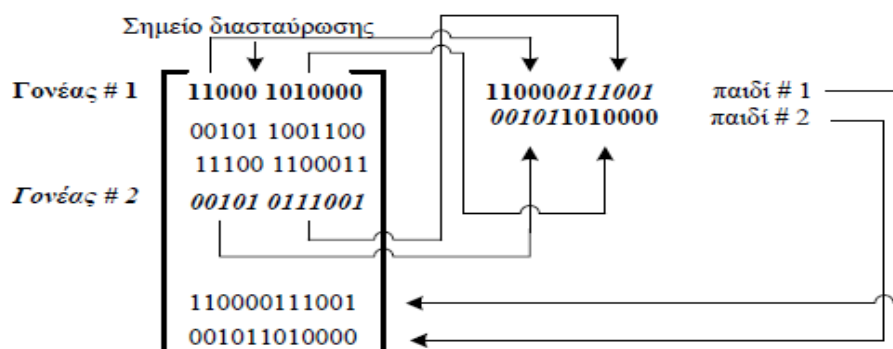
**Πίνακας 2.4:** Πιθανότητα επιλογής ενός χρωμοσώματος ανάλογα με τον βαθμό του,  $n$

Βαθμός $n$	Χρωμόσωμα	$P_n$	$\sum_{i=1}^n P_i$
1	00110010001100	0.4	0.4
2	11101100000001	0.3	0.7
3	00101111001000	0.2	0.9
4	00101111000110	0.1	1.0



## 2.2.6 Διασταύρωση

Διασταύρωση είναι η δημιουργία ενός ή περισσότερων απογόνων (παιδιών) από τους γονείς που έχουν επιλεγθεί με τον τρόπο που περιγράψαμε στην ενότητα 2.2.4. Η πιο συνηθισμένη μορφή διασταύρωσης περιλαμβάνει το ζευγάρι δύο γονιών, που έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία δύο νέων απογόνων. Η διαδικασία με την οποία πραγματοποιείται το ζευγάρι, ονομάζεται διασταύρωση μονού σημείου (single-point crossover), βασίζεται στη τυχαία επιλογή ενός σημείου διασταύρωσης ανάμεσα στο πρώτο και το τελευταίο bit ενός χρωμοσώματος του γονέα και παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2 :



**Σχήμα 2.2:** Δημιουργία δύο απογόνων μέσα από την διασταύρωση δύο γονέων. Τα παιδιά αυτά τοποθετούνται στο νέο πληθυσμό.

Αρχικά, ο γονέας<sub>1</sub> περνάει το δυαδικό του κώδικα που βρίσκεται αριστερά από το σημείο διασταύρωσης στο αντίστοιχο αριστερό μέρος του παιδιού<sub>1</sub>. Ομοίως, ο γονέας<sub>2</sub> περνάει το δυαδικό του κώδικα που βρίσκεται αριστερά από το ίδιο σημείο διασταύρωσης στο αντίστοιχο αριστερό μέρος του παιδιού<sub>2</sub>. Στη συνέχεια, ο δυαδικός κώδικας του γονέα<sub>1</sub> που βρίσκεται δεξιά από το σημείο διασταύρωσης περνάει στο δεξιό μέρος του παιδιού<sub>2</sub> και αντίστοιχα ο δυαδικός κώδικας του γονέα<sub>2</sub> που βρίσκεται δεξιά από το ίδιο σημείο διασταύρωσης περνάει στο παιδί<sub>1</sub>. Συνεπώς ένας απόγονος περιέχει τμήματα από τον δυαδικό κώδικα και των δύο γονέων που τον δημιούργησαν. Τη στιγμή που οι γονείς έχουν δημιουργήσει ένα σύνολο από  $(N_{pop} - N_{keep})$  απογόνους, ο πληθυσμός του προβλήματος έχει επανέλθει στο αρχικό  $N_{pop}$  πλήθος χρωμοσωμάτων. Στον Πίνακα 2.5 εμφανίζεται η επιλογή των γονέων, καθώς και η δημιουργία των απογόνων για το παράδειγμα που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες παραγράφους του Κεφαλαίου 2. Το πρώτο ζεύγος γονέων αποτελούν τα χρωμοσώματα 3 και 2 και ως σημείο διασταύρωσης έχει επιλεγθεί αυτό ανάμεσα στα bits 5 και 6. Ως δεύτερο ζεύγος γονέων έχουν επιλεγθεί τα χρωμοσώματα 3 και 4 και αυτή τη φορά το σημείο διασταύρωσης βρίσκεται ανάμεσα στα bits 10 και 11. Στον τελευταίο πίνακα αυτής της υποενότητας παρουσιάζεται ο πληθυσμός που προκύπτει ύστερα από την ολοκλήρωση

της διασταύρωσης, ο οποίος στη συνέχεια θα χρησιμοποιηθεί στο στάδιο της μετάλλαξης.

**Πίνακας 2.5:** Διασταύρωση με τη μέθοδο του μονού σημείου

Χρωμόσωμα	Οικογένεια	Διαδικός κώδικας
3	γονέας <sub>1</sub>	00101111001000
2	γονέα <sub>2</sub>	11101100000001
5	παιδί <sub>1</sub>	00101100000001
6	παιδί <sub>2</sub>	11101111001000
3	γονέας <sub>3</sub>	00101111001000
4	γονέας <sub>4</sub>	00101111000110
7	παιδί <sub>3</sub>	00101111000110
8	παιδί <sub>4</sub>	00101111001000

**Πίνακας 2.6:** Πληθυσμός που προκύπτει μετά την διασταύρωση

Χρωμόσωμα	Τρόπος επιλογής
00110010001100	Το χρωμόσωμα του αρχικού πληθυσμού με το χαμηλότερο κόστος
11101100000001	Το χρωμόσωμα του αρχικού πληθυσμού με το δεύτερο χαμηλότερο κόστος
00101111001000	Το χρωμόσωμα του αρχικού πληθυσμού με το τρίτο χαμηλότερο κόστος
00101111000110	Το χρωμόσωμα του αρχικού πληθυσμού με το τέταρτο χαμηλότερο κόστος
00101100000001	Το πρώτο παιδί που προέκυψε από τη διασταύρωση των χρωμοσωμάτων 3 και 2
11101111001000	Το δεύτερο παιδί που προέκυψε από τη διασταύρωση των χρωμοσωμάτων 3 και 2
00101111000110	Το πρώτο παιδί που προέκυψε από τη διασταύρωση των χρωμοσωμάτων 3 και 4
00101111001000	Το πρώτο παιδί που προέκυψε από τη διασταύρωση των χρωμοσωμάτων 3 και 4

### 2.2.7 Μετάλλαξη

Η μετάλλαξη είναι εκείνο τα σημείο του Γενετικού Αλγορίθμου που είναι υπεύθυνο για την είσοδο νέων πληροφοριών και χαρακτηριστικών στον πληθυσμό του προβλήματος. Οι τυχαίες μεταλλάξεις που πραγματοποιούνται στον πληθυσμό, αλλάζουν ένα συγκεκριμένο ποσοστό των bits των χρωμοσωμάτων που τον αποτελούν. Η μετάλλαξη μονού σημείου, αλλάζει την τιμή ενός bit από 0 σε 1 και το αντίστροφο. Τα

σημεία στα οποία θα πραγματοποιηθεί η μετάλλαξη, επιλέγονται τυχαία από τον  $N_{pop} \times N_{bits}$  πίνακα, ο οποίος περιέχει όλα τα χρωμοσώματα του πληθυσμού σε δυαδική μορφή. Αυξάνοντας τον αριθμό των μεταλλάξεων, αυξάνεται και το εύρος της περιοχής στην οποία αναζητείται η βέλτιστη λύση του αλγορίθμου. Η αύξηση των μεταλλάξεων μπορεί επίσης να οδηγήσει τον Γενετικό Αλγόριθμο σε μια λύση, η οποία δεν θα είναι η προφανής λύση για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη βαρύτητα στον γεγονός πως μεταλλάξεις δεν πραγματοποιούνται κατά την τελευταία επανάληψη του αλγορίθμου. Επίσης δεν επιτρέπεται να πραγματοποιηθεί μετάλλαξη στο χρωμόσωμα της κάθε γενιάς με το μικρότερο κόστος, δηλαδή στο χρωμόσωμα που βρίσκεται στην πρώτη γραμμή του πίνακα που απεικονίζει τον πληθυσμό του προβλήματος, καθώς στον Γενετικό Αλγόριθμο υπάρχει το κριτήριο του ελιτισμού.

Αν θεωρήσουμε ότι το ποσοστό των μεταλλάξεων σε έναν πληθυσμό δίνεται από τον αριθμό  $\mu$ , τότε ο αριθμός των bits που θα μεταλλαχθούν μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\text{Αριθμός μεταλλάξεων} = \mu \times (N_{pop} - 1) \times N_{bits}$$

Στο παράδειγμά μας επιλέγεται να λάβει μέρος στη μετάλλαξη το 20% του πληθυσμού (δηλαδή  $\mu=0.2$ ), εξαιρουμένου όπως προαναφέρθηκε, του χρωμοσώματος με το χαμηλότερο κόστος. Στην περίπτωση αυτή, όπου ισχύει  $N_{pop}=8$  και  $N_{bits}=14$ , ο αριθμός των bits που θα μεταλλαχθούν θα δίνεται από τη σχέση:

$$\text{Αριθμός μεταλλάξεων} = 0.2 \times (8 - 1) \times 14 = 19.6 \approx 20$$

Επομένως δημιουργούνται 20 τυχαία ζεύγη ακεραίων αριθμών που αναφέρονται αντίστοιχα στις γραμμές και στις στήλες των bits που έχουν επιλεγθεί για μετάλλαξη, τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.7.

**Πίνακας 2.7:** Παρουσίαση bits που έχουν επιλεγθεί για μετάλλαξη

Γραμμή	5	7	6	3	6	6	8	4	6	7	3	4	7	4	8	6	4	6	7	
Στήλη	6	12	5	11	13	5	5	6	4	11	10	6	13	3	4	11	5	14	10	5

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.7 το πρώτο τυχαίο ζεύγος ακεραίων είναι το (5,6), επομένως το πρώτο bit που θα μεταλλαχθεί είναι αυτό που στον πίνακα με τη δυαδική μορφή των χρωμοσωμάτων του πληθυσμού μετά την πραγματοποίηση της διασταύρωσης, βρίσκεται στην 5<sup>η</sup> γραμμή και 6<sup>η</sup> στήλη. Όπως φαίνεται στον πίνακα 2.6 το χρωμόσωμα της 5<sup>ης</sup> γραμμής είναι το 00101100000001, οπότε το 6<sup>ο</sup> bit είναι αυτό που θα μεταλλαχθεί και η τιμή του θα αλλάξει από 1 σε 0:

$$00101\underline{1}00000001 \longrightarrow 00101\underline{0}00000001$$

Ακριβώς η ίδια διαδικασία θα πραγματοποιηθεί και για τα υπόλοιπα 19 bits που έχουν επιλεχθεί για μετάλλαξη, των οποίων η αντίστοιχη γραμμή και στήλη φαίνονται στον Πίνακα 2.7. Σημαντικό είναι να αναφέρουμε και πάλι ότι το χρωμόσωμα της κάθε γενιάς με το χαμηλότερο κόστος, διατηρείται αναλλοίωτο και δεν μεταλλάσσεται. Αν κοιτάξουμε προσεκτικά τον Πίνακα 2.8, όπου απεικονίζονται τα χρωμοσώματα μετά τη μετάλλαξη, θα παρατηρήσουμε ότι μόνο 18 bits έχουν μεταλλαχθεί και όχι 20. Αυτό συμβαίνει διότι το ζεύγος γραμμής-στήλης (6,5) επιλέχθηκε τυχαία τρεις φορές, οπότε η δυαδική μορφή του χρωμοσώματος της 6<sup>ης</sup> γραμμής παρέμεινε τελικά αναλλοίωτη. Αναλυτικότερα, το ίδιο bit άλλαξε τιμή από 1 σε 0, στη συνέχεια ξανάγινε 1 και τελικά πήρε την τιμή 0. Στον Πίνακα 2.8 παρουσιάζεται η δυαδική μορφή του πληθυσμού πριν και μετά την μετάλλαξη, καθώς και η νέα τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης των χρωμοσωμάτων μετά την μετάλλαξη.

**Πίνακας 2.8:** Μεταλλάσσοντας τον πληθυσμό

Πληθυσμός μετά τη μετάλλαξη	Πληθυσμός μετά τη διασταύρωση	Νέο κόστος μετά τη διασταύρωση
00110010001100	00110010001100	-13477
11101100000001	11101100000001	-12588
0010111100 <u>1</u> 000	001011110 <u>1</u> 0000	-12415
00 <u>1</u> 01 <u>1</u> 1100011 <u>0</u>	00 <u>0</u> 01 <u>1</u> 1100011 <u>1</u>	-13482
00101 <u>1</u> 000000001	00101 <u>0</u> 000000001	-13171
111 <u>0</u> 111100 <u>1</u> 000	111 <u>1</u> 01110 <u>1</u> 00 <u>1</u> 0	-12146
0010 <u>1</u> 111000 <u>1</u> 10	0010 <u>0</u> 11100 <u>1</u> 000	-12716
0010 <u>1</u> 111001000	001 <u>1</u> 0111001000	-12103

### 2.2.8 Επόμενες γενιές

Ύστερα από την πραγματοποίηση των μεταλλάξεων υπολογίζονται οι νέες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης για τον πληθυσμό, όπως φαίνεται στην τρίτη στήλη του πίνακα 2.8. Στη συνέχεια ο νέος πληθυσμός ταξινομείται κατά αύξουσα σειρά κόστους των χρωμοσωμάτων του, όπως φαίνεται στον πίνακα 2.9:

**Πίνακας 2.9:** Ταξινόμηση πληθυσμού που χρησιμοποιείται στην αρχή της δεύτερης γενιάς

Χρωμόσωμα	Κόστος
00001011000111	-13482
00110010001100	-13477
00101000000001	-13171
00100111001000	-12716
11101100000001	-12588
00101111010000	-12415
11110111010010	-12146
00110111001000	-12103

Η διαδικασία που περιγράφηκε, επαναλαμβάνεται με τον ίδιο τρόπο σε κάθε γενιά του Γενετικού Αλγορίθμου. Στο παράδειγμά μας, ο αρχικός πληθυσμός της επόμενης γενιάς (δεύτερης κατά σειρά), παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.9. Αρχικά, τα τέσσερα τελευταία χρωμοσώματα διαγράφονται και την θέση τους παίρνουν οι τέσσερις απόγονοι που δημιουργούνται από τους 4 πρώτους γονείς του Πίνακα 2.9. Στη συνέχεια, επιλέγονται και πάλι είκοσι τυχαία bits για μετάλλαξη από τα επτά χρωμοσώματα του πίνακα που προκύπτει μετά τη διασταύρωση, εξαιρουμένου του πρώτου χρωμοσώματος. Στους επόμενους τρεις πίνακες παρουσιάζεται ο πληθυσμός στο τέλος της δεύτερης γενιάς μετά τις διασταυρώσεις και τις μεταλλάξεις που υφίσταται, ο ταξινομημένος πληθυσμός στην αρχή της τρίτης γενιάς, καθώς και ο ταξινομημένος πληθυσμός στην αρχή της τέταρτης γενιάς.

**Πίνακας 2.10:** Πληθυσμός στο τέλος της δεύτερης γενιάς, ύστερα από τις διασταυρώσεις και τις μεταλλάξεις

Χρωμόσωμα	Κόστος
00001011000111	-13482
00110000001000	-13332
01101001000001	-12923
01100111011000	-12128
10100111000001	-12961
10100010001000	-13237
00110100001110	-13564
00100010000001	-13246

**Πίνακας 2.11:** Ταξινομημένος πληθυσμός στην αρχή της τρίτης γενιάς, με αύξουσα σειρά κόστους

Χρωμόσωμα	Κόστος
00110100001110	-13564
00001011000111	-13482
00110000001000	-13332
00100010000001	-13246
10100010001000	-13237
10100111000001	-12961
01101001000001	-12923
01100111011000	-12128

**Πίνακας 2.12:** Ταξινομημένος πληθυσμός στην αρχή της τέταρτης γενιάς, με αύξουσα σειρά κόστους

<b>Χρωμόσωμα</b>	<b>Κόστος</b>
00100010100001	-14199
00110100001110	-13564
00010000001110	-13542
00100000000001	-13275
00100011010000	-12840
00001111111111	-12739
11001011000111	-12614
01111111011111	-12192

### 2.2.9 Σύγκλιση Γενετικού Αλγορίθμου

Ο Γενετικός Αλγόριθμος παρουσιάζει σύγκλιση είτε όταν η καλύτερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης δεν βελτιώνεται για ένα συγκεκριμένο αριθμό συνεχόμενων γενεών, είτε όταν ο αριθμός των γενεών που έχουν δημιουργηθεί φτάσει σε ένα συγκεκριμένο όριο που έχει θέσει εκ των προτέρων ο χρήστης.

Όσον αφορά το παράδειγμά μας, στον τελικό πληθυσμό του προβλήματος, ύστερα και από τη σύγκλιση του Γενετικού Αλγορίθμου, τέσσερα από τα χρωμοσώματα βρίσκονται πολύ κοντά στη βέλτιστη λύση του προβλήματος.







## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΚΑΙ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ MATPOWER**

### **3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Το MATPOWER αποτελεί ένα πακέτο λογισμικού ανοικτού κώδικα MATLAB, που λειτουργεί προσομοιώνοντας την ηλεκτρική ενέργεια. Χρησιμοποιείται για την προσομοίωση τόσο της AC και DC Ροής Φορτίου, όσο και της Βέλτιστης Ροής Φορτίου (ΒΡΦ), κυρίως για ερευνητικούς και εκπαιδευτικούς σκοπούς. Το συγκεκριμένο λογισμικό αποτελείται από διάφορους φακέλους-m, οι οποίοι είναι σχεδιασμένοι ώστε να αποδίδουν την όσο το δυνατόν καλύτερη επίδοση, ενώ ταυτοχρόνως χρησιμοποιούν έναν κώδικα ο οποίος είναι εύκολα κατανοητός και προσαρμόσιμος. Όσον αφορά το MATLAB, αποτελεί το ιδανικότερο εργαλείο για επιστημονικούς υπολογισμούς, καθώς συνδυάζει μια γλώσσα υψηλού επιπέδου ιδανική για υπολογισμούς διανυσμάτων και πινάκων, μια πλατφόρμα διασταύρωσης του χρόνου εκτέλεσης στηριζόμενη σε ισχυρές μαθηματικές βιβλιοθήκες, ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης και ένα γραφικό περιβάλλον με εξαιρετικές δυνατότητες απεικόνισης. Το λογισμικό MATPOWER ενώ συχνά χρησιμοποιείται ως ένα εργαλείο προσομοιώσεων για να εκτελείται απλώς ένα στιγμιότυπο του δικτύου όπως ορίζεται μέσα από ένα φάκελο εισόδου, έχει ωστόσο τη δυνατότητα να αποτελέσει και μια πολύτιμη βιβλιοθήκη λειτουργιών για χρήση σε ένα κώδικα που θα δημιουργηθεί από κάποιον ερευνητή, προσαρμοσμένο στην έρευνά του. Σε αυτό το χαμηλότερο επίπεδο, το MATPOWER έχει τη δυνατότητα παροχής εύκολων στη χρήση λειτουργιών για τον υπολογισμό της μεταφοράς ενέργειας και των παραγόντων διανομής της διακοπής λειτουργίας, καθώς επίσης υπολογίζει τις πρώτες και τις δεύτερες παραγώγους των εξισώσεων Ροής Φορτίου. Το MATPOWER εφαρμόζει όλα τα συνηθισμένα μοντέλα μόνιμης κατάστασης που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της Ροής Φορτίου. Τα μοντέλα AC περιγράφονται πρώτα, ενώ στη συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή των μοντέλων DC. Αξίζει να αναφερθεί πως όλα τα μεγέθη των αξιών μετρούνται σε ανά μονάδα τιμές και οι γωνίες των πολύπλοκων μεγεθών εκφράζονται σε ακτίνια.

### **3.2 ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ**

Το πρόβλημα της Ροής Φορτίου περιλαμβάνει επίλυση για το σύνολο των τάσεων και των ροών σε ένα δίκτυο το οποίο αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο μοτίβο φορτίου και παραγωγής. Το λογισμικό MATPOWER εμπεριέχει λύτες για τα προβλήματα της AC και της DC Ροής Φορτίου, που και στις δύο περιπτώσεις περιλαμβάνεται η επίλυση μια σειράς εξισώσεων της μορφής:

$$g(x) = 0$$

Η παραπάνω εξίσωση κατασκευάστηκε εκφράζοντας ένα υποσύνολο της εξίσωσης της κομβικής ισορροπίας της ενέργειας ως συνάρτηση των αγνώστων τιμών τάσης. Όλοι οι λύτες του συγκεκριμένου λογισμικού αξιοποιούν τις ελάχιστες αναφορές του εκάστοτε προβλήματος και αποδίδουν αποτελεσματικά σε πολύ μεγάλα συστήματα.

### 3.2.1 Ροή Φορτίου AC

Αρχικά, στο MATPOWER ένας ζυγός με μία γεννήτρια ορίζεται, κατά συνθήκη, ως ζυγός αναφοράς έτσι ώστε με βάση το συγκεκριμένο ζυγό να ορίζονται οι τιμές των τάσεων, των γωνιών και της ενεργού ισχύος αυτού. Η τιμή της γωνίας της τάσης στο ζυγό αναφοράς είναι γνωστή, αλλά η τιμή της ενεργού ισχύος της γεννήτριας στο ζυγό αυτό είναι άγνωστη ώστε να αποφεύγεται η υπερβολική ανάλυση του προβλήματος. Οι υπόλοιποι ζυγοί με γεννήτριες χαρακτηρίζονται ως ζυγοί PV και οι τιμές της τάσης και της ενεργού ισχύος σε αυτούς θεωρούνται γνωστές. Θεωρώντας δεδομένο πως τα φορτία  $P_d$  και  $Q_d$  έχουν επίσης δοσμένες τιμές, όλοι οι ζυγοί που δεν αποτελούνται από γεννήτριες χαρακτηρίζονται ως PQ ζυγοί με καθορισμένες πλήρως τις ενεργές και άεργες εγχύσεις σε αυτούς. Ακόμα, θεωρείται πως τα μεγέθη  $I_{ref}$ ,  $I_{PV}$  και  $I_{PQ}$  δηλώνουν τα σύνολα των δεικτών αντίστοιχα του ζυγού αναφοράς, των PV ζυγών και των PQ ζυγών. Έτσι, η εξίσωση του ισοζυγίου της ενέργειας χωρίζεται σε δύο μέρη, όπου το ένα αναφέρεται στην ενεργό ισχύ και το άλλο στην άεργο και είναι εκφρασμένα ως συναρτήσεις των μέτρων  $V_m$  και των γωνιών της τάσης  $\theta$ , καθώς και των εγχύσεων της γεννήτριας  $P_g$  και  $Q_g$ .

$$g_P(\theta, V_m, P_g) = P_{bus}(\theta, V_m) + P_d - C_g * P_g = 0$$

$$g_Q(\theta, V_m, Q_g) = Q_{bus}(\theta, V_m) + Q_d - C_g * Q_g = 0$$

Όσον αφορά το πρόβλημα της AC Ροής Φορτίου, η εξίσωση  $g(x)$  σχηματίζεται με τη λήψη της αριστερής πλευράς της εξίσωσης ισοζυγίου της πραγματικής ισχύος για όλους τους υπόλοιπους ζυγούς, εκτός από τον ζυγό αναφοράς. Στην παραπάνω εξίσωση ισορροπίας της αέργου ισχύος για όλους τους ζυγούς που έχουν χαρακτηριστεί PQ εισάγονται οι γωνίες αναφοράς, τα φορτία, καθώς και οι γνωστές εγχύσεις ενέργειας από τις γεννήτριες και τις τιμές των τάσεων.

$$g(x) = \begin{bmatrix} g_P^{\{i\}}(\theta, V_m, P_g) \\ g_P^{\{i\}}(\theta, V_m, Q_g) \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \forall i \in I_{PV} \cup I_{PQ} \\ \forall i \in I_{PQ} \end{array}$$

Το διάνυσμα  $x$  αποτελείται από τα υπόλοιπα άγνωστα μεγέθη τάσεων, δηλαδή από τις τιμές των γωνιών της τάσης σε όλους τους ζυγούς μη αναφοράς:

$$x = \begin{bmatrix} \theta_{\{i\}} \\ V_m^{\{j\}} \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \forall i \notin I_{ref} \\ \forall j \in I_{PQ} \end{array}$$

Έτσι λοιπόν παράγεται ένα σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων με  $(n_{PV} + 2 * n_{PQ})$  εξισώσεις και αγνώστους, όπου  $n_{PV}$  και  $n_{PQ}$  είναι ο αριθμός των PV και των PQ ζυγών, αντίστοιχα. Μέσα από την επίλυση του  $x$ , η εναπομείνασα ενεργή ισχύς της εξίσωσης του ισοζυγίου έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της έγχυσης της ενεργού ισχύος από τη γεννήτρια που βρίσκεται στο ζυγό αναφοράς. Με τον ίδιο τρόπο και οι υπόλοιπες  $(n_{PV} + 1)$  εξισώσεις ισοζυγίου της αέργου ισχύος αποδίδουν τις εγχύσεις της αέργου ενέργειας της γεννήτριας.

Το λογισμικό MATPOWER περιλαμβάνει τέσσερις διαφορετικούς αλγορίθμους για την επίλυση του προβλήματος της AC Ροής Φορτίου. Ο λύτης που είναι προεπιλεγμένος, βασίζεται στη σταθερή μέθοδο του Newton, χρησιμοποιώντας μια πλήρη μορφή και έναν πλήρη ενημερωμένο ιακωβιανό πίνακα σε κάθε επανάληψη. Κάθε ένα βήμα της μεθόδου Newton, περιλαμβάνει τον υπολογισμό της αναντιστοιχίας  $g(x)$ , σχηματίζοντας τον ιακωβιανό πίνακα ο οποίος στηρίζεται στις ευαισθησίες των αναντιστοιχιών αυτών στις αλλαγές του  $x$  και επιλύει για την αναθεωρημένη τιμή του  $x$ , παραγοντοποιώντας τα στοιχεία του πίνακα αυτού.

Ακόμα, το MATPOWER περιλαμβάνει δύο λύτες που στηρίζονται σε παραλλαγές της μεθόδου της ταχεία αποσύνδεσης. Οι λύτες αυτοί μειώνουν σημαντικά το ποσό υπολογισμού κάθε επανάληψης, με την ενημέρωση των μεγεθών των τάσεων και των γωνιών ξεχωριστά, στηριζόμενοι στην προσέγγιση των σταθερών του ιακωβιανού πίνακα που συνυπολογίζονται μόνο μια φορά στην αρχή της διαδικασίας της επίλυσης. Τον τέταρτο αλγόριθμο αποτελεί η μέθοδος Gauss-Seidel, που παρουσιάζει πολλά μειονεκτήματα σε σχέση με τη μέθοδο Newton και περιλαμβάνεται στο λογισμικό κυρίως για ακαδημαϊκούς λόγους.

### 3.2.2 Ροή Φορτίου DC

Στην περίπτωση του προβλήματος της DC Ροής Φορτίου, το διάνυσμα αποτελείται από το σύνολο των γωνιών της τάσης του κάθε ζυγού του υπό εξέταση δικτύου, εξαιρουμένου του επιλεγμένου ζυγού αναφοράς και έχει την εξής μορφή:

$$x = [\theta_{(i)}], \quad \forall i \notin I_{ref}$$

και η εξίσωση ισορροπίας  $g(x)$  παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$(B_{dc} * x) - P_{dc} = 0$$

Όπου η μεταβλητή  $B_{dc}$  απεικονίζει έναν  $(n_b - 1) \times (n_b - 1)$  πίνακα που προκύπτει ύστερα από την απλή εξάλειψη από τον  $B_{bus}$  της γραμμής και της στήλης που αντιστοιχεί στο ζυγό και στη γωνία αναφοράς, αντίστοιχα. Οι γωνίες των τάσεων του  $x$  υπολογίζονται από μια άμεση επίλυση του συνόλου των γραμμικών εξισώσεων.

### 3.3 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ

Ο όρος Βέλτιστη Ροή Φορτίου ( Optimal Power Flow – OPF ) εμφανίστηκε τα τέλη της δεκαετίας του '70 από τους W. Dommel και W. F. Tinney, αξίζει όμως να αναφέρουμε ότι στις αρχές της ίδιας δεκαετίας είχε εισαχθεί για πρώτη φορά από τον J. Carpentier ως οικονομική κατανομή φορτίου σε δίκτυο με περιορισμούς (network constrained economic dispatch). Η Βέλτιστη Ροή Φορτίου (ΒΡΦ) αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση ηλεκτρικών ενεργειακών συστημάτων, για το λόγο αυτό αποτελεί και αντικείμενο εκτεταμένων ερευνών. Σκοπός της είναι, ο καθορισμός κάποιων μεταβλητών ελέγχου ενός ηλεκτρικού συστήματος, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η βελτιστοποίηση της τιμής της αντικειμενικής του συνάρτησης. Ταυτόχρονα, θα πρέπει να ικανοποιείται και ένα σύνολο φυσικών και λειτουργικών περιορισμών του συστήματος, όπως τα θερμικά όρια των γραμμών, τα όρια ενεργού και άεργου ισχύος του συστήματος, τα όρια τάσης των ζυγών, καθώς και το ενεργειακό ισοζύγιο.

Η Βέλτιστη Ροή Φορτίου (ΒΡΦ) αποτελεί ένα πολύ σύνθετο, μη κυρτό και μη γραμμικό πρόβλημα μαθηματικού προγραμματισμού, που εμπεριέχει συνεχείς αλλά και διακριτές μεταβλητές ελέγχου. Για όλους αυτούς τους λόγους, χρειάστηκαν δεκαετίες για να αναπτυχθούν αποδοτικοί αλγόριθμοι για την επίλυσή του. Μέθοδοι οι οποίες χρησιμοποιούνται συχνά είναι η μέθοδος επαναλήψεων λάμδα, η μέθοδος Newton, η μέθοδος εσωτερικού σημείου, η μέθοδος γραμμικού προγραμματισμού και η μέθοδος κλίσης.

Στις παρακάτω υποενότητες παρουσιάζεται η μαθηματική περιγραφή του προβλήματος της Βέλτιστης Ροής Φορτίου (ΒΡΦ) , καθώς και οι μέθοδοι επίλυσής του που προαναφέραμε, ενώ δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα στις μεθόδους που χρησιμοποιούνται συχνότερα, οι οποίες είναι η μέθοδος εσωτερικού σημείου και η μέθοδος γραμμικού προγραμματισμού. Αξίζει να αναφερθεί πως δεν είναι ίδια η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την επίλυση ενός AC και ενός DC προβλήματος Βέλτιστης Ροής Φορτίου (ΒΡΦ).

#### 3.3.1 Μαθηματική περιγραφή του προβλήματος της ΒΡΦ

Όπως προαναφέραμε, σκοπός της ΒΡΦ είναι η βελτιστοποίηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, είτε ελαχιστοποιώντας την τιμή αυτή είτε βελτιστοποιώντας την, ενώ ταυτόχρονα πρέπει να ικανοποιείται ένα σύνολο περιορισμών που επιβάλλονται από το σύστημα, οι οποίοι έχουν τη μορφή ισότητων και ανισότητων. Περιορισμό ισότητας μπορεί να αποτελεί η ικανοποίηση των εξισώσεων Ροής Φορτίου, ενώ περιορισμό ανισότητας μπορεί να αποτελεί ο

περιορισμός των μέτρων των τάσεων των ζυγών μεταξύ μιας κατώτερης και μιας ανώτερης τιμής, όπως τις ορίζει ο διαχειριστής του συστήματος, όπως και η ικανοποίηση του θερμικού ορίου του συστήματος από τις ροές ισχύος της κάθε γραμμής. Έτσι, θεωρούμε ένα διάνυσμα βελτιστοποίησης  $x$ , το οποίο αποτελείται από τις τιμές των μεταβλητών σχεδίασης του προβλήματος, που είναι τα μέτρα και οι γωνίες των τάσεων του κάθε ζυγού του ενεργειακού συστήματος που εξετάζεται, καθώς και η παραγωγή ενεργού και άεργου ισχύος για κάθε γεννήτρια του συστήματος.

