



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

**ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ  
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΗΣ ΡΣΟ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ  
ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Αλεξάνδρα Σ. Ζίγκηρη

**Επιβλέπων :** Χατζηαργυρίου Νικόλαος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ..... Ιουλίου 2012

.....  
Χατζηαργυρίου Νικόλαος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Παπαθανασίου Σταύρος

Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Γεωργιλάκης Πάυλος

Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2012

.....  
Αλεξάνδρα Σ. Ζίγκηρη

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

Copyright © Αλεξάνδρα Ζίγκηρη, 2012

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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





## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μία έντονη αναδόμηση των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας και μία ολοένα αυξανόμενη διείσδυση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στα δίκτυα διανομής. Η κατάλληλη διαστασιολόγηση αυτών των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής είναι υψίστης σημασίας προκειμένου να μεγιστοποιηθούν τα οφέλη που προκύπτουν από την ένταξή τους στο δίκτυο.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εύρεση της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης και της βέλτιστης ονομαστικής ισχύος μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε ένα δίκτυο διανομής, με τεχνικά και με οικονομικά κριτήρια. Πιο συγκεκριμένα, μελετάται η συμβολή της βέλτιστης διαστασιολόγησης, κατά θέση και κατά μέγεθος, των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στην ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, καθώς και στην ελαχιστοποίηση της διακύμανσης της τάσης που παρουσιάζεται στο δίκτυο. Επιπλέον, διερευνάται η επίδραση της διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων, με μη ελεγχόμενη φόρτιση, στο δίκτυο.

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αναπτύχθηκε κατάλληλο λογισμικό σε περιβάλλον MATLAB, το οποίο επιλύει τα εν λόγω προβλήματα με την υλοποίηση ενός υβριδικού αλγορίθμου που συνδυάζει στοιχεία από τη θεωρία της επιλογής των κλώνων (Clonal Selection Theory) και τη μέθοδο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (Particle Swarm Optimization Technique).

Στο Κεφάλαιο 1 της παρούσας εργασίας γίνεται αναφορά στη διεσπαρμένη παραγωγή και το έντονο ενδιαφέρον που έχει παρατηρηθεί τα τελευταία χρόνια παγκοσμίως σε αυτόν τον τομέα. Εξετάζονται τα βασικότερα είδη διεσπαρμένων πηγών, οι χρήσεις τους, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Επιπρόσθετα, γίνεται αναφορά στα ηλεκτρικά οχήματα και πιο συγκεκριμένα, στις παραμέτρους που διαμορφώνουν τη ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων, στην επίδραση της μη ελεγχόμενης φόρτισης τους στο δίκτυο αλλά και στην ταυτόχρονη διείσδυση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής και ηλεκτρικών οχημάτων σε ένα δίκτυο. Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφεται ο αλγόριθμος της επιλογής των κλώνων και οι βασικές αρχές στις οποίες αυτός στηρίζεται, η μέθοδος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων, αλλά και ο υβριδικός αλγόριθμος PCLONALG που προκύπτει από το συνδυασμό αυτών. Επιπλέον, αναλύεται το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου και οι τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί για την επίλυση αυτού. Παρουσιάζεται ακόμα, μία εφαρμογή του προβλήματος σε ένα απλό δίκτυο 4 ζυγών. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που υλοποιήθηκαν και στο Κεφάλαιο 4 συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτήν την ανάλυση.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Διεσπαρμένη Παραγωγή, ηλεκτρικά οχήματα, βέλτιστη ροή φορτίου, μέθοδος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων, αλγόριθμος επιλογής των κλώνων, υβριδικός αλγόριθμος PCLONALG, απώλειες ενεργού ισχύος, προφίλ τάσης, διακύμανση τάσης



## **ABSTRACT**

In recent years, there is an intense restructuring of the electrical power systems and an increasing integration of distributed generation units in distribution networks. Optimal placement of these distributed generation units is crucial in order to maximize the benefits derived from their joining the network.

The aim of the present thesis is to find the optimal location and optimal capacity of distributed generation units in a distribution network, considering technical and financial criteria. More precisely, this thesis examines the contribution of optimal placement of distributed generation units in minimizing active power losses and voltage deviation in a network. In addition, the impact of electric vehicle deployment, without managing their charging demand, is investigated as well.

As part of this study, a suitable software was developed in MATLAB, solving these problems by implementing a hybrid algorithm that combines elements from the Clonal Selection Theory and Particle Swarm Optimization Technique.

Chapter 1 considers the distributed generation and the intense worldwide interest that has been recently observed in this field. It provides an overview of the main types of distributed resources, their uses, advantages and disadvantages. In addition, reference is made to the electric vehicles and specifically, the parameters that influence their charging demand, the effects of their uncontrolled charging in the network and the simultaneous integration of distributed generation units and electric vehicles in a network. Chapter 2 describes the algorithm for clones selection as well as the basic principles it relies on, the method of Particle Swarm Optimization, and the hybrid algorithm PCLONALG, which results from the combination of these. Furthermore, the problem of optimal power flow is analyzed, as well as the techniques that have been developed to solve this. Moreover, a simple 4-buses network has been simulated and studied for better understanding of PSOCLOALG performance. Chapter 3 presents the results of simulations carried out and Chapter 4 summarizes the main conclusions drawn from this analysis.

## **KEYWORDS**

Distributed generation, electric vehicles, optimal power flow, particle swarm optimization, clonal selection algorithm , hybrid algorithm PCLONALG, active power losses, voltage profiles, voltage fluctuation





## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Με την ευκαρία θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Ευάγγελο Καρφόπουλο, για την άψογη συνεργασία που είχαμε καθ'όλη την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η αμέριστη και συνεχής βοήθεια του καθώς και οι καίριες υποδείξεις και η υπομονετική καθοδήγηση του με βοήθησαν να ολοκληρώσω την εργασία αυτή. Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω το συνάδελφο Γεώργιο Φίντζο για τη βοήθεια που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου, οι οποίοι με στήριξαν και με ενθάρρυναν καθ'όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου σταδιοδρομίας.



<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>- 13 -</b>
1.1 ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ .....	- 13 -
1.1.1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΟΥ ΕΝΤΑΣΣΟΝΤΑΙ ΣΤΗ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ .....	- 15 -
1.1.2 ΧΡΗΣΕΙΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ .....	- 19 -
1.1.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ .....	- 20 -
1.1.3.1 Οφέλη για το δίκτυο.....	- 21 -
1.1.3.2 Οικονομικά και περιβαλλοντολογικά οφέλη .....	- 22 -
1.1.4 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ .....	- 23 -
1.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ.....	- 24 -
1.2.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΔΙΑΜΟΡΦΩΝΟΥΝ ΤΗ ΖΗΤΗΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ .....	- 25 -
1.2.1.1 Σταθερές Παράμετροι .....	- 25 -
1.2.1.2 Πιθανοκρατικές Παράμετροι .....	- 27 -
1.2.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΜΗ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ.....	- 29 -
1.3 ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ .....	- 30 -
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΑΚΕΤΩΝ ΛΟΓΙΣΜΙΚΩΝ .....</b>	<b>- 32 -</b>
2.1 CLONAL SELECTION ALGORITHM .....	- 32 -
2.1.1 ΤΕΧΝΗΤΑ ΑΝΟΣΟΠΟΙΗΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ .....	- 32 -
2.1.2 Η ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΤΩΝ ΚΛΩΝΩΝ .....	- 33 -
2.1.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ .....	- 35 -
2.1.3.1 Εισαγωγή .....	- 36 -
2.1.3.2 CLONALG αλγόριθμος.....	- 36 -
2.2 PARTICLE SWARM OPTIMIZATION .....	- 38 -
2.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	- 38 -
2.2.2 PSO ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ .....	- 40 -
2.3 ΥΒΡΙΔΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ .....	- 42 -
2.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	- 42 -
2.3.2 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ PCLONALG .....	- 43 -
2.4 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ .....	- 46 -
2.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	- 46 -
2.4.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΡΦ .....	- 46 -
2.4.3 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΒΡΦ.....	- 47 -
2.4.3.1 Μέθοδος Γραμμικού Προγραμματισμού .....	- 49 -
2.4.3.2 Μέθοδος Εσωτερικού Σημείου .....	- 52 -
2.5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΖΥΓΩΝ .....	- 55 -
2.5.1 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΙΑΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ 4 ΖΥΓΩΝ.....	- 55 -
2.5.1.1 Αρχικοποίηση Πληθυσμού.....	- 56 -
2.5.1.2 Ανανέωση Ταχύτητας και Θέσης των Αντισωμάτων .....	- 57 -
2.5.1.3 Κλωνοποίηση Αντισωμάτων .....	- 57 -
2.5.1.4 Υπερμετάλλαξη Αντισωμάτων .....	- 58 -
2.5.1.5 Ανανέωση Πληθυσμού .....	- 59 -
2.5.1.6 Αποτελέσματα .....	- 59 -
2.5.2 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΥΟ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ 4 ΖΥΓΩΝ.....	- 60 -
2.5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ.....	- 61 -
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ.....</b>	<b>- 63 -</b>
3.1 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΕΧΝΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ...	- 63 -

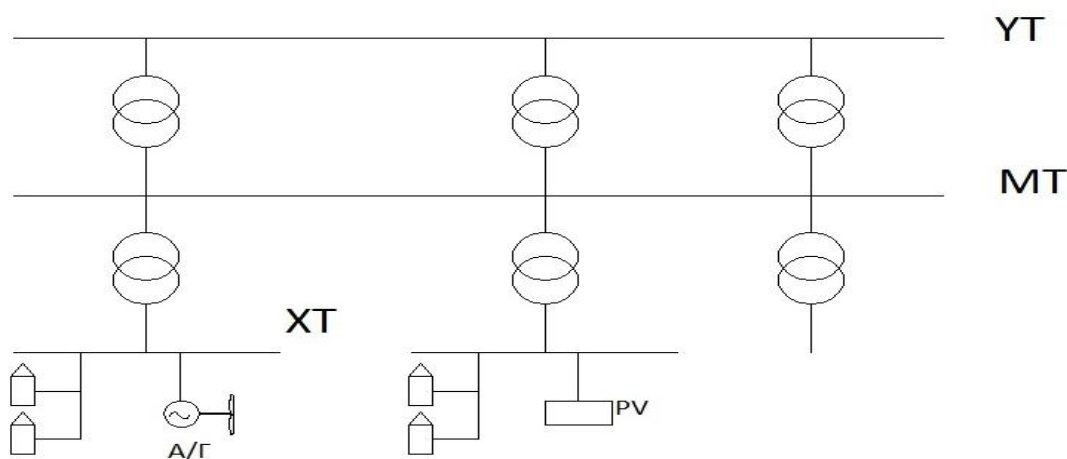
3.1.1 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΙΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΙ ΤΟ ΠΡΟΦΙΛ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ.....	- 63 -
3.1.1.1 Τοποθέτηση μιας μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.....	- 65 -
3.1.1.2 Τοποθέτηση τριών μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.....	- 67 -
3.1.1.3 Τοποθέτηση πέντε μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.....	- 67 -
3.1.2 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΙΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΙ ΤΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ.....	- 68 -
3.1.2.1 Τοποθέτηση μίας μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.....	- 71 -
3.1.2.2 Τοποθέτηση τριών μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.....	- 75 -
3.1.2.3 Τοποθέτηση πέντε μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.....	- 77 -
3.1.2.4 Διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο.....	- 81 -
3.1.2.4.1 Τοποθέτηση μίας μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.....	- 84 -
3.1.2.4.2 Τοποθέτηση τριών μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.....	- 86 -
3.1.2.4.3 Τοποθέτηση πέντε μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.....	- 89 -
3.2 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ ΜΕ ΒΑΣΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ.....	- 93 -
3.2.1. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΙΑΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟ ΝΕΟ ΔΙΚΤΥΟ.....	- 95 -
3.2.2 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΡΙΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟ ΝΕΟ ΔΙΚΤΥΟ.....	- 96 -
3.2.3 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΠΕΝΤΕ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟ ΝΕΟ ΔΙΚΤΥΟ.....	- 97 -
3.2.4 ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΦΟΡΤΙΣΗ.....	- 98 -
3.2.4.1 Τοποθέτηση μίας μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.....	- 100 -
3.2.4.2 Τοποθέτηση τριών μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.....	- 101 -
3.2.4.3 Τοποθέτηση πέντε μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.....	- 101 -
3.2.5 ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΝΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΦΟΡΤΙΣΗ.....	- 102 -
3.2.5.1 Τοποθέτηση μίας μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.....	- 103 -
3.2.5.2 Τοποθέτηση τριών μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.....	- 104 -
3.2.5.3 Τοποθέτηση πέντε μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.....	- 105 -
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>- 107 -</b>
4.1 ΥΒΡΙΔΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ PCLONALG.....	- 107 -
4.1.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ ΚΛΩΝΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ.....	- 107 -
4.2 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....	- 110 -
4.2.1 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΕΧΝΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ.....	- 110 -
4.2.2 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ.....	- 112 -
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>- 116 -</b>

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

Η διεσπαρμένη παραγωγή(distributed generation-DG) ορίζεται ως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας, από πολλές μονάδες διεσπαρμένες στο δίκτυο, δηλαδή από μονάδες που βρίσκονται κοντά στο φορτίο και είναι διασυνδεδεμένες με το σύστημα διανομής. Στη βιβλιογραφία χρησιμοποιείται ένας μεγάλος αριθμός όρων και ορισμών για την περιγραφή της διεσπαρμένης παραγωγής, όπως αποκεντροποιημένη ή διασκορπισμένη παραγωγή. Επιπλέον, όσον αφορά την απόδοση των διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το EPRI(Electric Power Research Institute-Ινστιτούτο Έρευνας Ηλεκτρικής Ενέργειας) ορίζει ότι αυτές παράγουν από μερικά kW έως 50 MW. Σύμφωνα με το GRI(Gas Research Institute-Ινστιτούτο Έρευνας Αερίου) η ενέργεια που παράγεται από τη διεσπαρμένη παραγωγή φτάνει μέχρι τα 25MW, ενώ το CIGRE(International Council on Large Electric Systems-Διεθνές Συμβούλιο Μεγάλων Ηλεκτρικών Συστημάτων) ορίζει ότι η παραγόμενη ενέργεια από διεσπαρμένη παραγωγή δεν υπερβαίνει τα 50 με 100MW [1].

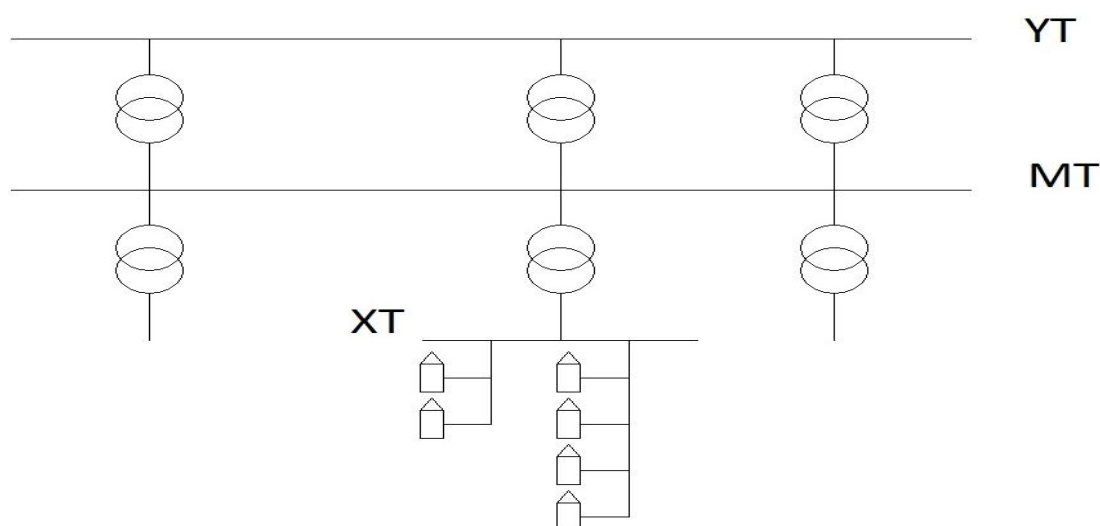
Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η μορφή ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με διείσδυση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.



**Σχήμα 1.1:**Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με διείσδυση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής

Αν και η διεσπαρμένη παραγωγή αποτελεί καινούργια σχετικά τάση στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, η ιδέα δεν είναι καινούργια αλλά έχει τις βάσεις της στα πρώτα χρόνια λειτουργίας των συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όταν το σύνολο των καταναλωτών τροφοδοτούνταν από σταθμούς παραγωγής που βρίσκονταν σε απόσταση μικρότερη από πέντε μίλια, ενώ οι διάφορες ηλεκτροδοτούμενες περιοχές δεν ήταν

διασυνδεδεμένες μεταξύ τους αλλά σχημάτιζαν «νησίδες». Τα πρώτα δίκτυα στηρίζονταν σε DC τάση, έτσι η παροχή τάσης ήταν περιορισμένη, όπως περιορισμένη ήταν και η απόσταση που μπορούσε να υπάρξει μεταξύ της κατανάλωσης και του φορτίου. Τις επόμενες δεκαετίες, η αύξηση του φορτίου αλλά και οι νέες τεχνολογικές εξελίξεις, όπως η εμφάνιση των AC δικτύων, οδήγησαν στην ανάπτυξη μεγαλύτερων αλλά και κεντροποιημένων συστημάτων ηλεκτρικής ισχύος τα οποία ήταν οικονομικότερα, πολύ πιο αξιόπιστα, με βελτιωμένη απόδοση, και αποτελούνταν από μεγάλης έκτασης δίκτυα μεταφοράς και διανομής αλλά και πολύ μεγάλες εγκαταστάσεις παραγωγής ισχύος. Έτσι οι τοπικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας περιορίστηκαν και εντέλει εξαλείφθηκαν σχεδόν ολοκληρωτικά από τη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ενώ το δίκτυο πήρε τη μορφή που φαίνεται παρακάτω.

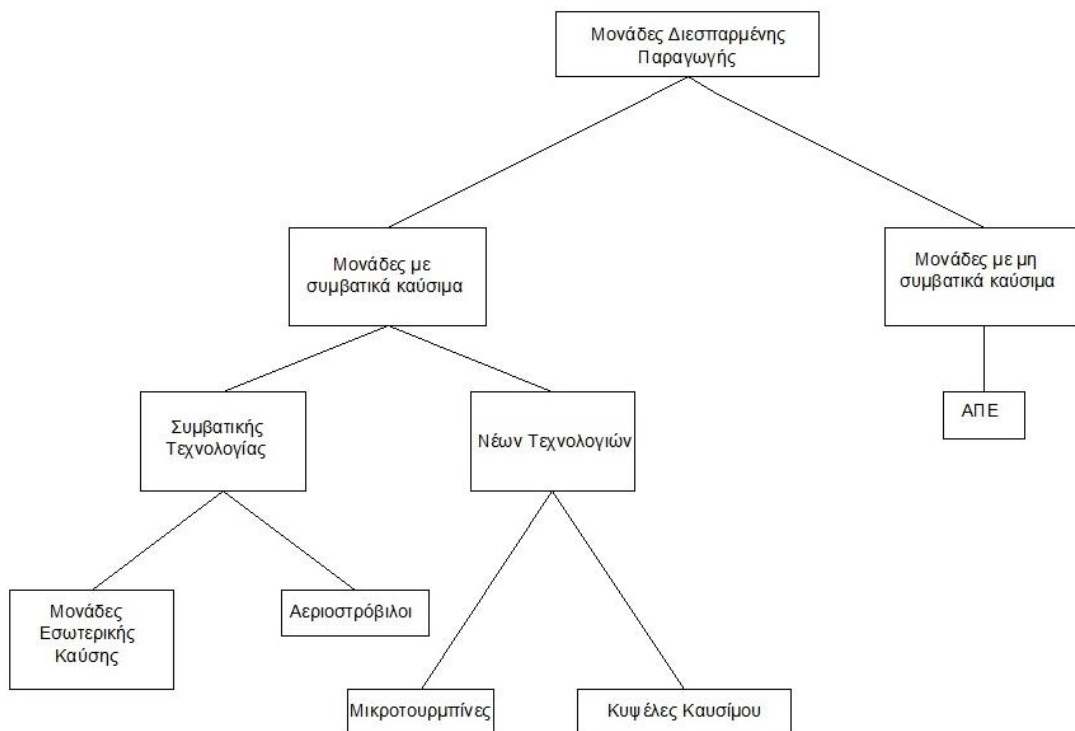


**Σχήμα 1.2:** Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας χωρίς Διεσπαρμένη Παραγωγή

Τις δύο περίπου τελευταίες δεκαετίες, υπήρξε μία αναζωπύρωση του ενδιαφέροντος για τη διεσπαρμένη παραγωγή. Οι τρεις κύριοι παράγοντες που συντέλεσαν σε αυτό είναι οι εξελίξεις στις τεχνολογίες της διεσπαρμένης παραγωγής, η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και το ενδιαφέρον για τις περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις. Κίνητρα αποτέλεσαν και οι περιορισμοί στην κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς αλλά και οι απαιτήσεις για ένα σύστημα πιο αξιόπιστο. Ωστόσο, η διεξόδυση της διεσπαρμένης παραγωγής μπορεί απλά να καθυστερήσει και όχι να αποτρέψει την κατασκευή νέων γραμμών διότι το δίκτυο θα πρέπει πάντα να είναι διαθέσιμο ως εφεδρεία. Επίσης, η αξιοπιστία δεν αποτελεί πρόβλημα στο Ευρωπαϊκό διασυνδεδεμένο σύστημα υψηλής τάσης αν και στο μέλλον μπορεί να παρατηρηθούν σημαντικές αλλαγές σε αυτό το κομμάτι. Παρακάτω παρουσιάζονται και αναλύονται τα διάφορα είδη τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής [2].

### 1.1.1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΟΥ ΕΝΤΑΣΣΟΝΤΑΙ ΣΤΗ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

Οι τεχνολογίες που εντάσσονται στη διεσπαρμένη παραγωγή είναι μονάδες που λειτουργούν με συμβατικά καύσιμα, όπως μηχανές εσωτερικής κάυσης, αεριοστρόβιλοι, μικροτουρμπίνες, κυψέλες καυσίμου αλλά και οι περισσότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Οι κυριότερες μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής δίνονται συνοπτικά στο σχήμα 1.3.



**Σχήμα 1.3:** Οι τεχνολογίες των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής [3]

Οι βασικότερες ΑΠΕ οι οποίες χρησιμοποιούνται ως συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής είναι οι ακόλουθες:

- Υδροηλεκτρική Ενέργεια
- Αιολική Ενέργεια
- Ηλιακή Ενέργεια
- Γεωθερμικές Πηγές
- Βιομάζα

Αν και οι περισσότερες ΑΠΕ αποτελούν γενικά συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής, υπάρχουν ορισμένες εξαιρέσεις όπως οι μεγάλες υδροηλεκτρικές πηγές και τα παράκτια αιολικά πάρκα.

Ακολουθεί μία σύντομη περιγραφή των κύριων ΑΠΕ που χρησιμοποιούνται ως συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής.

#### Υδροηλεκτρική Ενέργεια

Οι περισσότερες υδροηλεκτρικές μελέτες απαιτούν το χτίσιμο μεγάλων φραγμάτων στα ποτάμια, κάτι το οποίο μπορεί να είναι αρκετά δαπανηρό, αλλά και να έχει ποικίλες περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις. Ωστόσο, ως διεσπαρμένη παραγωγή χρησιμοποιούνται μικρά υδροηλεκτρικά, για τα οποία δεν απαιτούνται μεγάλα έργα αποθηκεύσεως. Η αποδοτικότητα των μικρών υδροηλεκτρικών συναρτάται άμεσα με τις υπάρχουσες εδαφο-υδρολογικές συνθήκες. Η συμβολή τους στις ενεργειακές ανάγκες μιας περιοχής μπορεί να είναι σημαντική, οπωσδήποτε όμως σε εθνικό επίπεδο παραμένει περιορισμένη.

#### Αιολική Ενέργεια

Η αιολική ενέργεια αξιοποιείται μέσω των Ανεμογεννητριών, οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική και είναι η μόνη από τις ΑΠΕ με την οποία παράγεται ηλεκτρική ενέργεια σε τιμές συγκρίσιμες με των συμβατικών πηγών και σε μεγάλες σχετικά ισχύες.

#### Ηλιακή Ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια, η οποία εκμεταλλεύεται τη φωτεινή και τη θερμική ενέργεια που προέρχεται από τον ήλιο, αξιοποιείται σήμερα για την παραγωγή απευθείας ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό επιτυγχάνεται σχεδόν αποκλειστικά μέσω των Φωτοβολταϊκών συστημάτων, ενώ περιορισμένη είναι ακόμα η χρήση ηλιοθερμικών σταθμών, οι οποίοι συγκεντρώνουν τις ηλιακές ακτίνες μέσω ηλιακών συλλεκτών, ώστε να επιτευχθούν υψηλές θερμοκρασίες και τελικά να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια.

#### Γεωθερμική Ενέργεια

Η γεωθερμική ενέργεια είναι η θερμότητα εσωτερικών στρωμάτων της γης, η οποία γίνεται εκμεταλλεύσιμη όταν υπάρχουν κατάλληλες γεωλογικές συνθήκες. Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμική, το μέγεθος των οποίων κυμαίνεται από 10MW μέχρι και άνω των 100MW.

#### Ενέργεια από τη Βιομάζα

Με τον όρο βιομάζα αποκαλείται οποιοδήποτε υλικό παράγεται από ζωντανούς οργανισμούς, όπως είναι το ξύλο και άλλα προϊόντα του δάσους, τα υπολείμματα των καλλιεργειών ή τα κτηνοτροφικά απόβλητα, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο, μέσω κατάλληλων θερμοχημικών διεργασιών επεξεργασίας, για την παραγωγή ενέργειας. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη βιομάζα έχει ποικίλα περιβαλλοντολογικά οφέλη και γι αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί αρκετές μελέτες πάνω σε αυτό το κομμάτι, οι περισσότερες εκ των οποίων χρησιμοποιούν γεωργικά απόβλητα, λύνοντας παράλληλα το πρόβλημα της αποκομιδής τους. Ωστόσο, η ενέργεια της βιομάζας μετατρέπεται σε ηλεκτρική κατά κανόνα μέσω ενδιάμεσων προϊόντων και έτσι το κόστος της παραμένει αρκετά υψηλό [4].



Ακολουθεί συνοπτική περιγραφή των διαφόρων μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής οι οποίες λειτουργούν με συμβατικά καύσιμα.

### Μηχανές Εσωτερικής Καύσης

Οι μηχανές εσωτερικής καύσης βασίζουν τη λειτουργία τους στην παραγωγή μηχανικού έργου από την κίνηση εμβόλων μέσα σε κύλινδρους. Η ισχύς που παράγουν κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες W, έως μερικές δεκάδες MW, ενώ ένα μεγάλο πλήθος κατασκευαστών ασχολείται όχι μόνο με την κατασκευή τους, αλλά και με την εξέλιξη των τεχνικών τους χαρακτηριστικών όπως και με τη μείωση του θορύβου που συνεπάγεται η λειτουργία τους. Υπάρχουν τρεις κύριοι τρόποι λειτουργίας μιας τέτοιας μηχανής: ως εφεδρική (Back up unit), ως κύρια (Prime) και ως εν δυνάμει κύρια (Continuous). Οι περισσότερες μηχανές αυτού του είδους χρησιμοποιούν κλάσματα της απόσταξης του πετρελαίου. Για τις μικρότερες μηχανές χρησιμοποιείται βενζίνη, για τις λίγο μεγαλύτερες πετρέλαιο diesel, ενώ χρησιμοποιείται ακόμα και μαζούτ για μεγέθη που χρησιμοποιούνται για ηλεκτροπαραγωγή σε αυτόνομα νησιά. Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες κατάλληλης μετατροπής αυτών των μηχανών, έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιούν φυσικό αέριο ή προπάνιο ως καύσιμο, με σκοπό τη μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων. Αρνητικές περιβαλλοντολογικές περιπτώσεις έχει και η ανάγκη λίπανσης του κινητήρα, εξαιτίας της πιθανής ανάμειξης λιπαντικών με το καύσιμο.

### Αεριοστρόβιλοι

Οι αεριοστρόβιλοι χρησιμοποιούνται από τις εταιρίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κυρίως για την παροχή ισχύος αιχμής, εξαιτίας της χαμηλής σχετικά απόδοσής τους, αλλά και του μικρού χρόνου εκκίνησης και μεταβολής του φορτίου. Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιεί ένα μείγμα συμπιεσμένου αέρα και καυσίμου, έτσι ώστε όταν αυτό εκτονωθεί, σε συγκεκριμένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, να παραχθεί μηχανικό έργο με αποτέλεσμα την κίνηση κάποιας γεννήτριας. Για τη λειτουργία των αεριοστροβίλων χρησιμοποιείται συνήθως φυσικό αέριο, αν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ελαφρά κλάσματα πετρελαίου.