Επομένως το διάνυσμα βελτιστοποίησης  $x$  έχει την παρακάτω μορφή:

$$x = \begin{bmatrix} \Theta \\ V_m \\ P_g \\ Q_g \end{bmatrix}$$

,όπου  $V_m$  και  $\Theta$ , το μέτρο και η γωνία αντίστοιχα της τάσης του  $m$  ζυγού του συστήματος, ενώ  $P_g$  και  $Q_g$  η παραγωγή ενεργού και άεργου ισχύος αντίστοιχα κάθε γεννήτριας. Για παράδειγμα, αν το σύστημά μας αποτελείται από  $n_b$  ζυγούς και υπάρχουν σε αυτό  $n_g$  γεννήτριες, τότε οι διαστάσεις του διανύσματος  $x$  θα είναι:  $(2 \cdot n_b + 2 \cdot n_g) \times 1$ .

Έτσι το πρόβλημα της ΒΡΦ διατυπώνεται σύμφωνα με την παρακάτω μορφή:

$$\min_x f(x) \quad (3.1)$$

και θα πρέπει να ικανοποιούνται οι παρακάτω περιορισμοί:

$$g(x) = 0 \quad (3.2)$$

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

$$x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \quad (3.4)$$

$$l \leq A \cdot x \leq u \quad (3.5)$$

Η Σχέση (3.2) αναφέρεται στο ισοζύγιο ενεργού και άεργου ισχύος, η Σχέση (3.3) στην ικανοποίηση των θερμικών ορίων του συστήματος και η Σχέση (3.4) στα επιτρεπτά όρια των τάσεων των ζυγών του συστήματος ή της παραγωγής των γεννητριών. Μέσα από τη σχέση (3.5) μπορούμε να εισάγουμε επιπλέον περιορισμούς στο σύστημα, όπως να θέσουμε κάποιο αριθμητικό όριο στο άθροισμα της παραγωγής, ή να απαιτήσουμε

κάποια από τις γεννήτριες του συστήματος να λειτουργεί με συγκεκριμένο συντελεστή ισχύος.

### 3.3.2 Μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος της ΒΡΦ

Καθώς το πρόβλημα της ΒΡΦ αποτελεί ένα σύνθετο, μη γραμμικό πρόβλημα μαθηματικού προγραμματισμού, μόνο κατά τις τελευταίες δεκαετίες ύστερα από εκτεταμένες έρευνες, αναπτύχθηκε ένας αριθμός αποτελεσματικών αλγορίθμων για την επίλυσή του. Η μέθοδος Newton (Newton's method), οι λ-επαναληπτικές μέθοδοι (lambda iteration method) και η μέθοδος κλίσης (gradient method), αποτελούν μερικές από τις τεχνικές επίλυσης του προβλήματος της ΒΡΦ. Οι δύο πιο ευρέως διαδεδομένες τεχνικές είναι όμως, η μέθοδος γραμμικού προγραμματισμού (linear programming-LP) και η μέθοδος εσωτερικού σημείου (interior point method). Παρακάτω παρουσιάζονται πιο αναλυτικά τα χαρακτηριστικά της κάθε μεθόδου.

- Μέθοδος Newton (Newton's method): Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει πολύ γρήγορη σύγκλιση, αλλά είναι πολύ πιθανόν να εμφανιστούν προβλήματα στην επίλυσή της όταν απαιτείται η χρήση ανισοτικών περιορισμών. Όταν στο πρόβλημα υπάρχουν ανισοτικοί περιορισμοί, τότε μέσω των τελεστών Lagrange και των παραγόντων ποινής, αθροίζονται στην αντικειμενική συνάρτηση.
- λ-επαναληπτικές μέθοδοι (lambda iteration methods): Είναι μια μέθοδος που αποτελεί τη βάση πολλών on-line προγραμμάτων οικονομικής κατανομής φορτίου. Βασίζεται στους πολλαπλασιαστές Lagrange και παρουσιάζει ιδιαιτερότητες σε σχέση με τις άλλες μεθόδους, καθώς η άγνωστη μεταβλητή λάμδα λαμβάνει την επόμενη τιμή της ενστικτωδώς. Στη μέθοδο αυτή, σε έναν πίνακα [B] αναπαρίστανται οι απώλειες και μπορούν να υπολογιστούν εξωτερικά από μια ροή ισχύος οι παράγοντες σφαλμάτων. Στα προβλήματα όπου η αντικειμενική συνάρτηση είναι πιο σύνθετη, παρουσιάζονται δυσκολίες στη ρύθμιση και προσαρμογή της μεταβλητής λάμδα.
- Μέθοδος κλίσης (gradient method): Η μέθοδος αυτή αποτελεί την παλαιότερη τεχνική επίλυσης προβλημάτων ΒΡΦ και παρουσιάζει πολύ αργή σύγκλιση, γεγονός που αυξάνει τον υπολογιστικό χρόνο. Αρχικά υπολογίζονται οι πρώτες παράγωγοι της αντικειμενικής συνάρτησης ως προς τις ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος (διανύσματα κλίσης) και στη συνέχεια αυτές οι παράγωγοι καθορίζουν την κατεύθυνση της κίνησης που δίνεται στη τρέχουσα λύση, έτσι ώστε αυτή να βελτιωθεί. Η διαδικασία επίλυσης τερματίζεται, όταν ύστερα από την επαναληπτική διαδικασία προκύψει μια επαρκώς μικρή κλίση. Στα προβλήματα όπου χρησιμοποιούνται ανισοτικοί περιορισμοί, η επίλυση με τη μέθοδο αυτή παρουσιάζει δυσκολίες.
- Μέθοδος γραμμικού προγραμματισμού (linear programming-LP): Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια από τις πλήρως ανεπτυγμένες τεχνικές επίλυσης του προβλήματος της ΒΡΦ και είναι από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες.

Αναλυτικότερα χαρακτηριστικά σχετικά με τον τρόπο επίλυσης αυτής της μεθόδου θα παρουσιαστούν στις παρακάτω υποενότητες.

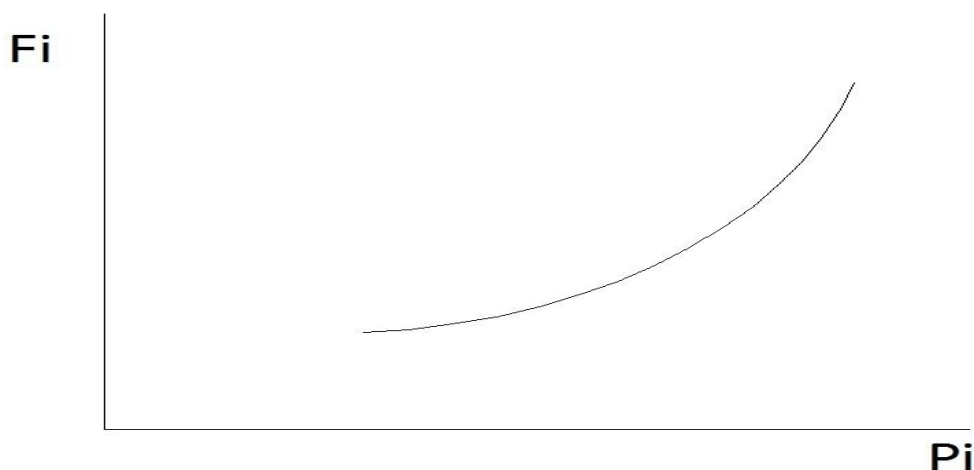
- Μέθοδος εσωτερικού σημείου (interior point method): Αυτή η μέθοδος αποτελεί μια επίσης από τις πλήρως αναπτυγμένες τεχνικές επίλυσης του προβλήματος της ΒΡΦ, καθώς και ένα νέο αλγόριθμο για την επίλυση προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού. Αναλυτικότερα χαρακτηριστικά σχετικά με τον τρόπο επίλυσης αυτής της μεθόδου θα παρουσιαστούν στις παρακάτω υποενότητες.

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται πιο λεπτομερώς οι δύο τελευταίες από τις παραπάνω μεθόδους, οι οποίες αποτελούν τις πιο ευρέως χρησιμοποιημένες τεχνικές επίλυσης του προβλήματος της ΒΡΦ .

### Μέθοδος γραμμικού προγραμματισμού

Εν αντιθέσει με τη μέθοδο Newton και τη μέθοδο κλίσης, η μέθοδος του γραμμικού προγραμματισμού χειρίζεται χωρίς καμία δυσκολία τους ανισοτικούς περιορισμούς, εφόσον το πρόβλημα είναι τέτοιο ώστε να μπορεί να γραμμικοποιηθεί χωρίς να υπάρχει σημαντική απώλεια της ακρίβειας.

Κατά την επίλυση του προβλήματος της ΒΡΦ με τη μέθοδο αυτή, αρχικά εκφράζονται οι μη γραμμικές είσοδοι και έξοδοι, καθώς και οι συναρτήσεις κόστους ως ένα σύνολο γραμμικών συναρτήσεων. Χωρίζουμε σε τμήματα τα οποία αποτελούνται από ευθείες γραμμές, τη μη γραμμική συνάρτηση κόστους, η οποία έστω ότι είναι η  $F_i(P_i)$ . Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται η καμπύλη που αναπαριστά τη μη γραμμική συνάρτηση κόστους:



**Σχήμα 3.2:** Καμπύλη μη γραμμικής συνάρτησης κόστους  $F_i(P_i)$

Στην περίπτωση που χωρίσουμε τη συνάρτηση κόστους σε τρία τμήματα και τα συμβολίσουμε ως  $P_{i1}$ ,  $P_{i2}$ ,  $P_{i3}$ , τότε το κάθε τμήμα θα έχει κλίση  $s_{i1}$ ,  $s_{i2}$  και  $s_{i3}$  αντίστοιχα. Έτσι η συνάρτηση κόστους θα έχει τη μορφή:

$$F_i(P_i) = F_i(P_{i,min}) + s_{i1} * P_{i1} + s_{i2} * P_{i2} + s_{i3} * P_{i3} \quad (3.6)$$

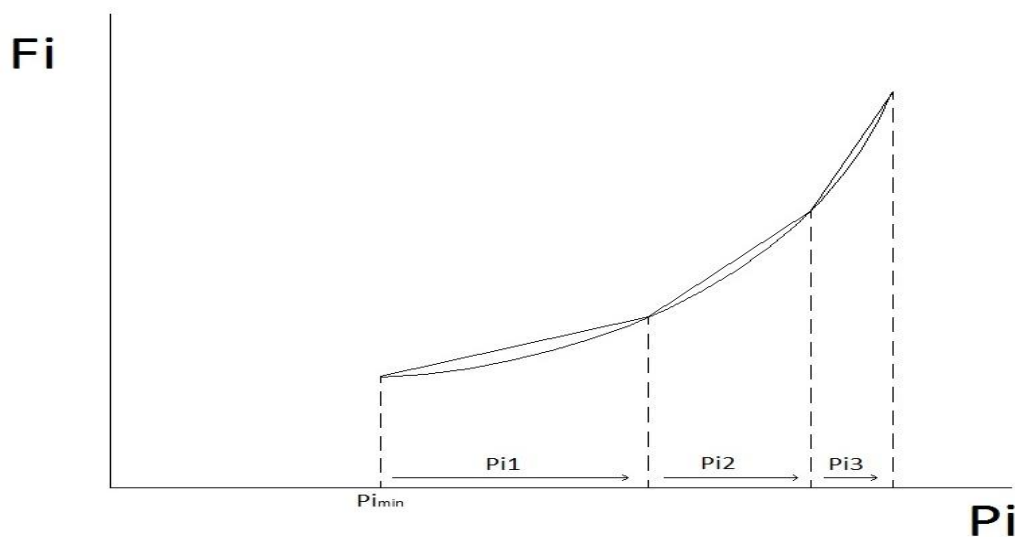
όπου ισχύει ο περιορισμός:

$$0 \leq P_{ik} \leq P_{ik}^+, \text{ για } k = 1, 2, 3 \quad (3.7)$$

Τελικά προκύπτει:

$$P_i = P_i^{min} + P_{i1} + P_{i2} + P_{i3} \quad (3.8)$$

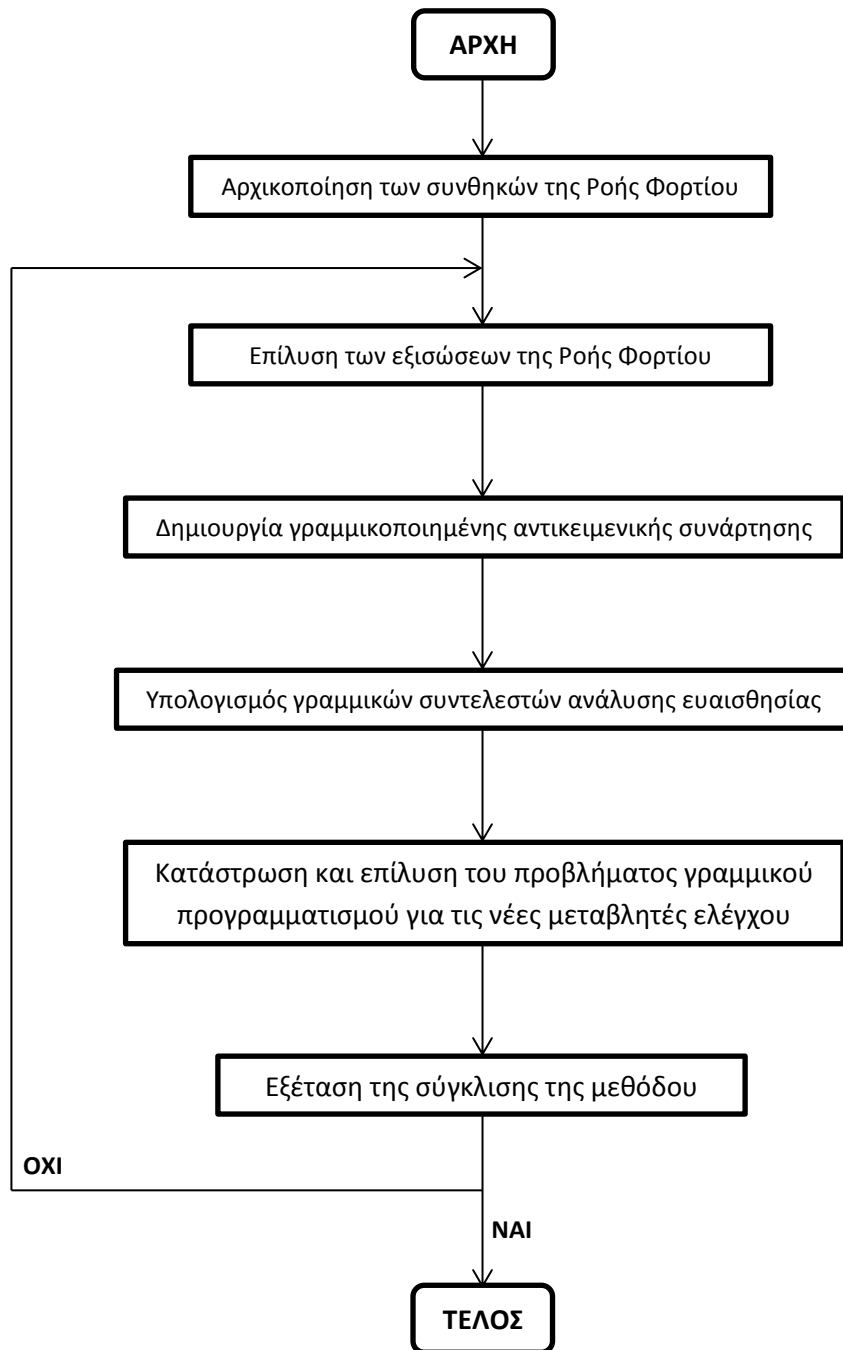
Με τον τρόπο αυτό η συνάρτηση κόστους αποτελείται πλέον από μια γραμμική έκφραση των τιμών  $P_{ik}$ . Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η γραμμικοποιημένη πλέον συνάρτηση κόστους:



**Σχήμα 3.2:** Καμπύλη γραμμικοποιημένης συνάρτησης κόστους  $F_i(P_i)$

Τα βήματα που ακολουθούνται κατά την επίλυση του προβλήματος της ΒΡΦ με τη χρήση της μεθόδου του γραμμικού προγραμματισμού παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα ροής (Σχήμα 3.1):





**Σχήμα 3.1:** Διάγραμμα ροής της μεθόδου του γραμμικού προγραμματισμού

Στη συγκεκριμένη μέθοδο επίλυσης του προβλήματος της ΒΡΦ, οι μεταβλητές σχεδίασης που ορίζονται από το διάνυσμα  $x$ , χωρίζονται σε μεταβλητές ελέγχου και μεταβλητές κατάστασης. Οι μεταβλητές κατάστασης δεν λαμβάνονται υπόψη ούτε στη συνάρτηση γραμμικού προγραμματισμού, ούτε στις εξισώσεις ροής ισχύος. Έτσι, υπόψη λαμβάνονται αντίστοιχα μόνο οι περιορισμοί του προβλήματος που επηρεάζουν τις μεταβλητές ελέγχου και όχι τις μεταβλητές κατάστασης. Οι μεταβλητές ελέγχου του προβλήματος περιορίζονται στην ενεργό ισχύ που παράγουν οι γεννήτριες, καθώς και στα μέτρα της τάσης κάθε ζυγού. Αυτές λοιπόν οι μεταβλητές ελέγχου ορίζονται από ένα διάνυσμα  $u$ .

Οι επόμενοι περιορισμοί που πρέπει να θεωρηθούν σε ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού ΒΡΦ είναι εκείνοι που αναπαριστούν το ισοζύγιο ισχύος μεταξύ της ενεργού και της αέργου ισχύος που παράγεται και αυτής που καταναλώνεται στα φορτία και τις απώλειες. Όσον αφορά την ενεργό ισχύ, η εξίσωση της ισορροπίας του ενεργειακού συστήματος δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_{gen} + P_{load} + P_{losses} = 0 \quad (3.9)$$

Όπου:

$P_{gen}$  : η παραγόμενη ενεργός ισχύς από τις γεννήτριες του συστήματος

$P_{load}$  : η ενεργός ισχύς που καταναλώνεται από τα φορτία

$P_{losses}$  : οι απώλειες στις γραμμές μεταφοράς του συστήματος, που ισοούνται με  $I^2 * R$ , καθώς και οι απώλειες στους μετασχηματιστές

Παραγωγίζοντας τη Σχέση (3.9) ως προς  $u$  (διάνυσμα των μεταβλητών ελέγχου), προκύπτει η εξίσωση:

$$\sum_u \left( \frac{\partial P_{gen}}{\partial u} \right) \Delta u - \sum_u \left( \frac{\partial P_{load}}{\partial u} \right) \Delta u - \sum_u \left( \frac{\partial P_{losses}}{\partial u} \right) \Delta u = 0 \quad (3.10)$$

Θεωρώντας ότι ισχύει  $\Delta u = u - u^0$  η Σχέση (3.10) γίνεται:

$$\sum_u \left( \frac{\partial P_{gen}}{\partial u} \right) u - \sum_u \left( \frac{\partial P_{load}}{\partial u} \right) u - \sum_u \left( \frac{\partial P_{losses}}{\partial u} \right) u = K_p \quad (3.11)$$

Όπου:

$$K_p = \sum_u \left( \frac{\partial P_{gen}}{\partial u} \right) u^0 - \sum_u \left( \frac{\partial P_{load}}{\partial u} \right) u^0 - \sum_u \left( \frac{\partial P_{losses}}{\partial u} \right) u^0 \quad (3.12)$$

Με παρόμοια λογική, προκύπτει και για το ισοζύγιο αέργου ισχύος η εξίσωση:

$$\sum_u \left( \frac{\partial Q_{gen}}{\partial u} \right) \Delta u - \sum_u \left( \frac{\partial Q_{load}}{\partial u} \right) \Delta u - \sum_u \left( \frac{\partial Q_{losses}}{\partial u} \right) \Delta u = 0 \quad (3.13)$$

Όπου ο όρος των απωλειών περιλαμβάνει τις απώλειες  $I^2 * X$ , όπως επίσης και την φόρτιση από τους πυκνωτές των γραμμών και τις αντιδράσεις των διακλαδώσεων. Στην περίπτωση της αέργου ισχύος, μπορεί επίσης να γίνει και εδώ η αντικατάσταση  $\Delta u = u - u^0$ .

Αυτή η μέθοδος επίλυσης του προβλήματος της ΒΡΦ περιορίζει τις μεταβλητές ελέγχου, ώστε να βρίσκονται πάντα μέσα στο εύρος των επιτρεπτών ορίων τους, όμως δεν βελτιστοποιεί τη συνάρτηση κόστους με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούνται οι περιορισμοί που έχουν τεθεί σχετικά με τα θερμικά όρια των γραμμών μεταφοράς, ή τα όρια των μέτρων των τάσεων των ζυγών. Έτσι, είναι αναγκαίο να βρεθεί μια μέθοδος η οποία θα εξασφαλίζει ότι το βέλτιστο κόστος θα ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς του συστήματος.

Για παράδειγμα, έστω ότι η συνολική φαινόμενη ισχύς που πρέπει να ρέει σε κάθε γραμμή του δικτύου έχει ως ανώτατο όριο  $MVA_{flow,nm,MAX}$ . Οπότε για μια τυχαία γραμμή του δικτύου με ζυγό αναχώρησης τον  $n$  και ζυγό άφιξης τον  $m$  θα ισχύει η σχέση:

$$MVA_{flow,nm} \leq MVA_{flow,nm,MAX} \quad (3.14)$$

Μοντελοποιώντας τον περιορισμό της Σχέσης (3.14) με τη χρήση σειρών Taylor, διατηρώντας μόνο τους γραμμικούς όρους, προκύπτει η σχέση:

$$MVA_{flow,nm} = MVA_{flow,nm}^0 + \sum_u \left( \frac{\partial}{\partial u} MVA_{flow,nm} \right) \Delta u \leq MVA_{flow,nm,MAX} \quad (3.15)$$

Αντικαθιστώντας όπως και πριν, τη σχέση  $\Delta u = u - u^0$  στη Σχέση (3.15) προκύπτει:

$$\sum_u \left( \frac{\partial}{\partial u} MVA_{flow,nm} \right) u \leq MVA_{flow,nm,MAX} - K_f \quad (3.16)$$

Όπου:

$$K_f = MVA_{flow,nm}^0 + \sum_u \left( \frac{\partial}{\partial u} MVA_{flow,nm} \right) u^0 \quad (3.17)$$

Με τον ίδιο τρόπο και άλλοι περιορισμοί μπορούν να εισαχθούν, όπως τα όρια των τάσεων των ζυγών του συστήματος. Για την επίλυση της Βέλτιστης Ροής Φορτίου με τη μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού, πρέπει να προστεθούν όσοι περιορισμοί είναι απαραίτητοι, ώστε το σύστημα ισχύος να παραμένει εντός των προκαθορισμένων ορίων.

## Μέθοδος εσωτερικού σημείου

Το 1984 ο Narendra Karmarkar παρουσίασε έναν νέο αλγόριθμο επίλυσης για τα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού, ο οποίος δεν επιλύεται ως προς τη βέλτιστη λύση ακολουθώντας μια σειρά σημείων που ανήκουν στα όρια των περιορισμών, όπως παρουσιάστηκε ότι συμβαίνει στην προηγούμενη μέθοδο επίλυσης του προβλήματος της ΒΡΦ. Στην συγκεκριμένη μέθοδο, υπάρχει η ικανότητα εύρεσης βελτιωμένων διαδρομών αναζήτησης της βέλτιστης λύσης στο εσωτερικό του επιτρεπτού από τους περιορισμούς χώρου, δηλαδή για την εύρεση της βέλτιστης λύσης ακολουθείται ένα μονοπάτι στο εσωτερικό των περιορισμών. Σημαντικό στοιχείο αποτελεί επίσης, το γεγονός πως η συγκεκριμένη τεχνική παρουσιάζει πολύ γρηγορότερη σύγκλιση στη βέλτιστη λύση, εν συγκρίσει με τους συμβατικούς αλγόριθμους γραμμικού προγραμματισμού. Μερικά χρόνια αργότερα, το 1986 ο Grill παρουσίασε τη σχέση μεταξύ του αλγορίθμου του Karmarkar και του αλγορίθμου λογαριθμικής φραγμένης συνάρτησης. Ο αλγόριθμος αυτός, ο οποίος αποτελεί μια από τις ευρέως χρησιμοποιημένες προσεγγίσεις για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων, λόγω της ταχύτητας σύγκλισής του και της ευκολίας με την οποία χειρίζεται τους ανισοτικούς περιορισμούς του προβλήματος, έχει γίνει η βάση για την επίλυση πολλών προβλημάτων ΒΡΦ.

Στη μέθοδο εσωτερικού σημείου δεν γίνεται διάκριση μεταξύ των μεταβλητών ελέγχου και των μεταβλητών κατάστασης, αλλά όλες οι μεταβλητές αναπαρίστανται μέσω ενός διανύσματος  $x$ . Η αντίστοιχη αντικειμενική συνάρτηση είναι η  $f(x)$ , που όπως φαίνεται εξαρτάται από όλες τις μεταβλητές. Οι περιορισμοί του προβλήματος χωρίζονται σε ισοτικούς και ανισοτικούς περιορισμούς. Οι ισοτικοί περιορισμοί έχουν τη μορφή:  $g(x) = 0$ , ενώ οι ανισοτικοί έχουν τη μορφή:  $h^- \leq h(x) \leq h^+$ , όπου τα διανύσματα  $h^-$  και  $h^+$  συμβολίζουν το κατώτερο και το ανώτερο επιτρεπτό όριο αντίστοιχα των ανισοτικών περιορισμών. Ακόμα και οι μεταβλητές σχεδίασης περιορίζονται σε ένα επιτρεπτό εύρος τιμών:  $x^- \leq x \leq x^+$ .

Το πρώτο βήμα για την επίλυση του προβλήματος με τη συγκεκριμένη μέθοδο, είναι η προσθήκη κάποιων νέων μεταβλητών, έτσι ώστε όλες οι εξισώσεις να μετατραπούν σε ισοτικούς περιορισμούς. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η χρήση ανισοτικών περιορισμών στο πρόβλημα. Κατά συνέπεια προκύπτει το σύνολο εξισώσεων που παρουσιάζεται παρακάτω:

$$\begin{aligned} \min f(x) \\ g(x) = 0 \\ h(x) + s_h = h^+ \\ s_h + s_{sh} = h^+ - h^- \\ x + s_x = x^+ \\ x - x^- \geq 0 \\ s_x, s_h, s_{sh} \geq 0 \end{aligned} \tag{3.18}$$

Όπως παρατηρείται, προκύπτει ένα σύνολο εξισώσεων που αποτελούνται από ισοτικούς μόνο περιορισμούς, εκτός από τις τελικές συνθήκες μη αρνητικότητας  $x - x^-$  και τις ελεύθερες μεταβλητές. Οι συνθήκες αυτές μπορούν να εισαχθούν στο πρόβλημα με την προσθήκη μιας 'λογαριθμικής φραγμένης συνάρτησης' στην αντικειμενική συνάρτηση. Η συνάρτηση που προκύπτει αποτελεί μια μορφή συνάρτησης σφάλματος, που η τιμή της μεγαλώνει όλο και περισσότερο όσο η αντικειμενική συνάρτηση ή οι μεταβλητές πλησιάζουν στο μηδέν. Έτσι, η νέα αντικειμενική συνάρτηση θα έχει τη μορφή:

$$f_\mu = f(x) - \mu * \sum_j \ln(x - x^-)_j - \mu * \sum_j \ln(s_x)_j - \mu * \sum_i \ln(s_h)_i - \mu * \sum_i \ln(s_{sh})_i \quad (3.19)$$

Η παράμετρος  $\mu$  που ονομάζεται παράμετρος φράγματος, είναι ένας θετικός αριθμός ο οποίος εξαναγκάζεται να πλησιάσει στο μηδέν, καθώς ο αλγόριθμός συγκλίνει στη βέλτιστη λύση. Αυτό παρουσιάζεται μέσα από την εξίσωση Lagrange:

$$L_\mu = f(x) - \lambda^T * g(x) - \lambda_h^T * [h^+ - s_h - h(x)] - \lambda_{sh}^T * (h^+ - h^- - s_h - s_{sh}) - \lambda_x^T * (x^+ - x - s_x) - \mu * \sum_j \ln(x - x^-)_j - \mu * \sum_j \ln(s_x)_j - \mu * \sum_i \ln(s_h)_i - \mu * \sum_i \ln(s_{sh})_i \quad (3.20)$$

Αν θέσουμε την κλίση του πρώτου μέλους ίση με το μηδέν, τότε προκύπτει η λύση αυτής της εξίσωσης Lagrange. Έτσι, προκύπτει το παρακάτω σύστημα εξισώσεων:

$$\begin{aligned} \nabla_x L_\mu &= \nabla f(x) - \nabla_g(x)^T * \lambda + \nabla h(x)^T * \lambda_h + \lambda_x - \mu * (x - x^-)^{-1} * e = 0 \\ \nabla_{sh} L_\mu &= \lambda_\mu + \lambda_{sh} - \mu h^{-1} * e = 0 \\ \nabla_{s_h} L_\mu &= \lambda_{sh} - \mu * (s_{sh})^{-1} * e = 0 \\ \nabla_{s_x} L_\mu &= \lambda_x - \mu * (s_s)^{-1} * e = 0 \\ \nabla_\lambda L_\mu &= -g(x) \\ \nabla_{\lambda_{sh}} L_\mu &= h(x) + s_h - h^+ \\ \nabla_{\lambda_x} L_\mu &= x + s_x - x^+ \\ \nabla_{\lambda_h} L_\mu &= s_h + s_{sh} - h^+ + h^- = 0 \end{aligned} \quad (3.21)$$

Το σύνολο των μη γραμμικών εξισώσεων (3.21) επιλύεται με την επαναληπτική μέθοδο Newton, ενώ η παράμετρος  $\mu$  προσαρμόζεται έτσι ώστε να τείνει προς μηδενικές τιμές, καθώς ο αλγόριθμος συγκλίνει στη βέλτιστη λύση του.

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί βελτιωμένοι αλγόριθμοι που στηρίζονται πάνω στη μέθοδο εσωτερικού σημείου, όπως η Interior Point Cutting Plane Method, η οποία προτάθηκε το 2004 και χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση μεγάλων διαστάσεων μη γραμμικών προβλημάτων ΒΡΦ. Έτσι, έχει επεκταθεί κατά μεγάλο βαθμό η δυνατότητα χρήσης της μεθόδου εσωτερικού σημείου για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων.







## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΣΤΑΘΜΩΝ ΤΑΧΕΙΑΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΜΕ ΓΕΝΕΤΙΚΟ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ ΚΑΙ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ**

### **4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Σε ένα δίκτυο διανομής στο οποίο έχουν εγκατασταθεί Σταθμοί Ταχείας Φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (Fast Charging Station-FCS ή ΣΤΦ), η εγκατάσταση Μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής (ΜΔΠ) προσφέρει πολλά θετικά οφέλη στη διαχείρισή του και γι αυτό το λόγο δίνονται κίνητρα ώστε να εγκατασταθούν όσο το δυνατόν περισσότερες. Λόγω της ύπαρξης ΜΔΠ, ο διαχειριστής έχει τη δυνατότητα να κάνει καλύτερη χρήση του δικτύου διανομής, για το λόγο αυτό και έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι που υπολογίζουν τη βέλτιστη θέση και την ονομαστική ισχύ της κάθε ΜΔΠ που εγκαθίσταται στο εκάστοτε δίκτυο.

Τα σημαντικότερα οφέλη που προσφέρει σε ένα δίκτυο διανομής η ύπαρξη ΜΔΠ, αφορούν τη μείωση των ηλεκτρικών απωλειών του δικτύου και τη βελτίωση του προφίλ της τάσης. Σε ένα δίκτυο διανομής, αναπτύσσονται ηλεκτρικές απώλειες, καθώς όταν από έναν αγωγό, που έχει κάποια ωμική αντίσταση, διέρχεται ρεύμα, τότε αναπτύσσεται θερμότητα η οποία ισοδυναμεί με απώλεια ενέργειας. Το μέγεθος αυτών των απωλειών εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος που ρέει σε μία γραμμή, καθώς και από την αντίσταση της γραμμής. Στην περίπτωση διείσδυσης ΜΔΠ στο δίκτυο, οι ηλεκτρικές απώλειες του δικτύου μπορούν να μειωθούν, εξαιτίας της μείωσης του ρεύματος το οποίο ρέει σε κάποια σημεία του δικτύου. Δηλαδή, καθώς οι ΜΔΠ τροφοδοτούν το φορτίο με μία ποσότητα ενεργού και αέργου ισχύος, το ρεύμα το οποίο ρέει από την πηγή μέχρι τη θέση της ΜΔΠ μειώνεται και έτσι παρατηρούνται χαμηλότερες ηλεκτρικές απώλειες στο δίκτυο. Ακόμα, η διείσδυση ΜΔΠ σε ένα δίκτυο μπορεί να μειώσει τις διακυμάνσεις της τάσης των διαφόρων ζυγών του δικτύου, καθώς ένα μέρος του φορτίου θα τροφοδοτείται από τη ΜΔΠ και επομένως η ισχύς που απαιτείται από την πηγή, θα είναι μειωμένη, άρα μικρότερες θα είναι και οι πτώσεις τάσης κατά μήκος κάποιων γραμμών του συστήματος. Έτσι η διεσπαρμένη παραγωγή δεν μπορεί μόνο να βοηθήσει τη λειτουργία δικτύων με μεγάλες πτώσεις τάσης, αλλά μπορεί και να συμβάλλει θετικά σε περιπτώσεις που εμφανίζονται μικρότερες διακυμάνσεις τάσης, βελτιώνοντας το προφίλ της τάσης του δικτύου.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία παρουσιάζεται μια υβριδική μέθοδος, η οποία χρησιμοποιώντας τον Γενετικό Αλγόριθμο (ΓΑ) δημιουργεί ένα μεγάλο αριθμό συνδυασμών θέσεων τοποθέτησης είτε των ΜΔΠ είτε των ΣΤΦ. Για κάθε έναν από τους συνδυασμούς των θέσεων των ΜΔΠ επιστρατεύεται η ΒΡΦ, έτσι ώστε να καθοριστεί η βέλτιστη ονομαστική ισχύς των ΜΔΠ. Όσον αφορά τους συνδυασμούς των θέσεων των ΣΤΦ επιστρατεύεται η Ροή Φορτίου (ΡΦ), έτσι ώστε να υπολογιστούν οι συνολικές απώλειες ισχύος και οι συνολική απόκλιση της τάσης των ζυγών του δικτύου. Στη συγκεκριμένη μέθοδο απαιτείται να έχει προκαθοριστεί ο αριθμός των ΜΔΠ που πρόκειται να συνδεθούν στο δίκτυο, καθώς και η ισχύς του κάθε ΣΤΦ.

## 4.2 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η ονομαστική ισχύς των ΜΔΠ που πρόκειται να συνδεθούν σε ένα δίκτυο διανομής, καθορίζεται με βάση κάποιους περιορισμούς οι οποίοι επιβάλλονται από τη νομοθεσία, όπως για παράδειγμα τα θερμικά όρια τάσεως, από τις προδιαγραφές του εξοπλισμού των δικτύων, όπως για παράδειγμα τα θερμικά όρια των γραμμών και των μετασχηματιστών, καθώς και από άλλους παράγοντες.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία θα παρουσιαστεί μια υβριδική μέθοδος, η οποία απαιτεί από τον χρήστη να καθορίσει τον αριθμό των ΜΔΠ που θέλει να συνδεθούν στο δίκτυο, καθώς και την ισχύ του κάθε ΣΤΦ. Αρχικά, διαλέγουμε ένα συγκεκριμένο δίκτυο διανομής και χωρίζουμε τους ζυγούς που το αποτελούν σε ζώνες με βάση κάποια κοινωνικά κριτήρια, έτσι ώστε να ικανοποιούνται όλοι οι κάτοχοι ηλεκτρικών οχημάτων. Στη συνέχεια, επιλέγουμε τον αριθμό των ΣΤΦ που θα τοποθετηθούν σε κάθε μία από τις ζώνες, καθώς και την ισχύ του κάθε σταθμού. Ακόμα, ορίζουμε τον αριθμό των ΜΔΠ που θα συνδεθούν στο δίκτυό μας. Τέλος, με τον τρόπο που θα περιγράψουμε παρακάτω αναζητούμε τη βέλτιστη θέση, δηλαδή τον βέλτιστο ζυγό στον οποίο θα συνδεθεί ο κάθε ΣΤΦ, καθώς και τη βέλτιστη θέση και ισχύ των ΜΔΠ που έχουμε επιλέξει να συνδέσουμε στο δίκτυο στην περίπτωση που οι θέσεις τους είναι μεταβλητές. Ο σκοπός της μεθόδου που θα περιγράψουμε είναι, η ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος καθώς και η βελτίωση του προφίλ της τάσης του δικτύου, έτσι ώστε να παρατηρηθούν τεχνικά οφέλη στο δίκτυο σε συνδυασμό με την όσο το δυνατόν μικρότερη καταπόνησή του.

### 4.2.1 Ορισμός αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος

Η αντικειμενική συνάρτησή μας βοηθά έτσι ώστε να επιλέξουμε τη βέλτιστη θέση και ισχύ των ΜΔΠ που θα εγκατασταθούν στο δίκτυο, καθώς και τη βέλτιστη θέση τοποθέτησης του κάθε Σταθμού Ταχείας Φόρτισης. Έτσι, ο συνδυασμός όλων των παραπάνω, ο οποίος παρουσιάζει τη μικρότερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης αποτελεί και τη βέλτιστη λύση του προβλήματός μας.

Επομένως, επιχειρείται η ελαχιστοποίηση του λόγου των απωλειών ενεργού ισχύος μετά τη διείσδυση των Σταθμών Ταχείας Φόρτισης και των ΜΔΠ προς τις αρχικές απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου πριν την εγκατάσταση των ΜΔΠ και των Σταθμών Ταχείας Φόρτισης, καθώς και η ελαχιστοποίηση του λόγου της απόκλισης της τάσης των ζυγών του δικτύου από μία τάση αναφοράς, μετά τη διείσδυση των Σταθμών Ταχείας Φόρτισης και των ΜΔΠ, προς την αρχική απόκλιση της τάσης των ζυγών από την τάση αναφοράς, πριν τη διείσδυση. Η τάση αναφοράς ορίζεται ως η τάση του ζυγού αναφοράς. Επομένως με τον τρόπο αυτό, οι τάσεις των ζυγών του συστήματος προσεγγίζουν την τάση του ζυγού αναφοράς, με αποτέλεσμα τη μείωση της πτώσης τάσης κατά μήκος των γραμμών του δικτύου. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η αντικειμενική συνάρτηση, λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

$$F = k_p * f_p + k_v * f_v$$

$$F = k_p * \frac{P_{losses}^{with DG,FCS}}{P_{losses}^{without DG,FCS}} + k_v * \frac{\sum_{i=1}^N |V_i^{with DG,FCS} - V_i^{ref}|}{\sum_{i=1}^N |V_i^{without DG,FCS} - V_i^{ref}|}$$

Όπου  $N$  είναι ο αριθμός των ζυγών που αποτελούν το εκάστοτε δίκτυο διανομής. Οι παράμετροι  $k_p$  και  $k_v$  αποτελούν δύο συντελεστές βαρύτητας, οι οποίοι καθορίζουν το πόσο μεγάλη σημασία δίνεται στην ελαχιστοποίηση των απωλειών ή της διακύμανσης της τάσης των ζυγών, και ποιος από τους δύο αυτούς παράγοντες έχει μεγαλύτερη βαρύτητα στο εκάστοτε πρόβλημα. Το άθροισμα των δύο αυτών παραμέτρων είναι ίσο με τη μονάδα. Δηλαδή, πάντα πρέπει να ισχύει η σχέση:  $k_p + k_v = 1$ .

Για το εκάστοτε δίκτυο διανομής που εξετάζεται, θα πρέπει να ικανοποιούνται κάποιοι συγκεκριμένοι περιορισμοί ασφαλείας. Έτσι, τα μέτρα των τάσεων σε κάθε ζυγό του δικτύου δε θα πρέπει να ξεπερνούν μια ορισμένη ελάχιστη και μια αντίστοιχα ορισμένη μέγιστη τιμή τάσης, κοντά στην ονομαστική τους, δηλαδή:

$$V_b^{min} \leq V_b \leq V_b^{max}$$

Όπου  $V_b^{min}$  και  $V_b^{max}$  είναι το κατώτερο και το ανώτερο όριο αντίστοιχα για το μέτρο της τάσης  $V_b$  σε όλους τους ζυγούς. Το ίδιο θα πρέπει να ισχύει και για τις αντίστοιχες γωνίες, δηλαδή:

$$\theta_b^{min} \leq \theta_b \leq \theta_b^{max}$$

Όπου  $\theta_b^{min}$  και  $\theta_b^{max}$  είναι το κατώτερο και το ανώτερο όριο αντίστοιχα για τη γωνία της τάσης  $\theta_b$  σε όλους τους ζυγούς. Ακόμα, ένας άλλος περιορισμός που τίθεται από το δίκτυο είναι να μην ξεπερνιούνται τα θερμικά όρια στις γραμμές και στους μετασχηματιστές του δικτύου. Έτσι, για κάθε γραμμή και για κάθε μετασχηματιστή, η ροή φαινόμενης ισχύος που μεταφέρεται,  $S_t$ , δεν θα πρέπει να ξεπερνά το μέγιστο θερμικό όριο  $S_t^{max}$ . Δηλαδή θα πρέπει να ισχύει:

$$|S_t| \leq S_t^{max}$$

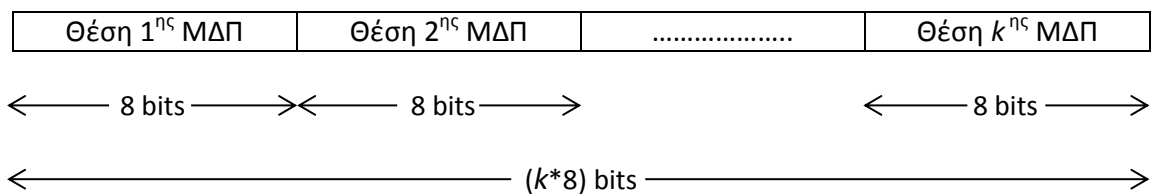
Εκτός από αυτούς τους περιορισμούς που τίθενται από το δίκτυο, προκύπτουν και κάποιοι άλλοι περιορισμοί, όπως είναι για παράδειγμα ο περιορισμός ότι οι ΜΔΠ έχουν σταθερό συντελεστή ισχύος  $pf_{dg}$ .

$$pf_{dg} = \frac{P_{dg}}{\sqrt{P_{dg}^2 + Q_{dg}^2}} = \text{σταθερό}$$

#### 4.2.2 Επίλυση του προβλήματος για βέλτιστη τοποθέτηση ΜΔΠ

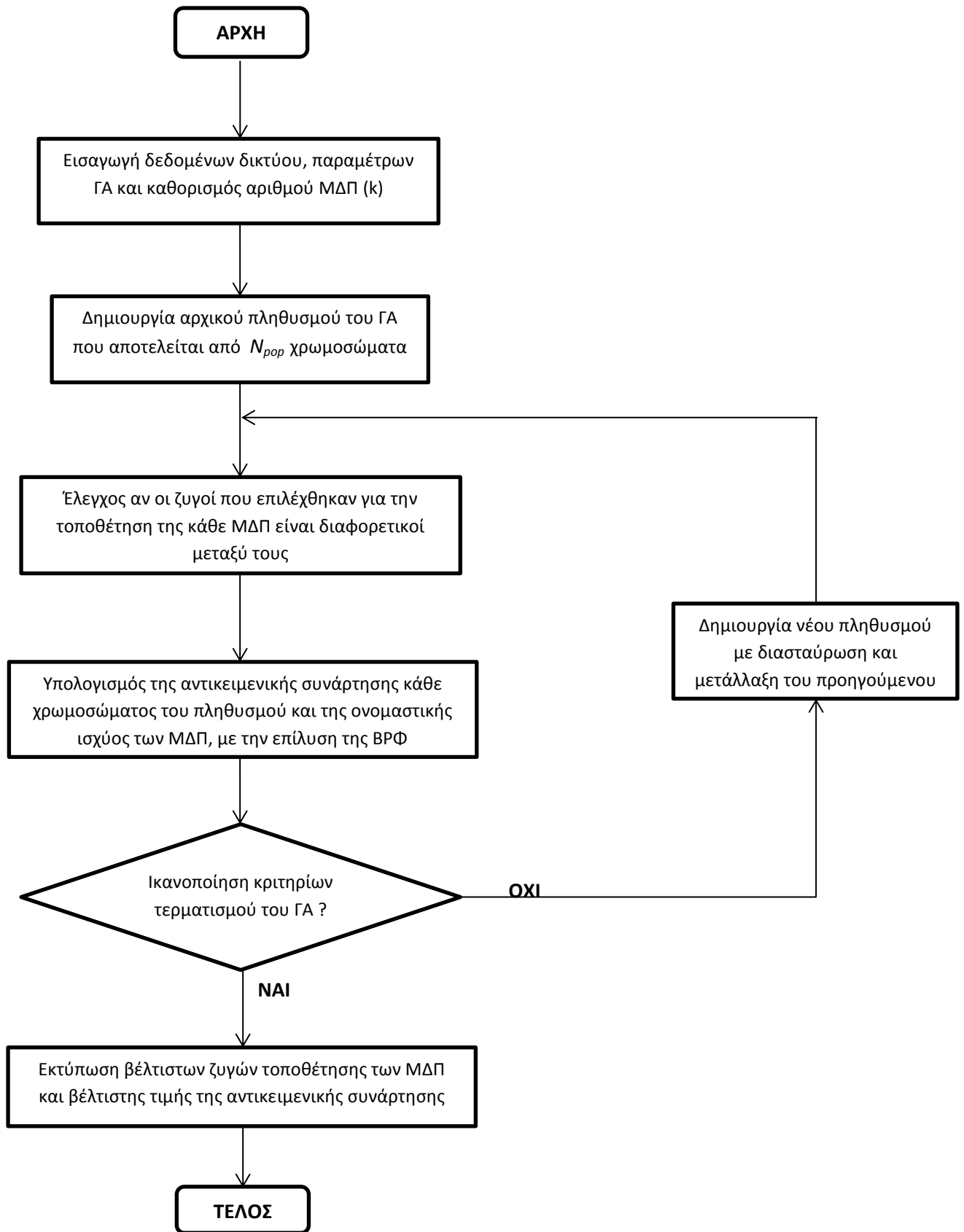
Στην υβριδική μέθοδο που θα παρουσιαστεί παρακάτω για την επίλυση του προβλήματος, γίνεται συνδυαστική χρήση του Δυαδικού Γενετικού Αλγορίθμου (ΓΑ) και της Βέλτιστης Ροής Φορτίου (ΒΡΦ). Στην υποενότητα αυτή, θα περιγράψουμε τον τρόπο επίλυσης του προβλήματος, στην περίπτωση που αναζητούμε τη βέλτιστη θέση και το βέλτιστο μέγεθος των ΜΔΠ που έχουμε επιλέξει να συνδέσουμε στο δίκτυο διανομής.

Αρχικά, ο χρήστης καθορίζει τον αριθμό των ΜΔΠ ( $k$ ) που επιθυμεί να συνδεθούν στο δίκτυο διανομής και εισάγει τα δεδομένα του προς εξέταση δικτύου. Στη συνέχεια με τη χρήση του ΓΑ δημιουργούμε έναν αρχικό τυχαίο πληθυσμό, ο οποίος αποτελείται από  $N_{pop}$  χρωμοσώματα, δηλαδή δημιουργούμε έναν πίνακα με  $N_{pop}$  αριθμό γραμμών, που η κάθε μία από αυτές αποτελεί μια πιθανή λύση του προβλήματος. Κάθε γραμμή του πίνακα αυτού χωρίζεται σε ( $k$ ) μέρη και απεικονίζει τους ( $k$ ) ζυγούς στους οποίους θα συνδεθούν οι ( $k$ ) ΜΔΠ του εκάστοτε χρωμοσώματος. Τέλος, ελέγχουμε αν οι ( $k$ ) ΜΔΠ έχουν επιλεγεί να συνδεθούν σε διαφορετικούς ζυγούς του δικτύου η κάθε μια και αν δεν συμβαίνει αυτό τότε αλλάζουμε τυχαία τους ζυγούς που ταυτίζονται, μέχρις ότου η κάθε ΜΔΠ να εγκατασταθεί σε διαφορετικό ζυγό του δικτύου διανομής.



**Σχήμα 4.1:** Ενδεικτική μορφή ενός, από τα  $N_{pop}$  χρωμοσώματα του πληθυσμού

Έχοντας επιλέξει ζυγούς διαφορετικούς μεταξύ τους για την τοποθέτηση της κάθε ΜΔΠ, για το κάθε χρωμόσωμα του πληθυσμού εφαρμόζουμε μια ΒΡΦ. Μέσα από τη ΒΡΦ καθορίζεται η ονομαστική παραγωγή ενεργού και αέργου ισχύος της κάθε ΜΔΠ. Ακόμα, υπολογίζονται οι συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος, καθώς και η συνολική μεταβολή της τάσης των ζυγών για το κάθε χρωμόσωμα. Με βάση τις τιμές που έχουν προκύψει από τη ΒΡΦ υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε ένα από τα χρωμοσώματα. Στη συνέχεια, ο νέος πίνακας που δημιουργείται με τις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης για καθένα από τα  $N_{pop}$  χρωμοσώματα, ταξινομείται κατά αύξουσα σειρά, έτσι ώστε το πρώτο στοιχείο του πίνακα να είναι εκείνο με τη χαμηλότερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή εκείνος ο συνδυασμός ζυγών που αποτελεί τη βέλτιστη λύση για το πρόβλημα. Σύμφωνα με την ίδια αύξουσα σειρά, ταξινομείται στη συνέχεια και ο πίνακας με τον πληθυσμό των χρωμοσωμάτων. Η πρώτη γραμμή αυτών των 2 πινάκων, αποθηκεύεται, καθώς αποτελεί την βέλτιστη λύση και δεν θέλουμε να αλλάξει κατά τη μετάλλαξη του πληθυσμού αυτής της γενιάς.



**Σχήμα 4.2:** Μεθοδολογία επίλυσης με ΓΑ και ΒΡΦ

Εν συνεχεία, ένα ποσοστό των χρωμοσωμάτων με τη χειρότερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης διαγράφεται και από τα χρωμοσώματα που επιζούν επιλέγονται ορισμένα για διασταύρωση και στη συνέχεια πραγματοποιείται μετάλλαξη του πληθυσμού. Η διαδικασία της διασταύρωσης και της μετάλλαξης πραγματοποιείται, με τον τρόπο που έχουμε περιγράψει αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2, όπου παρουσιάζεται ο Δυαδικός Γενετικός Αλγόριθμος. Μετά από αυτές τις δυο διαδικασίες ο νέος πληθυσμός ελέγχεται και πάλι με τον ίδιο τρόπο που περιγράψαμε παραπάνω, σχετικά με το αν οι νέοι ζυγοί του κάθε χρωμοσώματος που έχουν επιλεγεί για την τοποθέτηση της κάθε ΜΔΠ, είναι διαφορετικοί μεταξύ τους. Οι ζυγοί που δεν ικανοποιούν αυτόν τον περιορισμό αλλάζουν τιμή, σύμφωνα με τον τρόπο που αναφέρεται παραπάνω. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται μια νέα γενιά με χρωμοσώματα σαφώς βελτιωμένα σε σχέση με αυτά της προηγούμενης. Αυτή η επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται, έως ότου οι γενιές φτάσουν ένα ανώτερο επιτρεπτό όριο, ή όταν το καλύτερο χρωμόσωμα κάθε γενιάς αποτύχει να βελτιωθεί παραπάνω από μια συγκεκριμένη ποσότητα για ένα συγκεκριμένο αριθμό γενεών. Στο παραπάνω διάγραμμα ροής του Σχήματος 4.2 παρουσιάζονται όλα τα βήματα που ακολουθούνται κατά την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος.

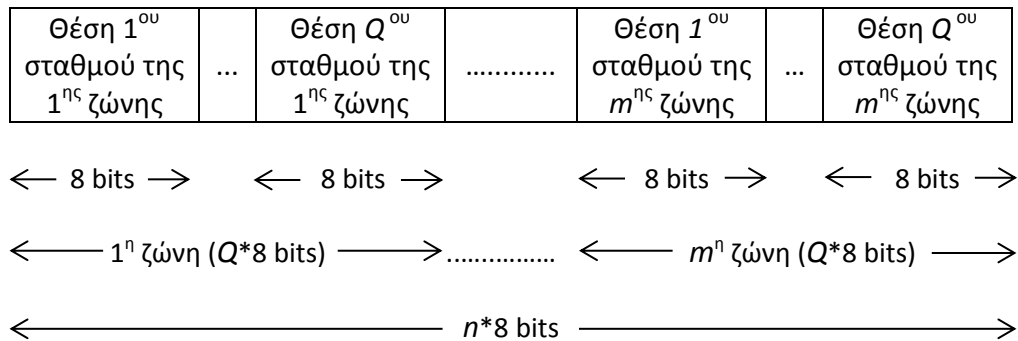
#### 4.2.3 Επίλυση του προβλήματος για βέλτιστη τοποθέτηση Σταθμών Ταχείας Φόρτισης

- ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΤΙΣ ΘΕΣΕΙΣ ΤΩΝ ΜΔΠ

Η μέθοδος επίλυσης που θα παρουσιαστεί παρακάτω, στηρίζεται στη συνδυαστική χρήση του Δυαδικού Γενετικού Αλγορίθμου (ΓΑ) και της Ροής Φορτίου (ΡΦ). Στην υποενοότητα αυτή, θα περιγράψουμε τον τρόπο επίλυσης του προβλήματος, στην περίπτωση που αναζητούμε τη βέλτιστη θέση τοποθέτησης των Σταθμών Ταχείας Φόρτισης (ΣΤΦ) ηλεκτρικών οχημάτων, θεωρώντας ως δεδομένες τις θέσεις και τις ισχύεις των ΜΔΠ.

Αρχικά, ο χρήστης καθορίζει τον αριθμό ( $k$ ), τις θέσεις και τις τιμές της ισχύος των ΜΔΠ που επιθυμεί να συνδεθούν στο δίκτυο διανομής, εισάγει τα δεδομένα του προς εξέταση δικτύου και ορίζει ποιές θα είναι οι ( $m$ ) ζώνες στις οποίες θα χωρίσει τους ζυγούς του δικτύου με βάση κάποια κοινωνικά κριτήρια. Ακόμα, ορίζει τον αριθμό των Σταθμών Ταχείας Φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων ( $n$ ) που θα εγκατασταθούν στο δίκτυο, καθώς και την ισχύ του καθενός από αυτούς και μοιράζει τους σταθμούς ισόποσα σε κάθε μια από τις ( $m$ ) ζώνες. Έτσι, στην κάθε ζώνη εγκαθίστανται ( $Q=n/m$ ) ΣΤΦ. Στη συνέχεια με τη χρήση του ΓΑ δημιουργούμε έναν αρχικό τυχαίο πληθυσμό, ο οποίος αποτελείται από  $N_{pop}$  χρωμοσώματα, δηλαδή δημιουργούμε έναν πίνακα με  $N_{pop}$  αριθμό γραμμών, που η κάθε μία από αυτές αποτελεί μια πιθανή λύση του προβλήματος. Κάθε γραμμή του πίνακα αυτού αποτελείται από ( $m$ ) μέρη, όσες και οι ζώνες που έχουμε χωρίσει το δίκτυο του προβλήματος και κάθε ένα από αυτά απεικονίζει τους ( $Q$ ) ζυγούς στους οποίους θα συνδεθούν οι ( $Q$ ) Σταθμοί Ταχείας Φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων της κάθε μίας από τις ζώνες, του συγκεκριμένου χρωμοσώματος. Στη συνέχεια, ελέγχουμε αν οι ( $n$ ) ζυγοί που έχουν επιλεγεί για την εγκατάσταση των ΣΤΦ του κάθε χρωμοσώματος, ανήκουν στις αντίστοιχες ζώνες του δικτύου και αν δεν ανήκουν αντικαθιστούμε τον κάθε ζυγό που δεν ανήκει στην

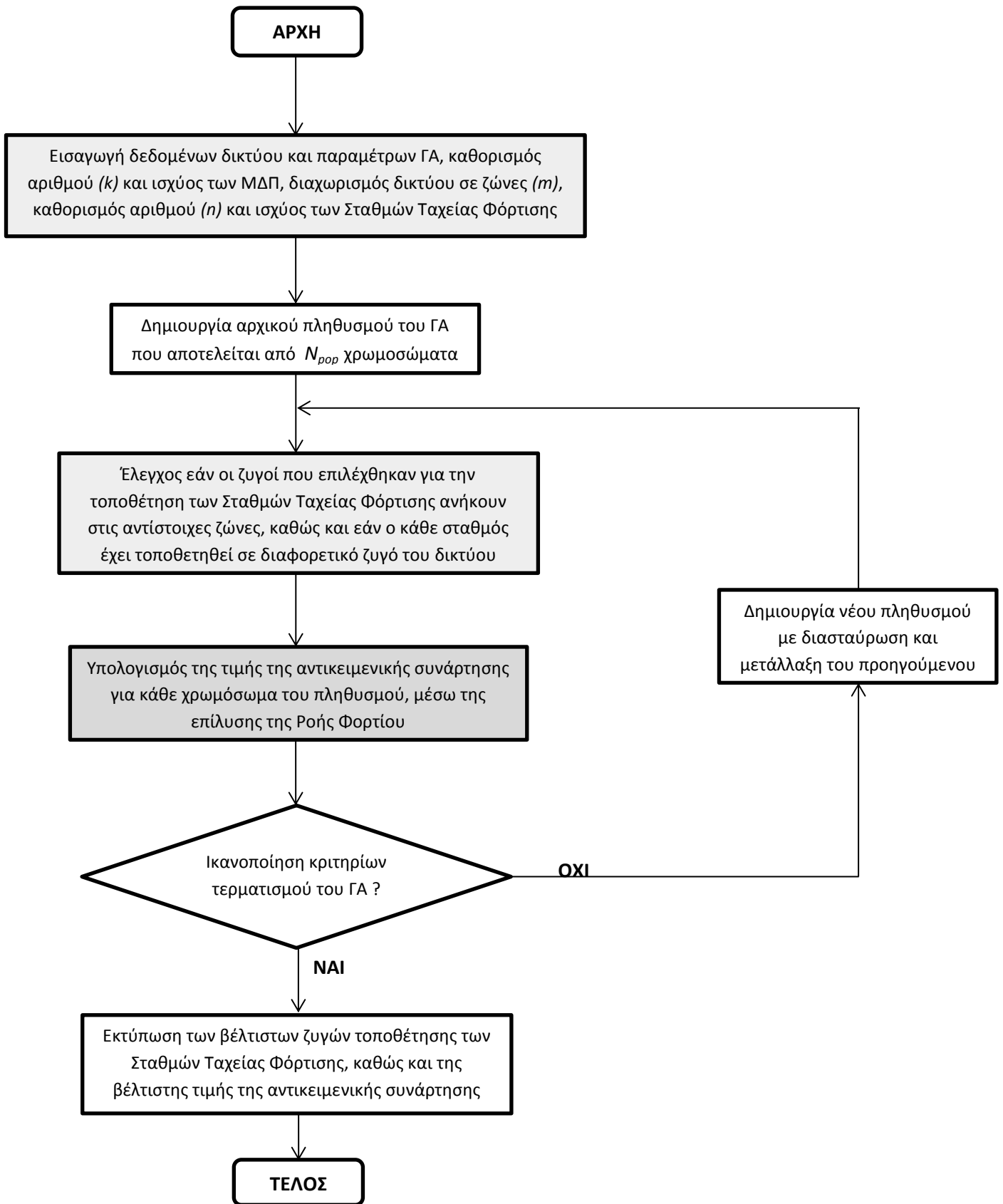
αντίστοιχη ζώνη με τον κοντινότερό του αριθμητικά ζυγό ο οποίος ανήκει σε αυτή. Ακόμα, σε περίπτωση που σε κάποια ζώνη επιλεγεί τυχαία ο ίδιος ζυγός για την εγκατάσταση, άνω του ενός Σταθμού Ταχείας Φόρτισης σε αυτόν, τότε αντικαθιστούμε τυχαία τον έναν από τους ζυγούς που ταυτίζονται με κάποιον άλλον που βρίσκεται εντός ζώνης, μέχρις ότου όλοι οι σταθμοί στη συγκεκριμένη ζώνη να τοποθετηθούν σε διαφορετικούς ζυγούς εντός ζώνης.



**Σχήμα 4.3:** Ενδεικτική μορφή ενός, από τα  $N_{pop}$  χρωμοσώματα του πληθυσμού

Έχοντας επιλέξει ζυγούς διαφορετικούς μεταξύ τους που ανήκουν στην αντίστοιχη ζώνη, για την τοποθέτηση (Q) Σταθμών Ταχείας Φόρτισης ανά ζώνη, για το κάθε χρωμόσωμα του πληθυσμού εφαρμόζουμε μια Ροή Φορτίου. Μέσα από τη Ροή Φορτίου, υπολογίζονται οι συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος, καθώς και η συνολική μεταβολή της απόκλισης της τάσης των ζυγών για το κάθε χρωμόσωμα. Με βάση τις τιμές που έχουν προκύψει από τη Ροή Φορτίου, υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε ένα από τα χρωμοσώματα. Στη συνέχεια, ο νέος πίνακας που δημιουργείται με τις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης για καθένα από τα  $N_{pop}$  χρωμοσώματα, ταξινομείται κατά αύξουσα σειρά, έτσι ώστε το πρώτο στοιχείο του πίνακα να είναι εκείνο με τη χαμηλότερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή εκείνος ο συνδυασμός ζυγών που αποτελεί τη βέλτιστη λύση για το πρόβλημα. Σύμφωνα με την ίδια αύξουσα σειρά, ταξινομείται εν συνεχεία και ο πίνακας με τον πληθυσμό των χρωμοσωμάτων. Η πρώτη γραμμή αυτών των 2 πινάκων, αποθηκεύεται, καθώς αποτελεί την βέλτιστη λύση και δεν θέλουμε να αλλάξει κατά τη μετάλλαξη του πληθυσμού αυτής της γενιάς.

Εν συνεχεία, ένα ποσοστό των χρωμοσωμάτων με τη χειρότερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης διαγράφεται και από τα χρωμοσώματα που επιζούν επιλέγονται ορισμένα για διασταύρωση και στη συνέχεια πραγματοποιείται μετάλλαξη του πληθυσμού. Η διαδικασία της διασταύρωσης και της μετάλλαξης πραγματοποιείται, με τον τρόπο που έχουμε περιγράψει αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2, όπου παρουσιάζεται ο Δυαδικός Γενετικός Αλγόριθμος. Μετά από αυτές τις δυο διαδικασίες ο νέος πληθυσμός ελέγχεται και πάλι με τον ίδιο τρόπο που περιγράψαμε παραπάνω, σχετικά με το αν οι νέοι ζυγοί του κάθε χρωμοσώματος που έχουν επιλεγεί για την τοποθέτηση του κάθε Σταθμού Ταχείας Φόρτισης είναι διαφορετικοί μεταξύ τους, καθώς και αν ανήκουν στις αντίστοιχες ζώνες. Οι ζυγοί που δεν ικανοποιούν αυτόν τον περιορισμό αλλάζουν τιμή, σύμφωνα με τον τρόπο που αναφέρεται παραπάνω. Ύστερα, από αυτή τη διαδικασία δημιουργείται μια νέα γενιά με χρωμοσώματα σαφώς βελτιωμένα σε σχέση με αυτά της προηγούμενης.