**Εικόνα 1.1:** Αεριοστρόβιλος [5]

## Μικροτουρμπίνες

Οι μικροτουρμπίνες είναι μικροί αεριοστρόβιλοι με ισχύες που κυμαίνονται από 25 έως 300 kW. Οι περισσότερες μικροτουρμπίνες είναι σήμερα σχεδιασμένες για κύριες μηχανές παραγωγής (prime movers) και κάνουν χρήση προθερμαντήρα αέρα καύσης για την επίτευξη υψηλών αποδόσεων, ενώ αυτές που δεν προθερμαίνουν τον αέρα παράγουν υψηλότερης θερμοκρασίας καυσαέρια και γίνονται έτσι κατάλληλες για βιομηχανικές εφαρμογές, παρά το μικρότερο βαθμό ηλεκτρικής απόδοσής τους. Όταν το καύσιμο που θα χρησιμοποιηθεί είναι αέριο, όπως για παράδειγμα φυσικό αέριο, προπάνιο, αέριο ΧΥΤΑ και αέριο αναερόβιας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων, αυτό πρέπει να συμπιεστεί και αυτή η ανάγκη συμπίεσης αποτελεί το μεγαλύτερο παρασιτικό φορτίο αυτής της μονάδας.



**Εικόνα 1.2:** Μικροτουρμπίνα [6]

## Κυψέλες Καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν ως καύσιμο το υδρογόνο. Η ένωση του υδρογόνου με το οξυγόνο κατά την καύση αποτελεί μία έντονα εξώθερμη αντίδραση, το υποπροϊόν της οποίας είναι το νερό, ενώ το πλεονέκτημα αυτής της διαδικασίας είναι ότι δεν παράγει ρύπους. Οι ποσότητες των ρύπων εξαρτώνται από τις μεθόδους παραγωγής του υδρογόνου, η πιο διαδεδομένη εκ των οποίων είναι η κατάλληλη επεξεργασία του φυσικού αερίου (Reforming). Αν το υδρογόνο παράγεται με ηλεκτρόλυση νερού με τη βοήθεια ΑΠΕ, τότε η εγκατάσταση μπορεί να θεωρηθεί ως εγκατάσταση ΑΠΕ. Οι τεχνολογίες κυψελών καυσίμων χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Πολυμερών Ηλεκτρολυτών (PEMFC).
- Φωσφορικού Οξέος (PAFC),
- Τήγματος Ανθρακικών Αλάτων (MCFC),
- Στερεών Οξειδίων (SOFC)
- Αλκαλικές (AFC)

- Άμεσης Μεθανόλης (DMFC) [3].



**Εικόνα 1.3:** Κυψέλες Καυσίμου [7]

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα δίκτυο με διείσδυση κάποιων από τις προαναφερθέντες μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής.



**Εικόνα 1.4:** Δίκτυο με διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής [8]

### 1.1.2 ΧΡΗΣΕΙΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

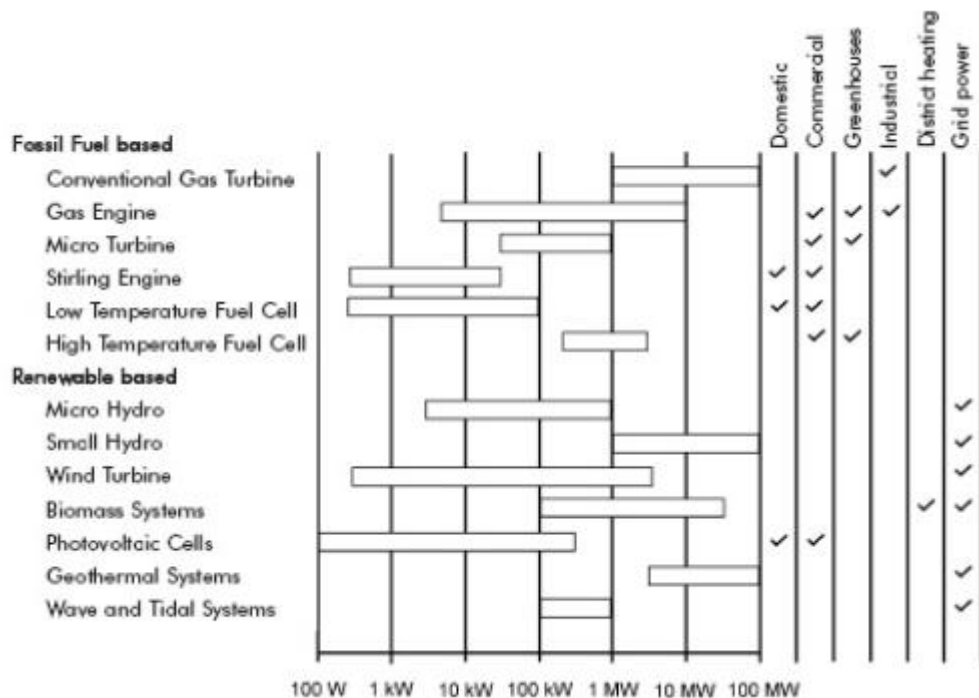
Παρακάτω παρουσιάζονται οι συνήθειες χρήσεις της διεσπαρμένης παραγωγής.

- Οικιακή
- Εμπορική

- Θερμοκήπια
- Βιομηχανική
- Περιφερειακή θέρμανση
- Ισχύς δικτύου

Όσον αφορά την οικιακή και την εμπορική χρήση, η διεσπαρμένη παραγωγή χρησιμοποιείται για την παροχή ηλεκτρισμού και θέρμανσης, ενώ στη βιομηχανική χρήση συμπεριλαμβάνεται και η παροχή ατμού. Στην περίπτωση των θερμοκηπίων, συμπεριλαμβάνεται η απαγωγή του διοξειδίου του άνθρακα από τη γονιμοποίηση της σοδειάς, ενώ στην περιφερειακή θέρμανση χρησιμοποιείται για την παροχή ηλεκτρισμού και θέρμανσης μέσω του δικτύου διανομής της θέρμανσης. Τέλος με τον όρο ισχύς δικτύου, εννοείται η παροχή ηλεκτρισμού αποκλειστικά στο δίκτυο [9].

Το σχήμα 1.4 παρουσιάζει με συνοπτικό τρόπο τις χρήσεις των διαφόρων τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής καθώς και το εύρος ισχύος το οποίο έχουν.



**Σχήμα 1.4:** Χρήσεις και εύρος ισχύος διαφόρων τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής [9]

### 1.1.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Η διεσπαρμένη παραγωγή παρουσιάζει ένα πλήθος πλεονεκτημάτων όσον αφορά θέματα οικονομικής και περιβαλλοντολογικής φύσεως, αλλά και όσον αφορά θέματα τεχνικής φύσεως, καθώς προσφέρει ποικίλα οφέλη στη λειτουργία του δικτύου.

### 1.1.3.1 Οφέλη για το δίκτυο

- Μείωση Ηλεκτρικών Απωλειών Δικτύου: Σε ένα σύστημα διανομής ή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, 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 είναι φανερό ότι εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος που ρέει σε μία γραμμή, καθώς και από την αντίσταση της γραμμής, και επομένως οι ηλεκτρικές απώλειες δύνανται να μειωθούν είτε με τη μείωση της έντασης του ρεύματος είτε με τη μείωση της ωμικής αντίστασης των γραμμών. Στην περίπτωση διείσδυσης διεσπαρμένης παραγωγής 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 μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής (ΜΔΠ) τροφοδοτούν το φορτίο με μία ποσότητα ενεργού και αέργου ισχύος, το ρεύμα το οποίο ρέει από την πηγή μέχρι τη θέση της διεσπαρμένης παραγωγής μειώνεται και έτσι παρατηρούνται χαμηλότερες ηλεκτρικές απώλειες στο δίκτυο. Ωστόσο, η διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των ηλεκτρικών απωλειών του δικτύου, αν η τοποθέτηση και η διαστασιολόγησή της δεν γίνουν σωστά. Η κατάλληλη διαστασιολόγηση των ΜΔΠ εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος και τη θέση του φορτίου, ενώ γενικά όσο υψηλότερο είναι το φορτίο, τόσο υψηλότερη μπορεί να είναι και η διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής χωρίς την πρόκληση υψηλότερων ηλεκτρικών απωλειών. Αν η ισχύς εξόδου των ΜΔΠ έχει οριστεί κατάλληλα, σύμφωνα με το φορτίο του συστήματος, τότε όσο πιο κοντά στο φορτίο εγκαθίσταται η διεσπαρμένη παραγωγή, σε τόσο μεγαλύτερο βαθμό μειώνονται οι ηλεκτρικές απώλειες. Στην περίπτωση όμως που η παραγόμενη ισχύς των ΜΔΠ είναι υψηλότερη από τη βέλτιστη τιμή της, τότε όσο πιο κοντά στο φορτίο εγκαθίσταται η διεσπαρμένη παραγωγή, τόσο υψηλότερες είναι και οι ηλεκτρικές απώλειες του δικτύου. Αυτό συμβαίνει διότι το φορτίο δεν μπορεί να καταναλώσει όλη την ισχύ που παράγεται από τη διεσπαρμένη παραγωγή και έτσι η παραμένουσα ισχύς ρέει προς την πηγή, μέσω των γραμμών διανομής, με αποτέλεσμα την αύξηση των ηλεκτρικών απωλειών του δικτύου. Ο συντελεστής ισχύος των ΜΔΠ παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στη μείωση των ηλεκτρικών απωλειών, καθώς η χρήση γεννητριών με επαγωγικούς συντελεστές ισχύος, προκαλεί μείωση των απωλειών. Αυτό συμβαίνει διότι η διεσπαρμένη παραγωγή υποστηρίζει την άεργο ισχύ που απαιτεί το φορτίο με αποτέλεσμα τα ρεύματα στις διάφορες γραμμές του συστήματος, μέχρι τη θέση της ΔΠ, να μειώνονται, και έτσι μειώνονται και οι ηλεκτρικές απώλειες [10], [11].
- Βελτίωση του Προφίλ της Τάσης: Η διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής σε ένα δίκτυο μπορεί να μειώσει τις διακυμάνσεις της τάσης των διαφόρων ζυγών του δικτύου. Αυτό συμβαίνει διότι όπως προαναφέρθηκε, ένα μέρος του φορτίου θα τροφοδοτείται από τη διεσπαρμένη παραγωγή και επομένως η ισχύς που απαιτείται από τους σταθμούς διανομής, ή αλλιώς από την πηγή, θα είναι μειωμένη, άρα μικρότερες θα είναι και οι πτώσεις τάσεις κατά μήκος κάποιων γραμμών του συστήματος. Έτσι η διεσπαρμένη παραγωγή δεν μπορεί μόνο να

βοηθήσει τη λειτουργία δικτύων με μεγάλες πτώσεις τάσεις, αλλά μπορεί και να συμβάλλει θετικά σε περιπτώσεις που εμφανίζονται μικρότερες διακυμάνσεις τάσης, βελτιώνοντας το προφίλ της τάσης του δικτύου. Ωστόσο, η εξαιρετικά υψηλή διείδυση διεσπαρμένης παραγωγής και η ακατάλληλη τοποθέτηση και διαστασιολόγηση αυτής, μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα τάσης σε ένα δίκτυο. Επίσης, το σημείο σύνδεσης της ΔΠ με το δίκτυο το οποίο θα δώσει το βέλτιστο αποτέλεσμα όσον αφορά το προφίλ της τάσης του δικτύου και το σημείο σύνδεσης της ΔΠ, στο οποίο θα επιτευχθούν οι μικρότερες δυνατές ηλεκτρικές απώλειες για το δίκτυο, κατά γενικό κανόνα δεν ταυτίζονται. Επομένως θα πρέπει να μελετηθεί εκτεταμένα το πρόβλημα ώστε να προκύψει το αποτέλεσμα εκείνο το οποίο θα έχει τα μέγιστα δυνατά οφέλη για τη λειτουργία του δικτύου [12], [13].

- Μείωση Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης: Η διείδυση διεσπαρμένης παραγωγής έχει την ικανότητα να μειώνει την ολική αρμονική παραμόρφωση (THD) του δικτύου, όταν συνοδεύεται από κατάλληλη τοποθέτηση και διαστασιολόγηση [14].
- Μείωση Ισχύος Αιχμής (Peak Shaving): Η διεσπαρμένη παραγωγή παρέχει ισχύ στο δίκτυο, εξυπηρετώντας ένα μέρος του φορτίου, με αποτέλεσμα να μειώνει την ισχύ αιχμής του συστήματος.
- Αποσυμφόρηση των ήδη υπαρχόντων δικτύων.
- Αξιοπιστία Δικτύου: Όσο αυξάνεται η ζήτηση για περισσότερη και καλύτερης ποιότητας ηλεκτρική ισχύ, η διεσπαρμένη παραγωγή παρέχει εναλλακτικές λύσεις για αξιόπιστη και οικονομική ισχύ, ενώ μπορεί να εξασφαλίσει στους καταναλωτές ότι η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας θα είναι συνεχόμενη και αξιόπιστη [2].

### **1.1.3.2. Οικονομικά και περιβαλλοντολογικά οφέλη**

- Η διεσπαρμένη παραγωγή περιλαμβάνει μία μεγάλη γκάμα νέων αλλά και παλαιότερων τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένων των περισσότερων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που παρέχουν μικρά επίπεδα ισχύος και είναι τοποθετημένες κοντά στους καταναλωτές. Έτσι, όλες αυτές οι τεχνολογίες δημιουργούν νέες ευκαιρίες στην αγορά αλλά και αυξημένο βιομηχανικό ανταγωνισμό.
- Το κόστος μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να μειωθεί μέχρι και 30%, διότι όπως προαναφέρθηκε, είναι δυνατό να μειωθούν και οι ηλεκτρικές απώλειες.
- Με τη χρήση μονάδων ΑΠΕ ως διεσπαρμένη παραγωγή, προκαλείται μείωση της ζήτησης καυσίμου με μία επακόλουθη μείωση στην τιμή τους και μια γενική καθυστέρηση στις αυξήσεις των τιμών ενέργειας.
- Η διεσπαρμένη παραγωγή, μέσω των εφαρμογών συμπαραγωγής, παρέχει πολλαπλά πλεονεκτήματα στους καταναλωτές θερμικών φορτίων, όπως και σε εκείνους τους καταναλωτές που έχουν πρόσβαση σε φτηνά καύσιμα αλλά και σε αυτούς που ευνοούνται από τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής όπου ζουν και μπορούν έτσι να αξιοποιήσουν τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
- Είναι πολύ πιο εύκολο να βρεθούν ποικίλες τοποθεσίες για την εγκατάσταση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής από ότι για την κατασκευή ενός μεγάλου, κεντρικού εργοστασίου παραγωγής ενέργειας, ενώ οι μονάδες αυτές είναι πιο εύκολο και πιο γρήγορο να συνδεθούν στο δίκτυο. Με αυτόν τον τρόπο, η έκθεση και το ρίσκο του κεφαλαίου μειώνονται ενώ αποφεύγονται οι περιττές δαπάνες.

- Με τη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ως διεσπαρμένη παραγωγή, μειώνεται η κατανάλωση ορυκτών καυσίμων αλλά και η εκπομπή των αερίων του θερμοκηπίου (CO<sub>2</sub>) και άλλων επιβλαβών ρύπων, όπως είναι τα οξείδια του θείου και του αζώτου (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>). Επομένως, κάτι τέτοιο συμβάλλει σε πολύ μεγάλο βαθμό στην προστασία του περιβάλλοντος και στον περιορισμό του προβλήματος που αφορά τις παγκόσμιες κλιματικές αλλαγές.

#### 1.1.4 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Παρακάτω αναφέρονται κάποια μειονεκτήματα της διεσπαρμένης παραγωγής, δηλαδή κάποια προβλήματα οικονομικής ή και τεχνικής φύσεως που προκύπτουν σχετικά με τη διεσπαρμένη παραγωγή και πολλά από τα οποία μελετώνται εκτεταμένα για την αναζήτηση λύσης.

- Ένα σοβαρό μειονέκτημα είναι το υψηλό κόστος ανά kW εγκατεστημένης ισχύος, σε σύγκριση με το αντίστοιχο κόστος της ισχύος που προέρχεται από τα μεγάλα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, μεγάλες διακυμάνσεις, όσον αφορά το κόστος, παρατηρούνται και για τις διάφορες τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής, με τιμές που κυμαίνονται από 1000€/kW μέχρι 20000€/kW.
- Ένα άλλο ζήτημα είναι ότι η αυξανόμενη διεξόδυση της διεσπαρμένης παραγωγής θα επιφέρει μικρότερη επιλογή μεταξύ των βασικών καυσίμων. Αυτό θα μπορούσε να μειώσει τη διαφοροποίηση των πρωταρχικών αποθεμάτων ενέργειας. Δεδομένου ότι οι περισσότερες τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής βασίζονται πρωταρχικά στο αέριο, αναμένεται να υπάρξει αυξημένη ζήτηση, αλλά και εξάρτηση από αυτό.
- Το κόστος για την πρωταρχική παροχή καυσίμου στη διεσπαρμένη παραγωγή θα είναι αρκετά μεγαλύτερο από ότι για την κεντρική παραγωγή.
- Πολλές φορές δεν μπορεί να υπάρξει ακριβής πρόβλεψη για την ικανότητα παραγωγής συγκεκριμένων εγκαταστάσεων παραγωγής, καθώς σε μικρά χρονικά διαστήματα μπορούν να υπάρξουν αποκλίσεις στη δυνατότητα παραγωγής ή ακόμα και απώλεια της παραγωγής εξαιτίας της φύσης ορισμένων πηγών, όπως είναι οι ανεμογεννήτριες. Έτσι υπάρχουν περιορισμοί πάνω στο ποσοστό της ζήτησης που μπορεί να καλυφθεί από ανανεώσιμες πηγές, ενώ πρέπει να υπάρχει πάντα εφεδρεία συμβατικών μονάδων παραγωγής. Αυτό το πρόβλημα αφορά κυρίως τα αυτόνομα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, όπως είναι τα νησιά.
- Η διεσπαρμένη παραγωγή μπορεί να μειώσει την αποτελεσματικότητα των κυκλωμάτων προστασίας του δικτύου. Οι καταναλωτές που επιθυμούν, σε μία διακοπή της παροχής, να συνεχίσουν να λαμβάνουν ενέργεια μέσω της διεσπαρμένης παραγωγής, δηλαδή να λειτουργούν σε μία «νησιδοποιημένη» κατάσταση, θα πρέπει να λάβουν υπόψη τους σημαντικά τεχνικά θέματα, όπως και ζητήματα ασφαλείας. Όταν το δίκτυο διανομής επανέλθει σε λειτουργία, η διεσπαρμένη παραγωγή θα πρέπει να συγχρονιστεί ξανά με την τάση του δικτύου.

- Ένας αυξημένος αριθμός μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής μπορεί να προκαλέσει ροή φορτίου, από την χαμηλή τάση στο δίκτυο μέσης τάσης. Έτσι, απαιτούνται διαφορετικά μέσα προστασίας και στα δύο επίπεδα τάσης.
- Υπάρχουν επίσης ποικίλοι ανασταλτικοί παράγοντες μικρότερης σημασίας για τη λειτουργία της διεσπαρμένης παραγωγής, όπως η πολυπλοκότητα της αδειοδοτικής διαδικασίας, η έλλειψη χωροταξικού σχεδιασμού, η χρηματοδότηση των έργων, η ανωριμότητα των επενδυτικών σχεδίων και άλλα [2].

## 1.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ

Σήμερα όλες σχεδόν οι μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες καθώς και νεοσύστατες εταιρίες έχουν κυκλοφορήσει ή προγραμματίζουν την άμεση κυκλοφορία ηλεκτρικών οχημάτων, ενώ παράλληλα κατευθύνονται σε παγκόσμιο επίπεδο στην ανάδειξη τεχνολογιών ηλεκτρικής κίνησης, που θα επιτρέψουν την όσο το δυνατόν γρηγορότερη και ομαλότερη μετάβαση από τα οχήματα μηχανών εσωτερικής καύσης, στα οχήματα μηδενικών ρύπων. Τα τελευταία χρόνια πλέον έχει γίνει κοινή συνείδηση τόσο από τους ιδιώτες όσο και από την πολιτεία ότι είναι επιτακτική ανάγκη η αντικατάσταση των συμβατικών αυτοκινήτων από οχήματα μηδενικών ρύπων. Επιπλέον, η εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος, των ημιαγωγικών στοιχείων, αλλά και των κινητήρων προμηνύει αισιόδοξο μέλλον σε ότι αφορά την επικράτηση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Τα παραπάνω συντέλεσαν στη συνεχή έρευνα για τη βελτίωση των τεχνικών προδιαγραφών και επιδόσεων των ηλεκτρικών οχημάτων, που συνεχίζεται σε παγκόσμιο επίπεδο με αμείωτο ενδιαφέρον. Παρακάτω παρουσιάζονται οι κύριες παράμετροι που διαμορφώνουν τη ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων τη σημερινή εποχή.



Εικόνα 1.5: Ηλεκτρικό Όχημα [15]



## **1.2.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΔΙΑΜΟΡΦΩΝΟΥΝ ΤΗ ΖΗΤΗΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ**

Οι παράμετροι που διαμορφώνουν τη ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, τις σταθερές και τις πιθανοκρατικές παραμέτρους.

### **1.2.1.1 Σταθερές Παράμετροι**

#### Επίπεδο Διείσδυσης Ηλεκτρικών Οχημάτων

Ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων που προσομοιώνονται εξαρτάται από τις προβλεπόμενες πωλήσεις για κάθε χώρα. Λαμβάνοντας υπόψη ένα πλήθος κρίσιμων παραγόντων, όπως οι τεχνολογικές εξελίξεις που αφορούν τις μπαταρίες, οι τιμές των καυσίμων και οι επενδύσεις στις υποδομές φόρτισης, διαμορφώνονται τρία σενάρια για τη μελλοντική διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων. Σύμφωνα με το πρώτο από αυτά, το οποίο αποτελεί την πιο ρεαλιστική προσέγγιση, οι πωλήσεις των ηλεκτρικών οχημάτων θα αγγίξουν το 15% των συνολικών πωλήσεων οχημάτων μέχρι το 2030. Το δεύτερο σενάριο αποτελεί μια πιο αισιόδοξη πρόβλεψη και υπαγορεύει ότι το προαναφερθέν ποσοστό θα φτάσει το 30%, ενώ σύμφωνα με το τελευταίο σενάριο, το οποίο προβλέπει μια πιο επιθετική είσοδο των ηλεκτρικών οχημάτων στην αγορά, το 2030 οι μισές πωλήσεις θα προέρχονται από τα ηλεκτρικά οχήματα.

#### Τεχνολογίες Σταθμών Φόρτισης

Η παράμετρος αυτή καθορίζει τη μέγιστη ροή φορτίου μεταξύ του δικτύου και των ηλεκτρικών οχημάτων, η οποία εξαρτάται από τη χωρητικότητα της γραμμής της υποδομής φόρτισης. Το επίπεδο ισχύος της φόρτισης επηρεάζει επίσης τη διάρκεια του κύκλου φόρτισης, στο τέλος του οποίου η μπαταρία του οχήματος είναι πλήρως φορτισμένη. Έχουν υιοθετηθεί τρεις διαφορετικοί τρόποι φόρτισης, οι οποίοι βασίζονται στους κανονισμούς IEC 62196 και IEC 61851. Έτσι, ένα ηλεκτρικό όχημα μπορεί να φορτίζεται είτε με κανονική είτε με γρήγορη είτε με dc φόρτιση. Η επιλογή του τρόπου φόρτισης αποτελεί μια πιθανοκρατική διαδικασία, η οποία εξαρτάται από το είδος του οχήματος.

#### Διαθεσιμότητα της Φόρτισης

Όσον αφορά αυτήν την παράμετρο, έχουν αναπτυχθεί τρία διαφορετικά σενάρια, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω:

- Φόρτιση μετά από το τελευταίο ταξίδι της ημέρας(home charging): Εφόσον ο εξηλεκτρισμός των μεταφορών θα συνεχίσει να βρίσκεται σε αρχικά στάδια, ο αριθμός των σημείων φόρτισης θα είναι περιορισμένος και έτσι οι περισσότεροι ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων δεν θα έχουν τη δυνατότητα να φορτίζουν τα

οχήματά τους οπουδήποτε, αλλά κυρίως στα σπίτια τους, στους ιδιωτικούς τους σταθμούς φόρτισης.

- Φόρτιση όταν ένα σημείο φόρτισης(ιδιωτικό ή δημόσιο) είναι διαθέσιμο: Οι ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων θα έχουν τη δυνατότητα να φορτίζουν τα οχήματά τους εκτός από το σπίτι τους και σε άλλα σημεία, όπως για παράδειγμα στα μέρη εργασίας τους. Αυτό απαιτεί την εγκατάσταση σημείων φόρτισης σε ποικίλες ιδιωτικές και δημόσιες περιοχές. Επειδή δεν μπορεί να οριστεί ο ακριβής αριθμός οχημάτων που θα φορτίζονται στο σπίτι θα πρέπει να υιοθετηθούν διαφορετικά πρότυπα φόρτισης.
- Φόρτιση όταν το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας είναι χαμηλότερο από ένα επιθυμητό όριο: Βάση της σημερινής τεχνολογίας, η μέση απόσταση που μπορεί να διανύσει ένα ηλεκτρικό όχημα, χωρίς να χρειαστεί να φορτιστεί, είναι λίγο μεγαλύτερη από τα 100km. Έτσι, είναι πιθανό ο ιδιοκτήτης να διανύει μικρότερες αποστάσεις, κάτι αρκετά σύνηθες στις αστικές περιοχές, και να μη χρειάζεται να φορτίζει το όχημά του σε καθημερινή βάση, αλλά μόνο όταν αυτό είναι απαραίτητο. Αυτό το σενάριο υπαγορεύει ότι ο ιδιοκτήτης θα φορτίσει το όχημά του μόνο όταν το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας ξεπεράσει ένα κατώφλι, τυπικά ίσο με 40% της ολικής φόρτισης.

#### Απώλειες Φόρτισης

Αυτή η παράμετρος εκφράζει τις απώλειες της μετατροπής από AC που έχει το δίκτυο σε DC για τη φόρτιση των μπαταριών, και αντίστροφα. Αυτές οφείλονται στις διεπαφές των ηλεκτρονικών ισχύος και κυμαίνονται από 10% έως 15% της συνολικής ζήτησης.

#### Πολιτική Φόρτισης

Για να αξιολογηθεί το αντίκτυπο της διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων στα συστήματα ισχύος, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι στρατηγικές φόρτισης. Αυτές παρουσιάζονται παρακάτω:

- Μη Ελεγχόμενη Φόρτιση(Dumb Charging): Αποτελεί τη μη σχεδιασμένη σύνδεση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο, η οποία τυπικά λαμβάνει χώρα μετά το τελευταίο ταξίδι της ημέρας ή όταν ένα σημείο φόρτισης είναι διαθέσιμο.
- Φόρτιση Πολλαπλής Χρέωσης(Multiple Tariff Charging): Αποτελεί τον πιο συνηθισμένο τρόπο με τον οποίο η αγορά διαχειρίζεται την ενεργειακή ζήτηση. Σε ώρες μη αιχμής εφαρμόζονται μικρότερες χρεώσεις, έτσι ώστε να μετατοπιστεί η ζήτηση αυτές τις ώρες.
- Έξυπνη Φόρτιση(Smart Charging): Σε αυτό το σενάριο, το φορτίο μετακινείται από τις περιόδους αιχμής στις περιόδους μη αιχμής. Αυτή η στρατηγική φόρτισης τοποθετεί τη ζήτηση ισχύος εκ μέρους των οχημάτων σε ώρες που η ζήτηση είναι χαμηλή. Τυπικά, η κινητικότητα των ηλεκτρικών οχημάτων κατά τη

διάρχεια των ωρών μη αιχμής είναι περιορισμένη και αυτό επιτρέπει την αποτελεσματική διαχείριση της φόρτισης.