**Σχήμα 4.4:** Μεθοδολογία επίλυσης με ΓΑ και ΒΡΦ

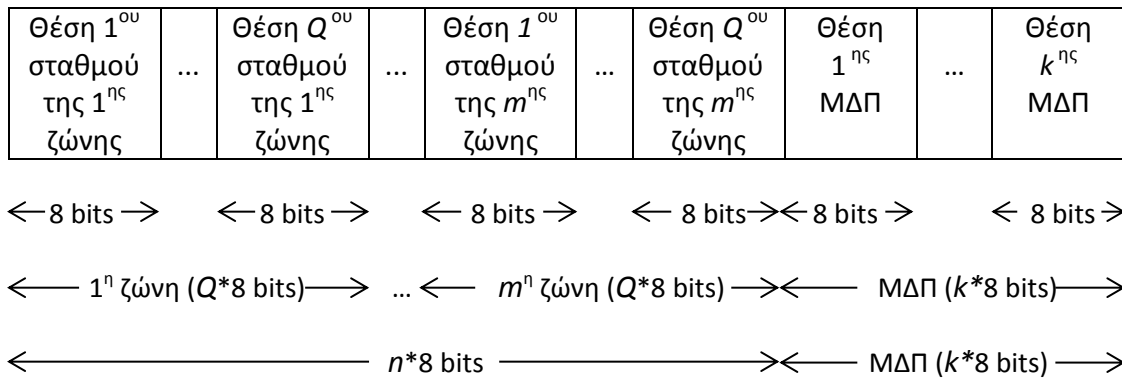


Αυτή η επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται, έως ότου οι γενιές φτάσουν ένα ανώτερο επιτρεπτό όριο, ή όταν το καλύτερο χρωμόσωμα κάθε γενιάς αποτύχει να βελτιωθεί παραπάνω από μια συγκεκριμένη ποσότητα για ένα συγκεκριμένο αριθμό γενεών. Στο παραπάνω διάγραμμα ροής του Σχήματος 4.4 παρουσιάζονται όλα τα βήματα που ακολουθούνται κατά την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος.

- ΜΕ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΤΙΣ ΘΕΣΕΙΣ ΤΩΝ ΜΔΠ

Στην υποενότητα αυτή, θεωρείται η υποθετική περίπτωση όπου θα επιλεγόταν η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της θέσης των ΜΔΠ και της θέσης των ΣΤΦ στο υπό εξέταση δίκτυο. Έτσι, θα περιγράψουμε παρακάτω τον τρόπο επίλυσης του προβλήματος, στη θεωρητική περίπτωση που αναζητούμε τη βέλτιστη θέση και το βέλτιστο μέγεθος των ΜΔΠ που έχουμε επιλέξει να συνδέσουμε στο δίκτυο, καθώς και τη βέλτιστη θέση τοποθέτησης των ΣΤΦ.

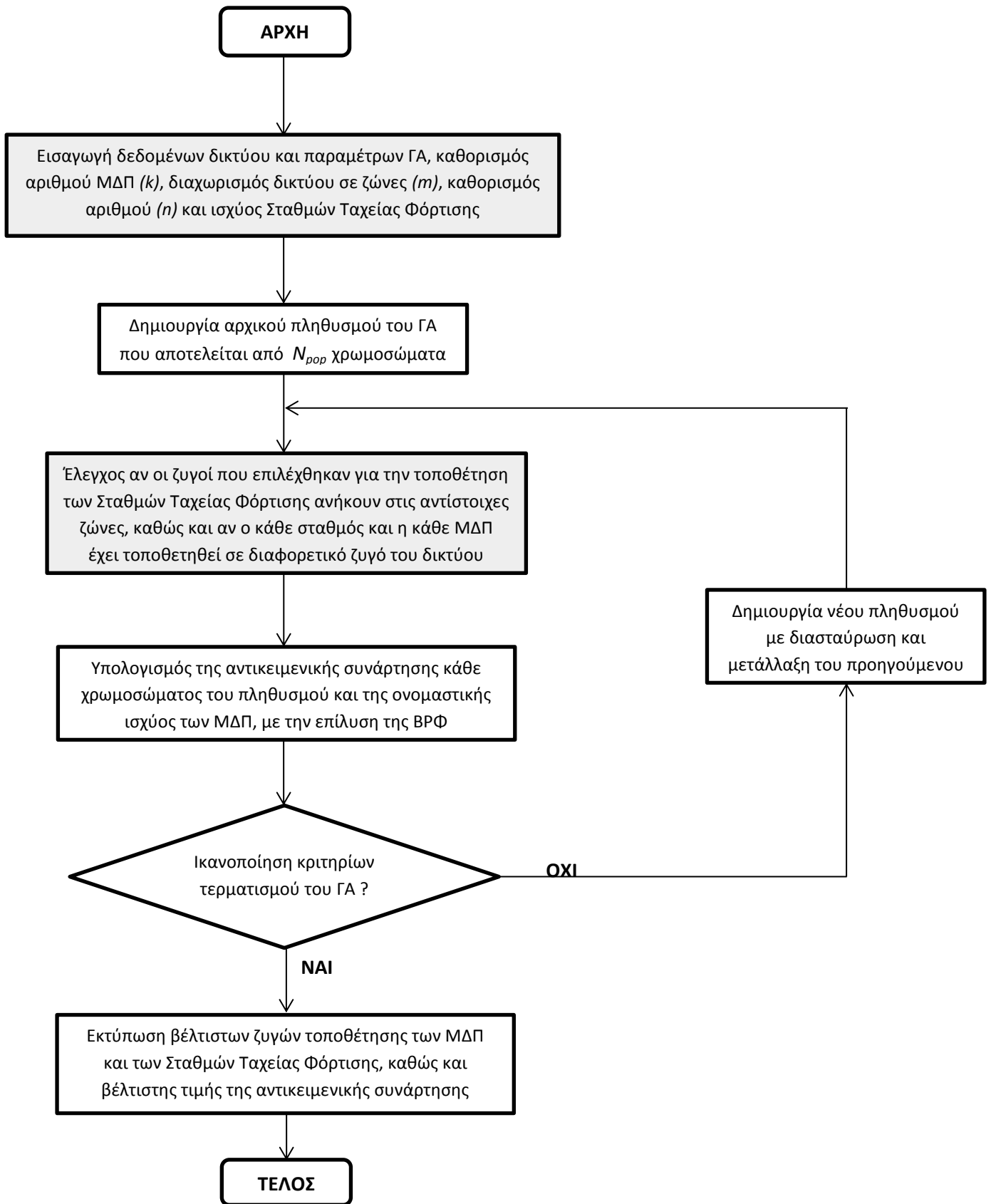
Αρχικά, ο χρήστης καθορίζει τον αριθμό των ΜΔΠ ( $k$ ) που επιθυμεί να συνδεθούν στο δίκτυο διανομής, εισάγει τα δεδομένα του προς εξέταση δικτύου και ορίζει ποιες θα είναι οι ( $m$ ) ζώνες στις οποίες θα χωρίσει τους ζυγούς του δικτύου με βάση κάποια κοινωνικά κριτήρια. Ακόμα, ορίζει τον αριθμό των ΣΤΦ ( $n$ ) που θα εγκατασταθούν στο δίκτυο, καθώς και την ισχύ του καθενός από αυτούς και μοιράζει τους σταθμούς ισόποσα σε κάθε μια από τις ( $m$ ) ζώνες. Έτσι, στην κάθε ζώνη εγκαθίστανται ( $Q=n/m$ ) ΣΤΦ. Στη συνέχεια, με τη χρήση του ΓΑ δημιουργούμε έναν αρχικό τυχαίο πληθυσμό, ο οποίος αποτελείται από  $N_{pop}$  χρωμοσώματα, δηλαδή δημιουργούμε έναν πίνακα με  $N_{pop}$  αριθμό γραμμών, που η κάθε μία από αυτές αποτελεί μια πιθανή λύση του προβλήματος. Κάθε ένα από αυτά τα χρωμοσώματα αποτελείται από δυο μέρη, το πρώτο μέρος αφορά τους ΣΤΦ που θα εγκατασταθούν, ενώ το δεύτερο μέρος τις ΜΔΠ που θα συνδεθούν στο δίκτυο. Έτσι λοιπόν, κάθε χρωμόσωμα, δηλαδή κάθε γραμμή του πίνακα, αποτελείται από ( $n + k$ ) στοιχεία, όπου τα πρώτα ( $n$ ) στοιχεία χωρίζονται σε ( $m$ ) μέρη, όσες και οι ζώνες που έχουμε χωρίσει το δίκτυο του προβλήματος. Εν συνεχεία, ελέγχουμε αν τα ( $n$ ) πρώτα στοιχεία του κάθε χρωμοσώματος, ανήκουν στις αντίστοιχες ζώνες του δικτύου και αν δεν ανήκουν αντικαθιστούμε τον κάθε ζυγό που δεν ανήκει στην αντίστοιχη ζώνη με τον κοντινότερό του αριθμητικά ζυγό ο οποίος ανήκει σε αυτή. Ακόμα, σε περίπτωση που σε κάποια ζώνη επιλεγθεί τυχαία ο ίδιος ζυγός για την εγκατάσταση, άνω του ενός Σταθμού Ταχείας Φόρτισης σε αυτόν, τότε αντικαθιστούμε τυχαία τον έναν από τους ζυγούς που ταυτίζονται με κάποιον άλλον που βρίσκεται εντός ζώνης, μέχρις ότου όλοι οι σταθμοί στη συγκεκριμένη ζώνη να τοποθετηθούν σε διαφορετικούς ζυγούς εντός ζώνης. Τέλος, ελέγχουμε αν οι ( $k$ ) ΜΔΠ έχουν επιλεγθεί να συνδεθούν σε διαφορετικούς ζυγούς του δικτύου η κάθε μια και αν δεν συμβαίνει αυτό τότε αλλάζουμε τυχαία τους ζυγούς που ταυτίζονται, μέχρις ότου η κάθε ΜΔΠ να εγκατασταθεί σε διαφορετικό ζυγό του δικτύου διανομής.



**Σχήμα 4.5:** Ενδεικτική μορφή ενός, από τα  $N_{pop}$  χρωμοσώματα του πληθυσμού

Έχοντας επιλέξει ζυγούς διαφορετικούς μεταξύ τους που ανήκουν στην αντίστοιχη ζώνη, για την τοποθέτηση ( $Q$ ) Σταθμών Ταχείας Φόρτισης ανά ζώνη και ζυγούς διαφορετικούς μεταξύ τους για την τοποθέτηση της κάθε ΜΔΠ, για το κάθε χρωμόσωμα του πληθυσμού εφαρμόζουμε μια ΒΡΦ. Μέσα από τη ΒΡΦ καθορίζεται η ονομαστική παραγωγή ενεργού και αέργου ισχύος της κάθε ΜΔΠ. Ακόμα, υπολογίζονται οι συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος, καθώς και η συνολική μεταβολή της τάσης των ζυγών για το κάθε χρωμόσωμα. Με βάση τις τιμές που έχουν προκύψει από τη ΒΡΦ υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε ένα από τα χρωμοσώματα. Στη συνέχεια, ο νέος πίνακας που δημιουργείται με τις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης για καθένα από τα  $N_{pop}$  χρωμοσώματα, ταξινομείται κατά αύξουσα σειρά, έτσι ώστε το πρώτο στοιχείο του πίνακα να είναι εκείνο με τη χαμηλότερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή εκείνος ο συνδυασμός ζυγών που αποτελεί τη βέλτιστη λύση για το πρόβλημα. Σύμφωνα με την ίδια αύξουσα σειρά, ταξινομείται στη συνέχεια και ο πίνακας με τον πληθυσμό των χρωμοσωμάτων. Η πρώτη γραμμή αυτών των 2 πινάκων, αποθηκεύεται, καθώς αποτελεί την βέλτιστη λύση και δεν θέλουμε να αλλάξει κατά τη μετάλλαξη του πληθυσμού αυτής της γενιάς.

Εν συνεχεία, ένα ποσοστό των χρωμοσωμάτων με τη χειρότερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης διαγράφεται και από τα χρωμοσώματα που επιζούν επιλέγονται ορισμένα για διασταύρωση και στη συνέχεια πραγματοποιείται μετάλλαξη του πληθυσμού. Η διαδικασία της διασταύρωσης και της μετάλλασης πραγματοποιείται, με τον τρόπο που έχουμε περιγράψει αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2, όπου παρουσιάζεται ο Δυναμικός Γενετικός Αλγόριθμος. Μετά από αυτές τις δυο διαδικασίες ο νέος πληθυσμός ελέγχεται και πάλι με τον ίδιο τρόπο που περιγράψαμε παραπάνω, σχετικά με το αν οι νέοι ζυγοί του κάθε χρωμοσώματος που έχουν επιλεγεί για την τοποθέτηση των Σταθμών Ταχείας Φόρτισης είναι διαφορετικοί μεταξύ τους και ανήκουν στις αντίστοιχες ζώνες, καθώς και αν η κάθε μια ΜΔΠ έχει συνδεθεί σε διαφορετικό ζυγό του δικτύου. Οι ζυγοί που δεν ικανοποιούν αυτούς τους περιορισμούς αλλάζουν τιμή, σύμφωνα με τον τρόπο που αναφέρεται παραπάνω. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται μια νέα γενιά με χρωμοσώματα σαφώς βελτιωμένα σε σχέση με αυτά της προηγούμενης. Αυτή η επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται, έως ότου οι γενιές φτάσουν ένα ανώτερο επιτρεπτό όριο, ή όταν το καλύτερο χρωμόσωμα κάθε γενιάς αποτύχει να βελτιωθεί παραπάνω από μια συγκεκριμένη ποσότητα για ένα συγκεκριμένο αριθμό γενεών. Στο παρακάτω διάγραμμα ροής του Σχήματος 4.6 παρουσιάζονται όλα τα βήματα που ακολουθούνται κατά την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος.



**Σχήμα 4.6:** Μεθοδολογία επίλυσης με ΓΑ και ΒΡΦ







## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ**

### **5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν, ύστερα από την εκτέλεση στο περιβάλλον της MATLAB των αλγορίθμων που περιγράψαμε στο Κεφάλαιο 4, για διάφορα σενάρια. Αρχικά, μέσα από δοκιμές επιλέγουμε τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων του Γενετικού Αλγορίθμου (ΓΑ) και τη βέλτιστη μέθοδο επίλυσης της Βέλτιστης Ροής Φορτίου (ΒΡΦ), έτσι ώστε να ελαχιστοποιήσουμε το χρόνο εκτέλεσης του κώδικα και να επιτύχουμε γρηγορότερη σύγκλιση της μεθόδου στη βέλτιστη λύση. Στη συνέχεια, με αυτές τις τιμές των παραμέτρων του ΓΑ και με τον βέλτιστο solver της ΒΡΦ που έχουμε επιλέξει, επιλύουμε το πρόβλημα ως προς την βέλτιστη τοποθέτηση μόνο Μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής (ΜΔΠ), καθώς και ως προς την βέλτιστη τοποθέτηση Σταθμών Ταχείας Φόρτισης (ΣΤΦ) στο δίκτυο διανομής. Η επίλυση του προβλήματος πραγματοποιείται με βάση τεχνικά κριτήρια, δηλαδή με βάση τις απώλειες και το προφίλ της τάσης του δικτύου. Όλες οι εκτελέσεις των αλγορίθμων, έγιναν με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή με τα παρακάτω χαρακτηριστικά λειτουργίας:

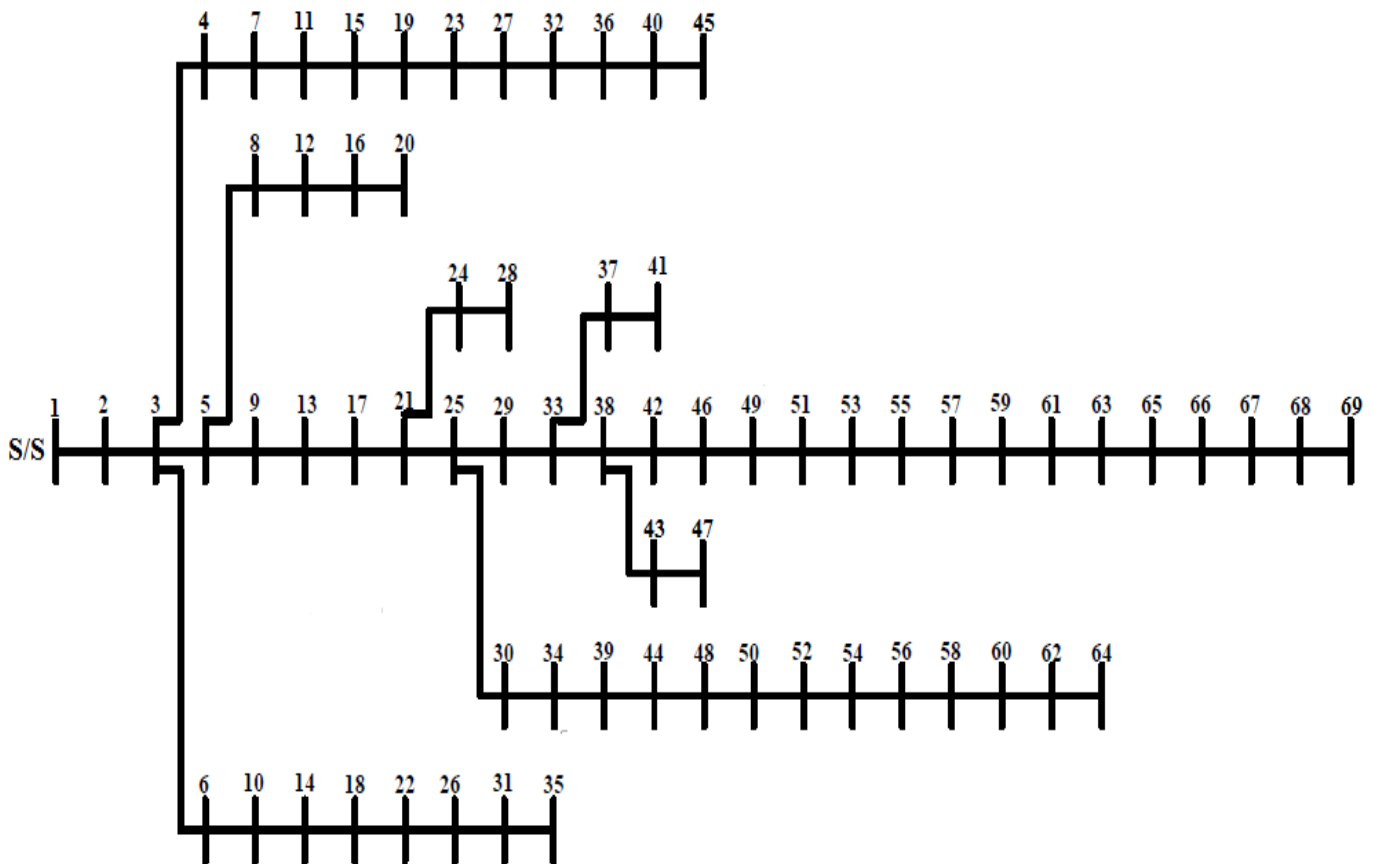
- Επεξεργαστής: Intel(R) Core™ i5-3210M 2.5 GHz
- Μνήμη RAM: 8 GB (7.84 GB usable)
- Λειτουργικό σύστημα: Microsoft Windows 8.1 Pro

### **5.2 ΔΙΚΤΥΟ 69 ΖΥΓΩΝ**

#### **5.2.1 Δεδομένα δικτύου 69 ζυγών**

Θεωρείται το δίκτυο διανομής που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1, το οποίο αποτελείται από 69 ζυγούς και 68 γραμμές. Το συγκεκριμένο δίκτυο, καλύπτει μια κατοικημένη περιοχή που έχει έκταση 10.5 τετραγωνικά χιλιόμετρα και το συνολικό φορτίο των καταναλωτών που το χρησιμοποιούν είναι 4.014 MW και 2.845 MVar. Στο ζυγό 1 βρίσκεται ο υποσταθμός ΥΤ/ΜΤ και για το λόγο αυτό θεωρείται ως ζυγός ταλάντωσης, οπότε στο ζυγό αυτό δεν μπορεί να συνδεθεί ούτε κάποιος ΣΤΦ ούτε κάποια ΜΔΠ. Οι υπόλοιποι ζυγοί του συστήματος χαρακτηρίζονται ως ζυγοί φορτίου (ΡQ) και τα δεδομένα του συγκεκριμένου δικτύου φαίνονται στον Πίνακα 6.1. Για το δίκτυο διανομής που μελετάται, η βασική ισχύς είναι  $S_{base}=10MVA$  και η βασική τάση είναι  $V_{base}=12.8kV$ . Ακόμα, οι περιορισμοί του δικτύου που εξετάζεται, αφορούν το μέγιστο και το ελάχιστο μέτρο της τάσης για κάθε ζυγό του, που πρέπει να είναι 1.0 α.μ. και 0.95 α.μ. αντίστοιχα. Επιπλέον περιορισμοί υπάρχουν σχετικά με τη γωνία του κάθε ζυγού που πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ  $-360^\circ$  και  $360^\circ$ , καθώς επίσης και σχετικά με τα

Θερμικά όρια των γραμμών που θεωρούνται ίσα με 3MVA. Θεωρείται ακόμα, ότι η ΜΔΠ έχει ένα σταθερό συντελεστή ισχύος, ο οποίος είναι ίσος με 0.9 επαγωγικός και πως η τιμή της ενεργούς ισχύος της έχει ως ανώτατο όριο τα 1.5 MW. Στις ενότητες 5.2.2 και 5.2.3 θα διερευνηθεί η επίδραση που έχουν οι διάφορες παράμετροι του προβλήματος στα αποτελέσματα. Οι παράμετροι αυτοί αφορούν τον ΓΑ και τη ΒΡΦ και θα παρουσιαστούν αναλυτικά στις επόμενες ενότητες.



**Σχήμα 5.1:** Μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου 69 ζυγών



**Πίνακας 5.1:** Δεδομένα δικτύου 69 ζυγών

<b>Ζυγός αναχώρησης</b>	<b>Ζυγός άφιξης</b>	<b>R (α.μ.)</b>	<b>X (α.μ.)</b>	<b>Αριθμός Ζυγού</b>	<b>P ζυγού (MW)</b>	<b>P ζυγού (MW)</b>
1	2	0,0000205	0,0000632	1	0	0
2	3	0,0000305	0,0000732	2	0	0
3	5	0,0000916	0,0002197	3	0	0
3	6	0,0002686	0,0006592	4	0	0
3	4	0,0002686	0,0006592	5	0	0
4	7	0,0039063	0,009552	6	0,026	0,0186
5	9	0,001532	0,0017944	7	0,026	0,0186
5	8	0,0002075	0,0005127	8	0	0
6	10	0,0039063	0,009552	9	0	0
7	11	0,006427	0,0075073	10	0,026	0,0186
8	12	0,0051941	0,0127136	11	0	0
9	13	0,0223389	0,011377	12	0,079	0,0564
10	14	0,0242798	0,0080261	13	0,0026	0,0022
11	15	0,0018555	0,0021667	14	0	0
12	16	0,017688	0,04328	15	0,024	0,017
13	17	0,0232605	0,0118469	16	0,3847	0,2745
14	18	0,0042847	0,001416	17	0,0404	0,03
15	19	0,0001099	0,0001282	18	0	0
16	20	0,0050171	0,0122742	19	0,024	0,017
17	21	0,0056274	0,0028687	20	0,3847	0,2745
18	22	0,0214233	0,0070801	21	0,075	0,054
19	23	0,0444519	0,0519348	22	0	0
21	25	0,003009	0,001532	23	0,0012	0,001
21	24	0,0056641	0,002887	24	0,0405	0,0283
22	26	0,0512085	0,0171875	25	0,03	0,022
23	27	0,0189209	0,022113	26	0,014	0,01
24	28	0,0202576	0,0067993	27	0	0
25	29	0,0499878	0,0165222	28	0,0036	0,0027
25	30	0,0106201	0,0054077	29	0,028	0,019
26	31	0,104248	0,0344604	30	0,0044	0,0035
27	32	0,0025024	0,0029175	31	0,0195	0,014
29	33	0,0114258	0,0037781	32	0,006	0,0043
30	34	0,0123901	0,006311	33	0,145	0,104
31	35	0,0899658	0,0297424	34	0,0264	0,019
32	36	0,0005615	0,000708	35	0,006	0,004
33	38	0,0434204	0,0143494	36	0	0
33	37	0,0122803	0,0037292	37	0,018	0,013
34	39	0,0173462	0,0088318	38	0,145	0,104
36	40	0,0066467	0,0083801	39	0,024	0,0172
37	41	0,0002869	0,0000854	40	0,0392	0,0263
38	42	0,0628662	0,020752	41	0,018	0,013

38	43	0,0451294	0,014917	42	0,008	0,005
39	44	0,0171692	0,0087463	43	0,028	0,02
40	45	0,0000549	0,0000732	44	0	0
42	46	0,0637207	0,0210571	45	0,0392	0,0263
43	47	0,0002869	0,0000977	46	0,008	0,0055
44	48	0,0970459	0,0325745	47	0,028	0,02
46	49	0,0645752	0,0213379	48	0	0
48	50	0,048053	0,0160522	49	0	0
49	51	0,0119995	0,0039673	50	0	0
50	52	0,0185669	0,0061401	51	0,0455	0,03
51	53	0,0228516	0,0075562	52	0,1	0,072
52	54	0,0235657	0,0071533	53	0,06	0,035
53	55	0,0002869	0,0000977	54	0	0
54	56	0,0309753	0,0157776	55	0,06	0,035
55	57	0,0199951	0,0066101	56	1,244	0,888
56	58	0,0059448	0,0030273	57	0	0
57	59	0,012854	0,0042114	58	0,032	0,023
58	60	0,0088501	0,0045044	59	0,001	0
59	61	0,0208496	0,0068909	60	0	0
60	62	0,0433655	0,0220886	61	0,114	0,081
61	63	0,0008545	0,0002808	62	0,227	0,162
62	64	0,0635376	0,0323608	63	0,005	0,0035
63	65	0,0097107	0,0032104	64	0,059	0,042
65	66	0,0211365	0,0069885	65	0,059	0,042
66	67	0,0457031	0,0151062	66	0,059	0,042
67	68	0,0457031	0,0151062	67	0,059	0,042
68	69	0,0457031	0,0151062	68	0,059	0,042
				69	0,059	0,042

### 5.2.2 Μορφή αντικειμενικής συνάρτησης για το δίκτυο των 69 ζυγών

Η γενική μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης του συγκεκριμένου προβλήματος, παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4 (ενότητα 4.2.1) και έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος και τη βελτίωση του προφίλ της τάσης. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η μορφή που θα έχει αυτή η αντικειμενική συνάρτηση στην περίπτωση που στο δίκτυο των 69 ζυγών επιδιώκεται μόνο τοποθέτηση ΜΔΠ, καθώς και στην περίπτωση που επιδιώκεται η τοποθέτηση ΣΤΦ στο συγκεκριμένο δίκτυο διανομής. Δεδομένου ότι στο συγκεκριμένο δίκτυο των 69 ζυγών ο ζυγός 1 θεωρείται ως ζυγός αναφοράς, η τάση αναφοράς στην αντικειμενική συνάρτηση θα έχει την τιμή της τάσης του ζυγού 1, δηλαδή θα ισχύει  $V_{ref} = 1.0$  α.μ. Επίσης, έχει υπολογιστεί για αυτό το δίκτυο ότι οι αρχικές απώλειες ενεργού ισχύος, δηλαδή οι απώλειες όταν δεν έχουν συνδεθεί ούτε ΜΔΠ ούτε ΣΤΦ σε αυτό, είναι:

$$P_{losses}^{without DG,FCS} = 0.250506 MW$$

Ακόμα, όσον αφορά την αρχική απόκλιση της τάσης των ζυγών του δικτύου από την τάση αναφοράς, δηλαδή η απόκλιση όταν δεν έχουν συνδεθεί ούτε ΜΔΠ ούτε ΣΤΦ σε αυτό, έχει υπολογιστεί ότι η τιμή της είναι:

$$\sum_{i=1}^{69} |V_i^{without DG,FCS} - 1| = 2.06574 \text{ α. μ.}$$

Όπου  $V_i^{without DG,FCS}$  είναι η τιμή της τάσης του κάθε ενός από τους 69 ζυγούς του δικτύου πριν συνδεθούν σε αυτό οι ΣΤΦ και οι ΜΔΠ.

Επομένως στην περίπτωση που αναζητείται μόνο η βέλτιστη τοποθέτηση ενός συγκεκριμένου αριθμού ΜΔΠ, η μορφή που θα λαμβάνει η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος θα είναι:

$$F_{DG} = k_p * \frac{P_{losses}^{with DG}}{0.250506} + k_v * \frac{\sum_{i=1}^{69} |V_i^{with DG} - 1|}{2.06574} \quad (5.1)$$

Όπου  $P_{losses}^{with DG}$  και  $V_i^{with DG}$  είναι η τιμή των απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου και η τιμή της τάσης του κάθε ενός από τους 69 ζυγούς του δικτύου αντίστοιχα, μετά τη σύνδεση των ΜΔΠ σε αυτό .

Αντίστοιχα, στην θεωρητική περίπτωση που αναζητείται και η βέλτιστη τοποθέτηση ΣΤΦ, καθώς και η βέλτιστη τοποθέτηση ΜΔΠ, η μορφή που θα λαμβάνει η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος θα είναι:

$$F_{FCS,DG} = k_p * \frac{P_{losses}^{with DG,FCS}}{0.250506} + k_v * \frac{\sum_{i=1}^{69} |V_i^{with DG,FCS} - 1|}{2.06574} \quad (5.2)$$

Όπου  $P_{losses}^{with DG,FCS}$  και  $V_i^{with DG,FCS}$  είναι η τιμή των απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου και η τιμή της τάσης του κάθε ενός από τους 69 ζυγούς του δικτύου αντίστοιχα, μετά τη σύνδεση των ΣΤΦ και των ΜΔΠ σε αυτό .

Στην περίπτωση που στο δίκτυο διανομής του Σχήματος 5.1 υπάρχουν εξαρχής συνδεδεμένες τέσσερις ΜΔΠ στους ζυγούς 27, 61, 60 και 35 με την τιμή της ισχύος της καθεμιάς από αυτές να φαίνεται στον Πίνακα 5.2α, οι αρχικές τιμές των απωλειών ισχύος και της απόκλισης της τάσης θα είναι διαφορετικές από αυτές που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Οι συγκεκριμένες αρχικές τιμές, πριν τη σύνδεση των ΣΤΦ στο συγκεκριμένο δίκτυο διανομής, παρουσιάζονται στις δύο επόμενες σχέσεις:

$$P_{losses}^{with 4 stable DG} = 0.123481 MW$$

$$\sum_{i=1}^{69} |V_i^{with 4 stable DG} - 1| = 0.974991 \alpha. \mu.$$

**Πίνακας 5.2α:** Οι 4 σταθερές ΜΔΠ που είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο των 69 ζυγών

Θέση ΜΔΠ (ζυγός)	Ισχύς ΜΔΠ (MW)
27	0.3
61	1.6
60	0.5
35	0.3

Επομένως, όταν στην επίλυση του προβλήματος αναζητείται η βέλτιστη θέση των ΣΤΦ, θεωρώντας σταθερές εξαρχής τις θέσεις και την τιμή της ισχύος των ΜΔΠ, η αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

$$F_{FCS} = k_p * \frac{P_{losses}^{with FCS}}{0.123481} + k_v * \frac{\sum_{i=1}^{69} |V_i^{with FCS} - 1|}{0.974991} \quad (5.3)$$

Όπου  $P_{losses}^{with FCS}$  και  $V_i^{with FCS}$  είναι η τιμή των απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου και η τιμή της τάσης του κάθε ενός από τους 69 ζυγούς του δικτύου αντίστοιχα, μετά τη σύνδεση των ΣΤΦ σε αυτό .

Όπως έχει προαναφερθεί και στο Κεφάλαιο 4, για τους δύο συντελεστές βαρύτητας θα πρέπει να ισχύει πάντοτε η σχέση:  $k_p + k_v = 1$ . Στις επόμενες ενότητες θα δούμε πως επηρεάζει την επίλυση του προβλήματος, η μεταβολή της τιμής αυτών των συντελεστών, δοκιμάζοντας είτε την περίπτωση που δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα στην απόκλιση της τάσης των ζυγών, είτε την περίπτωση που δίνεται στους δύο συντελεστές η ίδια βαρύτητα, είτε εκείνη που δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα στις απώλειες της ενεργούς ισχύος. Οι τρεις αυτές περιπτώσεις παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 5.2β:

**Πίνακας 5.2β:** Εναλλαγή τιμών των συντελεστών βαρύτητας της αντικειμενικής συνάρτησης

$k_p$	$k_v$	$k_p + k_v$
0.25	0.75	1
0.50	0.50	1
0.75	0.25	1

### 5.2.3 Διερεύνηση επίδρασης παραμέτρων Γενετικού Αλγορίθμου στα αποτελέσματα για το δίκτυο των 69 ζυγών

Στην ενότητα αυτή αναζητούνται οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων του ΓΑ και η επιλογή τους γίνεται με βάση τη βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος, καθώς και τον συνολικό χρονική διάρκεια της εκτέλεσης του αλγορίθμου. Σε όλες αυτές τις εκτελέσεις θεωρείται ως μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης, εκείνη που παρουσιάστηκε γενικότερα στο Κεφάλαιο 4 (ενότητα 4.2.1) και εκτενέστερα στην προηγούμενη ενότητα 5.2.2. Ακόμα, οι παράμετροι του ΓΑ αποτελούνται από το μέγεθος του πληθυσμού, το ποσοστό του πληθυσμού που κρατείται για διασταύρωση, την πιθανότητα μετάλλαξης, τον μέγιστο αριθμό γενεών του αλγορίθμου, καθώς και από τον αριθμό των συνεχόμενων γενεών που η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης παραμένει σταθερή. Η αναζήτηση των βέλτιστων παραμέτρων θα πραγματοποιηθεί για τις περιπτώσεις τοποθέτησης δυο, τριών και τεσσάρων ΜΔΠ στο δίκτυο των 69 ζυγών, μέσα από την εκτέλεση μιας και μόνο επανάληψης του αλγορίθμου στο περιβάλλον της MATLAB. Και στις τρεις περιπτώσεις θεωρείται ότι δίνεται η ίδια βαρύτητα στους συντελεστές της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή ισχύει  $k_p = k_v = 0.50$ .

#### **i. Τοποθέτηση δύο ΜΔΠ**

Αρχικά διερευνάται ποιο είναι το βέλτιστο μέγεθος πληθυσμού και η επιλογή γίνεται με βάση τη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που προκύπτει κάθε φορά, καθώς και τη συνολική χρονική διάρκεια της εκτέλεσης του αλγορίθμου. Πιο συγκεκριμένα, θεωρούνται τα σενάρια που φαίνονται στον Πίνακα 5.3.

Υλοποιώντας τα σενάρια 1 έως 4 στο περιβάλλον της MATLAB, θεωρώντας πως η αντικειμενική συνάρτηση έχει την μορφή που περιγράψαμε παραπάνω και επιλέγοντας ως solver του MATPOWER τον PDIPM, τα αποτελέσματα που προκύπτουν φαίνονται στον Πίνακα 5.4.

Από τον Πίνακα 5.4 προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα η βέλτιστη επιλογή μεγέθους του πληθυσμού είναι τα 40 χρωμοσώματα, καθώς με αυτόν τον πληθυσμό προκύπτει η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

**Πίνακας 5.3:** Σενάρια για την επιλογή του κατάλληλου πληθυσμού για το δίκτυο των 69 ζυγών

Σενάρια	Μέγεθος πληθυσμού	Ποσοστό του πληθυσμού που κρατείται για διασταύρωση (%)	Πιθανότητα μετάλλαξης (%)	Μέγιστος αριθμός γενεών	Αριθμός συνεχόμενων γενεών με σταθερή τιμή αντικειμενικής συνάρτησης
1	20	50	15	300	50
2	30	50	15	300	50
3	40	50	15	300	50
4	50	50	15	300	50

**Πίνακας 5.4:** Επίδραση του μεγέθους του πληθυσμού του ΓΑ στα αποτελέσματα για το δίκτυο των 69 ζυγών

Σενάρια	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης (α.μ.)	Συνολικός χρόνος εκτέλεσης (min)
1	1.060018	1.4557
2	1.029320	2.4052
3	1.026096	3.1369
4	1.034970	4.1350

Στη συνέχεια κρατώντας το μέγεθος του πληθυσμού σταθερό και ίσο με 40 χρωμοσώματα αναζητείται το ιδανικότερο ποσοστό πληθυσμού που κρατείται για διασταύρωση. Πιο συγκεκριμένα, θεωρούνται τα σενάρια που φαίνονται στον Πίνακα 5.5.

Υλοποιώντας τα σενάρια 5 έως 8 στο περιβάλλον της MATLAB , θεωρώντας πως και πάλι η αντικειμενική συνάρτηση έχει την μορφή που περιγράψαμε παραπάνω και επιλέγοντας ως solver του MATPOWER τον PDIPM, τα αποτελέσματα που προκύπτουν φαίνονται στον Πίνακα 5.6.

Από τον Πίνακα 5.6 προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα η βέλτιστη επιλογή ποσοστού του πληθυσμού που κρατείται για διασταύρωση είναι 50%, καθώς με αυτό το ποσοστό επιτυγχάνεται η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

**Πίνακας 5.5:** Σενάρια για την επιλογή του κατάλληλου ποσοστού του πληθυσμού που κρατείται για διασταύρωση στο δίκτυο των 69 ζυγών

Σενάρια	Μέγεθος πληθυσμού	Ποσοστό του πληθυσμού που κρατείται για διασταύρωση (%)	Πιθανότητα μετάλλαξης (%)	Μέγιστος αριθμός γενεών	Αριθμός συνεχόμενων γενεών με σταθερή τιμή αντικειμενικής συνάρτησης
5	40	30	15	300	50
6	40	40	15	300	50
7	40	50	15	300	50
8	40	60	15	300	50

**Πίνακας 5.6:** Επίδραση του πληθυσμού του ΓΑ που κρατείται για διασταύρωση στα αποτελέσματα για το δίκτυο των 69 ζυγών

Σενάρια	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης (α.μ.)	Συνολικός χρόνος εκτέλεσης (min)
5	1.086339	2.4537
6	1.089216	2.5365
7	1.026096	3.1369
8	1.044478	3.3256

Εν συνεχεία, κρατώντας το μέγεθος του πληθυσμού σταθερό και ίσο με 40 χρωμοσώματα και το ποσοστό που κρατείται για διασταύρωση και αυτό σταθερό και ίσο με 50%, αναζητείται ποιο είναι το βέλτιστο ποσοστό όσον αφορά την πιθανότητα μετάλλαξης. Πιο συγκεκριμένα, θεωρούνται τα σενάρια που φαίνονται στον Πίνακα 5.7.

Υλοποιώντας τα σενάρια 9 έως 12 στο περιβάλλον της MATLAB, θεωρώντας πως και πάλι η αντικειμενική συνάρτηση έχει την μορφή που περιγράψαμε παραπάνω και επιλέγοντας ως solver του MATPOWER τον PDIPM, τα αποτελέσματα που προκύπτουν φαίνονται στον Πίνακα 5.8.

Από τον Πίνακα 5.8 προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα η βέλτιστη επιλογή πιθανότητας μετάλλαξης είναι 5%, καθώς σε αυτή την περίπτωση επιτυγχάνεται η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

**Πίνακας 5.7:** Σενάρια για την επιλογή της κατάλληλης πιθανότητας μετάλλαξης για το δίκτυο των 69 ζυγών

Σενάρια	Μέγεθος πληθυσμού	Ποσοστό του πληθυσμού που κρατείται για διασταύρωση (%)	Πιθανότητα μετάλλαξης (%)	Μέγιστος αριθμός γενεών	Αριθμός συνεχόμενων γενεών με σταθερή τιμή αντικειμενικής συνάρτησης
9	40	50	5	300	50
10	40	50	10	300	50
11	40	50	15	300	50
12	40	50	20	300	50

**Πίνακας 5.8:** Επίδραση της πιθανότητας μετάλλαξης του πληθυσμού του ΓΑ στα αποτελέσματα για το δίκτυο των 69 ζυγών

Σενάρια	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης (α.μ.)	Συνολικός χρόνος εκτέλεσης (min)
9	1.005832	2.4454
10	1.017637	2.9699
11	1.026096	3.1369
12	1.059133	3.3379

Τέλος, κρατώντας σταθερά το μέγεθος του πληθυσμού, το ποσοστό που κρατείται για διασταύρωση, καθώς και το ποσοστό της πιθανότητας μετάλλαξης και ίσα με 40 χρωμοσώματα, 50% και 5% αντίστοιχα, αναζητούνται οι ιδανικότερες παράμετροι για τον αριθμό των μέγιστων γενεών και για τον αριθμό των συνεχόμενων γενεών για τις οποίες αν η βελτίωση της καλύτερης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης είναι 0.01 τότε τερματίζεται ο ΓΑ. Πιο συγκεκριμένα, θεωρούνται τα σενάρια που φαίνονται στον Πίνακα 5.9.

Υλοποιώντας τα σενάρια 13 έως 16 στο περιβάλλον της MATLAB, θεωρώντας πως και πάλι η αντικειμενική συνάρτηση έχει την μορφή που περιγράψαμε παραπάνω και επιλέγοντας ως solver του MATPOWER τον PDIPM, τα αποτελέσματα που προκύπτουν φαίνονται στον Πίνακα 5.10.

**Πίνακας 5.9:** Σενάρια για την επιλογή του κατάλληλου μέγιστου αριθμού γενεών και συνεχόμενου αριθμού γενεών με σταθερή τιμή αντικειμενικής συνάρτησης για το δίκτυο των 69 ζυγών

Σενάρια	Μέγεθος πληθυσμού	Ποσοστό του πληθυσμού που κρατείται για διασταύρωση (%)	Πιθανότητα μετάλλαξης (%)	Μέγιστος αριθμός γενεών	Αριθμός συνεχόμενων γενεών με σταθερή τιμή αντικειμενικής συνάρτησης
13	40	50	5	50	10
14	40	50	5	150	25
15	40	50	5	300	50
16	40	50	5	450	75

**Πίνακας 5.10:** Επίδραση του μέγιστου αριθμού γενεών, καθώς και του αριθμού συνεχόμενων γενεών με σταθερή τιμή αντικειμενικής συνάρτησης στα αποτελέσματα για το δίκτυο των 69 ζυγών

Σενάρια	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης (α.μ.)	Συνολικός χρόνος εκτέλεσης (min)
13	1.034199	0.5986
14	1.007150	1.2761
15	1.005833	2.4454
16	1	3.6977

Από τον Πίνακα 5.10 προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα ο βέλτιστος μέγιστος αριθμός γενεών και ο βέλτιστος αριθμός των συνεχόμενων γενεών που η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι σταθερή, είναι 450 και 75 αντίστοιχα, καθώς για αυτές τις τιμές επιτυγχάνεται η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Σύμφωνα με όσα υπολογίστηκαν παραπάνω, οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων του ΓΑ θα είναι οι εξής:

- Μέγεθος πληθυσμού: 40
- Ποσοστό του πληθυσμού που κρατείται για διασταύρωση (%): 50
- Πιθανότητα μετάλλαξης (%): 5
- Μέγιστος αριθμός γενεών: 450
- Αριθμός συνεχόμενων γενεών με σταθερή τιμή αντικειμενικής συνάρτησης: 75

Στους παραπάνω πίνακες έχουμε θεωρήσει ως τιμή αναφοράς της αντικειμενικής συνάρτησης, τη βέλτιστη τιμή της που επιτυγχάνεται στο σενάριο 16 και για το λόγο αυτό στο συγκεκριμένο σενάριο στον Πίνακα 5.10, έχουμε τιμή 1 α.μ.. Επομένως για τα υπόλοιπα σενάρια που έχουν πραγματοποιηθεί η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης έχει υπολογιστεί με βάση την τιμή αναφοράς του σεναρίου 16.



## ii. Τοποθέτηση τριών ΜΔΠ

Αρχικά διερευνάται και πάλι, ποιο είναι το καλύτερο μέγεθος πληθυσμού και η επιλογή γίνεται με βάση τη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που προκύπτει κάθε φορά, καθώς και τη συνολική χρονική διάρκεια της εκτέλεσης του αλγορίθμου. Πιο συγκεκριμένα, θεωρούνται τα σενάρια που φαίνονται στον Πίνακα 5.11.

Υλοποιώντας τα σενάρια 1 έως 4 στο περιβάλλον της MATLAB, θεωρώντας πως η αντικειμενική συνάρτηση έχει την μορφή που περιγράψαμε παραπάνω και επιλέγοντας ως solver του MATPOWER τον PDIPM, τα αποτελέσματα που προκύπτουν φαίνονται στον Πίνακα 5.12.

Από τον Πίνακα 5.12 προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα η καλύτερη επιλογή μεγέθους του πληθυσμού είναι τα 50 χρωμοσώματα, καθώς με αυτόν τον πληθυσμό προκύπτει η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

**Πίνακας 5.11:** Σενάρια για την επιλογή του κατάλληλου πληθυσμού για το δίκτυο των 69 ζυγών

Σενάρια	Μέγεθος πληθυσμού	Ποσοστό του πληθυσμού που κρατείται για διασταύρωση (%)	Πιθανότητα μετάλλαξης (%)	Μέγιστος αριθμός γενεών	Αριθμός συνεχόμενων γενεών με σταθερή τιμή αντικειμενικής συνάρτησης
1	20	50	15	300	50
2	30	50	15	300	50
3	40	50	15	300	50
4	50	50	15	300	50

**Πίνακας 5.12:** Επίδραση του μεγέθους του πληθυσμού του ΓΑ στα αποτελέσματα για το δίκτυο των 69 ζυγών

Σενάρια	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης (α.μ)	Συνολικός χρόνος εκτέλεσης (min)
1	1.159857	1.6786
2	1.152942	2.2098
3	1.102048	2.9256
4	1.073334	3.5728

Στη συνέχεια κρατώντας το μέγεθος του πληθυσμού σταθερό και ίσο με 50 χρωμοσώματα αναζητείται ποιο είναι το ιδανικότερο ποσοστό πληθυσμού που κρατείται για διασταύρωση. Πιο συγκεκριμένα θεωρούνται τα σενάρια που φαίνονται στον Πίνακα 5.13.

Υλοποιώντας τα σενάρια 5 έως 8 στο περιβάλλον της MATLAB, θεωρώντας πως και πάλι η αντικειμενική συνάρτηση έχει την μορφή που περιγράψαμε παραπάνω και επιλέγοντας ως solver του MATPOWER τον PDIPM, τα αποτελέσματα που προκύπτουν φαίνονται στον Πίνακα 5.14.

Από τον Πίνακα 5.14 προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα η βέλτιστη επιλογή ποσοστού του πληθυσμού που κρατείται για διασταύρωση είναι 50%, καθώς με αυτό το ποσοστό επιτυγχάνεται η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

**Πίνακας 5.13:** Σενάρια για την επιλογή του κατάλληλου ποσοστού του πληθυσμού που κρατείται για διασταύρωση στο δίκτυο των 69 ζυγών

Σενάρια	Μέγεθος πληθυσμού	Ποσοστό του πληθυσμού που κρατείται για διασταύρωση (%)	Πιθανότητα μετάλλαξης (%)	Μέγιστος αριθμός γενεών	Αριθμός συνεχόμενων γενεών με σταθερή τιμή αντικειμενικής συνάρτησης
5	50	30	15	300	50
6	50	40	15	300	50
7	50	50	15	300	50
8	50	60	15	300	50

**Πίνακας 5.14:** Επίδραση του πληθυσμού του ΓΑ που κρατείται για διασταύρωση στα αποτελέσματα για το δίκτυο των 69 ζυγών

Σενάρια	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης (α.μ)	Συνολικός χρόνος εκτέλεσης (min)
5	1.126152	3.0557
6	1.107178	3.3974
7	1.073335	3.5728
8	1.083403	3.8096

Εν συνεχεία, κρατώντας το μέγεθος του πληθυσμού σταθερό και ίσο με 50 χρωμοσώματα και το ποσοστό που κρατείται για διασταύρωση και αυτό σταθερό και ίσο με 50%, διερευνάται ποιο είναι το βέλτιστο ποσοστό όσον αφορά την πιθανότητα μετάλλαξης. Πιο συγκεκριμένα θεωρούνται τα σενάρια που φαίνονται στον Πίνακα 5.15.

**Πίνακας 5.15:** Σενάρια για την επιλογή της κατάλληλης πιθανότητας μετάλλαξης για το δίκτυο των 69 ζυγών

Σενάρια	Μέγεθος πληθυσμού	Ποσοστό του πληθυσμού που κρατείται για διασταύρωση (%)	Πιθανότητα μετάλλαξης (%)	Μέγιστος αριθμός γενεών	Αριθμός συνεχόμενων γενεών με σταθερή τιμή αντικειμενικής συνάρτησης
9	50	50	5	300	50
10	50	50	10	300	50
11	50	50	15	300	50
12	50	50	20	300	50

Υλοποιώντας τα σενάρια 9 έως 12 στο περιβάλλον της MATLAB , θεωρώντας πως και πάλι η αντικειμενική συνάρτηση έχει την μορφή που περιγράψαμε παραπάνω και επιλέγοντας ως solver του MATPOWER τον PDIPM, τα αποτελέσματα που προκύπτουν φαίνονται στον Πίνακα 5.16.

Από τον Πίνακα 5.16 προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα η βέλτιστη επιλογή πιθανότητας μετάλλαξης είναι 5%, καθώς σε αυτή την περίπτωση επιτυγχάνεται η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

**Πίνακας 5.16:** Επίδραση της πιθανότητας μετάλλαξης του πληθυσμού του ΓΑ στα αποτελέσματα για το δίκτυο των 69 ζυγών

Σενάρια	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης (α.μ)	Συνολικός χρόνος εκτέλεσης (min)
9	1.039475	2.4454
10	1.049109	2.9699
11	1.073335	3.5728
12	1.124108	3.9979

Τέλος, κρατώντας σταθερά το μέγεθος του πληθυσμού, το ποσοστό που κρατείται για διασταύρωση, καθώς και το ποσοστό της πιθανότητας μετάλλαξης και ίσα με 50 χρωμοσώματα, 50% και 5% αντίστοιχα, διερευνάται ποιες είναι οι ιδανικότερες παράμετροι για τον αριθμό των μέγιστων γενεών και για τον αριθμό των συνεχόμενων γενεών για τις οποίες αν η βελτίωση της καλύτερης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης είναι 0.01 τότε τερματίζεται ο ΓΑ. Πιο συγκεκριμένα θεωρούνται τα σενάρια που φαίνονται στον Πίνακα 5.17.

Υλοποιώντας τα σενάρια 13 έως 16 στο περιβάλλον της MATLAB , θεωρώντας πως και πάλι η αντικειμενική συνάρτηση έχει την μορφή που περιγράψαμε παραπάνω και επιλέγοντας ως solver του MATPOWER τον PDIPM, τα αποτελέσματα που προκύπτουν φαίνονται στον Πίνακα 5.18.

**Πίνακας 5.17:** Σενάρια για την επιλογή του κατάλληλου μέγιστου αριθμού γενεών και συνεχόμενου αριθμού γενεών με σταθερή τιμή αντικειμενικής συνάρτησης για το δίκτυο των 69 ζυγών

Σενάρια	Μέγεθος πληθυσμού	Ποσοστό του πληθυσμού που κρατείται για διασταύρωση (%)	Πιθανότητα μετάλλαξης (%)	Μέγιστος αριθμός γενεών	Αριθμός συνεχόμενων γενεών με σταθερή τιμή αντικειμενικής συνάρτησης
13	50	50	5	50	10
14	50	50	5	150	25
15	50	50	5	300	50
16	50	50	5	450	75

**Πίνακας 5.18:** Επίδραση του μέγιστου αριθμού γενεών, καθώς και του αριθμού συνεχόμενων γενεών με σταθερή τιμή αντικειμενικής συνάρτησης στα αποτελέσματα για το δίκτυο των 69 ζυγών

Σενάρια	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης (α.μ)	Συνολικός χρόνος εκτέλεσης (min)
13	1.171085	0.5986
14	1.043841	1.2761
15	1.039475	2.4454
16	1	4.1369

Από τον Πίνακα 5.18 προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα ο βέλτιστος μέγιστος αριθμός γενεών και ο βέλτιστος αριθμός των συνεχόμενων γενεών που η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι σταθερή, είναι 450 και 75 αντίστοιχα, καθώς για αυτές τις τιμές επιτυγχάνεται η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Σύμφωνα με όσα υπολογίστηκαν παραπάνω, οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων του ΓΑ θα είναι οι εξής:

- Μέγεθος πληθυσμού: 50
- Ποσοστό του πληθυσμού που κρατείται για διασταύρωση (%): 50
- Πιθανότητα μετάλλαξης (%): 5
- Μέγιστος αριθμός γενεών: 450
- Αριθμός συνεχόμενων γενεών με σταθερή τιμή αντικειμενικής συνάρτησης: 75

Στους παραπάνω πίνακες έχουμε θεωρήσει ως τιμή αναφοράς της αντικειμενικής συνάρτησης, τη βέλτιστη τιμή της που επιτυγχάνεται στο σενάριο 16 και για το λόγο αυτό στο συγκεκριμένο σενάριο στον Πίνακα 5.18, έχουμε τιμή 1 α.μ.. Επομένως για τα υπόλοιπα σενάρια που έχουν πραγματοποιηθεί η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης έχει υπολογιστεί με βάση την τιμή αναφοράς του σεναρίου 16. Παρατηρείται ότι στην τοποθέτηση των τριών ΜΔΠ η μόνη παράμετρος του ΓΑ που αλλάζει η βέλτιστη τιμή της, είναι τα μέγεθος του πληθυσμού. Έτσι σε αυτή την περίπτωση, χρησιμοποιώντας 10 χρωμοσώματα παραπάνω στον πληθυσμό του ΓΑ σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση των δύο ΜΔΠ, ο αλγόριθμός μας συγκλίνει περισσότερο στην βέλτιστη λύση του προβλήματος.

### **iii. Τοποθέτηση τεσσάρων ΜΔΠ**

Ακολουθώντας ακριβώς τα ίδια βήματα, όπως στις προηγούμενες δύο περιπτώσεις, αναζητούνται και πάλι οι ιδανικότερες τιμές των παραμέτρων του ΓΑ στην περίπτωση που στο δίκτυο συνδέονται τέσσερις ΜΔΠ. Οι βέλτιστες τιμές που προέκυψαν είναι οι εξής:

- Μέγεθος πληθυσμού: 50
- Ποσοστό του πληθυσμού που κρατείται για διασταύρωση (%): 50
- Πιθανότητα μετάλλαξης (%): 5
- Μέγιστος αριθμός γενεών: 450
- Αριθμός συνεχόμενων γενεών με σταθερή τιμή αντικειμενικής συνάρτησης: 75

Παρατηρείται ότι οι τιμές των παραμέτρων ταυτίζονται στις περιπτώσεις της τοποθέτησης των τριών και των τεσσάρων ΜΔΠ. Με αυτό τον τρόπο, φαίνεται πως όταν η επίλυση του προβλήματος γίνεται πιο πολύπλοκη λόγω της αύξησης του αριθμού των ΜΔΠ που συνδέονται στο δίκτυο, απαιτούνται περισσότερα χρωμοσώματα για να επιτευχθεί η εύρεση της βέλτιστης λύσης.

#### 5.2.4 Διερεύνηση επίδρασης των διάφορων solvers του MATPOWER στα αποτελέσματα για το δίκτυο των 69 ζυγών

Στην ενότητα αυτή δοκιμάζονται για την εκτέλεση της ΒΡΦ του αλγορίθμου του προβλήματος, οι διάφοροι solvers οι οποίοι είναι διαθέσιμοι από το λογισμικό MATPOWER. Πιο συγκεκριμένα στην ενότητα αυτή, επιλύεται το ίδιο πρόβλημα για τους 7 διαφορετικούς solvers όπως παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4, χρησιμοποιώντας σε κάθε περίπτωση τις αντίστοιχες τιμές των παραμέτρων του ΓΑ που επιλέχθηκαν στην ακριβώς προηγούμενη ενότητα. Τα αποτελέσματα για κάθε έναν από αυτούς, παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.19 , 5.20 και 5.21 για τις περιπτώσεις τοποθέτησης δύο, τριών και τεσσάρων ΜΔΠ στο δίκτυο, αντίστοιχα. Η αναζήτηση του βέλτιστου solver θα πραγματοποιηθεί, μέσα από την εκτέλεση μιας και μόνο επανάληψης του αλγορίθμου στο περιβάλλον της MATLAB. Και στις τρεις περιπτώσεις θεωρείται ότι δίνεται η ίδια βαρύτητα στους συντελεστές της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή ισχύει  $k_p = k_v = 0.50$ .

##### *i. Τοποθέτηση δύο ΜΔΠ*

**Πίνακας 5.19:** Αποτελέσματα εκτέλεσης για τους διάφορους solvers, για το δίκτυο των 69 ζυγών

Solver	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης (α.μ.)	Συνολικός χρόνος εκτέλεσης (min)
MINOPF	-	-
fmincon	2.605609	10.3408
PDIPM	1	3.6977
SC-PDIPM	1.000416	3.7459
TRALM	1.004065	11.8964
MIPS	1.001716	9.8735
MIPS-sc	1.002669	10.4525

Στον παραπάνω πίνακα έχουμε θεωρήσει ως τιμή αναφοράς της αντικειμενικής συνάρτησης, τη βέλτιστη τιμή της που επιτυγχάνεται στο σενάριο όπου ως solver επιλέγεται ο PDIPM και για το λόγο αυτό στο συγκεκριμένο σενάριο στον Πίνακα 5.19, έχουμε τιμή 1 α.μ.. Επομένως για τα υπόλοιπα σενάρια που έχουν πραγματοποιηθεί η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης έχει υπολογιστεί με βάση τη συγκεκριμένη τιμή αναφοράς.

**ii. Τοποθέτηση τριών ΜΔΠ**

**Πίνακας 5.20:** Αποτελέσματα εκτέλεσης για τους διάφορους solvers, για το δίκτυο των 69 ζυγών

Solver	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης (α.μ.)	Συνολικός χρόνος εκτέλεσης (min)
MINOPF	-	-
fmincon	2.886861	14.5603
PDIPM	1	5.1369
SC-PDIPM	1.041138	5.7983
TRALM	1.093419	15.7654
MIPS	1.070666	11.8643
MIPS-sc	1.073976	12.9876

Στον παραπάνω πίνακα έχουμε θεωρήσει ως τιμή αναφοράς της αντικειμενικής συνάρτησης, τη βέλτιστη τιμή της που επιτυγχάνεται στο σενάριο όπου ως solver επιλέγεται ο PDIPM και για το λόγο αυτό στο συγκεκριμένο σενάριο στον Πίνακα 5.19, έχουμε τιμή 1 α.μ.. Επομένως για τα υπόλοιπα σενάρια που έχουν πραγματοποιηθεί η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης έχει υπολογιστεί με βάση τη συγκεκριμένη τιμή αναφοράς.

**iii. Τοποθέτηση τεσσάρων ΜΔΠ**

**Πίνακας 5.21:** Αποτελέσματα εκτέλεσης για τους διάφορους solvers, για το δίκτυο των 69 ζυγών

Solver	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης (α.μ.)	Συνολικός χρόνος εκτέλεσης (min)
MINOPF	-	-
fmincon	3.093566	16.7587
PDIPM	1	6.8766
SC-PDIPM	1.046408	7.6796
TRALM	1.100632	17.8766
MIPS	1.310754	12.8766
MIPS-sc	1.296847	13.4577

Στον παραπάνω πίνακα έχουμε θεωρήσει ως τιμή αναφοράς της αντικειμενικής συνάρτησης, τη βέλτιστη τιμή της που επιτυγχάνεται στο σενάριο όπου ως solver επιλέγεται ο PDIPM και για το λόγο αυτό στο συγκεκριμένο σενάριο στον Πίνακα 5.19, έχουμε τιμή 1 α.μ.. Επομένως για τα υπόλοιπα σενάρια που έχουν πραγματοποιηθεί η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης έχει υπολογιστεί με βάση τη συγκεκριμένη τιμή αναφοράς.

Από τους τρεις παραπάνω πίνακες, γίνεται αντιληπτό ότι και για τις τρεις περιπτώσεις συνέκλιναν οι έξι από τους επτά διαθέσιμους solvers και πιο συγκεκριμένα

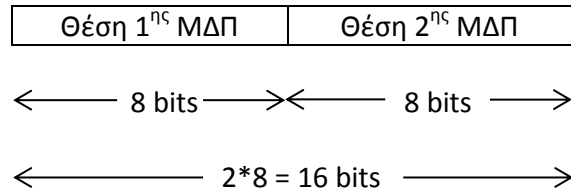
δεν κατάφερε να συγκλίνει ο solver MINOPF. Επίσης, από τους ίδιους πίνακες φαίνεται πως ο solver PDIPM συνέκλινε και γρηγορότερα χρονικά αλλά και στο καλύτερο αποτέλεσμα όσον αφορά την ελαχιστοποίηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος. Επομένως σε όλες τις εκτελέσεις του αλγορίθμου που θα πραγματοποιηθούν στην συνέχεια, θα χρησιμοποιείται ο συγκεκριμένος solver του MATPOWER. Όπως γίνεται αντιληπτό, η επιλογή του καταλληλότερου solver σε κάθε πρόβλημα αποτελεί μια πολύ σημαντική συνιστώσα της επίλυσής του, καθώς βοηθάει στην εξοικονόμηση πολύτιμου χρόνου, κυρίως σε περιπτώσεις όπου εκτελούνται πολλές διαδοχικές εκτελέσεις ενός κώδικα.

### **5.3 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ 69 ΖΥΓΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΕΧΝΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ**

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, που πραγματοποιήθηκαν στο περιβάλλον της MATLAB, με σκοπό την εύρεση της βέλτιστης θέσης και του βέλτιστου μεγέθους των ΜΔΠ, όσον αφορά τις περιπτώσεις της σύνδεσης δύο, τριών και τεσσάρων ΜΔΠ στο δίκτυο των 69 ζυγών. Στο ζυγό 1 δεν επιτρέπεται να συνδεθεί κάποια από τις ΜΔΠ, καθώς αποτελεί το ζυγό ταλάντωσης του δικτύου. Η αντικειμενική συνάρτηση της οποίας την τιμή επιδιώκουμε να βελτιστοποιήσουμε παρουσιάστηκε παραπάνω, είναι η ίδια και για τις τρεις περιπτώσεις και δίνεται από τη Σχέση 5.1. Σε κάθε μία από αυτές τις περιπτώσεις θα χρησιμοποιήσουμε τις αντίστοιχες βέλτιστες τιμές των παραμέτρων του ΓΑ και τον αντίστοιχο βέλτιστο solver για την ΒΡΦ, όπως υπολογίστηκαν στις δύο προηγούμενες ενότητες, έτσι ώστε να επιτευχθεί η εύρεση της βέλτιστης λύσης σε όσο το δυνατόν μικρότερο χρονικό διάστημα. Ακόμα θα εξεταστεί η επιρροή που έχουν στο τελικό αποτέλεσμα, οι διαφορετικές τιμές των συντελεστών βαρύτητας της αντικειμενικής συνάρτησης,  $k_p$  και  $k_v$ . Σε κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις θα εκτελεσθεί 100 διαδοχικές φορές ο ΓΑ, όπου ο αρχικός πληθυσμός της πρώτης εκτέλεσης θα είναι τυχαίος, αλλά από την δεύτερη εκτέλεση και μετά θα ορίζεται ως αρχικό βέλτιστο χρωμόσωμα της εκάστοτε εκτέλεσης η βέλτιστη λύση της ακριβώς προηγούμενης εκτέλεσης του ΓΑ.