- Από το Όχημα στο Δίκτυο(Vehicle-to-Grid): Αυτή η στρατηγική μπορεί να θεωρηθεί σαν μία επέκταση της έξυπνης φόρτισης. Σε αυτήν την περίπτωση υπάρχει ροή φορτίου όχι μόνο από το δίκτυο στα οχήματα, αλλά και το αντίστροφο. Καθώς η ημερήσια κινητικότητα των ηλεκτρικών οχημάτων διαρκεί 2 με 4 ώρες και οι αντίστοιχες ενεργειακές απαιτήσεις καταναλώνουν ένα μικρό κομμάτι της μπαταρίας του, η επιπλέον ισχύ της μπαταρίας θα μπορούσε να χρησιμεύσει ως πηγή ενέργειας ή ως παροχή βοηθητικών υπηρεσιών στο δίκτυο κατά τη διάρκεια των ωρών αιχμής, συμβάλλοντας σε μια πιο σταθερή και αξιόπιστη λειτουργία του δικτύου.

### **1.2.1.2 Πιθανοκρατικές Παράμετροι**

#### Κατηγοριοποίηση των ηλεκτρικών οχημάτων

Τα ηλεκτρικά οχήματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο του κινητήρα που χρησιμοποιούν.

1. Ηλεκτρικά οχήματα με δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο(PHEV- Plug-in Hybrid EV): Είναι τα ηλεκτρικά οχήματα που έχουν τη δυνατότητα να συνδέονται στο δίκτυο και να ανταλλάσσουν ηλεκτρική ενέργεια με αυτό. Αυτά τα οχήματα έχουν μεγαλύτερη μπαταρία από τα απλά υβριδικά και χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο, ενέργειας από το «αναπαραγωγικό φρενάρισμα» καθώς και ενέργειας από μηχανή εσωτερικής καύσης ή κυψέλη καυσίμου για να κινηθούν. Ουσιαστικά, φορτίζουν όσο είναι σταθμευμένα κι έτσι για μικρές διαδρομές δε χρειάζεται να χρησιμοποιήσουν καθόλου καύσιμο.
2. Οχήματα που χρησιμοποιούν αποκλειστικά μπαταρία(BEV- Pure Battery EV): Αυτά τα οχήματα αποθηκεύουν ηλεκτροχημική ενέργεια στις μπαταρίες και εκπέμπουν μηδενικούς ρύπους κατά την κίνησή τους. Οι μπαταρίες φορτίζονται με σύνδεση στο δίκτυο καθώς και με το λεγόμενο «αναπαραγωγικό φρενάρισμα», που είναι στην ουσία η χρησιμοποίηση μέρους της θερμότητας που παράγεται κατά το φρενάρισμα για την επαναφόρτιση της μπαταρίας. Τα ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας διαχωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά, ενώ οι κατηγορίες αυτές που αναμένεται να κυριαρχήσουν στην αγορά είναι οι παρακάτω:
  - L7e: Μικρά οχήματα σχεδιασμένα για την πόλη.
  - M1: Τετραθέσια Οχήματα.
  - N1: Οχήματα για μεταφορά προϊόντων βάρους μέχρι 3500kg.
  - N2: Οχήματα τα οποία χρησιμοποιούνται για εμπορικούς σκοπούς για μεταφορά προϊόντων βάρους 3500-12000kg.

Κάθε τύπος ηλεκτρικού οχήματος χρησιμοποιεί μπαταρίες με συγκεκριμένη χωρητικότητα η οποία κυμαίνεται μεταξύ μίας ελάχιστης και μίας μέγιστης τιμής. Για λόγους προσομοίωσης, η χωρητικότητα της μπαταρίας εκφράζεται με μία κανονική κατανομή με μέση τιμή και χωρητικότητα η οποία παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.1. Εξαιρέση αποτελούν τα ηλεκτρικά οχήματα τύπου N2 καθώς η χωρητικότητα της μπαταρίας που χρησιμοποιούν εκφράζεται με μία σύνθετη εκθετική κατανομή.

Τύπος		Χωρητικότητα Μπαταρίας(KWh)		
		Μέση Τιμή	Ελάχιστο	Μέγιστο
L7e	BEV	8,7	3	15
M1	BEV	28,5	10	72
	PHEV	12,9	4	22,6
N1	BEV	23	9,6	40
	PHEV	12,9	4	22,6
N2	BEV	51,2	51,2	120

**Πίνακας 1.1:** Περιγραφή της κατηγοριοποίησης των ηλεκτρικών οχημάτων και της χωρητικότητας της μπαταρίας

#### Καθημερινή Απόσταση Ταξιδιού

Αυτή η παράμετρος εκφράζει την απόσταση που καλύπτει ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο σε καθημερινή βάση, μεταξύ δύο διαδοχικών κύκλων φόρτισης. Οι καθημερινές αποστάσεις που καλύπτει ένα ηλεκτρικό όχημα εξαρτώνται κυρίως από τη χρήση για την οποία αυτό προορίζεται. Για παράδειγμα, τις καθημερινές τα οχήματα χρησιμοποιούνται κυρίως για λόγους δουλειάς και έτσι το προφίλ της απόστασης ακολουθεί το ίδιο πρότυπο. Αντιθέτως τα σαββατοκύριακα η κινητικότητα των οχημάτων μειώνεται, ενώ οι ιδιοκτήτες έχουν την τάση να διανύουν μεγαλύτερες αποστάσεις, διαφορετικές ώρες. Επιπλέον, από τη στιγμή που οι καθημερινές αποστάσεις ταξιδιού εξαρτώνται από τις συνήθειες των ιδιοκτητών, για κάθε χώρα μελετάται ένα διαφορετικό προφίλ.

#### Κατανάλωση Μπαταρίας

Με τον καθορισμό της συνολικής απόστασης που ταξίδεψε ένα όχημα, μπορεί να υπολογιστεί η ποσότητα της ενέργειας που καταναλώθηκε. Ο λόγος μεταξύ της καταναλισκόμενης ενέργειας και της απόστασης που διανύθηκε (kWh/km) εξαρτάται από την ταχύτητα οδήγησης, τις καιρικές συνθήκες, την κατάσταση στο δρόμο και άλλα. Αυτοί οι παράγοντες είναι μεταβλητοί και έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία μέση τιμή (kWh/km) για την ανάλυση των ηλεκτρικών οχημάτων.

## Απαιτούμενη Περίοδος Φόρτισης

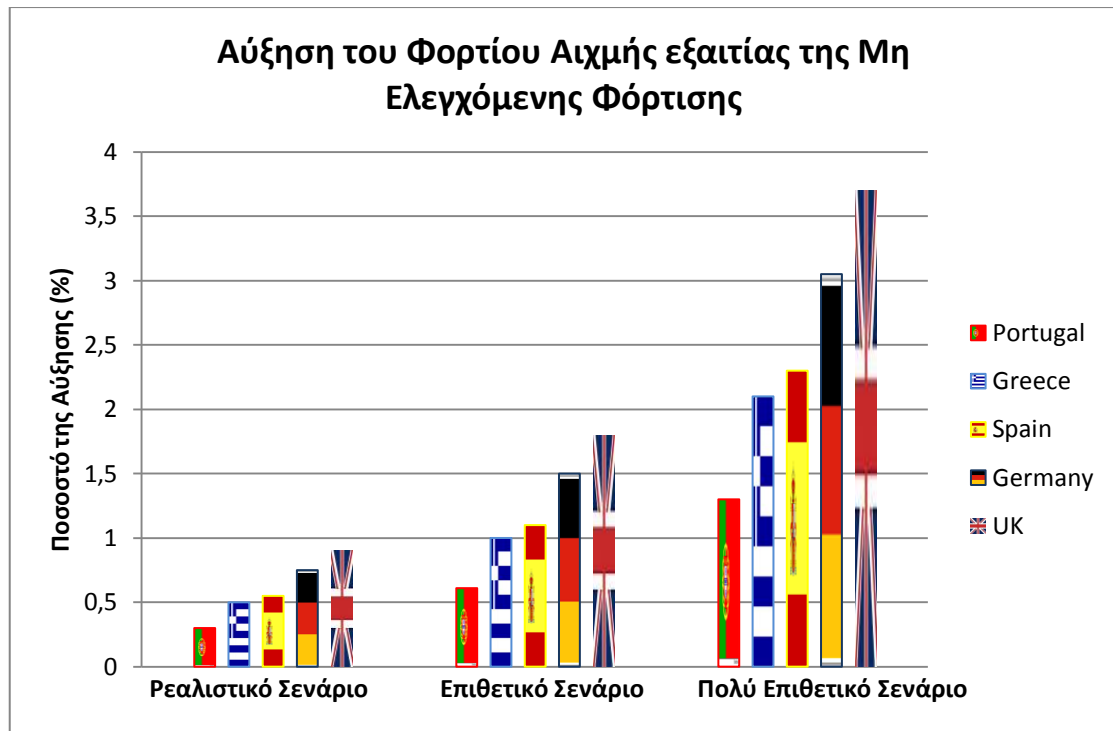
Αυτή η παράμετρος καθορίζει την ελάχιστη χρονική περίοδο κατά την οποία το ηλεκτρικό όχημα πρέπει να παραμένει συνδεδεμένο στο δίκτυο έτσι ώστε να φορτιστεί πλήρως. Αυτή η περίοδος φόρτισης καθορίζεται από τη χρήση του οχήματος και από τη μέγιστη ισχύ φόρτισης των διαθέσιμων υποδομών φόρτισης [16].

### **1.2.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΜΗ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ**

Η μαζική διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο είναι πολύ πιθανό να προκαλέσει αλλαγές στις συνθήκες λειτουργίας του δικτύου στο μέλλον. Το εύρος των επιπτώσεων των ηλεκτρικών οχημάτων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το επίπεδο διείσδυσης των οχημάτων στο δίκτυο, η συμπεριφορά των ιδιοκτητών και πολλούς άλλους. Ωστόσο, μία από τις κυριότερες παραμέτρους είναι η στρατηγική φόρτισης των οχημάτων. Η εφαρμογή μη ελεγχόμενων στρατηγικών φόρτισης μπορεί να έχει ποικίλες αρνητικές επιπτώσεις, ενώ αντίθετα η εφαρμογή ελεγχόμενων πολιτικών φόρτισης μπορεί να ωφελήσει το δίκτυο.

Όπως προαναφέρθηκε, η μη ελεγχόμενη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων αποτελεί τη μη σχεδιασμένη σύνδεση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο, η οποία τυπικά λαμβάνει χώρα μετά το τελευταίο ταξίδι της ημέρας ή όταν ένα σημείο φόρτισης είναι διαθέσιμο. Εκτεταμένες μελέτες και προσομοιώσεις υποδεικνύουν ότι η μη ελεγχόμενη φόρτιση αποτελεί τον πιο προβληματικό τρόπο φόρτισης, καθώς προκαλεί σημαντική αύξηση στο φορτίο αιχμής, με αρνητικές συνέπειες σε ότι αφορά το προφίλ της τάσης, τις απώλειες αλλά και τις υπερφορτίσεις διαφόρων κλάδων του δικτύου. Όσο μεγαλώνει η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων, τόσο μεγαλύτερες είναι οι αλλαγές που παρατηρούνται στο προφίλ της τάσης, ενώ όταν παράλληλα εφαρμόζεται η μη ελεγχόμενη φόρτιση, οι αλλαγές γίνονται ακόμα πιο εμφανείς. Μέχρι το 2020 δεν αναμένεται να παρουσιαστούν ιδιαίτερα προβλήματα στο δίκτυο, ανεξάρτητα από την πολιτική φόρτισης που θα κυριαρχήσει. Αντιθέτως, από το 2030 θα εμφανιστούν αρκετά σοβαρά προβλήματα, όσον αφορά τεχνικά θέματα του δικτύου, ιδιαίτερα αν κυριαρχήσει η μη ελεγχόμενη φόρτιση, ενώ με την εφαρμογή έξυπνων πολιτικών φόρτισης (smart charging) αυτά τα ζητήματα θα μπορούσαν να λυθούν ολοκληρωτικά.

Στο Διάγραμμα 1.1 παρουσιάζονται οι συνέπειες της μη ελεγχόμενης φόρτισης στο διάγραμμα της ζήτησης του συστήματος, για πέντε διαφορετικές ευρωπαϊκές χώρες και για τρία διαφορετικά σενάρια διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο. Το συγκεκριμένο διάγραμμα αντιστοιχεί σε μία τυπική χειμωνιάτικη μέρα έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη το χειρότερο σενάριο, όσον αφορά το φορτίο αιχμής του δικτύου. Επίσης έχει υποθεθεί ότι οι ιδιοκτήτες των οχημάτων φορτίζουν τα οχήματά τους όταν γυρνάνε στο σπίτι, μετά το τελευταίο ταξίδι της ημέρας.

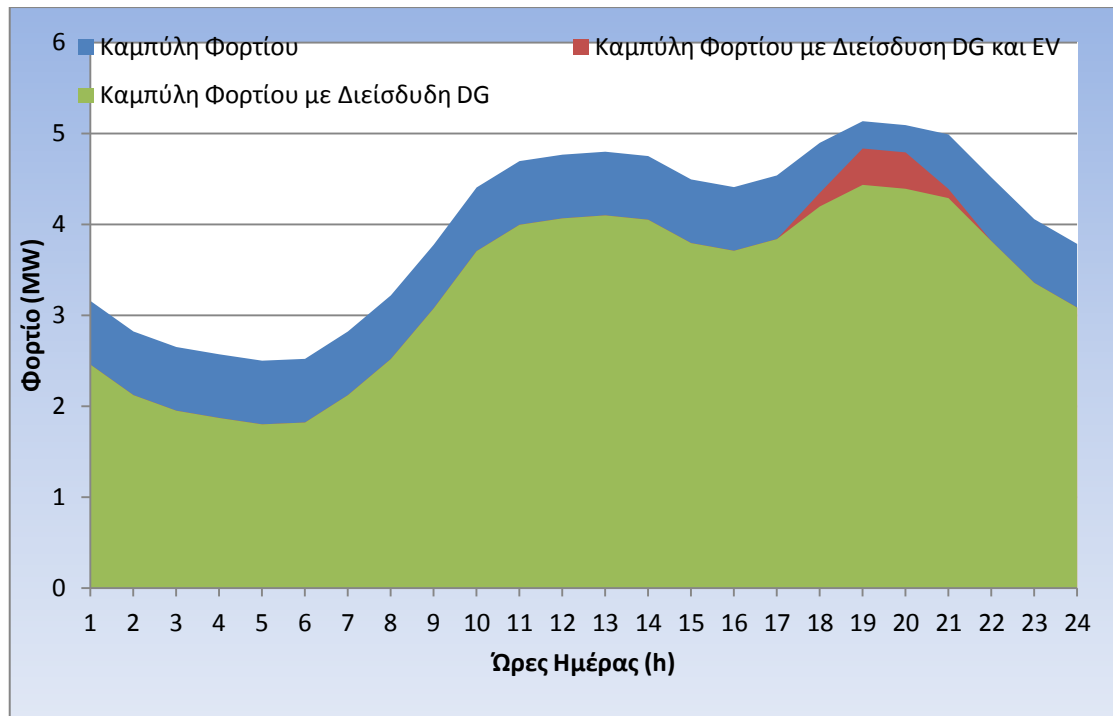


**Διάγραμμα 1.1:** Η αύξηση στη ζήτηση αιχμής του συστήματος εξαιτίας της μη ελεγχόμενης φόρτισης

Οι παραπάνω αυξήσεις θα μπορούσαν να περιοριστούν με την ανάπτυξη υποδομών φόρτισης στους χώρους εργασίας, καθώς ένα μέρος των απαιτήσεων των ηλεκτρικών οχημάτων θα μπορούσε να ικανοποιηθεί κατά τη διάρκεια των πρωινών ωρών, όταν η ζήτηση είναι ακόμα χαμηλή. Επίσης, είναι φανερό ότι διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης, όπως μια υβριδική πολιτική φόρτισης η οποία συνδυάζει τη μη ελεγχόμενη φόρτιση και τη φόρτιση πολλαπλής χρέωσης (dual tariff charging), ή η έξυπνη φόρτιση θα προκαλούσαν σημαντικά λιγότερα προβλήματα στο δίκτυο [17].

### **1.3 ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ**

Με τη διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο, ένα μέρος του φορτίου θα καλύπτεται από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και επομένως η ημερήσια καμπύλη φορτίου θα παρουσιάσει μία μετατόπιση «προς τα κάτω». Με τη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο και με την εφαρμογή μη ελεγχόμενης πολιτικής φόρτισης το φορτίο αιχμής θα αυξηθεί. Τα παραπάνω απεικονίζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



**Διάγραμμα 1.2:** Η ημερήσια καμπύλη φορτίου και η μεταβολή της με τη διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής και ηλεκτρικών οχημάτων

Επομένως, με τη διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο, το ελάχιστο φορτίο της ημερήσιας καμπύλης θα μειωθεί, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο τη μέγιστη τάση που παρατηρείται στο δίκτυο, κατά τη διάρκεια της ημέρας. Δηλαδή:

$$\downarrow L_{\min} \Leftrightarrow \uparrow V_{\max} \quad (1.1)$$

Στη συνέχεια, με τη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο, το φορτίο αιχμής θα αυξηθεί όπως προαναφέρθηκε, μειώνοντας παράλληλα την ελάχιστη τάση που παρατηρείται στο δίκτυο, κατά τη διάρκεια της ημέρας. Επομένως:

$$\uparrow L_{\max} \Leftrightarrow \downarrow V_{\min} \quad (1.2)$$

Η διακύμανση της τάσης, περί τη μέση τιμή, είναι ίση με:

$$\delta V = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2} \cdot 100\% \quad (1.3)$$

Όπως είναι γνωστό, η διακύμανση της τάσης πρέπει να είναι μικρότερη από 3%, δηλαδή:

$$\delta V \leq 3\% \Leftrightarrow \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2} \leq 0,03 \quad (1.4)$$

Υπάρχει κίνδυνος η σχέση (1.4) να μην ικανοποιείται, κυρίως λόγω της σχέσης (1.2), και έτσι η διακύμανση της τάσης να ξεφύγει από τα επιτρεπτά όρια. Αυτός ο παράγοντας λοιπόν θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψιν κατά την τοποθέτηση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο, καθώς με τη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων μπορούν να δημιουργηθούν σοβαρά τεχνικά θέματα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΑΚΕΤΩΝ ΛΟΓΙΣΜΙΚΩΝ

### 2.1 CLONAL SELECTION ALGORITHM

#### 2.1.1 ΤΕΧΝΗΤΑ ΑΝΟΣΟΠΟΙΗΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Ένα Τεχνητό Ανοσοποιητικό Σύστημα ή ΤΑΣ (AIS-Artificial Immune System) αποτελεί ένα υπολογιστικό μοντέλο το οποίο βασίζεται σε ιδέες εμπνευσμένες από τη λειτουργία και τη δομή του πραγματικού ανοσοποιητικού συστήματος. Το πεδίο των τεχνητών ανοσοποιητικών συστημάτων έχει τις ρίζες του στην εργασία του J.Doyne Farmer και των συνεργατών του(Farmer *et al.*, 1986), οι οποίοι πρότειναν ένα μοντέλο Ανοσοποιητικού Δικτύου, αν και η πρώτη αναφορά στον όρο «Τεχνητά Ανοσοποιητικά Συστήματα» χρονολογείται από το 1990 από τον H. Sieburg και τους συνεργάτες του(Sieburg *et al.*, 1990). Οι πρώτες γνωστές εφαρμογές αλγορίθμων που βασίζονται στα τεχνητά ανοσοποιητικά συστήματα για την επίλυση προβλημάτων εμπεριέχονται στις εργασίες των Hugues Bersini και Francisco Varela. Τα τελευταία χρόνια, ιδιαίτερα μετά το 1995, υπήρξε ένα ολοένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για το πεδίο των τεχνητών ανοσοποιητικών συστημάτων, ενώ από το 2002 έχει καθιερωθεί και Διεθνές Συνέδριο πάνω στον τομέα αυτό με την ονομασία ICARIS(International Conference on Artificial Immune Systems) [18].

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι δεν υπάρχει ένας συγκεκριμένος αλγόριθμος ΤΑΣ αλλά με τον όρο ΤΑΣ αναφερόμαστε σε οποιονδήποτε αλγόριθμο ή δομή η οποία έχει εμπνευστεί από τον τρόπο λειτουργίας του ανοσοποιητικού συστήματος. Χάρη στη μεγάλη ερευνητική δραστηριότητα που αναπτύχθηκε γύρω από τα ΤΑΣ τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί ένα πλήθος τεχνικών και αλγορίθμων οι οποίοι χωρίζονται σε κατηγορίες, η καθεμία από τις οποίες εκμεταλλεύεται διαφορετικά στοιχεία και ιδιότητες του ανοσοποιητικού συστήματος και χρησιμοποιείται σε διαφορετικές εφαρμογές . Οι βασικές κατηγορίες καθώς και κάποιοι αντιπροσωπευτικοί και γνωστοί ΤΑΣ αλγόριθμοι παρουσιάζονται παρακάτω:

- i. Αλγόριθμοι διαχωρισμού του «ιδίου» από το «ξένο», όπως ο Αλγόριθμος Αρνητικής Επιλογής(Negative Selection Algorithm).
- ii. Αλγόριθμοι που βασίζονται σε Ανοσοποιητικά Δίκτυα((Immune Network Algorithms) ή στην Αρχή της Επιλογής των Κλώνων(Clonal Selection Algorithm).
- iii. Αρχιτεκτονικές οι οποίες βασίζονται σε ιδέες εμπνευσμένες από την οργάνωση του ανοσοποιητικού συστήματος.
- iv. Υβριδικές δομές και αλγόριθμοι οι οποίοι συνδυάζουν ιδέες από το ανοσοποιητικό σύστημα με άλλα υπολογιστικά μοντέλα(Dendritic Cell Algorithm) [19].

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν κάποιες βασικές αρχές των ανοσοποιητικών συστημάτων οι οποίες εφαρμόζονται στα ΤΑΣ και πιο συγκεκριμένα η Αρχή της Επιλογής των Κλώνων, πάνω στην οποία βασίζεται ο Αλγόριθμος της Επιλογής των Κλώνων(CLONALG).



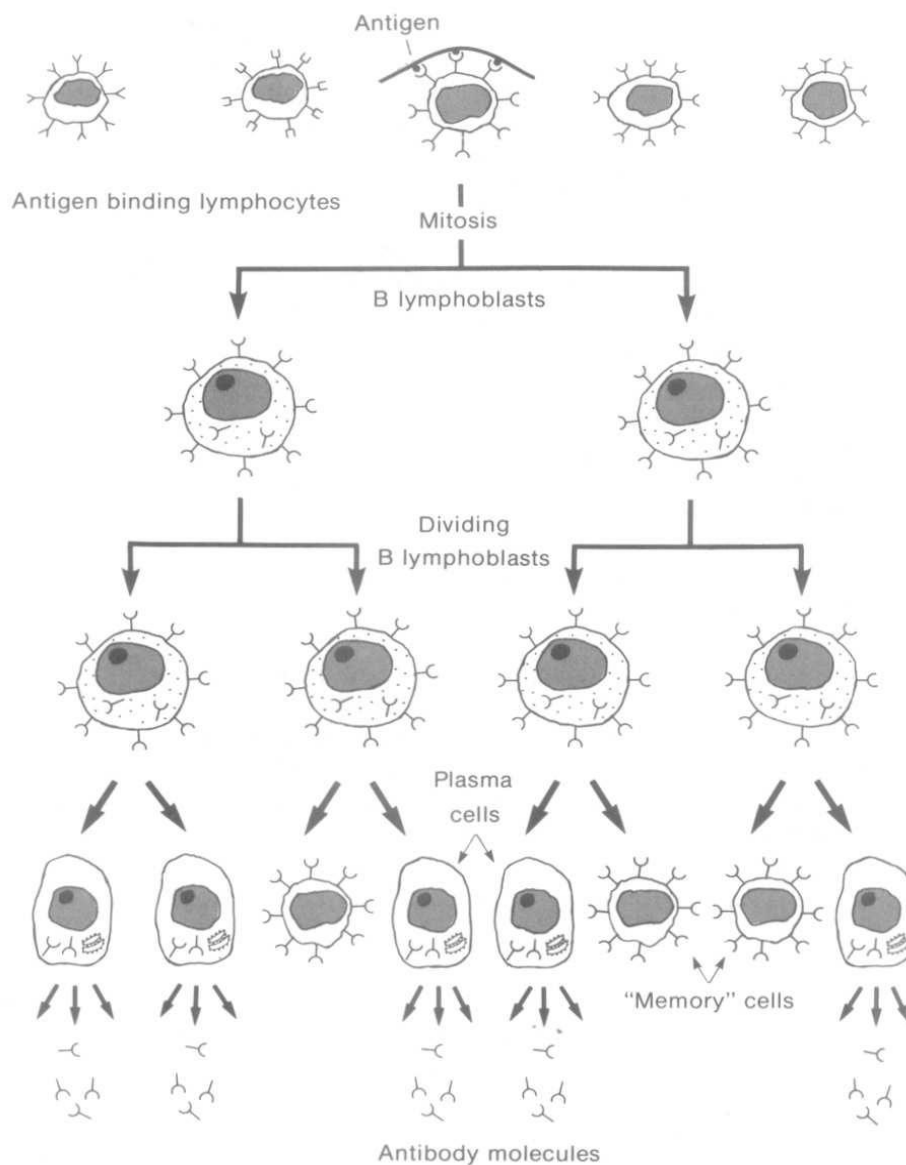
## 2.1.2 Η ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΤΩΝ ΚΛΩΝΩΝ

Η Αρχή της Επιλογής των Κλώνων (Clonal Selection Theory) προτάθηκε το 1959 από τον ανοσολόγο Frank Macfarlane Burnet. Εξηγεί τον τρόπο με τον οποίο το ανοσοποιητικό σύστημα αντιδρά ενάντια στα αντιγόνα παράγοντας αντισώματα, αλλά και τον τρόπο με τον οποίο ενισχύει την ικανότητά του να αναγνωρίζει και να εξαλείφει τα διάφορα αντιγόνα. Η θεωρία αποτέλεσε αρχικά αντικείμενο διαμάχης και ανταγωνίστηκε με μία άλλη, η οποία ονομάζεται Template Theory. Παρ'όλα αυτά, σήμερα θεωρείται δεδομένη καθώς τα πειραματικά στοιχεία που προκύπτουν από την εφαρμογή της θεωρούνται αδιαμφισβήτητα.

Τα αντισώματα είναι μόρια τα οποία παράγονται από τα Β λεμφοκύτταρα και έχουν την ικανότητα να εξουδετερώνουν αντιγόνα. Όταν ένα αντιγόνο εισέλθει στον οργανισμό, τότε κάποια από τα Β-λεμφοκύτταρα, τα οποία διαθέτουν κατάλληλους υποδοχείς, προσδένονται στο αντιγόνο. Η ποιότητα σύνδεσης ποικίλλει καθώς κάποια από τα Β-λεμφοκύτταρα αναγνωρίζουν καλύτερα το αντιγόνο. Παράλληλα, προσδένονται στο αντιγόνο και τα Τ-λεμφοκύτταρα παράγοντας κάποιες ουσίες, τις κυτοσίνες, οι οποίες ενεργοποιούν τα Β-λεμφοκύτταρα έτσι ώστε αυτά με τη σειρά τους να αρχίσουν αρχικά να παράγουν αντισώματα και στη συνέχεια να αναπαράγονται. Δεν ενεργοποιούνται όμως όλα τα Β-λεμφοκύτταρα στον ίδιο βαθμό, αλλά η ενεργοποίησή τους εξαρτάται από την ποιότητα της σύνδεσής τους με το αντιγόνο. Έτσι όσο καλύτερη είναι η σύνδεση, τόσους περισσότερους κλώνους θα παράγουν. Αντιθέτως, κάποια από αυτά μπορεί να μην αναπαραχθούν καθόλου και να εκλείψουν. Κατά τη διάρκεια του πολλαπλασιασμού του Β-λεμφοκυττάρου, γενετικές μεταλλάξεις λαμβάνουν χώρα στους κλώνους του, οι οποίες προωθούν τη συγγένεια σύνδεσης (affinity) με το συγκεκριμένο αντιγόνο. Μόλις η διαδικασία της αναπαραγωγής τελειώσει, τα Β λεμφοκύτταρα ωριμάζουν και αρχίζουν να εκκρίνουν αντισώματα σε μεγάλες ποσότητες. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι αυτά ονομάζονται κύτταρα πλάσματος. Το κάθε Β-λεμφοκύτταρο παράγει αντισώματα διαφορετικού τύπου, τα οποία μπορούν να συνδέονται-αναγνωρίζουν ένα μόνο συγκεκριμένο αντιγόνο.