#### **5.3.1 Τοποθέτηση δύο ΜΔΠ στο δίκτυο των 69 ζυγών**

Στην περίπτωση αυτή ορίζεται από τον χρήστη πως ο αριθμός των ΜΔΠ που θα συνδεθούν στο δίκτυο διανομής είναι δύο ( $k=2$ ) και όπως υπολογίστηκε παραπάνω ο αριθμός των χρωμοσωμάτων του αρχικού πληθυσμού θα είναι 40 ( $N_{pop}=40$ ). Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η μορφή του κάθε χρωμοσώματος αυτού του πληθυσμού. Ακόμα, αξίζει να αναφερθεί ότι θα πρέπει η κάθε μία από τις ΜΔΠ να συνδεθεί σε διαφορετικό ζυγό του δικτύου. Επομένως, για το λόγο αυτό ο κώδικας περιλαμβάνει τους κατάλληλους περιορισμούς, ώστε να αποτραπεί η ταύτιση των ζυγών τοποθέτησης των δύο ΜΔΠ.



**Σχήμα 5.2:** Ενδεικτική μορφή ενός, από τα 40 χρωμοσώματα του πληθυσμού

Στον Πίνακα 5.22 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των 100 διαδοχικών εκτελέσεων, αν πραγματοποιηθούν οι εναλλαγές στις τιμές των συντελεστών βαρύτητας της αντικειμενικής συνάρτησης που φαίνονται παρακάτω .

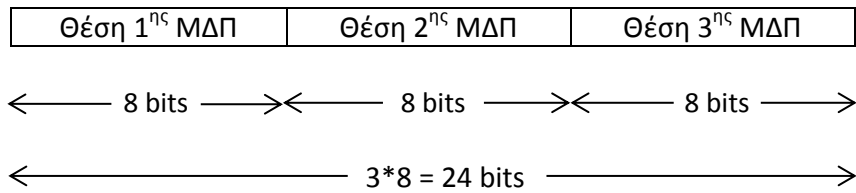
**Πίνακας 5.22:** Αποτελέσματα για βέλτιστη τοποθέτηση δύο ΜΔΠ

	$k_p=0.25$ $k_v=0.75$	$k_p=0.50$ $k_v=0.50$	$k_p=0.75$ $k_v=0.25$
Θέση 1 <sup>ης</sup> ΜΔΠ (ζυγός)	60	56	56
Ισχύς 1 <sup>ης</sup> ΜΔΠ (MW)	1.5	1.5	1.5
Θέση 2 <sup>ης</sup> ΜΔΠ (ζυγός)	55	53	61
Ισχύς 2 <sup>ης</sup> ΜΔΠ (MW)	0.88	0.88	0.83
Απόκλιση της τάσης των ζυγών πριν τη σύνδεση των ΜΔΠ (α.μ.)	2.065740	2.065740	2.065740
Απόκλιση της τάσης των ζυγών μετά τη σύνδεση των ΜΔΠ (α.μ.)	0.304278	0.313347	0.318837
Ποσοστό μείωσης της απόκλισης της τάσης των ζυγών (%)	85.27	84.83	84.57
Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου πριν τη σύνδεση των ΜΔΠ (MW)	0.250506	0.250506	0.250506
Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου μετά τη σύνδεση των ΜΔΠ (MW)	0.023242	0.020794	0.020502
Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος (%)	90.72	91.69	91.82
Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης ( $F_{DG}$ )	0.133668	0.117347	0,099968

### 5.3.2 Τοποθέτηση τριών ΜΔΠ στο δίκτυο των 69 ζυγών

Στην περίπτωση αυτή ορίζεται από τον χρήστη πως ο αριθμός των ΜΔΠ που θα συνδεθούν στο δίκτυο διανομής είναι τρεις ( $k=3$ ) και όπως υπολογίστηκε παραπάνω ο αριθμός των χρωμοσωμάτων του αρχικού πληθυσμού θα είναι 50. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η μορφή του κάθε χρωμοσώματος αυτού του πληθυσμού. Ακόμα, αξίζει να αναφερθεί ότι θα πρέπει η κάθε μία από τις ΜΔΠ να συνδεθεί σε διαφορετικό ζυγό του δικτύου. Επομένως, για το λόγο αυτό ο κώδικας περιλαμβάνει τους κατάλληλους περιορισμούς, ώστε να αποτραπεί η ταύτιση των ζυγών τοποθέτησης των τριών ΜΔΠ.





**Σχήμα 5.3:** Ενδεικτική μορφή ενός, από τα 50 χρωμοσώματα του πληθυσμού

Στον Πίνακα 5.23 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των 100 διαδοχικών εκτελέσεων, αν πραγματοποιηθούν οι εναλλαγές στις τιμές των συντελεστών βαρύτητας της αντικειμενικής συνάρτησης που φαίνονται παρακάτω .

**Πίνακας 5.23:** Αποτελέσματα για βέλτιστη τοποθέτηση τριών ΜΔΠ

	$k_p=0.25$ $k_v=0.75$	$k_p=0.50$ $k_v=0.50$	$k_p=0.75$ $k_v=0.25$
Θέση 1 <sup>ης</sup> ΜΔΠ (ζυγός)	58	56	56
Ισχύς 1 <sup>ης</sup> ΜΔΠ (MW)	1.48	1.5	1.5
Θέση 2 <sup>ης</sup> ΜΔΠ (ζυγός)	59	57	61
Ισχύς 2 <sup>ης</sup> ΜΔΠ (MW)	0.79	0.81	0.78
Θέση 3 <sup>ης</sup> ΜΔΠ (ζυγός)	54	58	62
Ισχύς 3 <sup>ης</sup> ΜΔΠ (MW)	0.43	0.39	0.39
Απόκλιση της τάσης των ζυγών πριν τη σύνδεση των ΜΔΠ (α.μ.)	2.065740	2.065740	2.065740
Απόκλιση της τάσης των ζυγών μετά τη σύνδεση των ΜΔΠ (α.μ.)	0.150121	0.152777	0.168397
Ποσοστό μείωσης της απόκλισης της τάσης των ζυγών (%)	92.73	92.60	91.85
Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου πριν τη σύνδεση των ΜΠΔ (MW)	0.250506	0.250506	0.250506
Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου μετά τη σύνδεση των ΜΠΔ (MW)	0.014990	0.014153	0.013190
Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος (%)	94.01	94.35	94.73
Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης ( $F_{DG}$ )	0.069464	0.065227	0.059871

### 5.3.3 Τοποθέτηση τεσσάρων ΜΔΠ στο δίκτυο των 69 ζυγών

Στην περίπτωση αυτή ορίζεται από τον χρήστη πως ο αριθμός των ΜΔΠ που θα συνδεθούν στο δίκτυο διανομής είναι τέσσερις ( $k=4$ ) και όπως υπολογίστηκε παραπάνω ο αριθμός των χρωμοσωμάτων του αρχικού πληθυσμού θα είναι και πάλι 50. Το κάθε χρωμόσωμα του πληθυσμού χωρίζεται σε τέσσερα μέρη, όπου το καθένα από αυτά αντιπροσωπεύει τον ζυγό στον οποίο θα συνδεθεί κάθε μια από τις 4 ΜΔΠ. Επομένως το κάθε χρωμόσωμα θα αποτελείται από  $4*8=32$  bits. Ακόμα, αξίζει να αναφερθεί ότι θα πρέπει η κάθε μία από τις ΜΔΠ να συνδεθεί σε διαφορετικό ζυγό του δικτύου. Επομένως, για το λόγο αυτό ο κώδικας περιλαμβάνει τους κατάλληλους περιορισμούς, ώστε να αποτραπεί η ταύτιση των ζυγών τοποθέτησης των τεσσάρων ΜΔΠ.

Στον Πίνακα 5.24 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των 100 διαδοχικών εκτελέσεων, αν πραγματοποιηθούν οι εναλλαγές στις τιμές των συντελεστών βαρύτητας της αντικειμενικής συνάρτησης που φαίνονται παρακάτω.

**Πίνακας 5.24:** Αποτελέσματα για βέλτιστη τοποθέτηση τεσσάρων ΜΔΠ

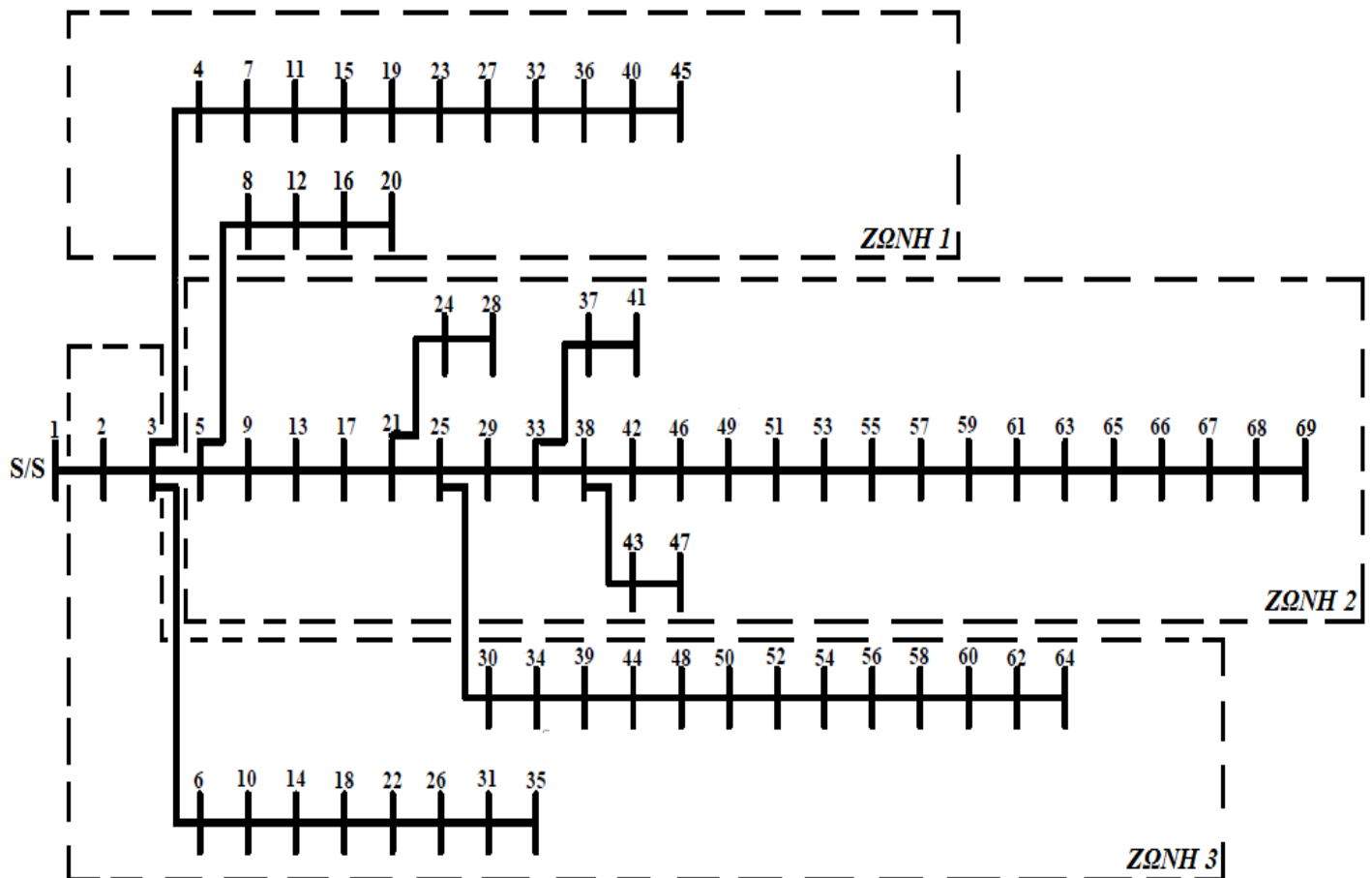
	$k_p=0.25$ $k_v=0.75$	$k_p=0.50$ $k_v=0.50$	$k_p=0.75$ $k_v=0.25$
<b>Θέση 1<sup>ης</sup> ΜΔΠ (ζυγός)</b>	56	56	56
<b>Ισχύς 1<sup>ης</sup> ΜΔΠ (MW)</b>	1.47	1.47	1.47
<b>Θέση 2<sup>ης</sup> ΜΔΠ (ζυγός)</b>	61	61	61
<b>Ισχύς 2<sup>ης</sup> ΜΔΠ (MW)</b>	0.63	0.63	0.63
<b>Θέση 3<sup>ης</sup> ΜΔΠ (ζυγός)</b>	33	33	33
<b>Ισχύς 3<sup>ης</sup> ΜΔΠ (MW)</b>	0.58	0.58	0.58
<b>Θέση 4<sup>ης</sup> ΜΔΠ (ζυγός)</b>	58	58	58
<b>Ισχύς 4<sup>ης</sup> ΜΔΠ (MW)</b>	0.35	0.35	0.35
<b>Απόκλιση της τάσης των ζυγών πριν τη σύνδεση των ΜΔΠ (α.μ.)</b>	2.065740	2.065740	2.065740
<b>Απόκλιση της τάσης των ζυγών μετά τη σύνδεση των ΜΔΠ (α.μ.)</b>	0.087894	0.087894	0.087894
<b>Ποσοστό μείωσης της απόκλισης της τάσης των ζυγών (%)</b>	95.75	95.75	95.75
<b>Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου πριν τη σύνδεση των ΜΠΔ (MW)</b>	0.250506	0.250506	0.250506
<b>Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου μετά τη σύνδεση των ΜΠΔ (MW)</b>	0.010416	0.010416	0.010416
<b>Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος (%)</b>	95.84	95.84	95.84
<b>Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης (<math>F_{DG}</math>)</b>	0.042306	0.042064	0.041822

Μέσω των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.22, 5.23 και 5.24 γίνεται αντιληπτό ότι όταν αυξάνεται ο συντελεστής βαρύτητας  $k_p$  τότε παρατηρείται και αύξηση του ποσοστού μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος, ενώ στην περίπτωση που πραγματοποιείται αύξηση του συντελεστή  $k_v$  τότε παρατηρείται αύξηση του ποσοστού μείωσης της απόκλισης της τάσης των ζυγών. Ακόμα, αξίζει να σημειωθεί πως ανεξαρτήτως της βαρύτητας που δίνεται στους δύο συντελεστές της αντικειμενικής συνάρτησης, το ποσοστό μείωσης των απωλειών είναι και στις τρεις περιπτώσεις μεγαλύτερο από το αντίστοιχο ποσοστό μείωσης της απόκλισης της τάσης. Η συγκεκριμένη παρατήρηση φανερώνει πως η σύνδεση ΜΔΠ σε ένα δίκτυο διανομής, δημιουργεί πολύ σημαντικά οφέλη στη μείωση της απόκλισης της τάσης, αλλά κατά κύριο λόγο στην βελτίωση των απωλειών ενεργού ισχύος. Αυτή η διαπίστωση, φαίνεται και από το γεγονός πως η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και στις τρεις περιπτώσεις επιτυγχάνεται όταν δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα στον συντελεστή  $k_p$ . Επίσης, παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται ο αριθμός των ΜΔΠ που συνδέονται στο δίκτυο, τόσο το ποσοστό μείωσης των απωλειών όσο και το ποσοστό μείωσης της απόκλισης της τάσης αυξάνονται σε σημαντικό βαθμό. Επιπροσθέτως, διαπιστώνεται ότι είτε συνδέσουμε δύο, είτε τρεις, είτε τέσσερις ΜΔΠ, η ΜΔΠ που έχει τη μεγαλύτερη ισχύ, δηλαδή η τιμή της πλησιάζει το ανώτερο όριο των 1.5 MW, συνδέεται κατά κύριο λόγο στο ζυγό 56 και σε μικρότερο βαθμό σε γειτονικούς του ζυγούς. Η συγκεκριμένη διαπίστωση, φανερώνεται εντονότερα στην περίπτωση της σύνδεσης στο δίκτυο τριών ΜΔΠ, όπου οι δύο από αυτές εγκαθίστανται στην συγκεκριμένη περιοχή. Ένας άλλος ζυγός στον οποίο τις περισσότερες περιπτώσεις συνδέθηκε μια ΜΠΔ είναι ο ζυγός 61,

αλλά η τιμή της ισχύος της ΜΠΔ ήταν πολύ μικρότερη. Επομένως, αυτές οι δύο περιοχές του δικτύου φαίνεται πως είναι εκείνες που χρειάζονται τη μεγαλύτερη ενίσχυση.

#### 5.4 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΣΤΑΘΜΩΝ ΤΑΧΕΙΑΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ 69 ΖΥΓΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΕΧΝΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, που πραγματοποιήθηκαν στο περιβάλλον της MATLAB, με σκοπό την εύρεση της βέλτιστης θέσης των ΣΤΦ, καθώς και της βέλτιστης θέσης και του βέλτιστου μεγέθους των ΜΔΠ στην θεωρητική περίπτωση όπου αναζητείται ταυτόχρονα η βέλτιστη θέση και των ΜΔΠ και των ΣΤΦ. Στα σενάρια που θα εξεταστούν παρακάτω, οι ΣΤΦ που θα εγκατασταθούν στο δίκτυο θα είναι έξι ( $n=6$ ).



Σχήμα 5.4: Δίκτυο 69 ζυγών, διαχωρισμένο σε τρεις ζώνες

**Πίνακας 5.25:** Διαχωρισμός των ζυγών ανά ζώνη

Ζώνη	Ζυγοί
1	4,7,8,11,12,15,16,19,20,23,27,32,36,40,45
2	5,9,13,17,21,24,25,28,29,33,37,38,41,42,43,46,,47,49,51,53,55,57,59,61,63,65,66,67,68,69
3	2,3,6,10,14,18,22,26,31,30,34,35,39,44,48,50,52,54,56,58,60,62,64

Για να πραγματοποιείται καλύτερη και πιο ολοκληρωμένη χρήση των έξι ΣΤΦ, θα πρέπει να κατανεμηθούν ομοιόμορφα στο δίκτυο των 69 ζυγών που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.4. Για το λόγο αυτό, το δίκτυο χωρίζεται με βάση κάποια κοινωνικά κριτήρια, αλλά και την κινητικότητα των ηλεκτρικών οχημάτων σε αυτό, σε τρεις ζώνες ( $m=3$ ) όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4, έτσι ώστε να ικανοποιούνται όλοι οι κάτοχοι ηλεκτρικών οχημάτων που το χρησιμοποιούν. Σε κάθε ζώνη θα εγκατασταθούν δύο ΣΤΦ ( $Q=2$ ) με χωρητικότητα είτε 120 kW είτε 210 kW είτε 300 kW ο καθένας από αυτούς. Αξίζει να αναφερθεί, ότι στο ζυγό 1 δεν επιτρέπεται να συνδεθεί ούτε κάποιος από τους ΣΤΦ ούτε κάποια από τις ΜΔΠ, καθώς αποτελεί το ζυγό ταλάντωσης του δικτύου.

- ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΤΙΣ ΘΕΣΕΙΣ ΤΩΝ ΜΔΠ

Στο συγκεκριμένο δίκτυο διανομής, υπάρχουν εγκατεστημένες εξαρχής τέσσερις ΜΔΠ που οι θέσεις τους και η τιμή της ισχύος καθορίζονται από αυτές φαίνονται στον Πίνακα 5.2α. Σε όλα τα σενάρια που θα εξεταστούν, αναζητούνται οι βέλτιστες θέσεις των έξι ΣΤΦ, δηλαδή οι ζυγοί εγκατάστασης των σταθμών στους οποίους βελτιστοποιείται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος.

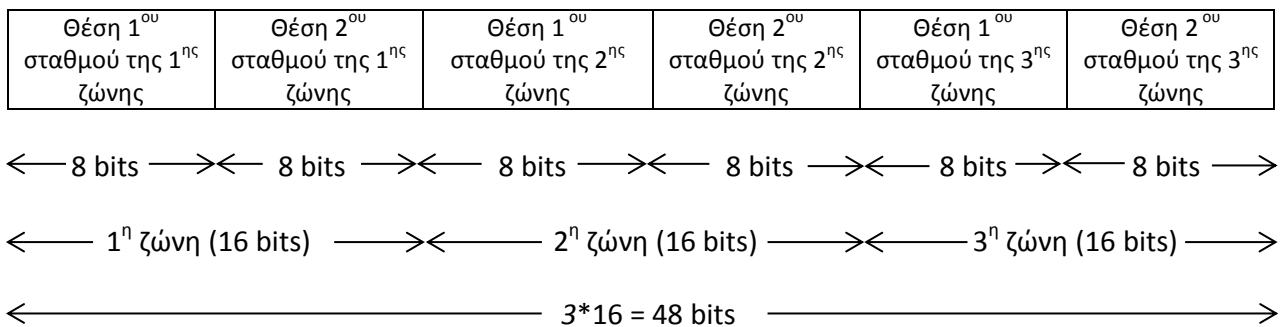
Η αντικειμενική συνάρτηση της οποίας την τιμή επιδιώκουμε να βελτιστοποιήσουμε, παρουσιάστηκε παραπάνω και δίνεται από τη Σχέση 5.3. Οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων του ΓΑ για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος, υπολογίστηκαν ακολουθώντας τα βήματα που παρουσιάστηκαν εκτενώς στην παράγραφο 5.2.3 και είναι οι εξής:

- Μέγεθος πληθυσμού: 50
- Ποσοστό του πληθυσμού που κρατείται για διασταύρωση (%): 50
- Πιθανότητα μετάλλαξης (%): 5
- Μέγιστος αριθμός γενεών: 450
- Αριθμός συνεχόμενων γενεών με σταθερή τιμή αντικειμενικής συνάρτησης: 75

Η χρήση των παραπάνω παραμέτρων, εξασφαλίζει στον χρήστη την εύρεση της βέλτιστης λύσης του προβλήματος σε όσο το δυνατόν μικρότερο χρονικό διάστημα. Επίσης, θα εξεταστεί η επιρροή που έχουν στο τελικό αποτέλεσμα, οι διαφορετικές τιμές των συντελεστών βαρύτητας της αντικειμενικής συνάρτησης,  $k_p$  και  $k_v$ . Για κάθε σενάριο θα εκτελεσθεί 10 διαδοχικές φορές ο ΓΑ, όπου ο αρχικός πληθυσμός της πρώτης εκτέλεσης θα είναι τυχαίος, αλλά από την δεύτερη εκτέλεση και μετά θα

ορίζεται ως αρχικό βέλτιστο χρωμόσωμα της εκάστοτε εκτέλεσης η βέλτιστη λύση της ακριβώς προηγούμενης εκτέλεσης του ΓΑ.

Το καθένα από τα  $N_{pop}$  χρωμοσώματα του πληθυσμού χωρίζεται σε τρία μέρη, όπου κάθε ένα από αυτά αποτελείται από δύο θέσεις που απεικονίζουν τους δύο ζυγούς της εκάστοτε ζώνης στους οποίους θα εγκατασταθούν οι ΣΤΦ. Στο παρακάτω Σχήμα 5.5 φαίνεται η μορφή του κάθε χρωμοσώματος αυτού του πληθυσμού. Ακόμα, αξίζει να αναφερθεί ότι θα πρέπει κάθε ένας από τους ΣΤΦ να συνδεθεί σε διαφορετικό ζυγό της αντίστοιχης ζώνης του δικτύου, όπου ανήκει, για το λόγο αυτό ο κώδικας περιλαμβάνει τους κατάλληλους περιορισμούς, ώστε να αποτραπεί η ταύτιση των ζυγών τοποθέτησης των έξι ΣΤΦ.



**Σχήμα 5.5:** Ενδεικτική μορφή ενός, από τα 50 χρωμοσώματα του πληθυσμού

Στους Πίνακες 5.26, 5.27 και 5.28 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των 10 διαδοχικών εκτελέσεων του ΓΑ, αν πραγματοποιηθούν οι εναλλαγές στις τιμές των δύο συντελεστών βαρύτητας της αντικειμενικής συνάρτησης που φαίνονται παρακάτω, για τις τρεις διαφορετικές τιμές της χωρητικότητας των ΣΤΦ.

**Πίνακας 5.26:** Αποτελέσματα για βέλτιστη τοποθέτηση έξι ΣΤΦ, χωρητικότητας 120 kW ο καθένας

	$k_p=0.25$ $k_v=0.75$		$k_p=0.50$ $k_v=0.50$		$k_p=0.75$ $k_v=0.25$	
<b>Θέσεις των δύο ΣΤΦ στη Ζώνη 1 (ζυγοί)</b>	40	45	27	36	27	32
<b>Θέσεις των δύο ΣΤΦ στη Ζώνη 2 (ζυγοί)</b>	68	69	61	65	61	63
<b>Θέσεις των δύο ΣΤΦ στη Ζώνη 3 (ζυγοί)</b>	31	35	31	35	31	35
<b>Απόκλιση της τάσης των ζυγών πριν τη σύνδεση των ΣΤΦ (α.μ.)</b>	0.974991		0.974991		0.974991	
<b>Απόκλιση της τάσης των ζυγών μετά τη σύνδεση των ΣΤΦ (α.μ.)</b>	0.848796		0.858572		0.859197	
<b>Ποσοστό μείωσης της απόκλισης της τάσης των ζυγών (%)</b>	12.94		11.94		11.88	
<b>Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου πριν τη σύνδεση των ΣΤΦ (MW)</b>	0.123481		0.123481		0.123481	
<b>Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου μετά τη σύνδεση των ΣΤΦ (MW)</b>	0.112059		0.110310		0.110232	
<b>Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος (%)</b>	9.25		10.66		10.73	
<b>Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης (<math>F_{FCS}</math>)</b>	0.879801		0.886965		0.889835	

**Πίνακας 5.27:** Αποτελέσματα για βέλτιστη τοποθέτηση έξι ΣΤΦ, χωρητικότητας **210 kW** ο καθένας

	$k_p=0.25$ $k_v=0.75$		$k_p=0.50$ $k_v=0.50$		$k_p=0.75$ $k_v=0.25$	
Θέσεις των δύο ΣΤΦ στη Ζώνη 1 (ζυγοί)	19	45	19	36	27	4
Θέσεις των δύο ΣΤΦ στη Ζώνη 2 (ζυγοί)	68	69	61	63	61	63
Θέσεις των δύο ΣΤΦ στη Ζώνη 3 (ζυγοί)	26	35	22	35	14	35
Απόκλιση της τάσης των ζυγών πριν τη σύνδεση των ΣΤΦ (α.μ.)	0.974991		0.974991		0.974991	
Απόκλιση της τάσης των ζυγών μετά τη σύνδεση των ΣΤΦ (α.μ.)	0.777898		0.796755		0.798398	
Ποσοστό μείωσης της απόκλισης της τάσης των ζυγών (%)	20.21		18.28		18.11	
Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου πριν τη σύνδεση των ΣΤΦ (MW)	0.123481		0.123481		0.123481	
Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου μετά τη σύνδεση των ΣΤΦ (MW)	0.109257		0.104949		0.104784	
Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος (%)	11.52		15.01		15.14	
Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης ( $F_{FCS}$ )	0.819591		0.833556		0.841155	

**Πίνακας 5.28:** Αποτελέσματα για βέλτιστη τοποθέτηση έξι ΣΤΦ, χωρητικότητας **300 kW** ο καθένας

	$k_p=0.25$ $k_v=0.75$		$k_p=0.50$ $k_v=0.50$		$k_p=0.75$ $k_v=0.25$	
Θέσεις των δύο ΣΤΦ στη Ζώνη 1 (ζυγοί)	4	27	27	4	27	4
Θέσεις των δύο ΣΤΦ στη Ζώνη 2 (ζυγοί)	65	67	61	63	61	63
Θέσεις των δύο ΣΤΦ στη Ζώνη 3 (ζυγοί)	2	35	2	35	2	35
Απόκλιση της τάσης των ζυγών πριν τη σύνδεση των ΣΤΦ (α.μ.)	0.974991		0.974991		0.974991	
Απόκλιση της τάσης των ζυγών μετά τη σύνδεση των ΣΤΦ (α.μ.)	0.729006		0.739205		0.739205	
Ποσοστό μείωσης της απόκλισης της τάσης των ζυγών (%)	25.23		24.18		24.18	
Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου πριν τη σύνδεση των ΣΤΦ (MW)	0.123481		0.123481		0.123481	
Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου μετά τη σύνδεση των ΣΤΦ (MW)	0.104032		0.101942		0.101942	
Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος (%)	15.75		17.44		17.44	
Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης ( $F_{FCS}$ )	0.771403		0.791867		0.808717	

Μέσω των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.26, 5.27 και 5.28 γίνεται αντιληπτό ότι όταν αυξάνεται ο συντελεστής βαρύτητας  $k_p$  τότε παρατηρείται αύξηση του ποσοστού μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος, ενώ στην περίπτωση που πραγματοποιείται αύξηση του συντελεστή  $k_v$  τότε παρατηρείται αύξηση του ποσοστού μείωσης της απόκλισης της τάσης των ζυγών. Ακόμα, αξίζει να σημειωθεί πως ανεξάρτητα από τις τιμές των δύο συντελεστών βαρύτητας της αντικειμενικής συνάρτησης, το ποσοστό μείωσης της απόκλισης της τάσης, είναι σε όλα τα σενάρια εγκατάστασης των ΣΤΦ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο ποσοστό μείωσης των απωλειών ισχύος. Αυτή η παρατήρηση, τονίζεται και από το γεγονός πως η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και για τις τρεις τιμές χωρητικότητας των ΣΤΦ, επιτυγχάνεται όταν δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα στον συντελεστή βαρύτητας  $k_p$ . Επίσης, παρατηρείται πως καθώς αυξάνεται η χωρητικότητα των ΣΤΦ, το ποσοστό

μείωσης της απόκλισης της τάσης αυξάνεται σε μεγαλύτερο βαθμό σε σχέση με το ποσοστό μείωσης των απωλειών.

Όσον αφορά τις ζώνες στις οποίες έχει διαχωριστεί το δίκτυο διανομής, παρατηρείται ότι στη Ζώνη 1 στην περίπτωση που δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα στο συντελεστή  $k_p$  οι ΣΤΦ εγκαθίστανται ανάμεσα στο ζυγό αναφοράς και στο ζυγό 27 στον οποίο είναι συνδεδεμένη η ΜΔΠ στη συγκεκριμένη ζώνη. Αντιθέτως, όταν η βαρύτητα του συντελεστή  $k_v$  γίνεται μεγαλύτερη, οι θέσεις εγκατάστασης των ΣΤΦ απομακρύνονται από τον ζυγό αναφοράς και μετατοπίζονται στην περιοχή κοντά στο ζυγό 27 και στο τέλος της Ζώνης 1. Ακόμα, παρατηρείται πως στα σενάρια όπου η χωρητικότητα του κάθε ΣΤΦ είναι 300 kW, οι σταθμοί στη συγκεκριμένη ζώνη ανεξαρτήτως της τιμής των συντελεστών βαρύτητας συνδέονται στο ζυγό 4 που βρίσκεται πολύ κοντά στο ζυγό αναφοράς και στο ζυγό 27.

Σχετικά με τη Ζώνη 2, όταν δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα στο συντελεστή  $k_p$  οι ΣΤΦ εγκαθίστανται στην περιοχή κοντά στον ζυγό 61 όπου είναι συνδεδεμένη η ΜΔΠ σε αυτή τη ζώνη. Όσον αφορά την περίπτωση όπου η τιμή του συντελεστή  $k_v$  γίνεται μεγαλύτερη, τότε οι ΣΤΦ μετατοπίζονται προς το τέλος της συγκεκριμένης ζώνης, δηλαδή προς τους ζυγούς 68 και 69. Επίσης, παρατηρείται πως στη Ζώνη 2 οι ΣΤΦ εγκαθίστανται κατά κύριο λόγο σε ζυγούς που βρίσκονται κοντά στον ζυγό 61, κάτι που εξηγείται από το γεγονός πως στον συγκεκριμένο ζυγό έχει συνδεθεί η ΜΠΔ με τη μεγαλύτερη τιμή ισχύος του δικτύου.

Όσον αφορά τη Ζώνη 3, όταν δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα στο συντελεστή  $k_p$  ο ένας ΣΤΦ εγκαθίσταται κοντά στο ζυγό αναφοράς, ενώ στην περίπτωση που η βαρύτητα του συντελεστή  $k_v$  γίνεται μεγαλύτερη, αυτός ο σταθμός απομακρύνεται από τον ζυγό ταλάντωσης πλησιάζοντας τον ζυγό 35. Ο άλλος ΣΤΦ της συγκεκριμένης ζώνης του δικτύου εγκαθίσταται ανεξαρτήτως της βαρύτητας των συντελεστών της αντικειμενικής συνάρτησης και της τιμής της χωρητικότητας του κάθε ΣΤΦ, στο ζυγό 35 στον οποίο είναι συνδεδεμένη η ΜΔΠ της ζώνης αυτής.

Συνοψίζοντας, παρατηρείται πως καθώς αυξάνεται η βαρύτητα του συντελεστή  $k_v$ , οι θέσεις τοποθέτησης των ΣΤΦ απομακρύνονται όλο και περισσότερο από τον ζυγό αναφοράς του δικτύου, σε όλα τα σενάρια που εξετάστηκαν σε αυτή την ενότητα. Ακόμα, αξίζει να αναφερθεί πως καθώς η τιμή της χωρητικότητας των ΣΤΦ αυξάνεται, οι θέσεις τοποθέτησης των ΣΤΦ μετατοπίζονται προς τον ζυγό αναφοράς. Τέλος, παρατηρείται ότι στη Ζώνη 2 και στη Ζώνη 3 η θέση όπου είναι εγκατεστημένη η ΜΔΠ επηρεάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό την επιλογή του βέλτιστου ζυγού εγκατάστασης των ΣΤΦ, ενώ στη Ζώνη 1 η θέση της ΜΔΠ επηρεάζει σε μικρότερο βαθμό τη θέση των ΣΤΦ.

- ΜΕ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΤΙΣ ΘΕΣΕΙΣ ΤΩΝ ΜΔΠ

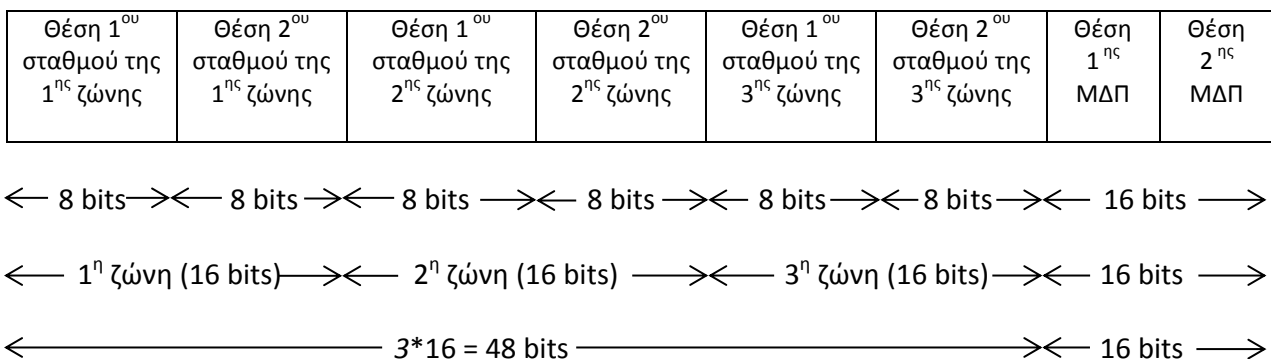
Στην συγκεκριμένη ενότητα της παρούσας διπλωματικής, θεωρείται η υποθετική περίπτωση όπου θα επιλεγόταν η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της θέσης των ΜΔΠ και της θέσης των ΣΤΦ στο συγκεκριμένο δίκτυο. Έτσι, θα παρουσιάσουμε παρακάτω τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την επίλυση του προβλήματος, στη θεωρητική περίπτωση που αναζητούμε τη βέλτιστη θέση και το βέλτιστο μέγεθος των ΜΔΠ που έχουμε επιλέξει να συνδέσουμε στο δίκτυο, καθώς και τη βέλτιστη θέση τοποθέτησης των ΣΤΦ. Δεν υπάρχουν στο υποθετικό αυτό σενάριο, εγκατεστημένες εξαρχές ΜΔΠ

στο συγκεκριμένο δίκτυο διανομής. Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι θα πρέπει κάθε ένας από τους ΣΤΦ να συνδεθεί σε διαφορετικό ζυγό της αντίστοιχης ζώνης του δικτύου, όπου ανήκει. Ωστόσο, θα πρέπει και κάθε μία από τις ΜΔΠ να εγκατασταθεί σε διαφορετικό ζυγό του δικτύου. Επομένως, για το λόγο αυτό ο κώδικας περιλαμβάνει τους κατάλληλους περιορισμούς, ώστε να αποτραπεί η ταύτιση των ζυγών τοποθέτησης των ΣΤΦ, καθώς και των ΜΔΠ.

Η αντικειμενική συνάρτηση της οποίας την τιμή επιδιώκουμε να βελτιστοποιήσουμε παρουσιάστηκε παραπάνω, είναι η ίδια και για τις τρεις περιπτώσεις και δίνεται από τη Σχέση 5.2. Σε κάθε μία από αυτές τις περιπτώσεις θα χρησιμοποιήσουμε τις αντίστοιχες βέλτιστες τιμές των παραμέτρων του ΓΑ και τον αντίστοιχο βέλτιστο solver για την ΒΡΦ, όπως υπολογίστηκαν στις προηγούμενες ενότητες, έτσι ώστε να επιτευχθεί η εύρεση της βέλτιστης λύσης σε όσο το δυνατόν μικρότερο χρονικό διάστημα. Ακόμα θα εξεταστεί η επιρροή που έχουν στο τελικό αποτέλεσμα, οι διαφορετικές τιμές των συντελεστών βαρύτητας της αντικειμενικής συνάρτησης,  $k_p$  και  $k_v$ . Σε κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις θα εκτελεσθεί 500 διαδοχικές φορές ο ΓΑ, όπου ο αρχικός πληθυσμός της πρώτης εκτέλεσης θα είναι τυχαίος, αλλά από την δεύτερη εκτέλεση και μετά θα ορίζεται ως αρχικό βέλτιστο χρωμόσωμα της εκάστοτε εκτέλεσης η βέλτιστη λύση της ακριβώς προηγούμενης εκτέλεσης του ΓΑ. Παρατηρείται ότι οι διαδοχικές φορές εκτέλεσης του ΓΑ αυξάνονται στις 500, σε σχέση με τις 100 που ήταν στην περίπτωση που αναζητούνταν μόνο οι βέλτιστες θέσεις τοποθέτησης ΜΔΠ στο δίκτυο. Αυτή η αύξηση των επαναλήψεων πραγματοποιείται, για το λόγο πως η πολυπλοκότητα του προβλήματος αυξάνεται οπότε χρειάζονται περισσότερες διαδοχικές εκτελέσεις για την εύρεση της βέλτιστης του λύσης.

i. Τοποθέτηση έξι ΣΤΦ και δύο ΜΔΠ στο δίκτυο των 69 ζυγών

Στην περίπτωση αυτή ορίζεται από τον χρήστη πως ο αριθμός των ΜΔΠ που θα συνδεθούν στο δίκτυο διανομής είναι δύο ( $k=2$ ) και όπως υπολογίστηκε παραπάνω ο αριθμός των χρωμοσωμάτων του αρχικού πληθυσμού θα είναι 40 ( $N_{pop}=40$ ). Στο παρακάτω Σχήμα 5.6 φαίνεται η μορφή του κάθε χρωμοσώματος αυτού του πληθυσμού.



**Σχήμα 5.6:** Ενδεικτική μορφή ενός, από τα 40 χρωμοσώματα του πληθυσμού



Στον Πίνακα 5.29 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των 500 διαδοχικών εκτελέσεων, αν πραγματοποιηθούν οι εναλλαγές στις τιμές των συντελεστών βαρύτητας της αντικειμενικής συνάρτησης που φαίνονται παρακάτω .

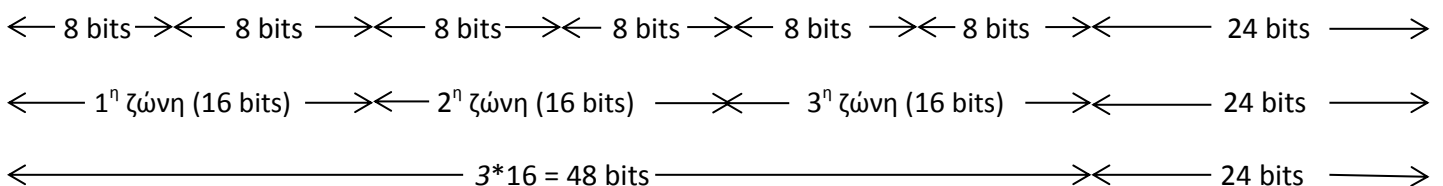
**Πίνακας 5.29:** Αποτελέσματα για βέλτιστη τοποθέτηση έξι ΣΤΦ και δύο ΜΔΠ

	$k_p=0.25$ $k_v=0.75$	$k_p=0.50$ $k_v=0.50$	$k_p=0.75$ $k_v=0.25$
Θέσεις των δύο ΣΤΦ στη Ζώνη 1 (ζυγοί)	4   8	4   8	4   8
Θέσεις των δύο ΣΤΦ στη Ζώνη 2 (ζυγοί)	5   55	53   55	61   63
Θέσεις των δύο ΣΤΦ στη Ζώνη 3 (ζυγοί)	3   6	2   3	2   3
Θέση 1 <sup>ης</sup> ΜΔΠ (ζυγός)	60	56	56
Ισχύς 1 <sup>ης</sup> ΜΔΠ (MW)	1.50	1.50	1.50
Θέση 2 <sup>ης</sup> ΜΔΠ (ζυγός)	55	55	61
Ισχύς 2 <sup>ης</sup> ΜΔΠ (MW)	0.98	1.08	1.02
Απόκλιση της τάσης των ζυγών πριν τη σύνδεση των ΣΤΦ, ΜΔΠ (α.μ.)	2.065740	2.065740	2.065740
Απόκλιση της τάσης των ζυγών μετά τη σύνδεση των ΣΤΦ, ΜΔΠ (α.μ.)	0.301366	0.313274	0.319824
Ποσοστό μείωσης της απόκλισης της τάσης των ζυγών (%)	85.41	84.83	84.51
Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου πριν τη σύνδεση των ΣΤΦ, ΜΔΠ (MW)	0.250506	0.250506	0.250506
Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου μετά τη σύνδεση των ΣΤΦ, ΜΔΠ (MW)	0.022596	0.019677	0.019355
Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος (%)	90.98	92.15	92.27
Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης ( $F_{FCS,DG}$ )	0.131966	0.115099	0.096654
Αριθμός επανάληψης που βρέθηκε η βέλτιστη λύση	21	32	17

ii. Τοποθέτηση έξι ΣΤΦ και τριών ΜΔΠ στο δίκτυο των 69 ζυγών

Στην περίπτωση αυτή ορίζεται από τον χρήστη πως ο αριθμός των ΜΔΠ που θα συνδεθούν στο δίκτυο διανομής είναι τρεις ( $k=3$ ) και όπως υπολογίστηκε παραπάνω ο αριθμός των χρωμοσωμάτων του αρχικού πληθυσμού θα είναι 50 ( $N_{pop}=50$ ). Στο παρακάτω Σχήμα 5.7 φαίνεται η μορφή του κάθε χρωμοσώματος αυτού του πληθυσμού.

Θέση 1 <sup>ου</sup> σταθμού της 1 <sup>ης</sup> ζώνης	Θέση 2 <sup>ου</sup> σταθμού της 1 <sup>ης</sup> ζώνης	Θέση 1 <sup>ου</sup> σταθμού της 2 <sup>ης</sup> ζώνης	Θέση 2 <sup>ου</sup> σταθμού της 2 <sup>ης</sup> ζώνης	Θέση 1 <sup>ου</sup> σταθμού της 3 <sup>ης</sup> ζώνης	Θέση 2 <sup>ου</sup> σταθμού της 3 <sup>ης</sup> ζώνης	Θέση 1 <sup>ης</sup> ΜΔΠ	Θέση 2 <sup>ης</sup> ΜΔΠ	Θέση 3 <sup>ης</sup> ΜΔΠ
--	--	--	--	--	--	--------------------------------	--------------------------------	--------------------------------



**Σχήμα 5.7:** Ενδεικτική μορφή ενός, από τα 50 χρωμοσώματα του πληθυσμού

**Πίνακας 5.30:** Αποτελέσματα για βέλτιστη τοποθέτηση έξι ΣΤΦ και τριών ΜΔΠ

	$k_p=0.25$ $k_v=0.75$		$k_p=0.50$ $k_v=0.50$		$k_p=0.75$ $k_v=0.25$	
Θέσεις των δύο ΣΤΦ στη Ζώνη 1 (ζυγοί)	4	11	4	8	4	8
Θέσεις των δύο ΣΤΦ στη Ζώνη 2 (ζυγοί)	5	61	5	61	61	63
Θέσεις των δύο ΣΤΦ στη Ζώνη 3 (ζυγοί)	50	52	58	60	56	58
Θέση 1 <sup>ης</sup> ΜΔΠ (ζυγός)	58		56		56	
Ισχύς 1 <sup>ης</sup> ΜΔΠ (MW)	1.50		1.50		1.50	
Θέση 2 <sup>ης</sup> ΜΔΠ (ζυγός)	61		61		61	
Ισχύς 2 <sup>ης</sup> ΜΔΠ (MW)	0.87		0.87		0.97	
Θέση 3 <sup>ης</sup> ΜΔΠ (ζυγός)	50		58		58	
Ισχύς 3 <sup>ης</sup> ΜΔΠ (MW)	0.64		0.59		0.59	
Απόκλιση της τάσης των ζυγών πριν τη σύνδεση των ΣΤΦ, ΜΔΠ (α.μ.)	2.065740		2.065740		2.065740	
Απόκλιση της τάσης των ζυγών μετά τη σύνδεση των ΣΤΦ, ΜΔΠ (α.μ.)	0.142429		0.146495		0.150960	
Ποσοστό μείωσης της απόκλισης της τάσης των ζυγών (%)	93.11		93.09		92.69	
Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου πριν τη σύνδεση των ΣΤΦ, ΜΔΠ (MW)	0.250506		0.250506		0.250506	
Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου μετά τη σύνδεση των ΣΤΦ, ΜΔΠ (MW)	0.012549		0.010917		0.010461	
Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος (%)	94.99		95.64		95.82	
Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης ( $F_{FCS,DG}$ )	0.064234		0.057248		0.049588	
Αριθμός επανάληψης που βρέθηκε η βέλτιστη λύση	162		47		151	

Στον Πίνακα 5.30 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των 500 διαδοχικών εκτελέσεων, αν πραγματοποιηθούν οι εναλλαγές στις τιμές των συντελεστών βαρύτητας της αντικειμενικής συνάρτησης που φαίνονται παρακάτω .

iii. Τοποθέτηση έξι ΣΤΦ και τεσσάρων ΜΔΠ στο δίκτυο των 69 ζυγών

Στην περίπτωση αυτή ορίζεται από τον χρήστη πως ο αριθμός των ΜΔΠ που θα συνδεθούν στο δίκτυο διανομής είναι τέσσερις ( $k=4$ ) και όπως υπολογίστηκε παραπάνω ο αριθμός των χρωμοσωμάτων του αρχικού πληθυσμού θα είναι και πάλι 50 ( $N_{pop}=50$ ). Το κάθε χρωμόσωμα του πληθυσμού χωρίζεται και πάλι σε δύο μέρη, όπου το πρώτο μέρος αποτελείται από έξι θέσεις που αντιπροσωπεύουν τους έξι ΣΤΦ που θα εγκατασταθούν στις τρεις ζώνες του δικτύου ( $6*8 = 48$  bits) και το δεύτερο μέρος αποτελείται από τέσσερις θέσεις που αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα, τις τέσσερις ΜΔΠ που θα συνδεθούν στο συγκεκριμένο δίκτυο ( $4*8 = 32$  bits). Επομένως κάθε χρωμόσωμα θα αποτελείται από  $48+32=80$  bits.

Στον Πίνακα 5.31 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των 500 διαδοχικών εκτελέσεων, αν πραγματοποιηθούν οι εναλλαγές στις τιμές των συντελεστών βαρύτητας της αντικειμενικής συνάρτησης που φαίνονται παρακάτω .

**Πίνακας 5.31:** Αποτελέσματα για βέλτιστη τοποθέτηση έξι ΣΤΦ και τεσσάρων ΜΔΠ

	$k_p=0.25$ $k_v=0.75$		$k_p=0.50$ $k_v=0.50$		$k_p=0.75$ $k_v=0.25$	
<b>Θέσεις των δύο ΣΤΦ στη Ζώνη 1 (ζυγοί)</b>	4	8	4	8	4	8
<b>Θέσεις των δύο ΣΤΦ στη Ζώνη 2 (ζυγοί)</b>	5	61	33	61	33	61
<b>Θέσεις των δύο ΣΤΦ στη Ζώνη 3 (ζυγοί)</b>	56	58	56	58	60	62
<b>Θέση 1<sup>ης</sup> ΜΔΠ (ζυγός)</b>	56		56		56	
<b>Ισχύς 1<sup>ης</sup> ΜΔΠ (MW)</b>	1.50		1.50		1.50	
<b>Θέση 2<sup>ης</sup> ΜΔΠ (ζυγός)</b>	61		61		61	
<b>Ισχύς 2<sup>ης</sup> ΜΔΠ (MW)</b>	0.73		0.73		0.73	
<b>Θέση 3<sup>ης</sup> ΜΔΠ (ζυγός)</b>	33		33		33	
<b>Ισχύς 3<sup>ης</sup> ΜΔΠ (MW)</b>	0.58		0.67		0.68	
<b>Θέση 4<sup>ης</sup> ΜΔΠ (ζυγός)</b>	58		58		62	
<b>Ισχύς 4<sup>ης</sup> ΜΔΠ (MW)</b>	0.51		0.51		0.51	
<b>Απόκλιση της τάσης των ζυγών πριν τη σύνδεση των ΣΤΦ, ΜΔΠ (α.μ.)</b>	2.065740		2.065740		2.065740	
<b>Απόκλιση της τάσης των ζυγών μετά τη σύνδεση των ΣΤΦ, ΜΔΠ (α.μ.)</b>	0.080984		0.082348		0.090543	
<b>Ποσοστό μείωσης της απόκλισης της τάσης των ζυγών (%)</b>	96.08		96.01		95.61	
<b>Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου πριν τη σύνδεση των ΣΤΦ, ΜΔΠ (MW)</b>	0.250506		0.250506		0.250506	
<b>Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου μετά τη σύνδεση των ΣΤΦ, ΜΔΠ (MW)</b>	0.007499		0.007190		0.006599	
<b>Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος (%)</b>	97.01		97.13		97.37	
<b>Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης (<math>F_{FCS,DG}</math>)</b>	0.036887		0.034283		0.030714	
<b>Αριθμός επανάληψης που βρέθηκε η βέλτιστη λύση</b>	327		65		326	

Μέσω των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.29, 5.30 και 5.31 γίνεται αντιληπτό ότι όταν αυξάνεται ο συντελεστής βαρύτητας  $k_p$  τότε παρατηρείται και πάλι αύξηση του ποσοστού μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος, ενώ στην περίπτωση που πραγματοποιείται αύξηση του συντελεστή  $k_v$ , τότε παρατηρείται αύξηση του ποσοστού μείωσης της απόκλισης της τάσης των ζυγών. Ακόμα, αξίζει να σημειωθεί πως ανεξάρτητα από τις τιμές των δύο συντελεστών βαρύτητας της αντικειμενικής συνάρτησης, το ποσοστό μείωσης των απωλειών, είναι και στα τρία σενάρια διεύθυνσης ΜΔΠ-ΣΤΦ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο ποσοστό μείωσης της απόκλισης της τάσης, όπως ίσχυε και στην προηγούμενη ενότητα όπου εξετάζαμε μόνο τη σύνδεση ΜΔΠ στο δίκτυο. Η συγκεκριμένη παρατήρηση φανερώνει πως η σύνδεση ΜΔΠ σε ένα δίκτυο διανομής, συνεισφέρει σημαντικά στη μείωση της απόκλισης της τάσης, αλλά κατά κύριο λόγο στην βελτίωση των απωλειών ενεργού ισχύος και στην περίπτωση που στο δίκτυο έχουν εγκατασταθεί ΣΤΦ. Αυτή η διαπίστωση, φαίνεται και από το γεγονός πως η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και στις τρεις περιπτώσεις επιτυγχάνεται όταν δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα στον συντελεστή βαρύτητας  $k_p$ . Επίσης, παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται ο αριθμός των ΜΔΠ που συνδέονται στο δίκτυο, τόσο το ποσοστό μείωσης των απωλειών όσο και το ποσοστό μείωσης της απόκλισης της τάσης αυξάνονται σε σημαντικό βαθμό.

Όσον αφορά τις ζώνες στις οποίες έχει διαχωριστεί το δίκτυο διανομής, παρατηρείται ότι στη Ζώνη 1 οι ΣΤΦ σε όλες τις περιπτώσεις συνδέονται σε συγκεκριμένους ζυγούς (ζυγοί 4,8), που βρίσκονται κοντά στο ζυγό αναφοράς. Στη συγκεκριμένη ζώνη σε καμία από τις περιπτώσεις δεν εγκαθίσταται κάποια ΜΔΠ, οπότε

φαίνεται πως η συγκεκριμένη ζώνη είναι η λιγότερο φορτισμένη από τις τρεις ζώνες του υπό εξέταση δικτύου.

Σχετικά με τη Ζώνη 2, αξίζει να αναφερθεί πως στις δύο πρώτες περιπτώσεις όπου συνδέονται στο δίκτυο δύο και τρεις ΜΔΠ αντίστοιχα, όσο αυξάνεται η τιμή του συντελεστή βαρύτητας  $k_p$ , παρατηρείται μετατόπιση των ΣΤΦ προς τους ζυγούς όπου συνδέονται οι ΜΔΠ. Στις δύο αυτές περιπτώσεις οι ΣΤΦ εγκαθίστανται τελικά, στους ζυγούς 61 και 63. Στην περίπτωση που στο δίκτυο συνδέουμε τέσσερις ΜΔΠ δεν παρατηρείται τόσο σημαντική μετατόπιση των ΣΤΦ προς τα δεξιά, κάτι που οφείλεται στο γεγονός πως η μία ΜΔΠ επιλέγεται να εγκατασταθεί στο ζυγό 33 που βρίσκεται αρκετά κοντά στον ζυγό αναφοράς. Επομένως, φαίνεται πως ο ζυγός 61 είναι εκείνος στον οποίο πρέπει να δοθεί η μεγαλύτερη προσοχή στη Ζώνη 2.

Όσον αφορά την Ζώνη 3, παρατηρείται ότι σε όλες τις περιπτώσεις είναι η ζώνη εκείνη που συγκεντρώνει τη μεγαλύτερη ενεργό ισχύ των ΜΔΠ. Η διαπίστωση αυτή, φαίνεται και από το γεγονός πως στην περίπτωση που συνδέουμε τρεις ΜΔΠ, οι δύο από αυτές θα συνδεθούν στη Ζώνη 3. Στην περίπτωση όπου συνδέονται δύο ΜΔΠ στο δίκτυο, στη ζώνη αυτή οι ΣΤΦ συνδέονται σε συγκεκριμένους ζυγούς (ζυγοί 2,3) που βρίσκονται κοντά στο ζυγό αναφοράς, ανεξαρτήτως της βαρύτητας που δίνεται στους συντελεστές της αντικειμενικής συνάρτησης. Στις περιπτώσεις όμως που συνδέονται τρεις και τέσσερις ΜΔΠ στο δίκτυο αντίστοιχα, όσο αυξάνεται η τιμή του συντελεστή  $k_p$ , παρατηρείται στη Ζώνη 3 μετατόπιση των ΣΤΦ προς τους ζυγούς όπου συνδέονται οι ΜΔΠ. Αυτή τη φορά οι ΣΤΦ δεν καταλήγουν τελικώς στις ίδιες θέσεις όπως συμβαίνει στη Ζώνη 2, αλλά οι ΣΤΦ απομακρύνονται περισσότερο από το ζυγό αναφοράς στην περίπτωση της τοποθέτησης τεσσάρων ΜΔΠ, όπως το ίδιο παρατηρείται και για τις θέσεις των ΜΔΠ. Επομένως, είναι φανερό πως η Ζώνη 3 είναι εκείνη που χρειάζεται τη μεγαλύτερη ενίσχυση στο συγκεκριμένο δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα στο ζυγό 56 παρατηρείται η μέγιστη παραγωγή από ΜΔΠ στην πλειονότητα των περιπτώσεων.

Συγκρίνοντας τις θέσεις των ΜΔΠ στην περίπτωση που εγκαθίστανται και ΣΤΦ με την περίπτωση όπου συνδέθηκαν μόνο ΜΔΠ στο δίκτυο, παρατηρείται ότι οι θέσεις των ΜΔΠ ταυτίζονται για αυτές τις δύο περιπτώσεις μόνο όταν τοποθετούνται τέσσερις ΜΔΠ. Στην περίπτωση αυτής της ταύτισης, οι ΜΔΠ συνδέονται στους ζυγούς 33 και 61 στη Ζώνη 2 και στους ζυγούς 56 και 58 στη Ζώνη 3 αντίστοιχα. Οι παραπάνω θέσεις των ΜΔΠ είναι ίδιες για όλες τις τιμές των συντελεστών βαρύτητας της αντικειμενικής συνάρτησης, όπως ακριβώς συνέβαινε και όταν εγκαταστάθηκαν μόνο ΜΔΠ στο δίκτυο. Όσον αφορά την περίπτωση όπου συνδέονται δύο και τρεις ΜΔΠ αντίστοιχα, οι θέσεις των ΜΔΠ στην περίπτωση που υπάρχουν και ΣΤΦ δεν ταυτίζονται με εκείνες που επιλέχθηκαν όταν υπήρχε μόνο η εγκατάσταση ΜΔΠ στο δίκτυο. Παρατηρείται ότι στην πρώτη περίπτωση, οι θέσεις των ΜΔΠ είναι μετατοπισμένες προς τα δεξιά, δηλαδή απομακρύνονται από το ζυγό αναφοράς.

Επιπροσθέτως, διαπιστώνεται ότι είτε συνδέσουμε δύο, είτε τρεις, είτε τέσσερις ΜΔΠ, η ΜΔΠ που έχει τη μεγαλύτερη ισχύ συνδέεται κατά κύριο λόγο στο ζυγό 56 και σε μικρότερο βαθμό σε γειτονικούς του ζυγούς. Η συγκεκριμένη διαπίστωση, φανερώνεται εντονότερα στην περίπτωση της σύνδεσης στο δίκτυο τριών ΜΔΠ, όπου οι δύο από αυτές εγκαθίστανται στην συγκεκριμένη περιοχή. Ένας άλλος ζυγός στον οποίο τις περισσότερες περιπτώσεις συνδέθηκε μια ΜΔΠ είναι ο ζυγός 61, αλλά η τιμή της ισχύος της ΜΔΠ ήταν πολύ μικρότερη. Επομένως, αυτές οι δύο περιοχές του δικτύου φαίνεται πως είναι εκείνες που χρειάζονται τη μεγαλύτερη ενίσχυση.





## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

### **6.1 ΣΥΝΟΨΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε αρχικά το πρόβλημα της βέλτιστης διαστασιολόγησης Μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής (ΜΔΠ) με τη χρήση του Γενετικού Αλγορίθμου (ΓΑ) και της Βέλτιστης Ροής Φορτίου (ΒΡΦ) και στη συνέχεια, το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης Σταθμών Ταχείας Φόρτισης (ΣΤΦ) ηλεκτρικών οχημάτων με χρήση του ΓΑ και της Ροής Φορτίου (ΡΦ). Για την επίλυση αυτών των δύο προβλημάτων αναπτύχθηκε ο κατάλληλος για την εκάστοτε περίπτωση κώδικας στο περιβάλλον της MATLAB, μέσω του οποίου επιτεύχθηκε η εύρεση των βέλτιστων ζυγών τοποθέτησης των ΜΔΠ και των ΣΤΦ αντίστοιχα. Όσον αφορά την επίλυση των προβλημάτων αυτών, επιλέχθηκε το δίκτυο διανομής των 69 ζυγών που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5. Παρατηρώντας τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο γίνεται αντιληπτό πως σε όλα τα σενάρια που μελετήθηκαν, όταν αυξάνεται ο συντελεστής βαρύτητας  $k_p$  τότε παρατηρείται και αύξηση του ποσοστού μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος, ενώ στην περίπτωση που πραγματοποιείται αύξηση του συντελεστή  $k_p$  τότε παρατηρείται αύξηση του ποσοστού μείωσης της απόκλισης της τάσης των ζυγών.

#### **6.1.1 Βέλτιστη διαστασιολόγηση Μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής**

Όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5, αρχικά πραγματοποιήθηκε η διερεύνηση των βέλτιστων παραμέτρων του ΓΑ και στη συνέχεια μελετήθηκε η επίδραση των solvers του MATPOWER, όταν εγκαθίστανται στο δίκτυο είτε δύο είτε τρεις είτε τέσσερις ΜΔΠ. Όσον αφορά τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων του ΓΑ παρατηρείται πως καθώς ο αριθμός των εγκατεστημένων ΜΔΠ αυξάνεται, η μόνη παράμετρος που αλλάζει είναι το μέγεθος του πληθυσμού των χρωμοσωμάτων που αυξάνεται. Αυτή η αύξηση της τιμής της συγκεκριμένης παραμέτρου φαίνεται λογική, καθώς όταν συνδέονται περισσότερες ΜΔΠ στο δίκτυο διανομής, η πολυπλοκότητα του προβλήματος αυξάνεται. Από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην Παράγραφο 5.2.4 σχετικά με την επίλυση της ΒΡΦ με διαφορετικούς solvers, προκύπτει πως εκείνος που τις περισσότερες φορές συνέκλινε πιο γρήγορα στη βέλτιστη λύση είναι ο PDIPM, ενώ ο solver MINOPF δεν κατάφερε να συγκλίνει για κανένα από τα σενάρια που μελετήθηκαν. Γενικά, στις περισσότερες περιπτώσεις οι solver συνέκλιναν στο ίδιο αποτέλεσμα, γεγονός που είναι λογικό αφού χρησιμοποιείται η ίδια μέθοδος επίλυσης της ΒΡΦ, η οποία είναι η μέθοδος εσωτερικού σημείου. Αξίζει να αναφερθεί πως εξαίρεση αποτελεί ο solver fmincon, ο οποίος χρησιμοποιεί τη μέθοδο του διαδοχικού τετραγωνικού προγραμματισμού και όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.19, 5.20 και 5.21 η ταχύτητα σύγκλισής του είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με τους υπόλοιπους.

Παρατηρείται πως ανεξαρτήτως της τιμής των συντελεστών βαρύτητας της αντικειμενικής συνάρτησης, σε όλα τα σενάρια που μελετήθηκαν στην Παράγραφο 5.3 το ποσοστό μείωσης των απωλειών είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο ποσοστό μείωσης της απόκλισης της τάσης των ζυγών. Η συγκεκριμένη παρατήρηση φανερώνει πως η σύνδεση ΜΔΠ σε ένα δίκτυο διανομής, δημιουργεί πολύ σημαντικά οφέλη στη μείωση της απόκλισης της τάσης, αλλά κατά κύριο λόγο στην βελτίωση των απωλειών ενεργού ισχύος. Αυτή η διαπίστωση, φαίνεται και από το γεγονός πως η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και στις τρεις περιπτώσεις επιτυγχάνεται όταν δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα στον συντελεστή  $k_p$ . Επίσης, διαπιστώνεται ότι καθώς αυξάνεται ο αριθμός των ΜΔΠ που συνδέονται στο δίκτυο, τόσο το ποσοστό μείωσης των απωλειών όσο και το ποσοστό μείωσης της απόκλισης της τάσης αυξάνονται σε σημαντικό βαθμό. Τέλος, προκύπτει ότι είτε συνδέσουμε δύο, είτε τρεις, είτε τέσσερις ΜΔΠ, η ΜΔΠ που έχει τη μεγαλύτερη ισχύ, δηλαδή η τιμή της πλησιάζει το ανώτερο όριο των 1.5 MW, συνδέεται κατά κύριο λόγο στο ζυγό 56 και σε μικρότερο βαθμό σε γειτονικούς του ζυγούς. Η συγκεκριμένη παρατήρηση, φανερώνεται εντονότερα στην περίπτωση της σύνδεσης στο δίκτυο τριών ΜΔΠ, όπου οι δύο από αυτές εγκαθίστανται στην συγκεκριμένη περιοχή. Επομένως είναι ξεκάθαρο πως η συγκεκριμένη περιοχή του υπό εξέταση δικτύου είναι εκείνη που χρειάζεται υποστήριξη.