Ορισμένα Β-λεμφοκύτταρα τα οποία ενεργοποιούνται κατά τη φάση της ανοσολογικής αντίδρασης, δεν παράγουν αντισώματα αλλά διαφοροποιούνται σε κύτταρα μνήμης τα οποία παραμένουν ανενεργά μέχρι τη στιγμή που το συγκεκριμένο αντιγόνο θα εμφανιστεί ξανά στον οργανισμό. Όταν συμβεί αυτό, θα ενεργοποιηθούν και θα ξεκινήσουν άμεσα την παραγωγή αντισωμάτων.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω. Στο πάνω μέρος της εικόνας, φαίνονται τα Β λεμφοκύτταρα τα οποία συνδέονται με αντιγόνα συγκεκριμένου τύπου. Στη συνέχεια παρατηρούμε ότι το Β-λεμφοκύτταρο το οποίο συνδέθηκε-αναγνώρισε το αντιγόνο αναπαράγεται, είτε με τη διαδικασία της μίτωσης είτε με της διαίρεσης, και παράγονται λεμφοβλαστοί οι οποίοι διαφοροποιούνται, είτε σε κύτταρα πλάσματος είτε σε κύτταρα μνήμης.



**Εικόνα 2.1:** Η Αρχή της Επιλογής των Κλώνων [20]

Είναι σύνηθες ένας οργανισμός να έρθει σε επαφή με ένα συγκεκριμένο αντιγόνο πάνω από μία φορά κατά τη διάρκεια της ζωής του. Έτσι ενώ κατά την πρωτογενή ανοσολογική αντίδραση, δηλαδή την πρώτη φορά που θα έρθει σε επαφή με το αντιγόνο, θα αρχίσουν να παράγονται Β-λεμφοκύτταρα με διαφορετική ποιότητα σύνδεσης με το αντιγόνο, κατά τη δευτερογενή ανοσολογική του αντίδραση, δηλαδή όταν έρθει σε επαφή για δεύτερη φορά με το εν λόγω αντιγόνο, θα ενεργοποιηθούν τα κύτταρα μνήμης που όπως προαναφέρθηκε έχουν παραχθεί την πρώτη φορά που ο οργανισμός ήρθε σε επαφή με το αντιγόνο, και θα αρχίσει η παραγωγή κατάλληλων αντισωμάτων, ενώ παράλληλα τα Β-λεμφοκύτταρα με υποδεέστερους υποδοχείς θα αρχίσουν να εξελίσσονται. Επομένως στο τέλος της ανοσολογικής αντίδρασης είναι πολύ πιθανό να έχουν προκύψει λεμφοκύτταρα με καλύτερους υποδοχείς από τα προηγούμενα κύτταρα μνήμης. Σε αυτήν την περίπτωση

κάποια από αυτά εισέρχονται στον πληθυσμό των κυτάρων μνήμης. Έτσι με την επαναλαμβανόμενη έκθεση του οργανισμού στο ίδιο αντιγόνο τα κύτταρα μνήμης βελτιώνονται συνεχώς και θα μπορούσαμε επομένως να θεωρήσουμε το ανοσοποιητικό σύστημα ως ένα σύστημα ενισχυτικής μάθησης(reinforcement learning system).

Οπότε όπως προαναφέρθηκε η επαναλαμβανόμενη έκθεση του οργανισμού σε κάποιο συγκεκριμένο αντιγόνο οδηγεί στη βελτίωση της ανοσολογικής του αντίδρασης, αφενός μεν εξαιτίας των μηχανισμών διαφοροποίησης των Β-λεμφοκυττάρων, αφετέρου δε διότι στη μνήμη του ανοσοποιητικού συστήματος εισάγονται τα καλύτερα Β-λεμφοκύτταρα, δηλαδή αυτά που θα έχουν την καλύτερη ποιότητα σύνδεσης με κάποιο αντιγόνο. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ωρίμανση σύνδεσης(affinity maturation).

Οι δύο μηχανισμοί διαφοροποίησης των υποδοχέων των Β-λεμφοκυττάρων είναι:

- i. Η υπερμετάλλαξη(hypermutation) και
- ii. Η διόρθωση των υποδοχέων(receptor editing)

Κατά τη διαδικασία της υπερμετάλλαξης το γενετικό υλικό των Β-λεμφοκυττάρων υφίσταται μεγάλες γονιδιακές αλλαγές με ταχείς ρυθμούς, με αποτέλεσμα να παράγεται ένα πλήθος αντισωμάτων με διαφορετική ποιότητα σύνδεσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα κάποια από τα μεταλλαγμένα Β-λεμφοκύτταρα να έχουν καλύτερους υποδοχείς από τα αρχικά, ενώ κάποια άλλα να έχουν υποδεέστερους. Επομένως θα πρέπει να γίνει μία περαιτέρω επιλογή των καλύτερων Β-λεμφοκυττάρων έτσι ώστε να εισάγονται στη μνήμη του ανοσοποιητικού συστήματος τα λεμφοκύτταρα εκείνα που έχουν καλύτερη ποιότητα σύνδεσης. Θα είναι καλό βέβαια να υπάρχει και ένας επιπλέον έλεγχος κατά τη διαδικασία της υπερμετάλλαξης έτσι ώστε τα Β-λεμφοκύτταρα που έχουν επιτύχει πολύ καλή ποιότητα σύνδεσης να μεταλλάσσονται λιγότερο ή και καθόλου σε σχέση με αυτά που έχουν υποδεέστερους υποδοχείς, για να αποφύγουμε την πιθανότητα να προκύψουν Β-λεμφοκύτταρα με υποδεέστερους υποδοχείς σε σχέση με προηγούμενως.

Η διαδικασία της διόρθωσης των υποδοχέων αφορά τα Β-λεμφοκύτταρα που διαθέτουν υποδοχείς χαμηλής ποιότητας καθώς και αυτά που είναι εχθρικά απέναντι στον ίδιο τον οργανισμό. Λαμβάνει χώρα μετά τη διαδικασία της υπερμετάλλαξης και πριν την επιλογή των κλώνων. Η διόρθωση των υποδοχέων δεν είχε προβλεφθεί από τον Burnet αλλά προτάθηκε αργότερα, μετά από έρευνες(Nussenzweig 1998).

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η υπερμετάλλαξη μπορεί να μας οδηγήσει στην ανακάλυψη τοπικών ακρότατων ενώ η διόρθωση των υποδοχέων είναι αυτή που μπορεί να μας οδηγήσει στην ανακάλυψη ολικών ακρότατων, καθώς τα «άλματα» στο πεδίο των περιοχών σύνδεσης είναι μεγάλα με συνέπεια να μπορούμε να ανακαλύψουμε καλύτερα Β-λεμφοκύτταρα [21].

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο Αλγόριθμος της Επιλογής των Κλώνων ο οποίος βασίζεται στην Αρχή ή Θεωρία της Επιλογής των Κλώνων.

### 2.1.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

### **2.1.3.1 Εισαγωγή**

Ο Αλγόριθμος της Επιλογής των Κλώνων(Clonal Selection Algorithm-CLONALG) προτάθηκε από τους De Castro και Von Juben το 2002 και βασίζεται σε ιδέες εμπνευσμένες από την Αρχή της Επιλογής των Κλώνων. Είναι ένας από τους πολλούς ΤΑΣ αλγορίθμους, οι οποίοι έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία για να αντιμετωπιστεί ένα πλήθος προβλημάτων στη μηχανική. Αποτελεί έναν ευρέως διαδεδομένο αλγόριθμο ο οποίος βρίσκει εφαρμογές στη βελτιστοποίηση, στην ανίχνευση εισβολής στα δίκτυα, στον έλεγχο ρομποτικών συστημάτων καθώς και στην ανίχνευση δεδομένων.

Πρόκειται για έναν πειραματικό αλγόριθμό ο οποίος, όπως και άλλοι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης οι οποίοι βασίζονται σε ιδέες εμπνευσμένες από φυσικές διαδικασίες, χρησιμοποιεί έναν πληθυσμό, ένα πλήθος επαναληπτικών διαδικασιών και ψάχνει για τη βέλτιστη λύση(global solution). Ο σκοπός του αλγορίθμου είναι η ανάπτυξη μιας δεξαμενής αντισωμάτων η οποία αναπαριστά μία λύση σε ένα μηχανικό πρόβλημα. Κάθε ένα από τα αντισώματα(antibodies) αναπαριστά ένα στοιχείο της λύσης ή μία μοναδική λύση στο πρόβλημα, ενώ ένα αντιγόνο αναπαριστά ένα στοιχείο ή μία εκτίμηση του χώρου του προβλήματος. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι ουσιαστικά σε αυτόν τον αλγόριθμο δεν γίνεται διάκριση μεταξύ αντισωμάτων και Β-λεμφοκυττάρων καθώς από υπολογιστικής άποψης είναι ισοδύναμα, διότι όποια αλλαγή γίνεται στα αντισώματα αντικατοπτρίζεται στα Β-λεμφοκύτταρα και το αντίστροφο.

Πιο συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος CLONALG βασίζεται στα παρακάτω στοιχεία της Αρχής της Επιλογής των Κλώνων:

- Διατήρηση ενός συνόλου κυττάρων μνήμης
- Επιλογή και κλωνοποίηση των πιο σημαντικών κυττάρων, δηλαδή αυτών που κινητοποιούνται περισσότερο
- Εξάλειψη των κυττάρων που δεν κινητοποιούνται
- Μετάλλαξη
- Επιλογή των κλώνων ανάλογα με το βαθμό συσχέτισης με τα αντιγόνα
- Δημιουργία και διατήρηση της ποικιλομορφίας

### **2.1.3.2 CLONALG αλγόριθμος**

Ο αλγόριθμος CLONALG χρησιμοποιεί δύο πληθυσμούς, ο ένας εκ των οποίων αποτελείται από αντιγόνα(antigens) ενώ ο δεύτερος αποτελείται από αντισώματα(antibodies). Αρχικά επιλέγεται τυχαία ένα αντιγόνο, το οποίο δεν αντικαθίσταται και το σύστημα εκτίθεται σε αυτό το αντιγόνο, δηλαδή υπολογίζεται η συγγένεια σύνδεσης των αντισωμάτων του πληθυσμού με αυτό το αντιγόνο. Δηλαδή, πιο

μαθηματικοποιημένα, υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε ένα από τα αντισώματα. Στη συνέχεια, τα αντισώματα ταξινομούνται κατά αύξουσα σειρά και επιλέγονται εκείνα που πέτυχαν την καλύτερη σύνδεση, δηλαδή τις μικρότερες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης. Για το επιλεγμένο αυτό πλήθος των αντισωμάτων δημιουργείται ένας αριθμός κλώνων ανάλογα με την απόδοση τους, δηλαδή όσο καλύτερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης έχει επιτύχει κάθε ένα από τα αντισώματα, τόσο μεγαλύτερος ο αριθμός των κλώνων που θα παραχθεί. Ο αριθμός των κλώνων για κάθε ένα από τα αντισώματα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

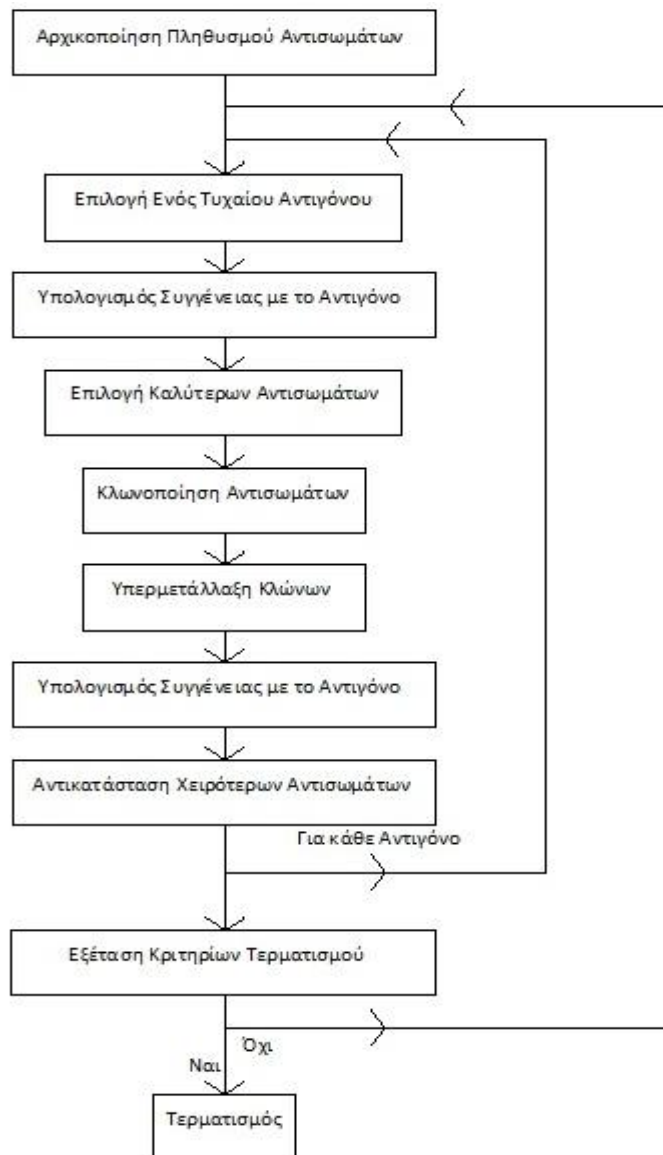
$$N_c = \text{round}\left(\frac{\beta \cdot N}{i}\right), \text{ όπου } \beta \text{ η παράμετρος κλωνοποίησης, } i \text{ η θέση του «γονιού-}$$

αντίσωμα» και  $N$  ο συνολικός αριθμός των αντισωμάτων. Σε άλλες προσεγγίσεις δεν επιλέγεται ένας συγκεκριμένος αριθμός από τα καλύτερα αντισώματα για κλωνοποίηση, αλλά αφού ταξινομηθούν κατά αύξουσα σειρά, κλωνοποιούνται όλα τα αντισώματα σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$$N_c = \text{round}\left(\frac{\beta \cdot n}{i}\right), \text{ όπου το } n \text{ σε αυτήν την περίπτωση είναι απλά μια ακόμη παράμετρος.}$$

Στη συνέχεια οι κλώνοι υπόκεινται στη διαδικασία της υπερμετάλλαξης και υπολογίζεται για ακόμα μία φορά η συγγένεια σύνδεσης τους με κάθε αντιγόνο. Τέλος επιλέγονται και αντικαθίστανται τα αντισώματα με τη χειρότερη ποιότητα σύνδεσης, ενώ διατηρούμε στη μνήμη εκείνα που πέτυχαν την καλύτερη σύνδεση [22].

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται τα βήματα του CLONALG.



**Σχήμα 2.1:** Διάγραμμα Ροής του Αλγορίθμου CLONALG

## 2.2 PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

### 2.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μέθοδος των ατόμων σμήνους (Particle Swarm Optimization-PSO) αποτελεί μία στοχαστική μέθοδο βελτιστοποίησης η οποία αναπτύχθηκε από τους J. Kennedy και R. Eberhart το 1995. Βασίζεται σε προσομοιώσεις απλοποιημένων κοινωνικών μοντέλων,

όπως η συμπεριφορά ενός σμήνους πουλιών ή ψαριών, ή ακόμα και ανθρώπινων κοινωνιών που εξελίσσονται μέσω της μεταξύ τους ανταλλαγής πληροφοριών. Προσφάτως έχει εφαρμοστεί σε ποικίλα προβλήματα βελτιστοποίησης που αφορούν τα συστήματα ισχύος, όπως θέματα ευστάθειας και ελέγχου.



**Εικόνα 2.2:** Η κίνηση ενός σμήνους ψαριών και πουλιών [23], [24]

Η μέθοδος αυτή βρίσκει ένα ολικό(global) ή σχεδόν ολικό ελάχιστο για μη γραμμικά και μη κυρτά προβλήματα βελτιστοποίησης και όπως έχει παρατηρηθεί από ένα πλήθος πειραμάτων, οι λύσεις που παρέχει είναι υψηλής ακρίβειας. Η PSO ψάχνει τη βέλτιστη λύση σε έναν πολυδιάστατο χώρο προσαρμόζοντας συνεχώς τις καμπύλες τροχιάς των κινούμενων σημείων, δηλαδή των ατόμων-σωματιδίων(particles). Πρόκειται ουσιαστικά για έναν εξελικτικό αλγόριθμο ο οποίος χρησιμοποιεί έναν πληθυσμό, όπου κάθε άτομο παίρνει μία απόφαση βασιζόμενο τόσο στη δική του εμπειρία όσο και στην εμπειρία των υπολοίπων ατόμων του πληθυσμού, αλλά αντιθέτως με τους γενετικούς αλγορίθμους και τον εξελικτικό προγραμματισμό, στην PSO δεν λαμβάνει χώρα η λειτουργία της επιλογής και η επικράτηση του δυνατού και όλα τα σωματίδια διατηρούνται ως μέλη του πληθυσμού. Επίσης δεν παρατηρούνται διασταυρώσεις μεταξύ των σωματιδίων και μεταλλάξεις.

Η PSO έχει εφαρμοστεί σε συνεχείς πολυτροπικές συναρτήσεις αλλά υπάρχουν επίσης ορισμένες εφαρμογές πάνω σε προβλήματα που διαθέτουν τόσο συνεχείς όσο και διακριτές μεταβλητές. Σε αυτήν την περίπτωση παραδοσιακά επιλέγονται ως λύση είτε διακριτές τιμές που προκύπτουν από στρογγυλοποίηση της βέλτιστης λύσης είτε αυτές που βρίσκονται κοντά στη βέλτιστη λύση. Σε πιο σύγχρονες προσεγγίσεις χρησιμοποιείται μία διευρυμένη αντικειμενική συνάρτηση η οποία περιλαμβάνει μια συνάρτηση ποινής(penalty function) και όλες οι μεταβλητές χειρίζονται ως συνεχείς.

Η μέθοδος αυτή έχει ένα πλήθος πλεονεκτημάτων που συνοψίζονται παρακάτω:

- i. Χρησιμοποιεί πιθανοκρατικούς και όχι ντετερμινιστικούς κανόνες μετάβασης και έτσι είναι ένα είδος στοχαστικού αλγορίθμου βελτιστοποίησης ο οποίος μπορεί να ψάχνει λύση σε μία πολύπλοκη περιοχή. Αυτό προσδίδει στην PSO μεγαλύτερη ευελιξία από τις συμβατικές μεθόδους.
- ii. Χρησιμοποιεί έναν πληθυσμό ο οποίος ψάχνει για τη λύση. Επομένως η αναζήτηση της λύσης από μία ομάδα ατόμων προσφέρει μεγαλύτερο εύρος από την αναζήτηση της λύσης από ένα μοναδικό σημείο και καθιστά τη μέθοδο λιγότερο ευαίσθητη στο να εγκλωβίζεται σε τοπικά ελάχιστα.
- iii. Μπορεί να εφαρμοστεί σε μη παραγωγίσιμα προβλήματα διότι δεν χρησιμοποιείται η ευαισθησία της συνάρτησης(function sensitivity-gradient).
- iv. Διαθέτει ένα πλήθος παραμέτρων οι οποίες μπορούν να ρυθμιστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να εφαρμόζεται σε ποικίλα προβλήματα. Είναι προφανές ότι η επιλογή των παραμέτρων είναι εξαιρετικής σημασίας τόσο για την ταχύτητα όσο και για την αποτελεσματικότητα της μεθόδου.
- v. Η ποιότητα της λύσης δεν εξαρτάται από τον αρχικό πληθυσμό αλλά ξεκινώντας από οποιοδήποτε σημείο στο χώρο, η μέθοδος εξασφαλίζει τη σύγκλιση στη βέλτιστη λύση.
- vi. Αντίθετα από τους γενετικούς και τους άλλους ευρετικούς αλγορίθμους, η PSO διαθέτει την ευελιξία να ελέγχει την ισορροπία ανάμεσα στην ολική και την τοπική εξερεύνηση του εξεταζόμενου χώρου. Έτσι ξεπερνάει το πρόβλημα της πρόωρης σύγκλισης και διευρύνεται η ικανότητα αναζήτησης της λύσης [25].

### 2.2.2 PSO ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ

Όπως προαναφέρθηκε, η PSO αποσκοπεί στην εύρεση της βέλτιστης λύσης, δηλαδή στη βελτιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης, διεξάγοντας μια στοχαστική αναζήτηση βασισμένη σε έναν πληθυσμό. Ο πληθυσμός αποτελείται από τα άτομα(particles), το κάθε ένα από τα οποία αποτελεί μια πιθανή λύση(candidate solution) και αναπαρίσταται από ένα διάνυσμα  $m$  διαστάσεων, όπου  $m$  ο αριθμός των παραμέτρων που πρόκειται να βελτιστοποιηθούν. Δηλαδή το  $k$ -οστό άτομο έχει την εξής μορφή:

$$X_k = [x_{k,1} \quad x_{k,2} \quad \dots \quad x_{k,m}]$$

Αρχικά ο πληθυσμός αρχικοποιείται κατά τυχαίο τρόπο, αλλά έτσι ώστε να ισχύουν οι περιορισμοί ισότητας και ανισότητας στους οποίους υπόκειται το πρόβλημα, και τα άτομα κινούνται ελεύθερα εντός του πολυδιάστατου χώρου αναζήτησης με κάποια ταχύτητα(velocity) η οποία μαθηματικά έχει την ίδια ακριβώς μορφή με τα άτομα. Κατά τη διάρκεια των επαναλήψεων τα άτομα διορθώνουν τόσο την ταχύτητά τους όσο και τη θέση τους(position) βασιζόμενα στη βέλτιστη λύση που έχει επιτύχει το κάθε ένα από αυτά(local best) αλλά και στη βέλτιστη λύση που έχει επιτύχει ο συνολικός πληθυσμός(global best)



μέχρι εκείνη τη στιγμή. Αυτό συμβαίνει με σκοπό να βρεθούν όλα τα άτομα στην περιοχή της βέλτιστης λύσης όπου θα γίνει μία πιο λεπτομερής εξέταση με σκοπό να επιτευχθεί με ακρίβεια η καλύτερη δυνατή λύση.

Παρακάτω παρουσιάζεται η σχέση σύμφωνα με την οποία κάθε άτομο ανανεώνει την ταχύτητα του σε κάθε επανάληψη:

$$\vec{V}_{i,new} = \omega \cdot \vec{V}_{i,old} + c_1 \cdot r_1 \cdot (\vec{p}_{i,best} - \vec{p}_i) + c_2 \cdot r_2 \cdot (\vec{g}_{best} - \vec{p}_i)$$

όπου  $\vec{V}_{i,old}$  η ταχύτητα του ατόμου,  $\vec{p}_i$  η θέση του,  $\vec{p}_{i,best}$  η καλύτερη λύση που έχει επιτύχει το άτομο και  $\vec{g}_{best}$  η καλύτερη λύση που έχει επιτευχθεί από όλον τον πληθυσμό.

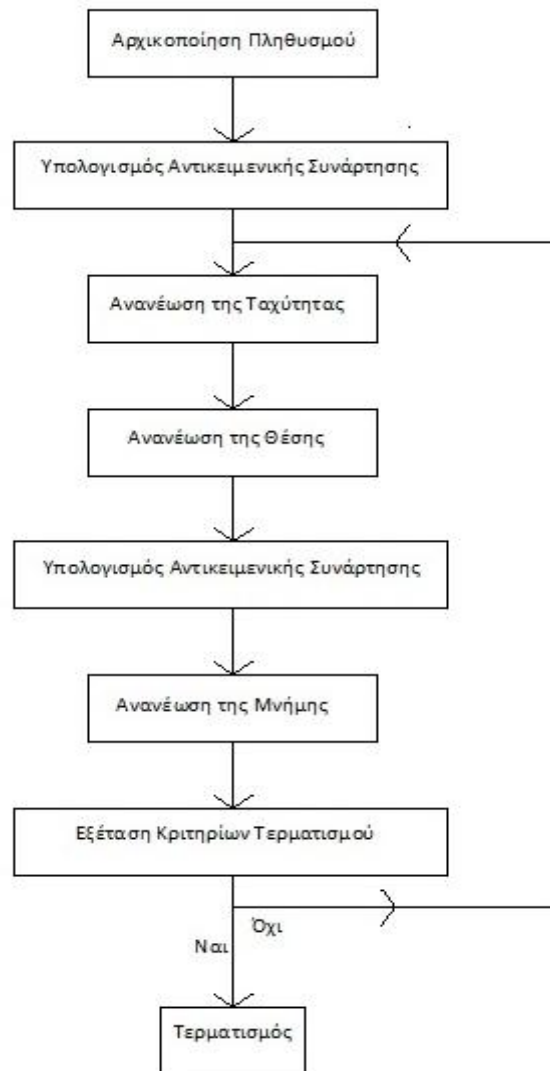
Οι  $c_1$  και  $c_2$  είναι συντελεστές βαρύτητας ενώ οι  $r_1$  και  $r_2$  λαμβάνουν τυχαίες τιμές στο διάστημα  $[0,1]$  προσδίδοντας στον αλγόριθμο στοχαστικό χαρακτήρα. Πιο συγκεκριμένα, η  $c_1$  ονομάζεται εμπειρική παράμετρος διότι συμβάλλει στην καινούργια ταχύτητα σύμφωνα με την εμπειρία του ατόμου, δηλαδή τη βέλτιστη λύση που έχει επιτύχει το ίδιο, ενώ η  $c_2$  ονομάζεται κοινωνική παράμετρος επειδή καθορίζει την καινούργια ταχύτητα βασιζόμενο στη συμπεριφορά ολόκληρου του πληθυσμού, δηλαδή στη βέλτιστη λύση που έχει επιτευχθεί από το συνολικό πληθυσμό. Η παράμετρος  $\omega$  ονομάζεται βάρος αδράνειας (inertia weight) και ελέγχει το αντίκτυπο που έχουν οι προηγούμενες ταχύτητες στις τρέχουσες. Όσον αφορά τα πρώτα στάδια της αναζήτησης είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται μεγάλες τιμές του  $\omega$  ενώ όταν πρόκειται για τις τελευταίες επαναλήψεις όπου ο αλγόριθμος έχει ήδη προσεγγίσει την περιοχή της βέλτιστης λύσης, είναι αποδοτικότερο να χρησιμοποιούνται μικρές τιμές του  $\omega$  έτσι ώστε να υπάρχει καλύτερη και πιο λεπτομερής τοπική αναζήτηση. Έτσι το  $\omega$  παρουσιάζεται να μεταβάλλεται γραμμικά σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:  $\omega = \omega_{\max} - \left( \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{iterations} \right) \cdot iterations$ , όπου iterations ο

συνολικός αριθμός των επαναλήψεων και  $\omega_{\max}$ ,  $\omega_{\min}$  η μέγιστη και η ελάχιστη αντίστοιχα τιμή που έχουμε ορίσει. Σε άλλες μελέτες το  $\omega$  παρουσιάζεται να μεταβάλλεται σύμφωνα με τη σχέση:  $\omega_{new} = a \cdot \omega_{old}$  όπου  $a$  μια σταθερά μικρότερη της μονάδας αλλά πολύ κοντά σε αυτήν, ενώ πολλές φορές, για λόγους απλοποίησης, το  $\omega$  θεωρείται σταθερό και ίσο με τη μονάδα.

Στη συνέχεια ανανεώνεται η θέση του κάθε ατόμου σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\vec{p}_{i,new} = \vec{p}_{i,old} + \vec{V}_{i,new}, \text{ δηλαδή η καινούργια θέση του ατόμου προκύπτει από την πρόσθεση της καινούργια ταχύτητας και της παλιάς του θέσης.}$$

Έπειτα αφού υπολογιστεί η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος, ανανεώνονται τα  $\vec{p}_{i,best}$  και  $\vec{g}_{best}$ , στην περίπτωση που το άτομο ή ο πληθυσμός αντίστοιχα έχει επιτύχει κάποια καλύτερη λύση. Μετά από αυτό το βήμα εξετάζεται αν ικανοποιούνται οι συνθήκες τερματισμού. Αν αυτές ικανοποιούνται ο αλγόριθμος τερματίζεται ενώ αν όχι, αυτός προχωράει στην επόμενη επαναληπτική διαδικασία [26]. Τα βήματα του αλγορίθμου συνοψίζονται στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 2.2:** Διάγραμμα Ροής Αλγορίθμου PSO

## 2.3 ΥΒΡΙΔΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

### 2.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε χρήση ενός υβριδικού αλγορίθμου βελτιστοποίησης ο οποίος ενσωματώνει την ιδέα της PSO στον αλγόριθμο CLONALG. Ο αλγόριθμος CLONALG πετυχαίνει με έναν στοχαστικό τρόπο ακριβέστερα αποτελέσματα από ότι ο αλγόριθμος PSO. Το μειονέκτημά του είναι ότι εκτελεί ένα μεγάλο πλήθος επαναληπτικών διαδικασιών μέχρι να επιτύχει τη βέλτιστη λύση και εξαιτίας αυτού η ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου παρουσιάζεται σημαντικά μειωμένη. Επομένως

χρησιμοποιώντας ιδέες από την PSO και ενσωματώνοντας έναν τελεστή βελτίωσης(improvement operator) στον αλγόριθμο CLONALG αναπτύχθηκε ο αλγόριθμος PCLONALG ο οποίος παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις δύο προηγούμενες μεθόδους, καθώς η απόδοση του είναι καλύτερη και ο αριθμός των κύκλων που εκτελεί μέχρι να φτάσει στο βέλτιστο αποτέλεσμα, σημαντικά μειωμένος.