### 6.1.2 Βέλτιστη τοποθέτηση Σταθμών Ταχείας Φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

Αρχικά, αναζητήθηκαν οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων του ΓΑ έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος εκτέλεσής του και να αυξηθεί η ταχύτητα σύγκλισής του στη βέλτιστη λύση του προβλήματος. Μέσα από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκτέλεση του κώδικα στο περιβάλλον της MATLAB και παρουσιάστηκαν στην Παράγραφο 5.4 του προηγούμενου κεφαλαίου, διαπιστώνεται πως οι τέσσερις ΜΔΠ που είναι εγκατεστημένες εξ αρχής στο δίκτυο διανομής επηρεάζουν σημαντικά την επιλογή των βέλτιστων ζυγών τοποθέτησης των ΣΤΦ. Το υπό εξέταση δίκτυο διανομής χωρίστηκε σε τρεις ζώνες και σε κάθε μια από αυτές εγκαταστάθηκαν δύο ΣΤΦ χωρητικότητας είτε 120 kW είτε 210 kW είτε 300 kW ο καθένας, έτσι ώστε να ικανοποιούνται όλοι οι κάτοχοι των ηλεκτρικών οχημάτων που το χρησιμοποιούν.

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.26, 5.27 και 5.28 του Κεφαλαίου 5, γίνεται εύκολα αντιληπτό πως ανεξάρτητα από τις τιμές των δύο συντελεστών βαρύτητας της αντικειμενικής συνάρτησης  $k_v$  και  $k_p$ , το ποσοστό μείωσης της απόκλισης της τάσης, είναι σε όλα τα σενάρια εγκατάστασης των ΣΤΦ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο ποσοστό μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος. Η συγκεκριμένη παρατήρηση, τονίζεται και από το γεγονός πως η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και για τις τρεις τιμές χωρητικότητας των ΣΤΦ, επιτυγχάνεται όταν δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα στον συντελεστή βαρύτητας  $k_v$ . Επίσης, παρατηρείται πως καθώς αυξάνεται η χωρητικότητα των ΣΤΦ, το ποσοστό μείωσης της απόκλισης της τάσης αυξάνεται σε μεγαλύτερο βαθμό σε σχέση με το ποσοστό μείωσης των απωλειών.

Όσον αφορά τις ζώνες στις οποίες έχει διαχωριστεί το δίκτυο διανομής, παρατηρείται ότι στη Ζώνη 1 στην περίπτωση που δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα στο συντελεστή  $k_p$ , οι ΣΤΦ εγκαθίστανται ανάμεσα στο ζυγό αναφοράς και στο ζυγό 27 στον οποίο είναι συνδεδεμένη η ΜΔΠ στη συγκεκριμένη ζώνη. Αντιθέτως, όταν η βαρύτητα



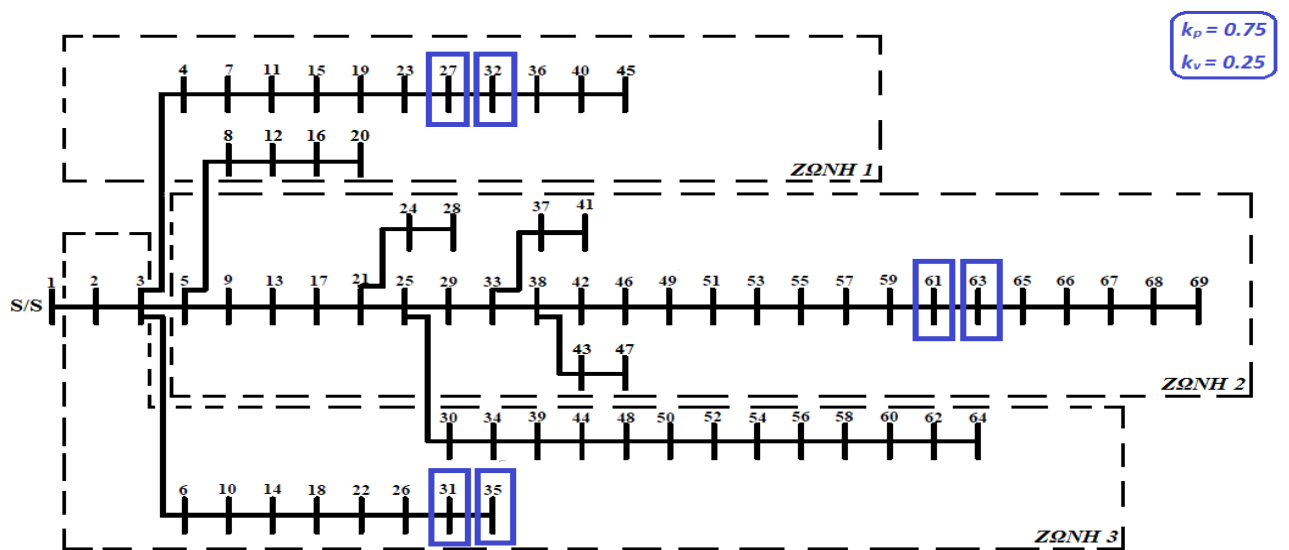
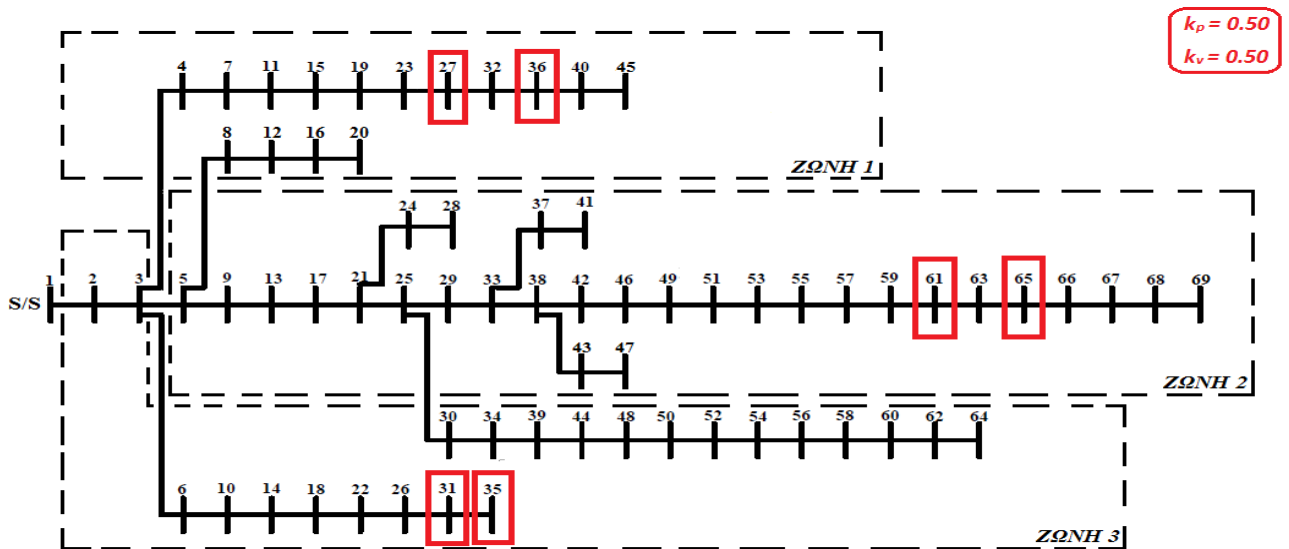
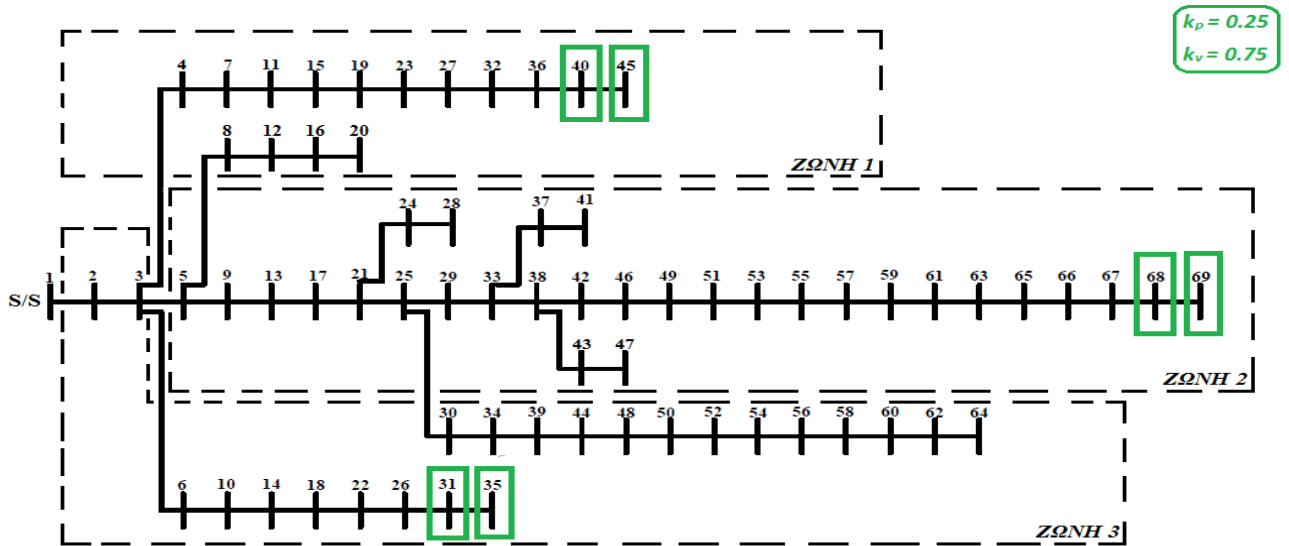
του συντελεστή  $k_v$ , γίνεται μεγαλύτερη, οι θέσεις εγκατάστασης των ΣΤΦ απομακρύνονται από τον ζυγό αναφοράς και μετατοπίζονται στην περιοχή κοντά στο ζυγό 27 και στο τέλος της Ζώνης 1. Ακόμα, παρατηρείται πως στα σενάρια όπου η χωρητικότητα του κάθε ΣΤΦ είναι 300 kW, οι σταθμοί στη συγκεκριμένη ζώνη ανεξαρτήτως της τιμής των συντελεστών βαρύτητας συνδέονται στο ζυγό 4 που βρίσκεται πολύ κοντά στο ζυγό αναφοράς και στο ζυγό 27.

Σχετικά με τη Ζώνη 2, όταν δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα στο συντελεστή  $k_p$  οι ΣΤΦ εγκαθίστανται στην περιοχή κοντά στον ζυγό 61 όπου είναι συνδεδεμένη η ΜΔΠ σε αυτή τη ζώνη. Όσον αφορά την περίπτωση όπου η τιμή του συντελεστή  $k_v$  γίνεται μεγαλύτερη, τότε οι ΣΤΦ μετατοπίζονται προς το τέλος της συγκεκριμένης ζώνης, δηλαδή προς τους ζυγούς 68 και 69. Επίσης, παρατηρείται πως στη Ζώνη 2 οι ΣΤΦ εγκαθίστανται κατά κύριο λόγο σε ζυγούς που βρίσκονται κοντά στον ζυγό 61, κάτι που εξηγείται από το γεγονός πως στον συγκεκριμένο ζυγό έχει συνδεθεί η ΜΠΔ με τη μεγαλύτερη τιμή ισχύος του δικτύου.

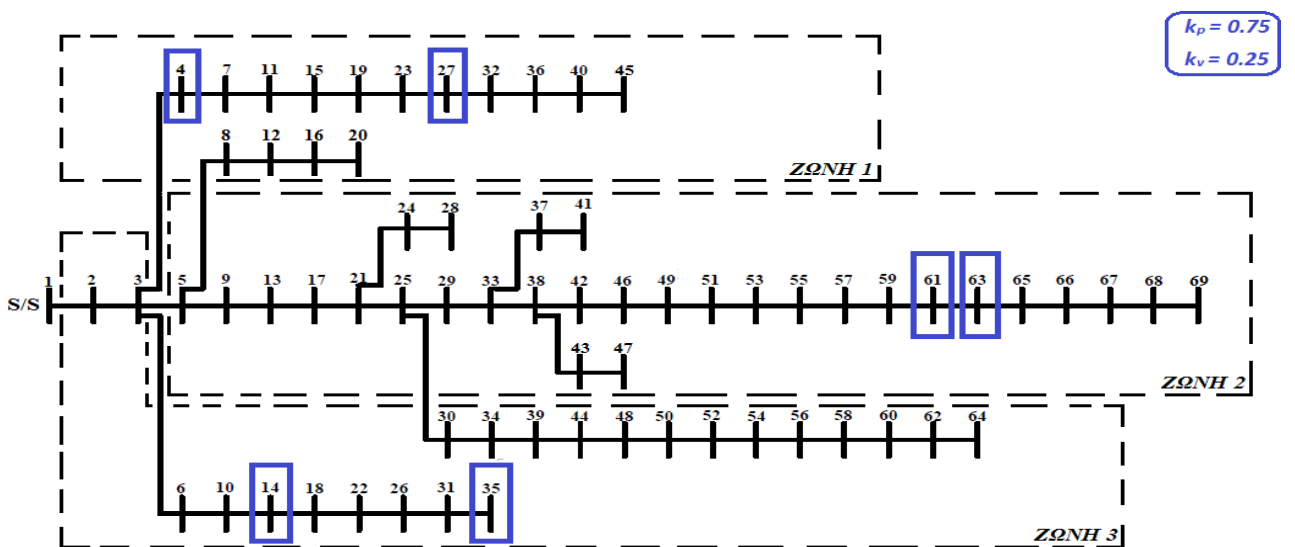
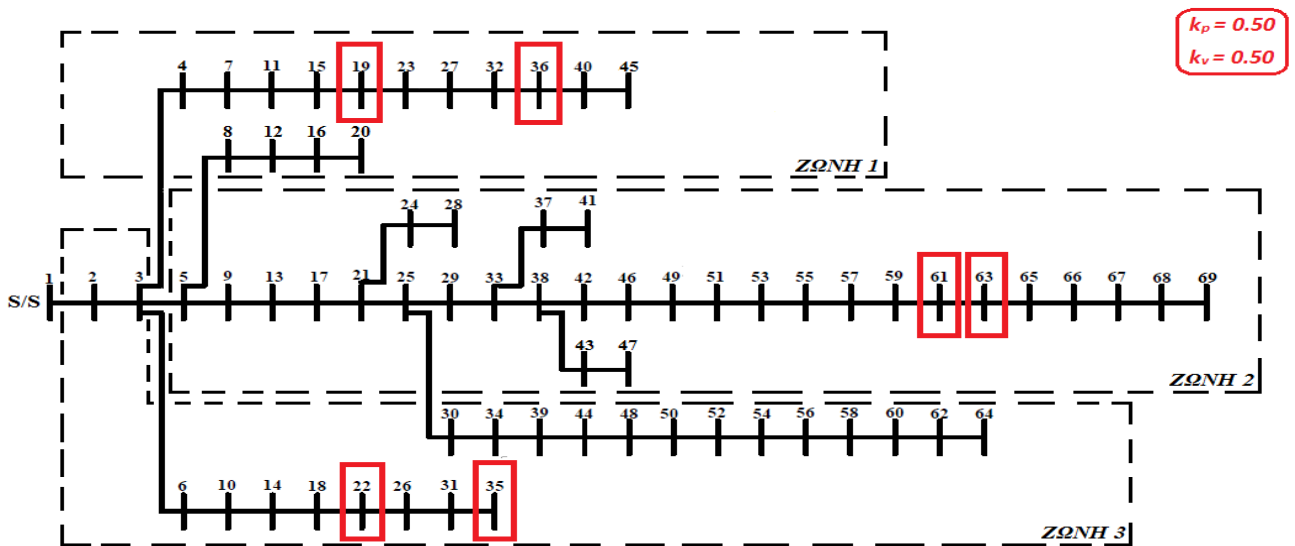
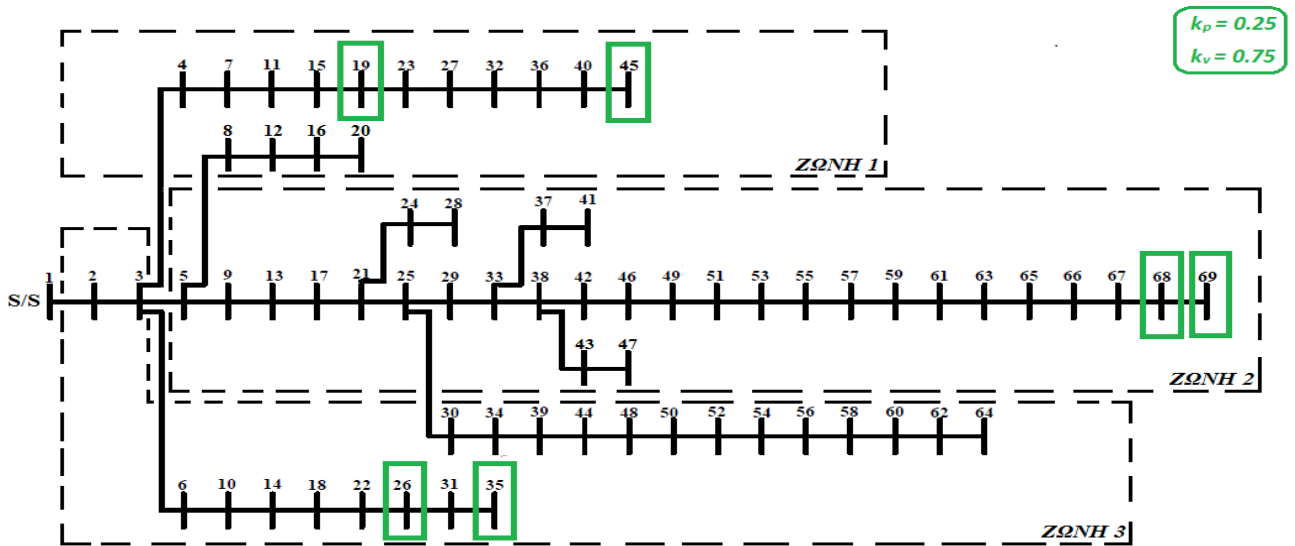
Όσον αφορά τη Ζώνη 3, όταν δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα στο συντελεστή  $k_p$  ο ένας ΣΤΦ εγκαθίσταται κοντά στο ζυγό αναφοράς, ενώ στην περίπτωση που η βαρύτητα του συντελεστή  $k_v$  γίνεται μεγαλύτερη, αυτός ο σταθμός απομακρύνεται από τον ζυγό ταλάντωσης πλησιάζοντας τον ζυγό 35. Ο άλλος ΣΤΦ της συγκεκριμένης ζώνης του δικτύου εγκαθίσταται ανεξαρτήτως της βαρύτητας των συντελεστών της αντικειμενικής συνάρτησης και της τιμής της χωρητικότητας του κάθε ΣΤΦ, στο ζυγό 35 στον οποίο είναι συνδεδεμένη η ΜΔΠ της ζώνης αυτής.

Συνοψίζοντας, παρατηρείται πως καθώς αυξάνεται η βαρύτητα του συντελεστή  $k_v$ , οι βέλτιστες θέσεις τοποθέτησης των ΣΤΦ απομακρύνονται όλο και περισσότερο από τον ζυγό αναφοράς του δικτύου, σε όλα τα σενάρια που εξετάστηκαν στην Παράγραφο 5.4 στα οποία οι θέσεις των ΜΔΠ είναι σταθερές εξαρχής. Επιπροσθέτως, προκύπτει πως όταν αυξάνεται ο συντελεστής  $k_v$ , μεγαλύτερη μετατόπιση των βέλτιστων θέσεων των ΣΤΦ παρατηρείται στη Ζώνη 2, ενώ σε περίπτωση αύξησης του συντελεστή  $k_p$  μεγαλύτερη μετατόπιση παρατηρείται κατά κύριο λόγο στη Ζώνη 1 και στη Ζώνη 3. Ακόμα, αξίζει να αναφερθεί πως καθώς η τιμή της χωρητικότητας των ΣΤΦ αυξάνεται, οι θέσεις τοποθέτησης των ΣΤΦ μετατοπίζονται προς τον ζυγό αναφοράς. Η αύξηση της τιμής της χωρητικότητας των ΣΤΦ από 210 kW σε 300 kW προκαλεί μεγαλύτερη μετατόπιση των βέλτιστων θέσεων των ΣΤΦ, ιδιαίτερα στις Ζώνες 1 και 3, σε σχέση με τη μείωση της τιμής αυτής από 210 kW σε 120 kW. Τέλος, παρατηρείται ότι στη Ζώνη 2 και στη Ζώνη 3 η θέση όπου είναι εγκατεστημένη η ΜΔΠ επηρεάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό την επιλογή του βέλτιστου ζυγού εγκατάστασης των ΣΤΦ, ενώ στη Ζώνη 1 η θέση της ΜΔΠ επηρεάζει σε μικρότερο βαθμό τη θέση των ΣΤΦ.

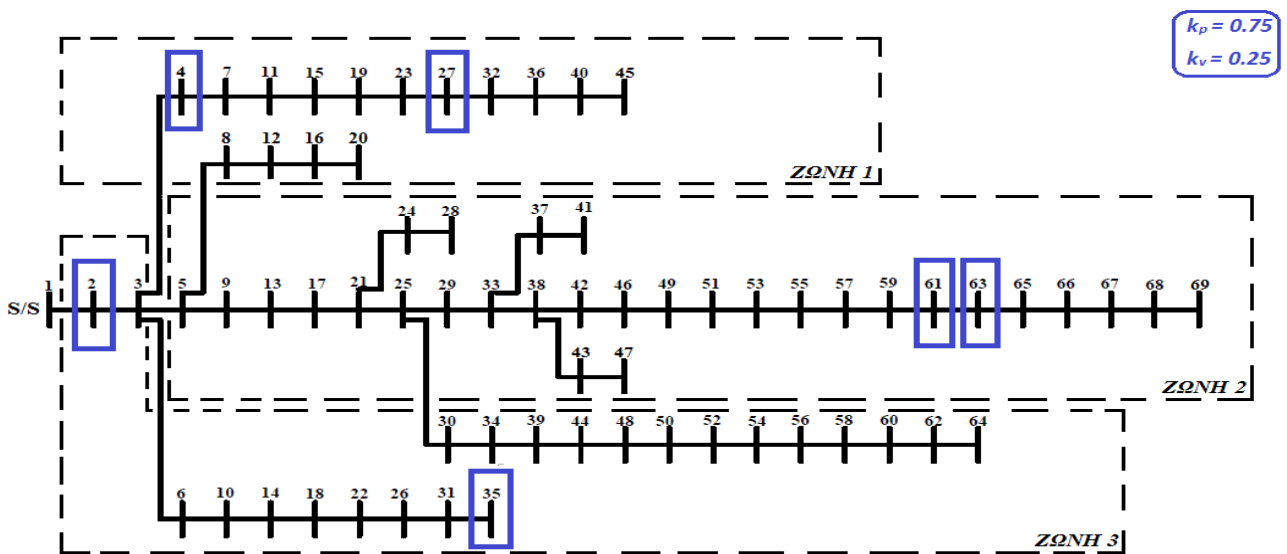
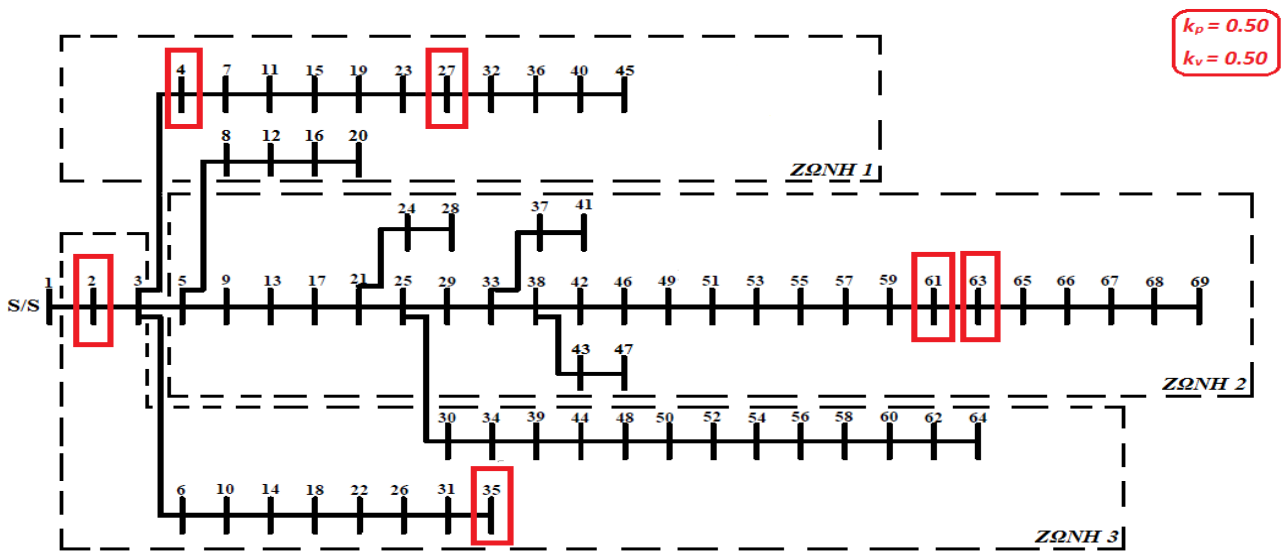
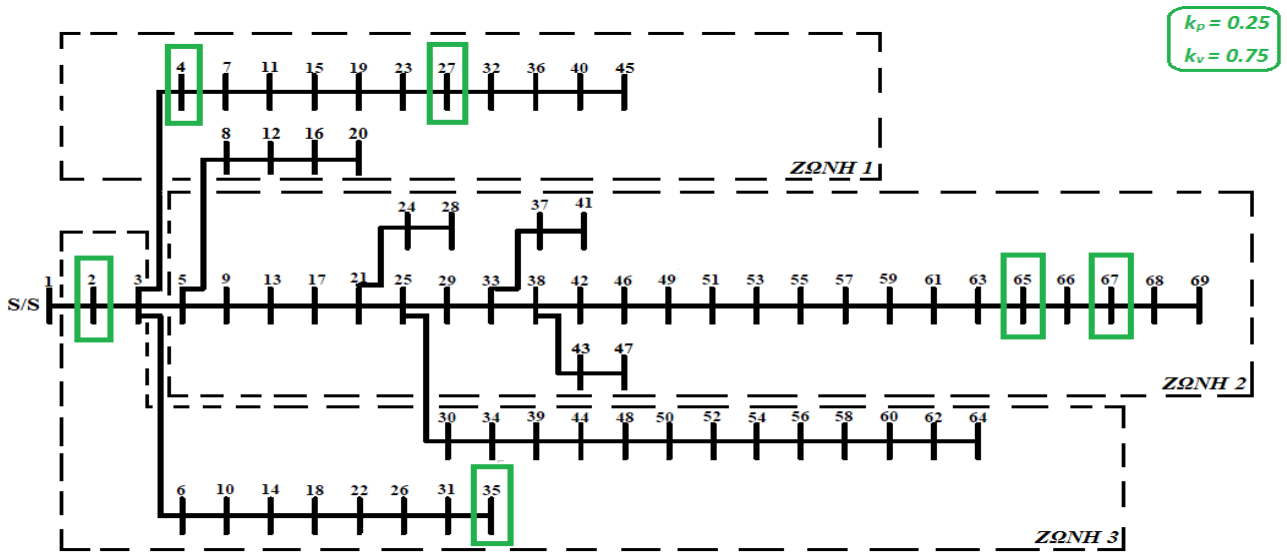
Στα σχήματα των επόμενων τριών σελίδων παρουσιάζονται οι βέλτιστοι ζυγοί που επιλέχθηκαν για την τοποθέτηση των έξι ΣΤΦ και για τις τρεις διαφορετικές τιμές της χωρητικότητας των σταθμών αυτών. Με πράσινο χρώμα σημειώνονται οι βέλτιστοι ζυγοί στην περίπτωση που δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα στον συντελεστή  $k_v$ , με μπλε χρώμα οι βέλτιστοι ζυγοί όταν δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα στον συντελεστή  $k_p$ , ενώ με κόκκινο χρώμα σημειώνονται οι ζυγοί εκείνοι που επιλέγονται όταν οι δύο συντελεστές της αντικειμενικής συνάρτησης παρουσιάζουν την ίδια βαρύτητα.



Σχήμα 6.1: Βέλτιστες θέσεις ΣΤΦ στο δίκτυο με χωρητικότητα 120 kW ο καθένας



Σχήμα 6.2: Βέλτιστες θέσεις ΣΤΦ στο δίκτυο με χωρητικότητα **210 kW** ο καθένας



Σχήμα 6.3: Βέλτιστες θέσεις ΣΤΦ στο δίκτυο με χωρητικότητα **300 kW** ο καθένας





## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Thomas Ackermann, Goran Andersson, Lennart Soder, "Distributed generation: a definition", Electric Power Systems Research, 2001
- [2] Μιχ. Π. Παπαδόπουλος, "Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές", Έκδοση Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, 1997
- [3] P. Chiradeja, "Benefit of Distributed Generation: A Line Loss Reduction Analysis", IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific Dalian, China, 2005
- [4] A. F. Zobaa, C. Cecati, "A Comprehensive Review on Distributed Power Generation", International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006
- [5] Pepermans, G., Driesen, G., J., Haeseldonckx, D., Belmans, R., D'haeseleer W., 2003. Distributed generation: definition, benefits and issues. Energy Policy, In Press.
- [6] Κ. Βουρνάς, και Γ. Κονταξής, "Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας," Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2001.
- [7] P. Dondi, D. Bayoumi, C. Haederli, D. Julian, M. Suter, "Network integration of distributed power generation", Journal of Power Sources, 2002
- [8] C.E. (Sandy) Thomas, "Fuel Cell and Battery Electric Vehicles Compared", International Journal of Hydrogen Energy 34, 2009
- [9] Murat Yilmaz, Philip T. Krein, "Review of Battery Charger Topologies, Charging Power Levels, and Infrastructure for Plug-In Electric and Hybrid Vehicles", IEEE transactions on power delivery, 2012
- [10] C. Botsford, A. Szczepanek, "Fast charging vs. Slow Charging: Pros and cons for the New Age of Electric Vehicles", EVS24, 2009
- [11] Hunter Hanzhuo Wu, Aaron Gilchrist, Ky Sealy, Paul Israelsen, Jeff Muhs, —A Review on Inductive Charging for Electric Vehicles||, IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), pp 143-147, 2011
- [12] R. Bailey, P. Kazemersky, A. Bonner, M. Chatham-tombs, W. Dawson, B. Gordon, N. Holland, W. Hooper, A. Malekzadeh, M. Murphy and E. Young, —Inductive Power Transfer Project||, Available at <http://www.utc.edu/Academic/EngineeringProjects/SmartCart/documents/ICFinalReport.doc> .

- [13] Mehdi Etezadi-Amoli, Kent Choma, Jason Stefani, "Rapid-Charge Electric- Vehicle Stations", IEEE transactions on power delivery, 2010
- [14] P. Papadopoulos, S. Skarvelis-Kazakos, I. Grau, B. Awad, L. Cipcigan and N. Jenkins, "Electric Vehicle Impact on Distribution Networks: A Probabilistic Approach", in Proc. 45th Universities Power Engineering Conference, Cardiff UK, 2010.
- [15] Daan Bakker, "Battery Electric Vehicles: Performance, CO<sub>2</sub> emissions, lifecycle costs and advanced battery technology development", Thesis, Universiteit Utrecht, 2010
- [16] R. L. Haupt, S. E. Haupt, *Practical Genetic Algorithms*, Second Edition Wiley-Interscience, USA, 2004, pp 27-47.
- [17] P. S. Georgilakis, *Spotlight on modern transformer design* Springer, London, UK, 2009.
- [18] Allen J. Wood and Bruce F. Wollenberg, *Power Generation, Operation and Control*, 2nd edition, John Willey & Sons, INC, 1996.
- [19] R. D. Zimmerman, *MATPOWER4.0- A MATLAB Power System Simulation Package*, User's Manual, Cornell Univ., Shc. Elect. Eng., Ithaca, NY, 2010. [Online]. Διαθέσιμο: <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/manual.pdf>.