### 2.3.2 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ PCLONALG

Ο αλγόριθμος PCLONALG διαθέτει τέσσερις τελεστές: έναν τελεστή κλωνοποίησης(cloning operator), έναν τελεστή υπερμετάλλαξης (hypermutation operator), έναν τελεστή βελτίωσης(improvement operator) και έναν τελεστή διόρθωσης υποδοχέων(receptor editing operator).

Όπως προαναφέρθηκε, ο τελεστής βελτίωσης είναι εμπνευσμένος από την PSO. Πιο συγκεκριμένα, αφού υπολογιστεί η συγγένεια σύνδεσης(affinity), ή αλλιώς η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, για όλα τα αντισώματα, επιλέγονται τα μισά που πέτυχαν τα καλύτερα αποτελέσματα. Στη συνέχεια βελτιώνεται η συγγένεια σύνδεσης των επιλεγμένων αντισωμάτων πριν την κλωνοποίησή τους. Έτσι χειριζόμαστε το πλήθος των επιλεγμένων αντισωμάτων σαν ένα σμήνος(swarm) και το κάθε ένα από αυτά σαν ένα άτομο(particle) του σμήνους. Έτσι αρχικά ανανεώνεται η ταχύτητα των αντισωμάτων σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\vec{v}_{i,new} = \vec{v}_{i,old} + c_1 \cdot \varphi_1 \cdot (\vec{p}_{i,best} - \vec{x}_i) + c_2 \cdot \varphi_2 \cdot (\vec{p}_{g,best} - \vec{x}_i),$$
 όπου  $\vec{v}_{i,new}$  και  $\vec{v}_{i,old}$  η καινούργια και η παλιά ταχύτητα αντίστοιχα των αντισωμάτων,  $c_1$  και  $c_2$  δύο θετικές σταθερές,  $\varphi_1$  και  $\varphi_2$  δύο τυχαίοι κανονικά κατανομημένοι στο διάστημα  $[0, 1]$  αριθμοί,  $\vec{x}_i$  η θέση των αντισωμάτων,  $\vec{p}_{i,best}$  η βέλτιστη λύση για κάθε ένα από τα αντισώματα και  $\vec{p}_{g,best}$  η συνολική βέλτιστη λύση που έχει επιτευχθεί. Στη συνέχεια ανανεώνεται η θέση των αντισωμάτων σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$$\vec{x}_{i,new} = \vec{x}_{i,old} + \vec{v}_{i,new},$$
 δηλαδή η καινούργια θέση των αντισωμάτων προκύπτει από το άθροισμα της παλιάς τους θέσης και της καινούργιας τους ταχύτητας.

Ακολούθως, τα αντισώματα ταξινομούνται κατά αύξουσα σειρά ανάλογα με την τιμή της συγγένειας σύνδεσης την οποία έχουν επιτύχει και εφαρμόζεται ο τελεστής κλωνοποίησης. Τα αντισώματα-κλώνοι ή αντισώματα-απόγονοι(offspring antibodies) έχουν ταυτόσημα χαρακτηριστικά με τα αντισώματα από τα οποία προήρθαν, δηλαδή με τα αντισώματα-γονείς(parents). Ο αριθμός των κλώνων που παράγονται για κάθε ένα από τα αντισώματα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$nc = \text{round}(\frac{\beta \cdot n}{i})$ , όπου  $\beta$  μια θετική σταθερά,  $i$  η θέση του αντισώματος-γονιού και  $n$  μια παράμετρος που ελέγχει τον αριθμό των κλώνων. Δηλαδή υπολογίζεται και στρογγυλοποιείται ο λόγος  $\frac{\beta \cdot n}{i}$ .

Στη συνέχεια τα αντισώματα-κλώνοι υπόκεινται στον τελεστή υπερμετάλλαξης, ο οποίος είναι αντιστρόφως ανάλογος με τη συγγένεια σύνδεσης κάθε αντισώματος και βασίζεται στις δύο παρακάτω σχέσεις:

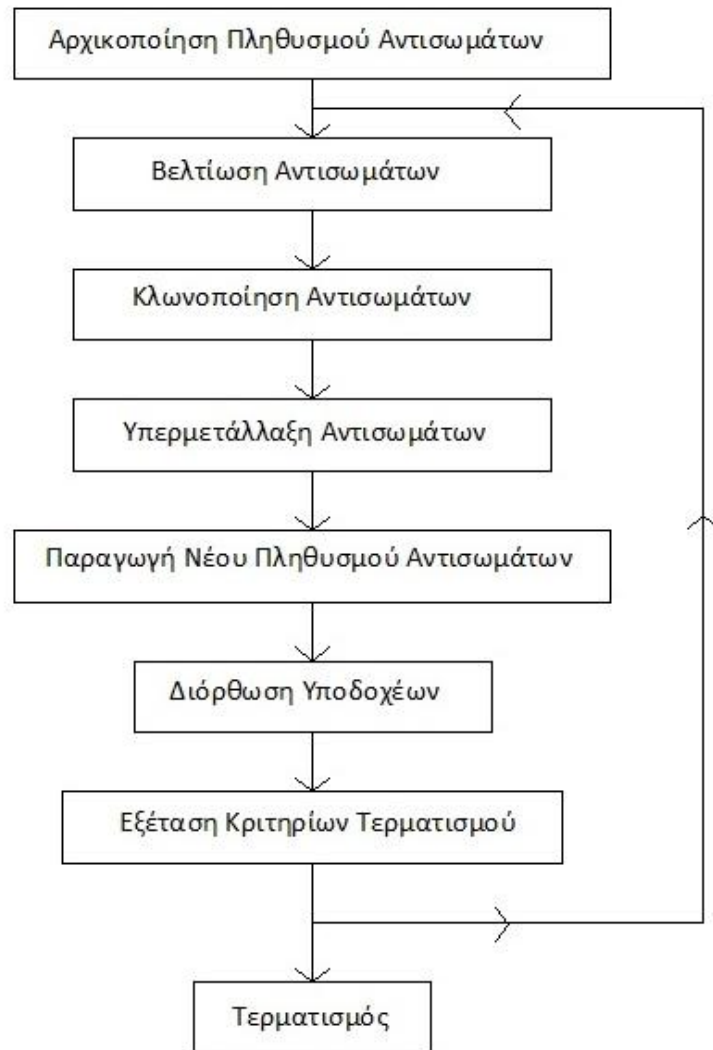
$$\vec{x}_{i,new} = \vec{x}_{i,old} + a \cdot N(0,1)$$

$$a = \frac{1}{\beta 1} \cdot \exp(-f)$$

Με το  $N(0,1)$  συμβολίζεται μια τυχαία μεταβλητή με μηδενικό μέσο και τυπική απόκλιση ίση με μονάδα., με το σύμβολο  $f$  η συγγένεια σύνδεσης(affinity) των αντισωμάτων και η  $\beta 1$  είναι μια θετική σταθερά.

Με σκοπό να αυξηθεί η ποικιλομορφία των αντισωμάτων, εφαρμόζεται ένας ακόμα τελεστής, ο τελεστής διόρθωσης υποδοχέων. Έτσι αν ο αρχικός πληθυσμός των αντισωμάτων που έχει επιλεγεί είναι μεγέθους  $N$ , θα δημιουργηθούν  $N/10$  καινούργια αντισώματα τα οποία θα αντικαταστήσουν τον αντίστοιχο αριθμό των παλιών αντισωμάτων που πέτυχαν τα χειρότερα αποτελέσματα και τα οποία επομένως δεν μας ενδιαφέρουν στην αναζήτηση της βέλτιστης λύσης. Δε σημαίνει όμως κατά ανάγκη ότι τα καινούργια αντισώματα θα επιτύχουν κάποιο καλύτερο αποτέλεσμα από τα αντισώματα που αντικατέστησαν [27].

Παρακάτω παρουσιάζεται διαγραμματικά ο υβριδικός αυτός αλγόριθμος βελτιστοποίησης.



**Σχήμα 2.3:** Απλοποιημένο Διάγραμμα Ροής Υβριδικού Αλγορίθμου Βελτιστοποίησης

Στο παρόν πρόβλημα, πριν τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης, σε κάθε σημείο του αλγορίθμου, χρειαζόταν να «τρέξει» μία βέλτιστη ροή φορτίου, με σκοπό να υπολογιστούν μεγέθη όπως οι χωρητικότητες των γεννητριών, οι απώλειες των γραμμών, οι τάσεις των ζυγών και άλλα, τα οποία ήταν απαραίτητα για τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης. Στη συνέχεια του κεφαλαίου περιγράφεται η λογική της βέλτιστης ροής φορτίου, η μαθηματικοποιημένη μορφή της, καθώς και οι τρόποι επίλυσης αυτής.

## 2.4 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ

### 2.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πρώτη αναφορά στον όρο βέλτιστη ροή φορτίου ή ΒΡΦ (Optimal Power Flow-OPF) χρονολογείται από το 1968 από τους H. W. Dommel και W. F. Tinney, αν και ο όρος εισήχθηκε για πρώτη φορά ως οικονομική κατανομή φορτίου σε δίκτυο με περιορισμούς (network constrained economic dispatch) το 1962 από τον J. Carpentier. Η βέλτιστη ροή φορτίου, η οποία αποτελεί αντικείμενο εκτεταμένων ερευνών, είναι ένα σημαντικό εργαλείο για τη διαχείριση συστημάτων ισχύος, τόσο σε σχεδιαστικά όσο και σε διαχειριστικά στάδια. Η ΒΡΦ βελτιστοποιεί την τιμή μιας αντικειμενικής συνάρτησης, μέσω του καθορισμού κάποιων μεταβλητών ελέγχου του συστήματος, ενώ παράλληλα φροντίζει ώστε να ικανοποιείται ένα σύνολο περιορισμών του δικτύου, όπως τα όρια της τάσης των ζυγών, τα θερμικά όρια των γραμμών και το ενεργειακό ισοζύγιο. Μετά την αναδόμηση του τομέα του ηλεκτρισμού, η ΒΡΦ έχει χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο οικονομικής διαχείρισης αλλά και πληροφορίας, όπως η εκτίμηση των διακυμάνσεων των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας.

Στη γενική της μορφή, η ΒΡΦ αποτελεί ένα μη γραμμικό, μεγάλου εύρους αλλά και μη κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης, το οποίο περιέχει τόσο συνεχείς όσο και διακριτές μεταβλητές ελέγχου, η παρουσία των οποίων καθιστά πιο σύνθετη τη λύση του προβλήματος. Για τη λύση της ΒΡΦ έχει εφαρμοστεί σχεδόν κάθε μαθηματικοποιημένη προγραμματιστική προσέγγιση, ενώ πέρασαν αρκετές δεκαετίες μέχρι οι ερευνητές να καταλήξουν σε προγραμματιστικούς κώδικες που μπορούν να λύσουν το πρόβλημα με αξιοπιστία. Σήμερα χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές για την επίλυση του προβλήματος, όπως ο γραμμικός προγραμματισμός, η μέθοδος επαναλήψεων λάμδα, η μέθοδος εσωτερικού σημείου, η μέθοδος κλίσης και η μέθοδος Newton.

Παρακάτω περιγράφεται μαθηματικά το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου ενώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι χρησιμοποιείται διαφορετική μεθοδολογία για την επίλυση ενός AC και ενός DC προβλήματος ΒΡΦ.

### 2.4.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΡΦ

Όπως προαναφέρθηκε, η ΒΡΦ βελτιστοποιεί την τιμή μιας αντικειμενικής συνάρτησης, είτε ελαχιστοποιώντας την είτε μεγιστοποιώντας την, ενώ ταυτόχρονα φροντίζει ώστε να ισχύει ένα σύνολο περιορισμών, οι οποίοι μεταφράζονται ως ισότητες και ανισότητες. Η AC ΒΡΦ με την οποία θα ασχοληθούμε, χρησιμοποιεί ένα διάνυσμα βελτιστοποίησης  $x$ , το οποίο περιέχει τις γωνίες και τα μέτρα των τάσεων κάθε ζυγού του προς εξέταση συστήματος,

όπως και την παραγωγή ενεργού και αέργου ισχύος κάθε γεννήτριας του συστήματος. Δηλαδή το διάνυσμα  $x$  έχει την παρακάτω μορφή:

$$x = \begin{bmatrix} \Theta \\ V_m \\ P_g \\ Q_g \end{bmatrix}, \text{ όπου } \Theta \text{ και } V_m \text{ η γωνία και το μέτρο αντίστοιχα της τάσης των ζυγών, ενώ } P_g \text{ και } Q_g \text{ η παραγωγή ενεργού και αέργου ισχύος αντίστοιχα κάθε γεννήτριας. Δηλαδή αν ο αριθμός των ζυγών του συστήματος είναι } n_b \text{ και ο αριθμός των γεννητριών που υπάρχουν σε αυτό είναι } n_g, \text{ τότε το διάνυσμα } x \text{ θα έχει διαστάσεις } (2 \cdot n_b + 2 \cdot n_g) \times 1.$$

Έτσι το πρόβλημα της OPF παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$\min_x f(x) \quad (1)$$

και υπόκειται στους ακόλουθους περιορισμούς:

$$g(x) = 0 \quad (2)$$

$$h(x) \leq 0 \quad (3)$$

$$x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \quad (4)$$

$$l \leq A \cdot x \leq u \quad (5)$$

Οι παραπάνω περιορισμοί αφορούν το ισοζύγιο ενεργού και αέργου ισχύος (2), τα θερμικά όρια των γραμμών (3), τα επιτρεπτά όρια των τάσεων των ζυγών ή της παραγωγής των γεννητριών (4), ενώ μπορούμε να εισάγουμε και επιπλέον περιορισμούς μέσω της σχέσης (5), όπως η απαίτηση κάποια από τις γεννήτριες να λειτουργεί με συγκεκριμένο συντελεστή ισχύος, ή το άθροισμα της παραγωγής να μην ξεπερνάει κάποιο όριο.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι διάφορες προγραμματιστικές τεχνικές οι οποίες χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης ροής φορτίου [28].

### 2.4.3 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΒΡΦ

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τις τελευταίες δεκαετίες μετά από εκτεταμένες έρευνες, έχει αναπτυχθεί ένα πλήθος μεθόδων για την επίλυση του σύνθετου προβλήματος της βέλτιστης ροής φορτίου, όπως η μέθοδος επαναλήψεων λάμδα (lambda iteration

method), η μέθοδος εσωτερικού σημείου(interior point method), η οποία είναι τεχνική μη γραμμικού προγραμματισμού, η μέθοδος κλίσης(gradient methods), η μέθοδος Newton(Newton's method) και ο γραμμικός προγραμματισμός(linear programming-LP). Παρακάτω παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά αυτών των μεθόδων.

### Μέθοδος Κλίσης

Αποτελεί την πιο παλιά τεχνική επίλυσης προβλημάτων ΒΡΦ καθώς σχεδόν όλες οι πρώιμες μέθοδοι επίλυσης που εφαρμόστηκαν χρησιμοποιούσαν μεθόδους κλίσης. Σύμφωνα με τη μέθοδο κλίσης, υπολογίζονται αρχικά οι πρώτες παράγωγοι της αντικειμενικής συναρτησης σε σχέση με τις ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος και στη συνέχεια αυτές οι παράγωγοι, οι οποίες ονομάζονται διάνυσμα κλίσης, καθορίζουν την κατεύθυνση της κίνησης που δίνεται στην τρέχουσα λύση έτσι ώστε αυτή να βελτιωθεί. Η διαδικασία είναι επαναληπτική και σταματάει όταν επιτυγχάνεται μία επαρκώς μικρή κλίση. Οι μέθοδοι κλίσης συγκλίνουν με αργούς ρυθμούς, με αποτέλεσμα να αυξάνεται κατά πολύ ο υπολογιστικός χρόνος, και παρουσιάζουν δυσκολίες στην επίλυση, όταν χρησιμοποιούνται ανισοτικοί περιορισμοί.

### Μέθοδος Επαναλήψεων Λάμδα

Πολλά προγράμματα οικονομικής κατανομής φορτίου χρησιμοποιούν ως βάση για την επίλυσή τους τη μέθοδο επαναλήψεων λάμδα. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στους πολλαπλασιαστές Lagrange και παρουσιάζει ιδιαιτερότητες σε σχέση με τις άλλες μεθόδους, καθώς η άγνωστη μεταβλητή λάμδα λαμβάνει την επόμενη τιμή της ενστικτωδώς. Οι απώλειες αναπαρίστανται σε έναν πίνακα B και οι παράγοντες ποινής μπορούν να υπολογίζονται έξω από μία ροή φορτίου. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει δυσκολίες στη ρύθμιση και προσαρμογή της μεταβλητής λάμδα όταν έχει να αντιμετωπίσει σύνθετες αντικειμενικές συναρτήσεις. Επίσης δε λαμβάνει υπόψη περιορισμούς που σχετίζονται με το σύστημα διανομής και δεν κατανέμει την παραγωγή, με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφύγει υπερφορτίσεις, παραβιάσεις ορίων της τάσης ή ορίων ασφαλείας.

### Μέθοδος Newton

Η μέθοδος Newton παρουσιάζει πολύ ταχείς ρυθμούς σύγκλισης, αλλά μπορεί να εμφανίσει προβλήματα όταν γίνεται χρήση ανισοτικών περιορισμών. Όταν υπάρχουν τέτοιου είδους περιορισμοί, αυτοί αθροίζονται στην αντικειμενική συνάρτηση μέσω των τελεστών Lagrange και των παραγόντων ποινής. Έτσι οι ανισοτικοί περιορισμοί χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τους περιορισμούς ποινής και τους ενεργούς περιορισμούς, κάτι το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την τροποποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης και έτσι την ευκολότερη επίλυσή της με τη μέθοδο Newton, κάτι το οποίο όμως παρουσιάζει πολλές φορές δυσκολίες. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι έχουν γίνει πολλές μελέτες για την τροποποίηση της μεθόδου και τη βελτίωσή της.



Οι δύο μέθοδοι που παρουσιάζονται παρακάτω, η μέθοδος γραμμικού προγραμματισμού και η μέθοδος εσωτερικού σημείου αποτελούν τις πιο διαδεδομένες τεχνικές επίλυσης προβλημάτων βέλτιστης ροής φορτίου και για αυτό η παρουσίασή τους είναι πιο αναλυτική.

### 2.4.3.1 Μέθοδος Γραμμικού Προγραμματισμού

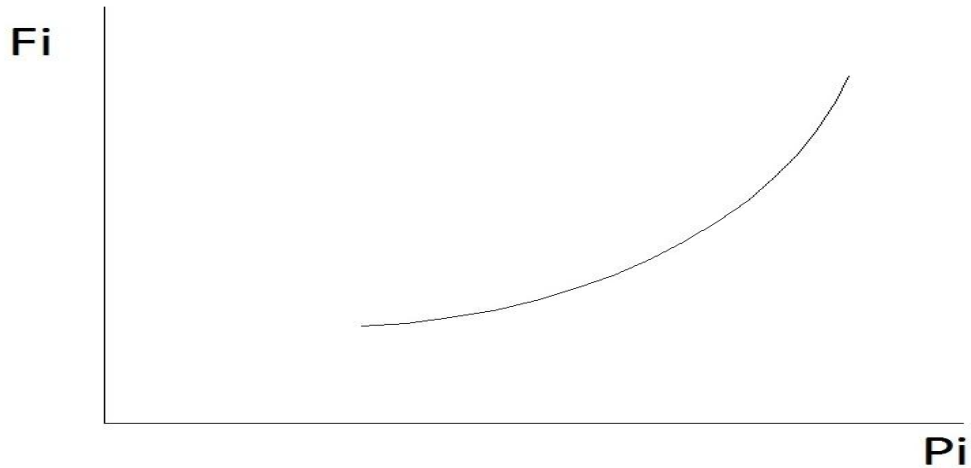
Η επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης ροής φορτίου με τη μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού αποτελεί μία από τις ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές. Έτσι, αν το πρόβλημα είναι τέτοιας μορφής ώστε να μπορεί να γραμμικοποιηθεί χωρίς να χαθεί η ακρίβεια, τότε ο γραμμικός προγραμματισμός αποτελεί ένα πολύ σημαντικό εργαλείο, καθώς μπορεί να χειρίζεται χωρίς καμία δυσκολία τους ανισοτικούς περιορισμούς του προβλήματος, εν αντιθέσει με τη μέθοδο Newton και τη μέθοδο κλίσης.

Στο παρακάτω διάγραμμα ροής παρουσιάζονται τα βήματα με τα οποία επιλύεται το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου με τη βοήθεια του γραμμικού προγραμματισμού (LPOPF).



**Σχήμα 2.4:** Διάγραμμα ροής LPOPF

Αρχικά τίθεται το πρόβλημα της έκφρασης των μη γραμμικών εισόδων και εξόδων ή της συνάρτησης κόστους ως ένα σύνολο μη γραμμικών συναρτήσεων. Έτσι, χωρίζουμε τη μη γραμμική συνάρτηση κόστους, σε τμήματα τα οποία αποτελούνται από ευθείες γραμμές. Στο παρακάτω σχήμα αναπαρίσταται η μη γραμμική συνάρτηση κόστους  $F_i(P_i)$ .



**Σχήμα 2.5:** Η μη γραμμική συνάρτηση κόστους  $F_i(P_i)$

Αν χωρίσουμε τη συνάρτηση κόστους σε τρία τμήματα,  $P_{i1}$ ,  $P_{i2}$ ,  $P_{i3}$ , το κάθε ένα από τα οποία έχει κλίση  $s_{i1}$ ,  $s_{i2}$  και  $s_{i3}$  αντίστοιχα, τότε αυτή θα γίνει:

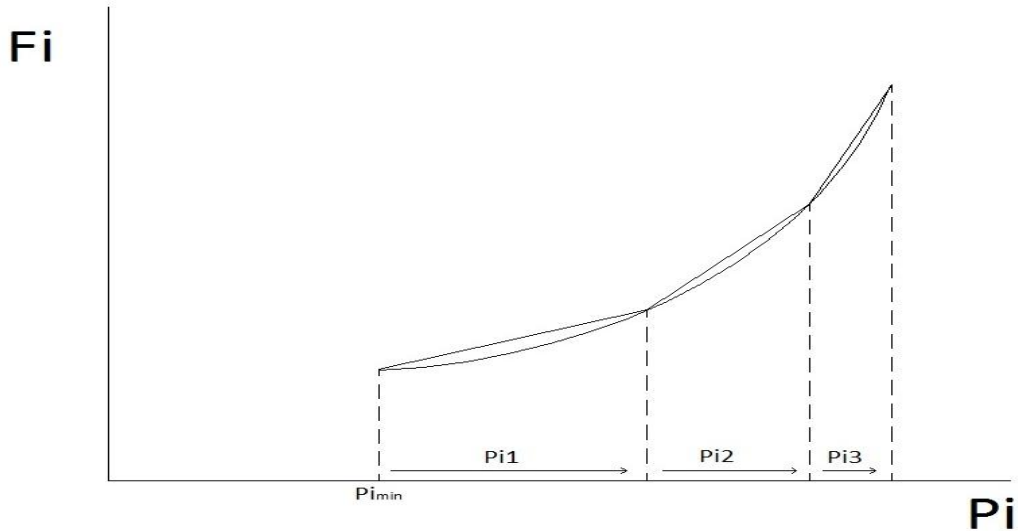
$$F_i(P_i) = F_i(P_{i,\min}) + s_{i1} \cdot P_{i1} + s_{i2} \cdot P_{i2} + s_{i3} \cdot P_{i3} \quad (6)$$

όπου ισχύει:

$$0 \leq P_{ix} \leq P_{ix}^+ \text{ για } x=1,2,3 \text{ και } P_i = P_{i,\min} + P_{i1} + P_{i2} + P_{i3}$$

Έτσι η συνάρτηση κόστους αποτελείται πλέον από μια γραμμική έκφραση των  $P_{ix}$ .

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η γραμμικοποιημένη συνάρτηση κόστους.



**Σχήμα 2.6:** Η γραμμικοποιημένη συνάρτηση κόστους  $F_i(P_i)$

Κατά το σχηματισμό του προβλήματος της βέλτιστης ροής φορτίου, με τη χρήση του γραμμικού προγραμματισμού, λαμβάνονται υπόψη μόνο οι μεταβλητές ελέγχου, ενώ παραλείπονται οι μεταβλητές κατάστασης. Έτσι, λαμβάνονται αντίστοιχα υπόψη μόνο οι περιορισμοί του προβλήματος που επηρεάζουν τις μεταβλητές ελέγχου και όχι τις μεταβλητές κατάστασης.

Οι επόμενοι περιορισμοί που θεωρούνται σε ένα πρόβλημα LOPF είναι εκείνοι που αναπαριστούν το ισοζύγιο ενεργού και αέργου ισχύος. Το ισοζύγιο ενεργού ισχύος αναπαρίσταται με την ακόλουθη σχέση:  $P_{gen} - P_{load} - P_{loss} = 0$  (7)

Ο όρος  $P_{gen}$  αναπαριστά την παραγόμενη ενεργό ισχύ από τις γεννήτριες του συστήματος, ο όρος  $P_{load}$  την ενεργό ισχύ που καταναλώνεται από τα φορτία, ενώ με ο όρος  $P_{loss}$  αναπαριστά τις απώλειες στις γραμμές μεταφοράς του συστήματος, που ισούνται με  $I^2 \cdot R$ , και τις απώλειες στους μετασχηματιστές. Συμβολίζοντας τις μεταβλητές ελέγχου με το γράμμα  $u$  και παραγωγίζοντας τη σχέση (7) ως προς  $u$ , προκύπτει:

$$\sum_u \left( \frac{\partial P_{gen}}{\partial u} \right) \Delta u - \sum_u \left( \frac{\partial P_{load}}{\partial u} \right) \Delta u - \sum_u \left( \frac{\partial P_{loss}}{\partial u} \right) \Delta u = 0 \quad (8)$$

$$\text{Θεωρούμε: } \Delta u = u - u^o \quad (9)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση (9) στην (8) προκύπτει:

$$\sum_u \left( \frac{\partial P_{gen}}{\partial u} \right) u - \sum_u \left( \frac{\partial P_{load}}{\partial u} \right) u - \sum_u \left( \frac{\partial P_{loss}}{\partial u} \right) u = K_p \quad (10)$$

$$\text{όπου } K_p = \sum_u \left( \frac{\partial P_{gen}}{\partial u} \right) u^0 - \sum_u \left( \frac{\partial P_{load}}{\partial u} \right) u^0 - \sum_u \left( \frac{\partial P_{loss}}{\partial u} \right) u^0 \quad (11)$$

Με την ίδια λογική, μπορεί αντίστοιχα να γραφτεί μια παρόμοια εξίσωση για το ισοζύγιο αέργου ισχύος.

Η μέθοδος του γραμμικού προγραμματισμού περιορίζει τις μεταβλητές ελέγχου έτσι ώστε αυτές να βρίσκονται πάντα μέσα στο εύρος των επιτρεπτών ορίων τους, ωστόσο δεν βελτιστοποιεί τη συνάρτηση κόστους με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούνται οι περιορισμοί των γραμμών μεταφοράς, ή τα όρια της τάσης των ζυγών. Για να προστεθούν οι τελευταίοι περιορισμοί, χρειάζεται να γίνει προσθήκη ενός επιπλέον περιορισμού σε αυτή τη μέθοδο.

Έστω ότι η θερμικής ισχύς των γραμμών έχει ένα ανώτατο επιτρεπτό όριο, δηλαδή σε μία γραμμή από το ζυγό n μέχρι το ζυγό m ισχύει:  $MVA_{flow, nm} \leq MVA_{flow, nm, MAX}$  (12)

Ο περιορισμός (12) μπορεί να μοντελοποιηθεί με τη χρήση σειρών Taylor και με τη διατήρηση των γραμμικών όρων. Δηλαδή η σχέση (12) γίνεται:

$$MVA_{flow, nm} = MVA_{flow, nm}^o + \sum_u \left( \frac{\partial}{\partial u} MVA_{flow, nm} \right) \Delta u \leq MVA_{flow, nm, MAX} \quad (13)$$

Θεωρώντας ότι ισχύει η σχέση (9), προκύπτει:

$$\sum_u \left( \frac{\partial}{\partial u} MVA_{flow, nm} \right) u \leq MVA_{flow, nm, MAX} - K_f \quad (14)$$

$$\text{όπου } K_f = MVA_{flow, nm}^o + \sum_u \frac{\partial}{\partial u} MVA_{flow, nm} u^o \quad (15)$$

Με τον ίδιο τρόπο μπορούν να προστεθούν και άλλοι περιορισμοί, όπως τα όρια τάσης των ζυγών του συστήματος. Για την επίλυση της βέλτιστης ροής φορτίου με τη μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού, θα πρέπει να γίνει προσθήκη όσων περιορισμών είναι απαραίτητοι ώστε το σύστημα ισχύος να παραμείνει μέσα στα προκαθορισμένα όρια.

#### 2.4.3.2 Μέθοδος Εσωτερικού Σημείου

Το 1984 ο Karmarkar πρότεινε έναν καινούργιο αλγόριθμο επίλυσης προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού, ο οποίος είναι γνωστός ως μέθοδος εσωτερικού σημείου. Αυτή η τεχνική έχει την ικανότητα να βρίσκει βελτιωμένες διαδρομές αναζήτησης της βέλτιστης λύσης στο εσωτερικού του επιτρεπτού χώρου. Δηλαδή, εν αντιθέσει με το γραμμικό προγραμματισμό, δεν αναζητά τη βέλτιστη λύση ακολουθώντας μια σειρά

σημείων που βρίσκονται στα σύνορα των περιορισμών, αλλά ακολουθεί ένα μονοπάτι στο εσωτερικό αυτών. Αυτή η μέθοδος είναι σημαντικά ταχύτερη σε σχέση με τη μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού. Λίγο αργότερα, το 1986, ο Gill (Gill et al. 1986) παρουσίασε τη σχέση μεταξύ του αλγορίθμου του Karmarkar και του αλγορίθμου της λογαριθμικής φραγμένης συνάρτησης. Αυτός ο αλγόριθμος, ο οποίος είναι μία από τις ευρέως χρησιμοποιούμενες προσεγγίσεις για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων, εξαιτίας της ταχύτητας σύγκλισής του και της ευκολίας με την οποία χειρίζεται τους ανισοτικούς περιορισμούς του προβλήματος, αποτέλεσε τη βάση για την επίλυση ενός πλήθους προβλημάτων ΒΡΦ.

Η μέθοδος εσωτερικού σημείου δε διαχωρίζει τις μεταβλητές σε μεταβλητές ελέγχου και μεταβλητές κατάστασης, αλλά όλες οι μεταβλητές αναπαρίστανται με ένα διάνυσμα  $x$  ενώ η αντικειμενική συνάρτηση είναι της μορφής  $f(x)$ , δηλαδή εξαρτάται από το σύνολο των μεταβλητών. Οι περιορισμοί του προβλήματος διαχωρίζονται σε ισοτικούς και ανισοτικούς περιορισμούς. Δηλαδή οι ισοτικοί περιορισμοί είναι της μορφής:  $g(x)=0$  και οι ανισοτικοί περιορισμοί είναι της μορφής:  $h^- \leq h(x) \leq h^+$ , όπου τα διανύσματα  $h^+$  και  $h^-$  αποτελούν το μέγιστο και το ελάχιστο επιτρεπτό όριο αντίστοιχα των ανισοτικών περιορισμών. Επιπλέον, οι ίδιες οι μεταβλητές περιορίζονται σε ένα επιτρεπτό εύρος τιμών:  $x^- \leq x \leq x^+$ .

Αρχικά, γίνεται προσθήκη κάποιων καινούργιων μεταβλητών, έτσι ώστε όλες οι εξισώσεις να μετατραπούν σε ισοτικούς περιορισμούς. Ουσιαστικά με αυτόν τον τρόπο, απαλείφονται οι περισσότεροι ανισοτικοί περιορισμοί του προβλήματος. Επομένως προκύπτει το παρακάτω σύνολο εξισώσεων:

$$\begin{aligned} \min f(x) \\ g(x) = 0 \\ h(x) + s_h = h^+ \\ s_h + s_{sh} = h^+ - h^- \\ x + s_x = x^+ \\ x - x^- \geq 0 \\ s_x, s_h, s_{sh} \geq 0 \end{aligned} \quad (16)$$

Έτσι προέκυψε ένα σύνολο εξισώσεων που αποτελούνται από ισοτικούς περιορισμούς, με εξαίρεση τις δύο συνθήκες, οι οποίες μπορούν να εισαχθούν στο πρόβλημα με την προσθήκη μιας «λογαριθμικής φραγμένης συνάρτησης» στην αντικειμενική συνάρτηση. Αυτή είναι μια μορφή συνάρτησης ποινής, η τιμή της οποίας μεγαλώνει όσο και περισσότερο όταν η αντικειμενική συνάρτηση ή η μεταβλητή πλησιάζει στο μηδέν. Η καινούργια αντικειμενική συνάρτηση έχει την ακόλουθη μορφή:

$$f_\mu = f(x) - \mu \cdot \sum_j \ln(x - x^-)_j - \mu \cdot \sum_j \ln(s_x)_j - \mu \cdot \sum_i \ln(s_h)_i - \mu \cdot \sum_i \ln(s_{sh})_i \quad (17)$$

Η παράμετρος  $\mu$ , η οποία ονομάζεται παράμετρος φράγματος, είναι ένας θετικός αριθμός ο οποίος αναγκάζεται να πλησιάσει στο μηδέν, καθώς ο αλγόριθμος συγκλίνει στη βέλτιστη λύση. Αυτό παρουσιάζεται με την εξίσωση Lagrange, δηλαδή με τη σχέση (18).

$$\begin{aligned}
L_\mu = & f(x) - \lambda^T \cdot g(x) - \lambda_h^T \cdot [h^+ - s_h - h(x)] - \lambda_{sh}^T \cdot [h^+ - h^- - s_h - s_{sh}] \\
& - \lambda_x^T \cdot [x^+ - x - s_x] - \mu \cdot \sum_j \ln(x - x^-)_j - \mu \cdot \sum_j \ln(s_x)_j \\
& - \mu \cdot \sum_i \ln(s_h)_i - \mu \cdot \sum_i \ln(s_{sh})_i
\end{aligned} \tag{18}$$

Η λύση της εξίσωσης (18) λαμβάνεται, θέτοντας την κλίση του πρώτου μέλους ίση με το μηδέν. Έτσι προκύπτει το ακόλουθο σύνολο εξισώσεων:

$$\begin{aligned}
\nabla_x L_\mu = & \nabla f(x) - \nabla_g(x)^T \lambda + \nabla h(x)^T \lambda_h + \lambda_x - \mu \cdot (x - x^-)^{-1} e = 0 \\
\nabla_{s_h} L_\mu = & \lambda_h + \lambda_{sh} - \mu_h^{-1} \cdot e = 0 \\
\nabla_{s_{sh}} L_\mu = & \lambda_{sh} - \mu \cdot s_{sh}^{-1} \cdot e = 0 \\
\nabla_{s_x} L_\mu = & \lambda_x - \mu \cdot s_x^{-1} \cdot e = 0 \\
\nabla_\lambda L_\mu = & -g(x) \\
\nabla_{\lambda_{sh}} L_\mu = & h(x) + s_h - h^+ \\
\nabla_{\lambda_x} L_\mu = & x + s_x - x^+ \\
\nabla_{\lambda_h} L_\mu = & s_h + s_{sh} - h^+ + h^-
\end{aligned} \tag{19}$$

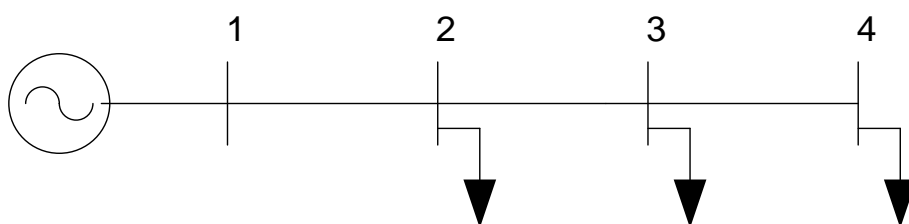
Το σύνολο των μη γραμμικών εξισώσεων (19) λύνεται με επαναληπτικές διαδικασίες με τη μέθοδο Newton, ενώ η τιμή της παραμέτρου  $\mu$  προσαρμόζεται έτσι ώστε να τείνει προς μηδενικές τιμές καθώς ο αλγόριθμος συγκλίνει στη βέλτιστη λύση του.

Τα τελευταία χρόνια έχουν προταθεί 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 BPF, και έτσι έχει επεκταθεί κατά μεγάλο βάθος η δυνατότητα χρήσης της μεθόδου εσωτερικού σημείου για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων [29].

Στη συνέχεια παρουσιάζεται μία απλή εφαρμογή του υβριδικού αλγορίθμου PCLONALG σε συνδυασμό με τη βέλτιστη ροή φορτίου, με σκοπό την τοποθέτηση μίας και δύο αντίστοιχα μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε ένα δίκτυο τεσσάρων ζυγών.

## 2.5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΖΥΓΩΝ

Θεωρείται το δίκτυο των 4 ζυγών το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα 2.7. Στο ζυγό 1 βρίσκεται ο υποσταθμός ΥΤ/ΜΤ και έτσι θεωρείται ζυγός ταλάντωσης. Δηλαδή, σε αυτό το ζυγό δεν μπορεί να συνδεθεί μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής. Οι υπόλοιποι ζυγοί του συστήματος είναι ζυγοί φορτίου και τα δεδομένα του δικτύου απεικονίζονται στον Πίνακα 2.2. Για το συγκεκριμένο δίκτυο, η βασική ισχύς θεωρείται ίση με  $S_{BASE}=0,1MVA$ , ενώ η βασική τάση ισούται με  $V_{BASE}=11kV$ .



Σχήμα 2.7: Μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου 4 ζυγών.

Γραμμή	Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	R (α.μ)	X(α.μ)	P ζυγού άφιξης (α.μ)	Q ζυγού άφιξης(α.μ)
1	1	2	0,000907	0,000888	5	4
2	2	3	0,001209	0,001176	3	2
3	3	4	0,000604	0,000592	7	6
Σύνολο					15	12

Πίνακας 2.2: Δεδομένα δικτύου 4 ζυγών

### 2.5.1 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΙΑΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ 4 ΖΥΓΩΝ

Στο παραπάνω δίκτυο πρόκειται να συνδεθεί μια μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής και ζητείται να βρεθεί ποιος είναι ο βέλτιστος ζυγός στον οποίο θα συνδεθεί, καθώς και ποια θα πρέπει να είναι η βέλτιστη ονομαστική ισχύς της.

Ο κάθε επενδυτής μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής υποχρεούται να καταβάλει στο διαχειριστή του δικτύου διανομής 3.927\$/year για κάθε kW διεσπαρμένης παραγωγής που

εγκαθίσταται στο δίκτυο, έτσι ώστε να δικαιολογείται η χρήση του δικτύου από την μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής, αλλά και να καλύπτονται έξοδα από πιθανές βελτιώσεις που μπορεί να χρειαστεί το δίκτυο, λόγω της εγκατάστασης των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.

Ο κανονισμός θέτει επίσης ένα όριο απωλειών ενεργού ισχύος, το οποίο είναι ίσο με τις απώλειες του δικτύου χωρίς διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής. Αν οι απώλειες μειωθούν κάτω από αυτό το όριο, τότε υπάρχει μία επιβράβευση της τάξης των 79.2\$/MWh για κάθε MW απωλειών που μειώνεται. Αντιθέτως, αν οι απώλειες αυξηθούν σε σχέση με αυτό το όριο, ο διαχειριστής είναι υποχρεωμένος να πληρώσει ένα πρόστιμο, το οποίο είναι ίσο με 79.2\$/MWh για κάθε MW απωλειών που αυξάνεται.

Επομένως η αντικειμενική συνάρτηση, της οποίας την ελάχιστη τιμή αναζητά ο υβριδικός αλγόριθμος είναι η παρακάτω:

$$F = -c_g \cdot P_{DG} - c_L \cdot (P_{LOSSES}^{withoutDG} - P_{LOSSES}^{withDG})$$
, όπου  $P_{DG}$  η ισχύς εξόδου της γεννήτριας διεσπαρμένης παραγωγής,  $P_{LOSSES}^{withoutDG}$  οι απώλειες του δικτύου πριν τη διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής,  $P_{LOSSES}^{withDG}$  οι απώλειες του δικτύου μετά τη διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής και  $c_g$ ,  $c_L$  οι δύο προαναφερθέντες συντελεστές τροποποιημένοι κατάλληλα ώστε να συμφωνούν και οι δύο με τις μονάδες του προβλήματος. Παρά το γεγονός ότι οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης που θα ληφθούν θα είναι αρνητικοί αριθμοί, αυτοί θα απεικονίζονται ως θετικοί αριθμοί, λαμβάνοντας υπόψη τη φυσική τους σημασία, καθώς οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε \$/h. Ουσιαστικά ζητείται η εύρεση της μέγιστης τιμής της  $-F$  [30].

Για το δίκτυο που εξετάζεται, θα πρέπει τα μέτρα των τάσεων σε κάθε ζυγό να μην ξεπερνάνε το  $\pm 6\%$  της ονομαστικής τιμής της τάσης, οι γωνίες να κυμαίνονται μεταξύ  $-360^\circ$  και  $360^\circ$ , ενώ τα θερμικά όρια των γραμμών θεωρούνται ίσα με 3MVA. Θεωρείται επίσης ότι η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής έχει έναν σταθερό συντελεστή ισχύος ο οποίος είναι ίσος με 0.9 επαγωγικός, ενώ κάθε KW διεσπαρμένης παραγωγής έχει ένα κόστος ίσο με \$1650. Τέλος, το διαθέσιμο κεφάλαιο για την επένδυση είναι \$825000 και η μέγιστη επιτρεπτή διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής πρέπει να είναι μικρότερη από το 40% του φορτίου.

Το πρόβλημα επιλύθηκε με τον υβριδικό αλγόριθμο PCLONALG και τα βήματα επίλυσης περιγράφονται παρακάτω.

### 2.5.1.1 Αρχικοποίηση Πληθυσμού

Το πρώτο βήμα ήταν η δημιουργία ενός τυχαίου αρχικού πληθυσμού, ο οποίος αποτελούνταν από 10 αντισώματα και ο υπολογισμός της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε ένα από αυτά. Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζεται αυτός ο πληθυσμός.



Αντίσωμα	Ζυγός Τοποθέτησης ΜΔΠ	Τιμή Αντικειμενικής Συνάρτησης (\$/h)
1	3	3,1709
2	2	2,1243
3	2	2,1243
4	2	2,1243
5	2	2,1243
6	3	3,1709
7	3	3,1709
8	2	2,1243
9	4	3,5019
10	2	2,1243

**Πίνακας 2.3:** Αρχικός Πληθυσμός

### 2.5.1.2 Ανανέωση Ταχύτητας και Θέσης των Αντισωμάτων

Στη συνέχεια τα αντισώματα ταξινομούνται κατά αύξουσα σειρά και επιλέγονται τα μισά τα οποία πέτυχαν τις καλύτερες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης. Έπειτα για τον καινούργιο πληθυσμό, ανανεώνεται η ταχύτητα και η θέση των αντισωμάτων και υπολογίζεται για ακόμα μία φορά η τιμή της αντικειμενικής τους συνάρτησης. Στον Πίνακα 2.4 παρουσιάζεται η θέση και η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης των αντισωμάτων μετά την παραπάνω διαδικασία.

Αντίσωμα	Ζυγός Τοποθέτησης ΜΔΠ	Τιμή Αντικειμενικής Συνάρτησης (\$/h)
1	4	3,5019
2	4	3,5019
3	4	3,5019
4	4	3,5019
5	4	3,5019

**Πίνακας 2.4:** Αποτελέσματα νέου πληθυσμού

### 2.5.1.3 Κλωνοποίηση Αντισωμάτων

Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει την ταξινόμηση για ακόμα μία φορά των αντισωμάτων και την κλωνοποίησή τους ανάλογα με την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης την οποία πέτυχαν. Στη συνέχεια υπολογίζεται η αντικειμενική συνάρτηση των κλώνων. Η σταθερά b,

από την οποία εξαρτάται ο αριθμός των κλώνων που θα παραχθεί, επιλέχθηκε ίση με 0.05, ενώ η εξαιρετικά μικρή τιμή της δικαιολογείται από την απλότητα του προβλήματος. Στον Πίνακα 2.5 παρουσιάζεται η θέση και η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης των κλώνων.

Αντίσωμα	Ζυγός Τοποθέτησης ΜΔΠ	Τιμή Αντικειμενικής Συνάρτησης (\$/h)
1	4	3,5019
2	4	3,5019
3	4	3,5019
4	4	3,5019
5	4	3,5019
6	4	3,5019
7	4	3,5019
8	4	3,5019
9	4	3,5019
10	4	3,5019
11	4	3,5019
12	4	3,5019

**Πίνακας 2.5:** Αποτελέσματα κλωνοποιημένων αντισωμάτων

#### **2.5.1.4 Υπερμετάλλαξη Αντισωμάτων**

Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει τον τελεστή της υπερμετάλλαξης στον οποίον υπόκεινται τα αντισώματα. Η τιμή του b1 επιλέχθηκε ίση με 1000. Στον Πίνακα 2.6 παρουσιάζονται τα νέα αντισώματα και η τιμή της αντικειμενικής τους συνάρτησης.

Αντίσωμα	Ζυγός Τοποθέτησης ΜΔΠ	Τιμή Αντικειμενικής Συνάρτησης (\$/h)
1	4	3,5019
2	4	3,5019
3	4	3,5019
4	4	3,5019
5	4	3,5019
6	4	3,5019
7	4	3,5019
8	4	3,5019

9	4	3,5019
10	4	3,5019
11	3	3,1709
12	3	3,1709

**Πίνακας 2.6:** Αντισώματα που έχουν υποστεί υπερμετάλλαξη

### 2.5.1.5 Ανανέωση Πληθυσμού

Στη συνέχεια παράγονται καινούργια αντισώματα τα οποία αντικαθιστούν τα χειρότερα που έχουν προκύψει. Συγκεκριμένα, παράγονται  $N/10$  νέα αντισώματα, όπου  $N$  ο αριθμός του αρχικού πληθυσμού. Δηλαδή στο συγκεκριμένο πρόβλημα θα παραχθεί ένα μόνο νέο αντίσωμα. Ο νέος πληθυσμός, δηλαδή ο πληθυσμός με ενσωματωμένα τα νέα αντισώματα, παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.7.

Αντίσωμα	Ζυγός Τοποθέτησης ΜΔΠ	Τιμή Αντικειμενικής Συνάρτησης (\$/h)
1	4	3,5019
2	4	3,5019
3	4	3,5019
4	4	3,5019
5	4	3,5019
6	4	3,5019
7	4	3,5019
8	4	3,5019
9	4	3,5019
10	2	2,1243

**Πίνακας 2.7:** Νέος Πληθυσμός

Τέλος αφού γίνει μία ακόμα ταξινόμηση και ανανεωθούν η βέλτιστη θέση και τιμή αντικειμενικής συνάρτησης του πληθυσμού, η διαδικασία ξεκινάει ακόμα μία φορά από το βήμα της ανανέωσης της ταχύτητας και της θέσης των αντισωμάτων. Η διαδικασία θα τερματιστεί είτε μετά από 300 επαναλήψεις είτε εάν επί 50 συνεχόμενες επαναλήψεις η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που επιτυγχάνεται διαφέρει από την αμέσως προηγούμενη λιγότερο από 0.01. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα τα κριτήρια τερματισμού θα μπορούσαν να είναι λιγότερα αυστηρά, εξαιτίας της απλής φύσης του προβλήματος.

### 2.5.1.6 Αποτελέσματα

Στον Πίνακα 2.8 παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα.

Βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης	4
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ	0.5
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου πριν τη σύνδεση της ΜΔΠ	0.065
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου μετά τη σύνδεση της ΜΔΠ	0.0236
Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος (%)	63.692
Χρηματικό κίνητρο (\$/h) σύνδεσης ΜΔΠ	0.22267
Χρηματικό κίνητρο (\$/h) μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος	3.27888
Συνολικό χρηματικό κίνητρο (\$/h)-Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	3.5019

**Πίνακας 2.8:** Αποτελέσματα για εγκατάσταση μίας ΜΔΠ στο δίκτυο 4 ζυγών

### 2.5.2 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΥΟ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ 4 ΖΥΓΩΝ

Στη συνέχεια επιλύεται το πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης δύο μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο των τεσσάρων ζυγών. Τα δεδομένα του προβλήματος είναι ακριβώς τα ίδια με αυτά της τοποθέτησης μιας μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, με εξαίρεση το συνολικό διαθέσιμο κεφάλαιο για την επένδυση, το οποίο σε αυτήν την περίπτωση είναι ίσο με 1650000\$ και τη συνολική επιτρεπόμενη διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο, η οποία σε αυτήν την περίπτωση θα πρέπει να είναι μικρότερη από το 60% του φορτίου.

Η μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι σε αυτήν την περίπτωση η παρακάτω:

$$F = -c_g \cdot \left[ \sum_{i=1}^2 (P_{DG,i}) \right] - c_L \cdot (P_{LOSSES}^{withoutDG} - P_{LOSSES}^{withDG}),$$

όπου  $P_{DG,i}$  η ονομαστική ισχύς

εξόδου κάθε γεννήτριας διεσπαρμένης παραγωγής.

Το πρόβλημα επιλύθηκε με τη χρήση του υβριδικού αλγορίθμου PCLONALG και τα βήματα είναι ακριβώς τα ίδια με αυτά που περιγράφηκαν για την τοποθέτηση της μίας μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο. Στον Πίνακα 2.9, παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα.

Πρώτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Α)	3
Δεύτερος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Β)	4
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Α	0.1108
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Β	0.7891

Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου πριν τη σύνδεση των ΜΔΠ	0.065
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου μετά τη σύνδεση των ΜΔΠ	0.0097
Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος (%)	85.077
Χρηματικό κίνητρο (\$/h) σύνδεσης ΜΔΠ	0.44534
Χρηματικό κίνητρο (\$/h) μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος	4.37976
Συνολικό χρηματικό κίνητρο (\$/h)-Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	4.825

**Πίνακας 2.9:** Αποτελέσματα για εγκατάσταση δύο ΜΔΠ στο δίκτυο 4 ζυγών

### 2.5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ίδιου προβλήματος, όταν αυτό επιλύεται με τη μέθοδο των γενετικών αλγορίθμων. Ο Πίνακας 2.10 περιλαμβάνει τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά τη διείσδυση μίας ΜΔΠ, ενώ ο Πίνακας 2.11 συνοψίζει τα αποτελέσματα που προκύπτουν μετά την εγκατάσταση δύο ΜΔΠ στο δίκτυο των 4 ζυγών [31].

Βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης	4
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ	0.5
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου πριν τη σύνδεση της ΜΔΠ	0.065
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου μετά τη σύνδεση της ΜΔΠ	0.024
Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος (%)	63.1
Χρηματικό κίνητρο (\$/h) σύνδεσης ΜΔΠ	0.236
Χρηματικό κίνητρο (\$/h) μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος	3.247
Συνολικό χρηματικό κίνητρο (\$/h)-Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	3.483

**Πίνακας 2.10:** Αποτελέσματα με χρήση γενετικού αλγορίθμου για εγκατάσταση μίας ΜΔΠ στο δίκτυο 4 ζυγών [31]

<i>Πρώτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Α)</i>	3
<i>Δεύτερος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Β)</i>	4
<i>Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Α</i>	0.103
<i>Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Β</i>	0.797
<i>Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου πριν τη σύνδεση των ΜΔΠ</i>	0.065
<i>Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου μετά τη σύνδεση των ΜΔΠ</i>	0.010
<i>Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος (%)</i>	84.6
<i>Χρηματικό κίνητρο (\$/h) σύνδεσης ΜΔΠ</i>	0.424
<i>Χρηματικό κίνητρο (\$/h) μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος</i>	4.356
<i>Συνολικό χρηματικό κίνητρο (\$/h)-Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης</i>	4.780

**Πίνακας 2.10:** Αποτελέσματα με χρήση γενετικού αλγορίθμου για εγκατάσταση δύο ΜΔΠ στο δίκτυο 4 ζυγών [31]

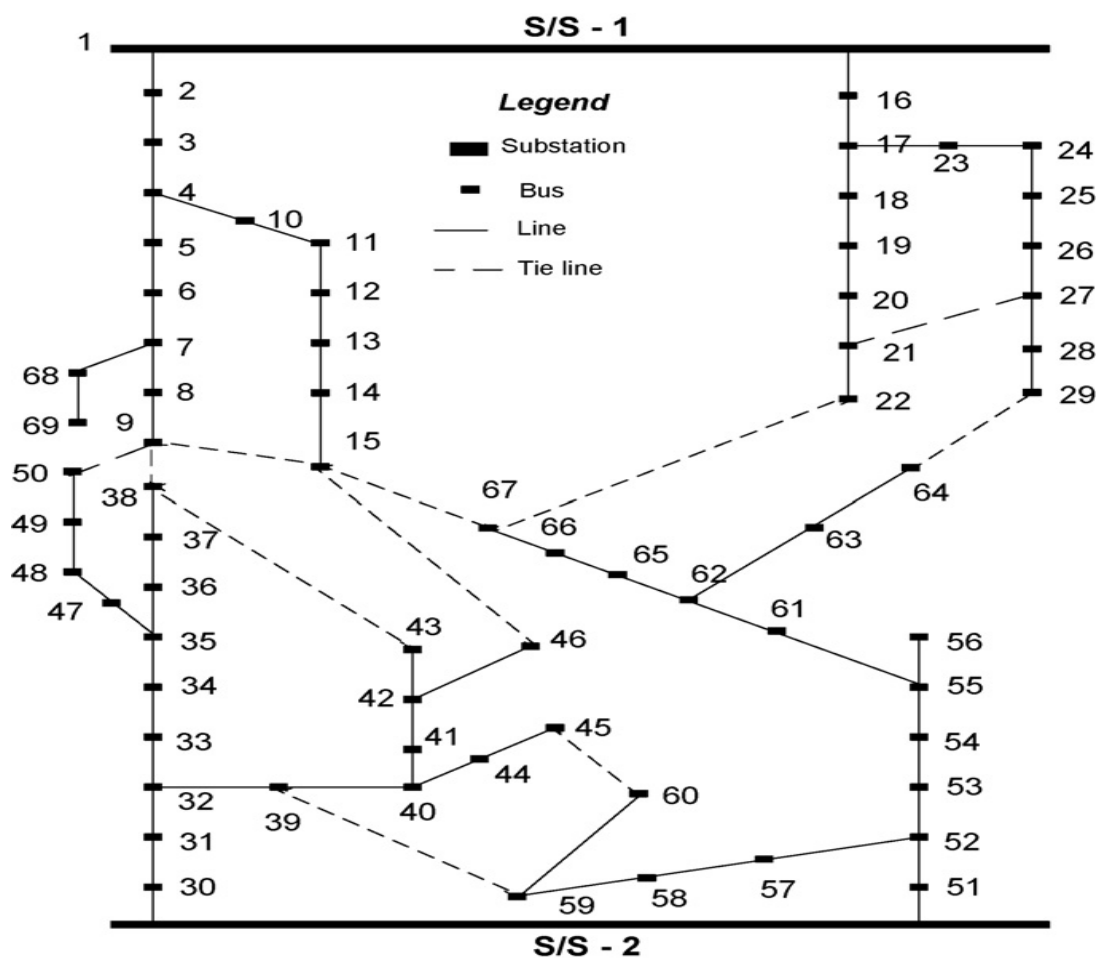
Όπως φαίνεται τα αποτελέσματα με τις δύο μεθόδους είναι παρόμοια, διότι επιλέγονται οι ίδιοι ζυγοί τοποθέτησης, ενώ ελάχιστη διαφορά παρατηρείται στη διαστασιολόγηση κατά μέγεθος των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής που εγκαθίστανται στο δίκτυο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

### 3.1 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΕΧΝΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ

#### 3.1.1 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΙΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΙ ΤΟ ΠΡΟΦΙΛ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ

Θεωρείται το δίκτυο διανομής το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1. Το συγκεκριμένο δίκτυο διαθέτει δύο υποσταθμούς ΥΤ/ΜΤ, τέσσερις ζυγούς τροφοδοσίας, 69 ζυγούς και 78 κλάδους. Η βασική του ισχύς ισούται με 0.1ΜΝΑ, ενώ η βασική του τάση είναι ίση με 11kV. Ο ζυγός 1 θεωρείται ζυγός ταλάντωσης, άρα δεν μπορεί να συνδεθεί μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής σε αυτόν το ζυγό, ενώ όλοι οι υπόλοιποι ζυγοί, χαρακτηρίζονται ως ζυγοί φορτίου. Στον Πίνακα 3.1 που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα δεδομένα του δικτύου.



Σχήμα 3.1: Ακτινικό δίκτυο διανομής 69 ζυγών [28]

Γραμμή	Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	R (α.μ)	Χ(α.μ)	P ζυγού άφιξης (α.μ)	Q ζυγού άφιξης(α.μ)
1	1	2	0,000907	0,000888	0,1	0,09
2	2	3	0,001209	0,001183	0,06	0,04
3	3	4	0,000604	0,000592	0,15	0,13
4	4	5	0,000302	0,000296	0,075	0,05
5	5	6	0,001511	0,001479	0,015	0,009
6	6	7	0,000907	0,000888	0,018	0,014
7	7	8	0,000604	0,000592	0,013	0,01
8	8	9	0,000604	0,000592	0,016	0,011
9	4	10	0,000893	0,000607	0,02	0,01
10	10	11	0,001339	0,00091	0,016	0,009
11	11	12	0,000893	0,000607	0,05	0,04
12	12	13	0,001116	0,000758	0,105	0,09
13	13	14	0,000669	0,000455	0,025	0,015
14	14	15	0,001607	0,001092	0,04	0,025
15	7	68	0,000893	0,000607	0,1	0,06
16	68	69	0,001339	0,00091	0,04	0,03
17	1	16	0,000907	0,000888	0,06	0,03
18	16	17	0,000302	0,000296	0,04	0,025
19	17	18	0,001209	0,001183	0,015	0,009
20	18	19	0,000755	0,00074	0,013	0,007
21	19	20	0,000664	0,00065	0,03	0,02
22	20	21	0,000936	0,000917	0,09	0,05
23	21	22	0,000393	0,000384	0,05	0,03
24	17	23	0,00183	0,001244	0,06	0,04
25	23	24	0,001339	0,000917	0,1	0,08
26	24	25	0,000893	0,000607	0,08	0,065
27	25	26	0,000446	0,000303	0,1	0,06
28	26	27	0,000446	0,000303	0,1	0,055
29	27	28	0,000893	0,000607	0,12	0,07
30	28	29	0,000893	0,000607	0,105	0,07
31	1	30	0,000302	0,000296	0,08	0,05
32	30	31	0,000604	0,000592	0,06	0,04
33	31	32	0,000604	0,000592	0,013	0,008
34	32	33	0,000664	0,00065	0,016	0,009
35	33	34	0,000967	0,000946	0,05	0,03
36	34	35	0,000635	0,000621	0,04	0,028
37	35	36	0,000604	0,000592	0,06	0,04
38	36	37	0,000907	0,000888	0,04	0,03
39	37	38	0,001209	0,001183	0,03	0,025



40	32	39	0,000893	0,000607	0,15	0,1
41	39	40	0,000446	0,000303	0,06	0,035
42	40	41	0,000893	0,000607	0,12	0,07
43	41	42	0,001517	0,001031	0,09	0,06
44	42	43	0,001071	0,000728	0,018	0,01
45	40	44	0,000982	0,000667	0,016	0,01
46	44	45	0,000446	0,000303	0,1	0,05
47	42	46	0,000893	0,000607	0,06	0,04
48	35	47	0,000446	0,000303	0,09	0,07
49	47	48	0,000893	0,000607	0,085	0,055
50	48	49	0,000893	0,000607	0,1	0,07
51	49	50	0,000893	0,000607	0,14	0,09
52	1	51	0,000302	0,000296	0,06	0,04
53	51	52	0,001209	0,001183	0,02	0,011
54	52	53	0,001209	0,001183	0,04	0,03
55	53	54	0,000755	0,00074	0,036	0,024
56	54	55	0,000907	0,000888	0,03	0,02
57	55	56	0,000907	0,000888	0,043	0,03
58	52	57	0,000223	0,000151	0,08	0,05
59	57	58	0,000223	0,000151	0,24	0,12
60	58	59	0,000669	0,000455	0,125	0,11
61	59	60	0,001071	0,000728	0,025	0,01
62	55	61	0,000982	0,000667	0,01	0,005
63	61	62	0,000982	0,000667	0,15	0,13
64	62	63	0,000669	0,000455	0,05	0,03
65	63	64	0,001339	0,00091	0,03	0,02
66	62	65	0,000893	0,000607	0,13	0,12
67	65	66	0,000446	0,000303	0,15	0,13
68	66	67	0,000893	0,000607	0,025	0,015

**Πίνακας 3.1:** Δεδομένα δικτύου 69 ζυγών [28]

### ***3.1.1.1 Τοποθέτηση μιας μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής***

Στο παραπάνω δίκτυο πρόκειται να συνδεθεί μία μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής και ζητείται να βρεθεί ποιος είναι ο βέλτιστος ζυγός στον οποίο θα συνδεθεί η μονάδα, καθώς και ποια θα πρέπει να είναι η βέλτιστη ονομαστική ισχύς εξόδου αυτής.

Σκοπός είναι, με την τοποθέτηση της ΜΔΠ, να επιτευχθεί ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου καθώς και βελτίωση του προφίλ της τάσης του δικτύου.

Δηλαδή, η επένδυση έχει στόχο να αποφέρει τεχνικά οφέλη στο δίκτυο και όσο το δυνατόν μικρότερη καταπόνηση αυτού. Επομένως, επιχειρείται η ελαχιστοποίηση του λόγου των απωλειών ενεργού ισχύος μετά τη διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής προς τις απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου πριν την εγκατάσταση της ΜΔΠ, καθώς και η ελαχιστοποίηση του λόγου της απόκλισης της τάσης των ζυγών του δικτύου από μία τάση αναφοράς, μετά τη διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής, προς την 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, δηλαδή του ζυγού 1, με αποτέλεσμα τη μείωση της πτώσης τάσης κατά μήκος των γραμμών του δικτύου. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η αντικειμενική συνάρτηση, λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

$$F = k_v \cdot f_v + k_p \cdot f_p \Leftrightarrow F = k_v \cdot \frac{P_{LOSSES}^{withDG}}{P_{LOSSES}^{withoutDG}} + k_p \cdot \frac{\sum_{i=1}^{69} |V_i - V_{i,ref}|}{\sum_{i=1}^{69} |V_{i,noDG} - V_{i,ref}|}$$

Οι παράμετροι  $k_v$  και  $k_p$  αποτελούν δύο συντελεστές βαρύτητας, οι οποίοι καθορίζουν το πόσο μεγάλη σημασία δίνεται στην ελαχιστοποίηση των απωλειών ή στη διακύμανση της τάσης των ζυγών, και ποιος από τους δύο αυτούς παράγοντες έχει μεγαλύτερη βαρύτητα στο εκάστοτε πρόβλημα [11]. Το άθροισμα των δύο αυτών παραμέτρων είναι ίσο με τη μονάδα. Δηλαδή ισχύει η σχέση:  $k_v + k_p = 1$

Για το δίκτυο που εξετάζεται, θα πρέπει τα μέτρα των τάσεων σε κάθε ζυγό να μην ξεπερνάνε το  $\pm 6\%$  της ονομαστικής τιμής της τάσης, οι γωνίες να κυμαίνονται μεταξύ  $-360^\circ$  και  $360^\circ$ , ενώ τα θερμικά όρια των γραμμών θεωρούνται ίσα με 3MVA. Θεωρείται επίσης ότι η ΜΔΠ έχει έναν σταθερό συντελεστή ισχύος ο οποίος είναι ίσος με 0.9 επαγωγικός.

Το πρόβλημα επιλύθηκε με τη χρήση του υβριδικού αλγορίθμου PCLONALG. Ο αλγόριθμος τερματίζεται είτε μετά από 300 επαναλήψεις είτε εάν επί 50 συνεχόμενες φορές η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που επιτυγχάνεται διαφέρει με την αμέσως προηγούμενη τιμή λιγότερο από 0.01. Τα τελικά αποτελέσματα του αλγορίθμου παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2.

Βέλτιστος Ζυγός Εγκατάστασης	62
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ	0.8254
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου πριν τη σύνδεση της ΜΔΠ	0.228
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου μετά τη σύνδεση της ΜΔΠ	0.1421
Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος (%)	376.754
Βέλτιστη Τιμή Αντικειμενικής Συνάρτησης	0.4711

**Πίνακας 3.2:** Αποτελέσματα για τοποθέτηση μίας ΜΔΠ στο δίκτυο 69 ζυγών

Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης χρησιμοποιήθηκαν 30 αντισώματα, ενώ οι τιμές των παραμέτρων ορίστηκαν ως  $c_1=c_2=2.5$ ,  $b=0.1$  και  $b_1=800$ .

### 3.1.1.2 Τοποθέτηση τριών μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής

Στη συνέχεια επιλύεται το πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης τριών μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο των 69 ζυγών. Τα δεδομένα του προβλήματος είναι ακριβώς τα ίδια με αυτά της τοποθέτησης μιας μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, όπως ίδια παραμένει και η μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης.

Το πρόβλημα επιλύθηκε με τη χρήση του υβριδικού αλγορίθμου PCLONALG και στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα.

Πρώτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Α)	25
Δεύτερος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Β)	35
Τρίτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Γ)	61
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Α	0.7373
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Β	0.9892
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Γ	0.8961
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου πριν τη σύνδεση των ΜΔΠ	0.228
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου μετά τη σύνδεση των ΜΔΠ	0.0659
Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος (%)	71,0965
Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	0.2276

**Πίνακας 3.3:** Αποτελέσματα για τοποθέτηση τριών ΜΔΠ στο δίκτυο 69 ζυγών

Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης χρησιμοποιήθηκαν 30 αντισώματα, ενώ οι τιμές των παραμέτρων ορίστηκαν ως  $c_1=c_2=2.5$ ,  $b=2.5$  και  $b_1=1000$ .

### 3.1.1.3 Τοποθέτηση πέντε μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής

Στη συνέχεια βρίσκεται η λύση του προβλήματος της βέλτιστης τοποθέτησης πέντε μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο των 69 ζυγών. Τα δεδομένα του προβλήματος παραμένουν τα ίδια με τις προηγούμενες περιπτώσεις, όπως ίδια παραμένει και η μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης. Το πρόβλημα επιλύθηκε και αυτή τη φορά με τη χρήση του υβριδικού αλγορίθμου PCLONALG, ενώ ο Πίνακας 3.4 περιλαμβάνει τα τελικά αποτελέσματα.

Πρώτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Α)	10
Δεύτερος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Β)	25
Τρίτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Γ)	37
Τέταρτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Δ)	41
Πέμπτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Ε)	65
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Α	0.7138
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Β	0.739
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Γ	0.5544
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Δ	0.6427
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Ε	0.785
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου πριν τη σύνδεση των ΜΔΠ	0.228
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου μετά τη σύνδεση των ΜΔΠ	0.0354
Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος (%)	84.47
Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	0.1223

**Πίνακας 3.4:** Αποτελέσματα για τοποθέτηση πέντε ΜΔΠ στο δίκτυο 69 ζυγών

Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης χρησιμοποιήθηκαν 30 αντισώματα, ενώ οι τιμές των παραμέτρων ορίστηκαν ως  $c_1=c_2=2.5$ ,  $b=5.5$  και  $b_1=1000$ .

### 3.1.2 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΙΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΙ ΤΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ

Θεωρείται το δίκτυο των 69 ζυγών το οποίο περιγράφηκε παραπάνω. Στο Διάγραμμα 3.1 παρουσιάζεται η καμπύλη φορτίου για το συγκεκριμένο δίκτυο.



**Διάγραμμα 3.1:** Ημερήσια Καμπύλη Φορτίου

Στον Πίνακα 3.5 παρουσιάζονται η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της τάσης κάθε ζυγού, οι οποίες αντιστοιχούν στο ελάχιστο και στο μέγιστο στιγμιότυπο του δικτύου, όπως και η διακύμανση της τάσης κάθε ζυγού, η οποία προκύπτει από τη σχέση:

$$\delta V = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2} \cdot 100\% \text{ ενώ πρέπει για κάθε ζυγό να ισχύει: } \delta V \leq 3\%$$

Ζυγός	Μέγιστη Τάση $V_{\max}$ (α.μ)	Ελάχιστη Τάση $V_{\min}$ (α.μ)	Διακύμανση Τάσεως (%)
1	1,06	1,06	0
2	1,0497	1,047	0,135
3	1,0377	1,0319	0,29
4	1,0321	1,0249	0,36
5	1,0311	1,0235	0,38
6	1,0271	1,0186	0,425
7	1,0249	1,0158	0,455
8	1,0247	1,0155	0,46
9	1,0246	1,0153	0,465
10	1,0295	1,0215	0,4
11	1,0257	1,0168	0,445
12	1,0234	1,0138	0,48
13	1,0211	1,011	0,505
14	1,0206	1,0103	0,515
15	1,0199	1,0094	0,525
16	1,0489	1,046	0,145
17	1,0454	1,0416	0,19
18	1,0425	1,038	0,225

19	1,0409	1,0359	0,25
20	1,0395	1,0342	0,265
21	1,0379	1,0322	0,285
22	1,0377	1,0319	0,29
23	1,0316	1,0241	0,375
24	1,0223	1,0123	0,5
25	1,0172	1,0059	0,565
26	1,0151	1,0032	0,595
27	1,0135	1,0012	0,615
28	1,0112	0,9983	0,645
29	1,0101	0,997	0,655
30	1,0545	1,053	0,075
31	1,0441	1,0399	0,21
32	1,0342	1,0273	0,345
33	1,0284	1,0201	0,415
34	1,0203	1,0098	0,525
35	1,0153	1,0035	0,59
36	1,0143	1,0022	0,605
37	1,0134	1,001	0,62
38	1,0129	1,0004	0,625
39	1,0281	1,0197	0,42
40	1,0258	1,0168	0,45
41	1,023	1,0132	0,49
42	1,0201	1,0096	0,525
43	1,0199	1,0093	0,53
44	1,0246	1,0153	0,465
45	1,0242	1,0147	0,475
46	1,0195	1,0088	0,535
47	1,0132	1,0008	0,62
48	1,0099	0,9966	0,665
49	1,0074	0,9934	0,7
50	1,006	0,9916	0,72
51	1,0549	1,0536	0,065
52	1,0356	1,0291	0,325
53	1,0236	1,0138	0,49
54	1,0165	1,0048	0,585
55	1,0084	0,9945	0,695
56	1,0079	0,9939	0,7
57	1,0344	1,0276	0,34
58	1,0335	1,0264	0,355
59	1,0323	1,0249	0,37
60	1,032	1,0246	0,37
61	1,0017	0,986	0,785
62	0,9951	0,9775	0,88
63	0,9945	0,9767	0,89

64	0,994	0,9761	0,895
65	0,9916	0,9731	0,925
66	0,9906	0,9718	0,94
67	0,9903	0,9715	0,94
68	1,0235	1,014	0,475
69	1,0229	1,0132	0,485

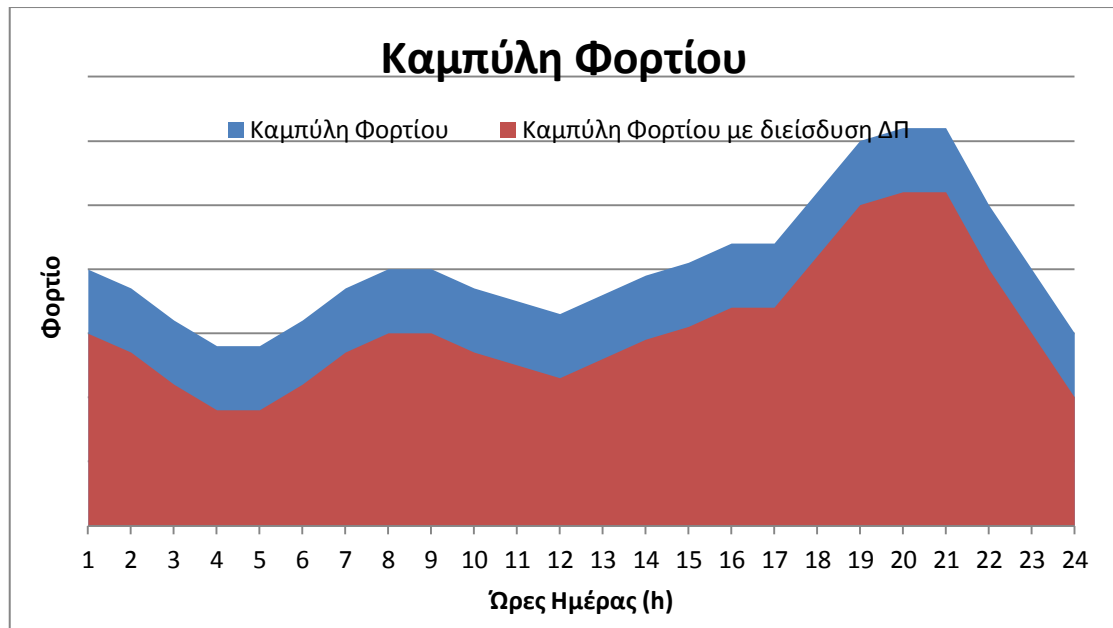
**Πίνακας 3.5:** Μέγιστη, ελάχιστη τάση και διακύμανση τάσης ζυγών

Όπως φαίνεται η διακύμανση της τάσης είναι αρκετά μικρότερη από τα ανεκτά όρια για κάθε ζυγό του δικτύου.

### **3.1.2.1 Τοποθέτηση μίας μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής**

Στο παραπάνω δίκτυο των 69 ζυγών πρόκειται να συνδεθεί μια μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής, και ζητείται να βρεθεί ποιος είναι ο βέλτιστος ζυγός στον οποίο θα συνδεθεί, καθώς και ποια θα πρέπει να είναι η βέλτιστη ονομαστική ισχύς αυτής. Σε αυτήν την περίπτωση ο σκοπός είναι, με την τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, να επιτευχθεί ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου, καθώς και ελαχιστοποίηση της διακύμανσης της τάσεως. Δηλαδή και σε αυτό το πρόβλημα, τα κριτήρια με τα οποία θα τοποθετηθεί η γεννήτρια διεσπαρμένης παραγωγής είναι τεχνικά, με τη διαφορά ότι επιχειρείται να ελαχιστοποιηθούν εκτός από τις απώλειες, και οι διακυμάνσεις της τάσης των διαφόρων ζυγών του δικτύου.

Στο Διάγραμμα 3.2 απεικονίζεται ποιοτικά ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται η καμπύλη φορτίου, μετά τη διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής.



**Διάγραμμα 3.2:** Ποιοτική μεταβολή ημερήσιας καμπύλης φορτίου λόγω της διείσδυσης ΔΠ

Επομένως, αρχικά επιχειρείται η ελαχιστοποίηση του λόγου των απωλειών ενεργού ισχύος μετα τη διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής προς τις απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου πριν την τοποθέτηση της ΜΔΠ. Παράλληλα επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση της διακύμανσης της τάσης, δηλαδή του λόγου του  $\Delta V_{\text{after}} = \left( \frac{V_{\text{max}} - V_{\text{min}}}{2} \right)$ , μετά τη διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής προς το  $\Delta V_{\text{before}} = \left( \frac{V_{\text{max}} - V_{\text{min}}}{2} \right)$ , πριν τη διείσδυση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής. Δηλαδή η αντικειμενική συνάρτηση, η ελαχιστοποίηση της οποίας επιδιώκεται, έχει την παρακάτω μορφή:

$$F = k_1 \cdot \frac{[P_{\text{LOSSES}}^{(1)} + P_{\text{LOSSES}}^{(2)}]_{\text{withDG}}}{[P_{\text{LOSSES}}^{(1)} + P_{\text{LOSSES}}^{(2)}]_{\text{withoutDG}}} + k_2 \cdot \frac{[\sum_{i=1}^{69} |V_{\text{bus},i}^{(1)} - V_{\text{bus},i}^{(2)}|]_{\text{withDG}}}{[\sum_{i=1}^{69} |V_{\text{bus},i}^{(1)} - V_{\text{bus},i}^{(2)}|]_{\text{withoutDG}}}, \text{ όπου}$$

$P_{\text{LOSSES}}^{(1)}$  και  $P_{\text{LOSSES}}^{(2)}$  οι απώλειες του δικτύου στο στιγμιότυπο της ελάχιστης και της μέγιστης ζήτησης αντίστοιχα, και  $V_{\text{bus},i}^{(1)}$ ,  $V_{\text{bus},i}^{(2)}$  οι τάσεις κάθε ζυγού του δικτύου στα αντίστοιχα στιγμιότυπα. Επομένως οι τάσεις  $V_{\text{bus},i}^{(1)}$  αντιστοιχούν στις μέγιστες τάσεις των ζυγών, ενώ οι τάσεις  $V_{\text{bus},i}^{(2)}$  αντιστοιχούν στις ελάχιστες τάσεις των ζυγών.

Για το δίκτυο που εξετάζεται, θα πρέπει τα μέτρα των τάσεων σε κάθε ζυγό να μην ξεπερνάνε το  $\pm 6\%$  της ονομαστικής τιμής της τάσης, οι γωνίες να κυμαίνονται μεταξύ  $-360^\circ$  και  $360^\circ$ , ενώ τα θερμικά όρια των γραμμών θεωρούνται ίσα με 3MVA. Θεωρείται επίσης ότι η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής έχει έναν σταθερό συντελεστή ισχύος ο οποίος



είναι ίσος με 0.9 επαγωγικός. Δηλαδή, ισχύουν ακριβώς οι ίδιοι περιορισμοί με το πρόβλημα της ενότητας 3.1.1

Το πρόβλημα επιλύθηκε με τη βοήθεια του υβριδικού αλγορίθμου PCLONALG και τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 3.6 που ακολουθεί.

<i>Βέλτιστος Ζυγός Εγκατάστασης</i>	62
<i>Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ</i>	0.6503
<i>Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW) και στα δύο στιγμιότυπα πριν την εγκατάσταση της ΜΔΠ</i>	0.324
<i>Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW) και στα δύο στιγμιότυπα μετά την εγκατάσταση της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Α</i>	0.2338
<i>Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος (%)</i>	27.84
<i>Βέλτιστη Τιμή Αντικειμενικής Συνάρτησης</i>	0.8455

**Πίνακας 3.6:** Αποτελέσματα για τοποθέτηση μίας ΜΔΠ

Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης χρησιμοποιήθηκαν 30 αντισώματα, ενώ οι τιμές των παραμέτρων ορίστηκαν ως  $c1=c2=2.5$ ,  $b=0.1$  και  $b1=800$ .

Στον Πίνακα 3.7 που ακολουθεί παρουσιάζεται η μέγιστη και η ελάχιστη τάση κάθε ζυγού του δικτύου, οι οποίες αντιστοιχούν στο ελάχιστο και στο μέγιστο στιγμιότυπο του δικτύου, καθώς και η διακύμανση της τάσης κάθε ζυγού.

<i>Ζυγός</i>	<i>Μέγιστη Τάση <math>V_{max}</math> (α.μ)</i>	<i>Ελάχιστη Τάση <math>V_{min}</math> (α.μ)</i>	<i>Διακύμανση Τάσεως (%)</i>
1	1,06	1,06	0
2	1,0497	1,047	0,135
3	1,0377	1,0319	0,29
4	1,0321	1,0249	0,36
5	1,0311	1,0235	0,38
6	1,0271	1,0186	0,425
7	1,0249	1,0158	0,455
8	1,0247	1,0155	0,46
9	1,0246	1,0153	0,465
10	1,0295	1,0215	0,4
11	1,0257	1,0168	0,445
12	1,0234	1,0138	0,48
13	1,0211	1,011	0,505
14	1,0206	1,0103	0,515

15	1,0199	1,0094	0,525
16	1,0489	1,046	0,145
17	1,0454	1,0416	0,19
18	1,0425	1,038	0,225
19	1,0409	1,0359	0,25
20	1,0395	1,0342	0,265
21	1,0379	1,0322	0,285
22	1,0377	1,0319	0,29
23	1,0316	1,0241	0,375
24	1,0223	1,0123	0,5
25	1,0172	1,0059	0,565
26	1,0151	1,0032	0,595
27	1,0135	1,0012	0,615
28	1,0112	0,9983	0,645
29	1,0101	0,997	0,655
30	1,0545	1,053	0,075
31	1,0441	1,0399	0,21
32	1,0342	1,0273	0,345
33	1,0284	1,0201	0,415
34	1,0203	1,0098	0,525
35	1,0153	1,0035	0,59
36	1,0143	1,0022	0,605
37	1,0134	1,001	0,62
38	1,0129	1,0004	0,625
39	1,0281	1,0197	0,42
40	1,0258	1,0168	0,45
41	1,023	1,0132	0,49
42	1,0201	1,0096	0,525
43	1,0199	1,0093	0,53
44	1,0246	1,0153	0,465
45	1,0242	1,0147	0,475
46	1,0195	1,0088	0,535
47	1,0132	1,0008	0,62
48	1,0099	0,9966	0,665
49	1,0074	0,9934	0,7
50	1,006	0,9916	0,72
51	1,0579	1,0566	0,065
52	1,0502	1,0442	0,3
53	1,0498	1,0409	0,445
54	1,05	1,0394	0,53
55	1,0506	1,038	0,625
56	1,0501	1,0374	0,63
57	1,0491	1,0428	0,315
58	1,0481	1,0416	0,325
59	1,047	1,0401	0,34

60	1,0467	1,0398	0,345
61	1,0523	1,0381	0,705
62	1,0541	1,0383	0,785
63	1,0535	1,0376	0,79
64	1,053	1,037	0,8
65	1,0508	1,0342	0,825
66	1,0498	1,033	0,84
67	1,0496	1,0237	0,845
68	1,0235	1,014	0,475
69	1,0229	1,0132	0,485

**Πίνακας 3.7:** Μέγιστη, ελάχιστη τάση και διακύμανση τάσης ζυγών μετά την εγκατάσταση μίας ΜΔΠ

### 3.1.2.2 Τοποθέτηση τριών μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής

Στη συνέχεια, επιλύεται το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης τριών μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο παραπάνω δίκτυο, με τα δεδομένα του προβλήματος να παραμένουν τα ίδια, όπως και η μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης. Αντίστοιχα όμως με το προηγούμενο πρόβλημα, αυτό της βέλτιστης εγκατάστασης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής με κριτήριο το προφίλ της τάσης, καθώς αυξάνεται η πολυπλοκότητα του προβλήματος αυξάνεται και η τιμή της παραμέτρου κλωνοποίησης. Το πρόβλημα επιλύθηκε με τη χρήση του υβριδικού αλγορίθμου PCLONALG και ο Πίνακας 3.8 περιλαμβάνει τα τελικά αποτελέσματα.

Πρώτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Α)	27
Δεύτερος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Β)	35
Τρίτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Γ)	62
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Α	0.5165
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Β	0.7471
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Γ	0.6400
Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW) και στα δύο στιγμιότυπα πριν τη σύνδεση των ΜΔΠ	0.324
Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW) και στα δύο στιγμιότυπα μετά τη σύνδεση των ΜΔΠ	0.1088
Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος (%)	66.42
Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	0.6388

**Πίνακας 3.8:** Αποτελέσματα για τοποθέτηση τριών ΜΔΠ

Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης χρησιμοποιήθηκαν 30 αντισώματα, ενώ οι τιμές των παραμέτρων ορίστηκαν ως  $c_1=c_2=2.5$ ,  $b=3.5$  και  $b_1=1000$ .

Ο Πίνακας 3.9 που ακολουθεί περιλαμβάνει τη μέγιστη και την ελάχιστη τάση, καθώς και τη διακύμανση της τάσης κάθε ζυγού του δικτύου.

Ζυγός	Μέγιστη Τάση $V_{max}$ (α.μ)	Ελάχιστη Τάση $V_{min}$ (α.μ)	Διακύμανση Τάσεως (%)
1	1,06	1,06	0
2	1,0497	1,047	0,135
3	1,0377	1,0319	0,29
4	1,0321	1,0249	0,36
5	1,0311	1,0235	0,38
6	1,0271	1,0186	0,425
7	1,0249	1,0158	0,455
8	1,0247	1,0155	0,46
9	1,0246	1,0153	0,465
10	1,0295	1,0215	0,4
11	1,0257	1,0168	0,445
12	1,0234	1,0138	0,48
13	1,0211	1,011	0,505
14	1,0206	1,0103	0,515
15	1,0199	1,0094	0,525
16	1,0558	1,053	0,14
17	1,0546	1,051	0,18
18	1,0517	1,0474	0,215
19	1,05	1,0453	0,235
20	1,0487	1,0436	0,255
21	1,0471	1,0416	0,275
22	1,0469	1,0413	0,28
23	1,0531	1,0461	0,35
24	1,0529	1,0436	0,465
25	1,0538	1,0433	0,525
26	1,0547	1,0437	0,55
27	1,0561	1,0446	0,575
28	1,0539	1,0419	0,6
29	1,0528	1,0406	0,61
30	1,0578	1,0564	0,07
31	1,054	1,05	0,2
32	1,0506	1,0442	0,32
33	1,0521	1,0442	0,395
34	1,0543	1,0445	0,49
35	1,0562	1,0452	0,55

36	1,0552	1,0439	0,565
37	1,0543	1,0428	0,575
38	1,0538	1,0422	0,58
39	1,0447	1,0367	0,4
40	1,0424	1,0338	0,43
41	1,0396	1,0303	0,465
42	1,0368	1,0267	0,505
43	1,0366	1,0264	0,51
44	1,0412	1,0324	0,44
45	1,0408	1,0318	0,45
46	1,0362	1,0259	0,515
47	1,0541	1,0426	0,575
48	1,0509	1,0385	0,62
49	1,0485	1,0355	0,65
50	1,0472	1,0338	0,67
51	1,0578	1,0566	0,06
52	1,05	1,044	0,3
53	1,0495	1,0405	0,45
54	1,0495	1,0389	0,53
55	1,05	1,0374	0,63
56	1,0495	1,0368	0,635
57	1,0489	1,0426	0,315
58	1,0479	1,0414	0,325
59	1,0468	1,0399	0,345
60	1,0465	1,0396	0,345
61	1,0516	1,0374	0,71
62	1,0532	1,0375	0,785
63	1,0527	1,0367	0,8
64	1,0522	1,0362	0,8
65	1,0499	1,0333	0,83
66	1,049	1,0321	0,845
67	1,0488	1,0318	0,85
68	1,0235	1,014	0,475
69	1,0229	1,0132	0,485

**Πίνακας 3.9:** Μέγιστη, ελάχιστη τάση ζυγών και διακύμανση τάσης μετά την εγκατάσταση τριών ΜΔΠ

### 3.1.2.3 Τοποθέτηση πέντε μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής

Έπειτα, βρίσκεται η λύση του προβλήματος της βέλτιστης διαστασιολόγησης, κατά μέγεθος και κατά θέση, πέντε μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Τα δεδομένα του προβλήματος παραμένουν τα ίδια με τις προηγούμενες περιπτώσεις, όπως ίδια παραμένει

και η μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης. Αυτό που τροποποιείται για ακόμα μία φορά είναι η παράμετρος της κλωνοποίησης, η οποία και αυξάνεται. Το πρόβλημα επιλύθηκε όπως και πριν με τη χρήση του υβριδικού αλγορίθμου PCLONALG και στον Πίνακα 3.10 συνοψίζονται τα τελικά αποτελέσματα.

<i>Πρώτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Α)</i>	6
<i>Δεύτερος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Β)</i>	25
<i>Τρίτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Γ)</i>	41
<i>Τέταρτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Δ)</i>	47
<i>Πέμπτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Ε)</i>	62
<i>Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Α</i>	0.4667
<i>Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Β</i>	0.5747
<i>Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Γ</i>	0.4373
<i>Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Δ</i>	0.5541
<i>Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Ε</i>	0.6594
<i>Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW) και στα δύο στιγμιότυπα πριν τη σύνδεση των ΜΔΠ</i>	0.324
<i>Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW) και στα δύο στιγμιότυπα μετά τη σύνδεση των ΜΔΠ</i>	0.0589
<i>Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος (%)</i>	81.82
<i>Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης</i>	0.555

**Πίνακας 3.10:** Αποτελέσματα για εγκατάσταση πέντε μονάδων DG στο δίκτυο 69 ζυγών

Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης χρησιμοποιήθηκαν 30 αντισώματα, ενώ οι τιμές των παραμέτρων ορίστηκαν ως  $c1=c2=2.5$ ,  $b=7$  και  $b1=1500$ .

Στον Πίνακα 3.11 εμπεριέχεται η μέγιστη και η ελάχιστη τάση, καθώς και η διακύμανση της τάσης κάθε ζυγού του δικτύου.

<i>Ζυγός</i>	<i>Μέγιστη Τάση <math>V_{max}</math> (α.μ)</i>	<i>Ελάχιστη Τάση <math>V_{min}</math> (α.μ)</i>	<i>Διακύμανση Τάσεως (%)</i>
1	1,06	1,06	0
2	1,0558	1,0532	0,13
3	1,0518	1,0463	0,275
4	1,0503	1,0434	0,345
5	1,0513	1,044	0,365

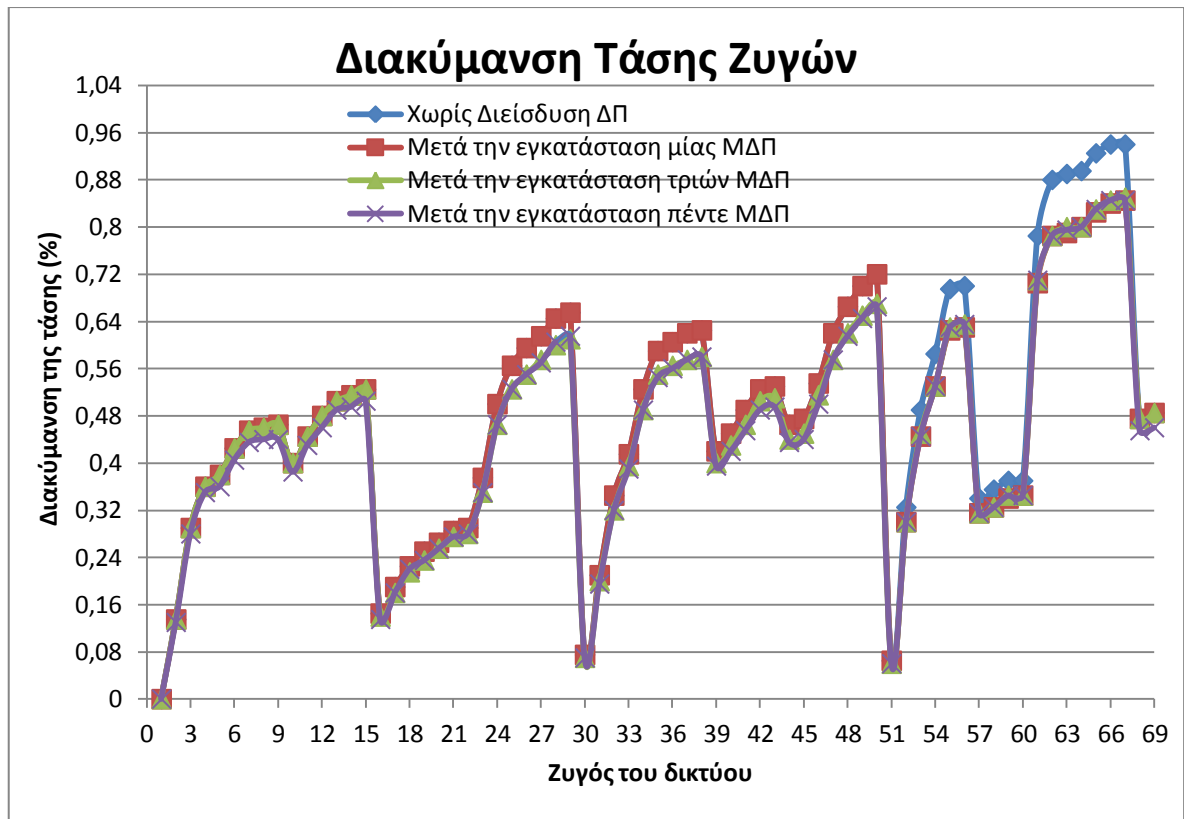
6	1,0572	1,0491	0,405
7	1,0551	1,0464	0,435
8	1,0549	1,0461	0,44
9	1,0548	1,046	0,44
10	1,0477	1,0401	0,38
11	1,044	1,0354	0,43
12	1,0417	1,0325	0,46
13	1,0395	1,0297	0,49
14	1,039	1,0291	0,495
15	1,0383	1,0282	0,505
16	1,056	1,0533	0,135
17	1,0549	1,0513	0,18
18	1,052	1,0477	0,215
19	1,0503	1,0456	0,235
20	1,049	1,0439	0,255
21	1,0474	1,0419	0,275
22	1,0472	1,0416	0,28
23	1,0537	1,0468	0,345
24	1,0538	1,0446	0,46
25	1,0549	1,0445	0,52
26	1,0559	1,0449	0,55
27	1,0573	1,046	0,565
28	1,0552	1,0433	0,595
29	1,0541	1,042	0,605
30	1,059	1,0577	0,065
31	1,0577	1,0538	0,195
32	1,0568	1,0505	0,315
33	1,0552	1,0474	0,39
34	1,053	1,0432	0,49
35	1,0519	1,041	0,545
36	1,0509	1,0397	0,56
37	1,05	1,0386	0,57
38	1,0495	1,038	0,575
39	1,0578	1,05	0,39
40	1,0556	1,0472	0,42
41	1,0528	1,0437	0,455
42	1,05	1,0402	0,49
43	1,0498	1,0399	0,495
44	1,0545	1,0458	0,435
45	1,054	1,0452	0,44
46	1,0494	1,0394	0,5
47	1,0522	1,0407	0,575
48	1,0537	1,0414	0,615
49	1,056	1,0432	0,64
50	1,0547	1,0415	0,66

51	1,0581	1,0568	0,065
52	1,0512	1,0452	0,3
53	1,0517	1,0427	0,45
54	1,0523	1,0417	0,53
55	1,0535	1,041	0,625
56	1,053	1,0403	0,635
57	1,0501	1,0438	0,315
58	1,0492	1,0426	0,33
59	1,048	1,0411	0,345
60	1,0477	1,0408	0,345
61	1,0558	1,0417	0,705
62	1,0496	1,0337	0,795
63	1,049	1,0329	0,805
64	1,0485	1,0324	0,805
65	1,0462	1,0295	0,835
66	1,0453	1,0283	0,85
67	1,0451	1,028	0,855
68	1,0537	1,0447	0,45
69	1,0531	1,0439	0,46

**Πίνακας 3.11:** Μέγιστη, ελάχιστη τάση ζυγών και διακύμανση τάσης μετά την εγκατάσταση πέντε ΜΔΠ

Στο Διάγραμμα 3.3 απεικονίζεται η διακύμανση της τάσης κάθε ζυγού του δικτύου, όταν δεν παρουσιάζεται διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής, αλλά και όταν εγκαθίστανται μία, τρεις και πέντε μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο.

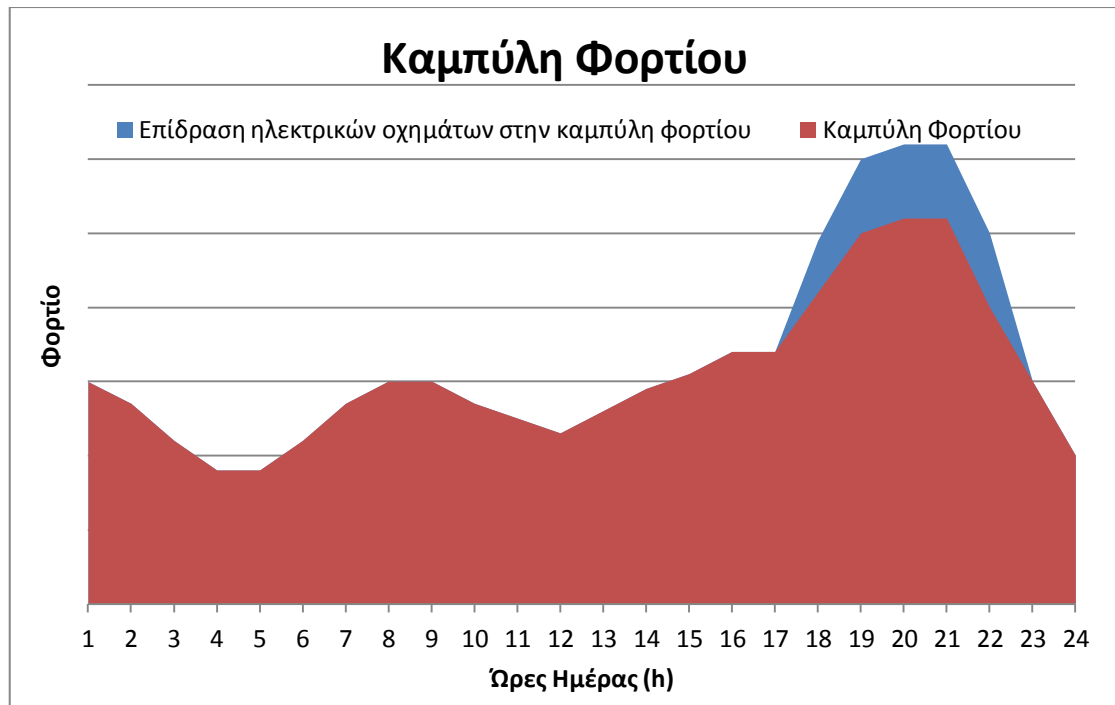




**Διάγραμμα 3.3:** Διακύμανση της τάσης κάθε ζυγού, χωρίς διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής και μετά την εγκατάσταση μίας, τριών και πέντε ΜΔΠ

### 3.1.2.4 Διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο

Θεωρείται ότι στο δίκτυο των 69 ζυγών που περιγράφηκε παραπάνω, παρουσιάζεται διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων, σε ποσοστό ίσο με το 30% του φορτίου, τα οποία φορτίζονται μη ελεγχόμενα. Στο Διάγραμμα 3.4 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η καμπύλη φορτίου του δικτύου, θεωρώντας τη χειρότερη δυνατή περίπτωση, δηλαδή την περίπτωση όπου όλα τα οχήματα φορτίζονται κατά τη διάρκεια του φορτίου αιχμής, με αποτέλεσμα την απότομη αύξηση αυτού.



**Διάγραμμα 3.4:** Μεταβολή καμπύλης φορτίου εξαιτίας της διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων

Στον Πίνακα 3.12 που ακολουθεί παρουσιάζεται η μέγιστη και η ελάχιστη τάση, όπως και η διακύμανση της τάσης κάθε ζυγού του δικτύου.

Ζυγός	Μέγιστη Τάση $V_{max}$ (α.μ)	Ελάχιστη Τάση $V_{min}$ (α.μ)	Διακύμανση Τάσεως (%)
1	1,06	1,06	0
2	1,0497	1,0429	0,34
3	1,0377	1,023	0,735
4	1,0321	1,0138	0,915
5	1,0311	1,012	0,955
6	1,0271	1,0054	1,085
7	1,0249	1,0018	1,155
8	1,0247	1,0014	1,165
9	1,0246	1,0012	1,17
10	1,0295	1,0093	1,01
11	1,0257	1,003	1,135
12	1,0234	0,9991	1,215
13	1,0211	0,9954	1,285
14	1,0206	0,9946	1,3
15	1,0199	0,9934	1,325
16	1,0489	1,0416	0,365
17	1,0454	1,0358	0,48

18	1,0425	1,031	0,575
19	1,0409	1,0282	0,635
20	1,0395	1,026	0,675
21	1,0379	1,0234	0,725
22	1,0377	1,023	0,735
23	1,0316	1,0125	0,955
24	1,0223	0,997	1,265
25	1,0172	0,9884	1,44
26	1,0151	0,9849	1,51
27	1,0135	0,9822	1,565
28	1,0112	0,9784	1,64
29	1,0101	0,9766	1,675
30	1,0545	1,0508	0,185
31	1,0441	1,0334	0,535
32	1,0342	1,0168	0,87
33	1,0284	1,0072	1,06
34	1,0203	0,9935	1,34
35	1,0153	0,9852	1,505
36	1,0143	0,9834	1,545
37	1,0134	0,9819	1,575
38	1,0129	0,981	1,595
39	1,0281	1,0067	1,07
40	1,0258	1,0029	1,145
41	1,023	0,9981	1,245
42	1,0201	0,9933	1,34
43	1,0199	0,993	1,345
44	1,0246	1,0009	1,185
45	1,0242	1,0002	1,2
46	1,0195	0,9923	1,36
47	1,0132	0,9816	1,58
48	1,0099	0,9759	1,7
49	1,0074	0,9718	1,78
50	1,006	0,9694	1,83
51	1,0549	1,0515	0,17
52	1,0356	1,0189	0,835
53	1,0236	0,9985	1,255
54	1,0165	0,9865	1,5
55	1,0084	0,9727	1,785
56	1,0079	0,9719	1,8
57	1,0344	1,017	0,87
58	1,0335	1,0154	0,905
59	1,0323	1,0135	0,94
60	1,032	1,013	0,95
61	1,0017	0,9613	2,02
62	0,9951	0,95	2,255

63	0,9945	0,9489	2,28
64	0,994	0,9481	2,295
65	0,9916	0,944	2,38
66	0,9906	0,9423	2,415
67	0,9903	0,9419	2,42
68	1,0235	0,9994	1,205
69	1,0229	0,9984	1,225

**Πίνακας 3.12** Μέγιστη, ελάχιστη τάση ζυγών και διακύμανση τάσης μετά τη διείδυση των ηλεκτρικών οχημάτων

#### 3.1.2.4.1 Τοποθέτηση μίας μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής

Σε αυτό το δίκτυο πρόκειται να συνδεθεί μια μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής, και ζητείται να βρεθεί ποιος είναι ο βέλτιστος ζυγός στον οποίο θα συνδεθεί, καθώς και ποια θα πρέπει να είναι η βέλτιστη ονομαστική ισχύς εξόδου αυτής. Με την τοποθέτηση της ΜΔΠ ζητείται να επιτευχθεί ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου, καθώς και ελαχιστοποίηση της διακύμανσης της τάσεως. Επιπλέον, οι περιορισμοί του προβλήματος παραμένουν οι ίδιοι. Επομένως, το πρόβλημα παραμένει ίδιο με την προηγούμενη περίπτωση, όπως ίδια παραμένει και η μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης, με τη διαφορά όμως ότι το στιγμιότυπο στην περίπτωση του φορτίου αιχμής έχει αλλάξει εξαιτίας της μη ελεγχόμενης φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων που διείδυσαν στο δίκτυο.

Το πρόβλημα επιλύθηκε με τη χρήση του υβριδικού αλγορίθμου PCLONALG και στον Πίνακα 3.13 συνοψίζονται τα τελικά αποτελέσματα.

<i>Βέλτιστος Ζυγός Εγκατάστασης</i>	62
<i>Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ</i>	0.6527
<i>Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW) και στα δύο στιγμιότυπα πριν την εγκατάσταση της ΜΔΠ</i>	0.475
<i>Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW) και στα δύο στιγμιότυπα μετά την εγκατάσταση της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Α</i>	0.3517
<i>Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος (%)</i>	25.958
<i>Βέλτιστη Τιμή Αντικειμενικής Συνάρτησης</i>	0.854

**Πίνακας 3.13:** Αποτελέσματα για τοποθέτηση μίας ΜΔΠ

Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης χρησιμοποιήθηκαν 30 αντισώματα, ενώ οι τιμές των παραμέτρων ορίστηκαν ως  $c_1=c_2=2.5$ ,  $b=0.1$  και  $b_1=800$ .

Στον Πίνακα 3.14 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή, καθώς και η διακύμανση της τάσης για κάθε ζυγό του δικτύου μετά την εγκατάσταση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.

Ζυγός	Μέγιστη Τάση $V_{max}$ (α.μ)	Ελάχιστη Τάση $V_{min}$ (α.μ)	Διακύμανση Τάσεως (%)
1	1,06	1,06	0
2	1,0497	1,0429	0,34
3	1,0377	1,023	0,735
4	1,0321	1,0138	0,915
5	1,0311	1,012	0,955
6	1,0271	1,0054	1,085
7	1,0249	1,0018	1,155
8	1,0247	1,0014	1,165
9	1,0246	1,0012	1,17
10	1,0295	1,0093	1,01
11	1,0257	1,003	1,135
12	1,0234	0,9991	1,215
13	1,0211	0,9954	1,285
14	1,0206	0,9946	1,3
15	1,0199	0,9934	1,325
16	1,0489	1,0416	0,365
17	1,0454	1,0358	0,48
18	1,0425	1,031	0,575
19	1,0409	1,0282	0,635
20	1,0395	1,026	0,675
21	1,0379	1,0234	0,725
22	1,0377	1,023	0,735
23	1,0316	1,0125	0,955
24	1,0223	0,997	1,265
25	1,0172	0,9884	1,44
26	1,0151	0,9849	1,51
27	1,0135	0,9822	1,565
28	1,0112	0,9784	1,64
29	1,0101	0,9766	1,675
30	1,0545	1,0508	0,185
31	1,0441	1,0334	0,535
32	1,0342	1,0168	0,87
33	1,0284	1,0072	1,06
34	1,0203	0,9935	1,34

35	1,0153	0,9852	1,505
36	1,0143	0,9834	1,545
37	1,0134	0,9819	1,575
38	1,0129	0,981	1,595
39	1,0281	1,0067	1,07
40	1,0258	1,0029	1,145
41	1,023	0,9981	1,245
42	1,0201	0,9933	1,34
43	1,0199	0,993	1,345
44	1,0246	1,0009	1,185
45	1,0242	1,0002	1,2
46	1,0195	0,9923	1,36
47	1,0132	0,9816	1,58
48	1,0099	0,9759	1,7
49	1,0074	0,9718	1,78
50	1,006	0,9694	1,83
51	1,0579	1,0547	0,16
52	1,0503	1,035	0,765
53	1,0499	1,0273	1,13
54	1,0501	1,0231	1,35
55	1,0507	1,0188	1,595
56	1,0502	1,0179	1,615
57	1,0491	1,0331	0,8
58	1,0482	1,0316	0,83
59	1,047	1,0296	0,87
60	1,0467	1,0292	0,875
61	1,0524	1,0164	1,8
62	1,0543	1,0142	2,005
63	1,0537	1,0132	2,025
64	1,0533	1,0125	2,04
65	1,051	1,0086	2,12
66	1,05	1,007	2,15
67	1,0498	1,0066	2,16
68	1,0235	0,9994	1,205
69	1,0229	0,9984	1,225

**Πίνακας 3.14** Μέγιστη,ελάχιστη τάση και διακύμανση τάσης ζυγών μετά την εγκατάσταση μίας ΜΔΠ

#### 3.1.2.4.2 Τοποθέτηση τριών μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής

Στη συνέχεια επιλύεται το πρόβλημα της εγκατάστασης τριών μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο των 69 ζυγών, μετά τη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων. Τα

δεδομένα και οι περιορισμοί του προβλήματος παραμένουν ίδια με προηγουμένως. Έγινε χρήση για ακόμα μία φορά του υβριδικού αλγορίθμου PCLONALG και στον Πίνακα 3.15 συνοψίζονται τα τελικά αποτελέσματα της προσομοίωσης.

<i>Πρώτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Α)</i>	26
<i>Δεύτερος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Β)</i>	35
<i>Τρίτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Γ)</i>	62
<i>Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Α</i>	0.5373
<i>Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Β</i>	0.7504
<i>Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Γ</i>	0.6414
<i>Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW) και στα δύο στιγμιότυπα πριν τη σύνδεση των ΜΔΠ</i>	0.475
<i>Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW) και στα δύο στιγμιότυπα μετά τη σύνδεση των ΜΔΠ</i>	0.1846
<i>Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος (%)</i>	61.137
<i>Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης</i>	0.6620

**Πίνακας 3.15:** Αποτελέσματα για την τοποθέτηση τριών ΜΔΠ

Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης χρησιμοποιήθηκαν 30 αντισώματα, ενώ οι τιμές των παραμέτρων ορίστηκαν ως  $c1=c2=2.5$ ,  $b=3.5$  και  $b1=1500$ .

Στον Πίνακα 3.16 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η μέγιστη και η ελάχιστη τάση, όπως και η διακύμανση της τάσης κάθε ζυγού του δικτύου μετά την εγκατάσταση των τριών μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής

<i>Ζυγός</i>	<i>Μέγιστη Τάση <math>V_{max}</math> (α.μ)</i>	<i>Ελάχιστη Τάση <math>V_{min}</math> (α.μ)</i>	<i>Διακύμανση Τάσεως (%)</i>
1	1,06	1,06	0
2	1,0497	1,0429	0,34
3	1,0377	1,023	0,735
4	1,0321	1,0138	0,915
5	1,0311	1,012	0,955
6	1,0271	1,0054	1,085
7	1,0249	1,0018	1,155
8	1,0247	1,0014	1,165
9	1,0246	1,0012	1,17
10	1,0295	1,0093	1,01

11	1,0257	1,003	1,135
12	1,0234	0,9991	1,215
13	1,0211	0,9954	1,285
14	1,0206	0,9946	1,3
15	1,0199	0,9934	1,325
16	1,056	1,0491	0,345
17	1,0549	1,0458	0,455
18	1,0521	1,0411	0,55
19	1,0504	1,0384	0,6
20	1,049	1,0361	0,645
21	1,0475	1,0335	0,7
22	1,0472	1,0332	0,7
23	1,0539	1,0362	0,885
24	1,0541	1,0306	1,175
25	1,0552	1,0286	1,33
26	1,0562	1,0283	1,395
27	1,0547	1,0257	1,45
28	1,0525	1,0221	1,52
29	1,0515	1,0204	1,555
30	1,0578	1,0543	0,175
31	1,054	1,044	0,5
32	1,0507	1,0344	0,815
33	1,0522	1,0323	0,995
34	1,0545	1,0296	1,245
35	1,0564	1,0285	1,395
36	1,0553	1,0268	1,425
37	1,0545	1,0253	1,46
38	1,054	1,0245	1,475
39	1,0447	1,0245	1,01
40	1,0425	1,0207	1,09
41	1,0397	1,016	1,185
42	1,0368	1,0113	1,275
43	1,0366	1,011	1,28
44	1,0413	1,0188	1,125
45	1,0409	1,018	1,145
46	1,0362	1,0103	1,295
47	1,0543	1,025	1,465
48	1,0511	1,0196	1,575
49	1,0487	1,0156	1,655
50	1,0473	1,0133	1,7
51	1,0578	1,0547	0,155
52	1,05	1,0347	0,765
53	1,0495	1,0268	1,135
54	1,0496	1,0225	1,355
55	1,0501	1,018	1,605



56	1,0496	1,0172	1,62
57	1,0489	1,0329	0,8
58	1,048	1,0313	0,835
59	1,0468	1,0294	0,87
60	1,0465	1,0289	0,88
61	1,0517	1,0155	1,81
62	1,0533	1,0132	2,005
63	1,0528	1,0122	2,03
64	1,0523	1,0115	2,04
65	1,05	1,0076	2,12
66	1,0491	1,006	2,155
67	1,0489	1,0056	2,165
68	1,0235	0,9994	1,205
69	1,0229	0,9984	1,225

**Πίνακας 3.16:** Μέγιστη, ελάχιστη τάση και διακύμανση τάσης για κάθε ζυγό του δικτύου μετά την εγκατάσταση τριών ΜΔΠ

#### 3.1.2.4.3 Τοποθέτηση πέντε μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής

Στη συνέχεια πρόκειται να εγκατασταθούν πέντε μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο των 69 ζυγών, μετά τη διεύθυνση των ηλεκτρικών οχημάτων, και ζητείται να βρεθούν οι βέλτιστοι ζυγοί στους οποίους θα συνδεθούν οι μονάδες, όπως και οι βέλτιστες ισχύες εξόδου αυτών, έτσι ώστε να υπάρξει ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος και της διακύμανσης της τάσης των ζυγών. Έτσι, τα δεδομένα και οι περιορισμοί του προβλήματος παραμένουν ίδια με την προηγούμενη περίπτωση. Το πρόβλημα επιλύθηκε με τη βοήθεια του υβριδικού αλγορίθμου PCLOALG και στον Πίνακα 3.7 συνοψίζονται τα τελικά αποτελέσματα της προσομοίωσης.

<i>Πρώτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Α)</i>	12
<i>Δεύτερος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Β)</i>	27
<i>Τρίτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Γ)</i>	42
<i>Τέταρτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Δ)</i>	50
<i>Πέμπτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Ε)</i>	65
<i>Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Α</i>	0.4215
<i>Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Β</i>	0.5374
<i>Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Γ</i>	0.3966

Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Δ	0.4376
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Ε	0.6180
Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW) και στα δύο στιγμιότυπα πριν τη σύνδεση των ΜΔΠ	0.475
Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW) και στα δύο στιγμιότυπα μετά τη σύνδεση των ΜΔΠ	0.1234
Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος (%)	74.02
Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	0.5914

**Πίνακας 3.17:** Αποτελέσματα για την τοποθέτηση πέντε ΜΔΠ

Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης χρησιμοποιήθηκαν 30 αντισώματα, ενώ οι τιμές των παραμέτρων ορίστηκαν ως  $c1=c2=2.5$ ,  $b=7$  και  $b1=1500$ .

Στον Πίνακα 3.18 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η μέγιστη και η ελάχιστη τάση, όπως και η διακύμανση της τάσης κάθε ζυγού του δικτύου, μετά την εγκατάσταση των πέντε μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.

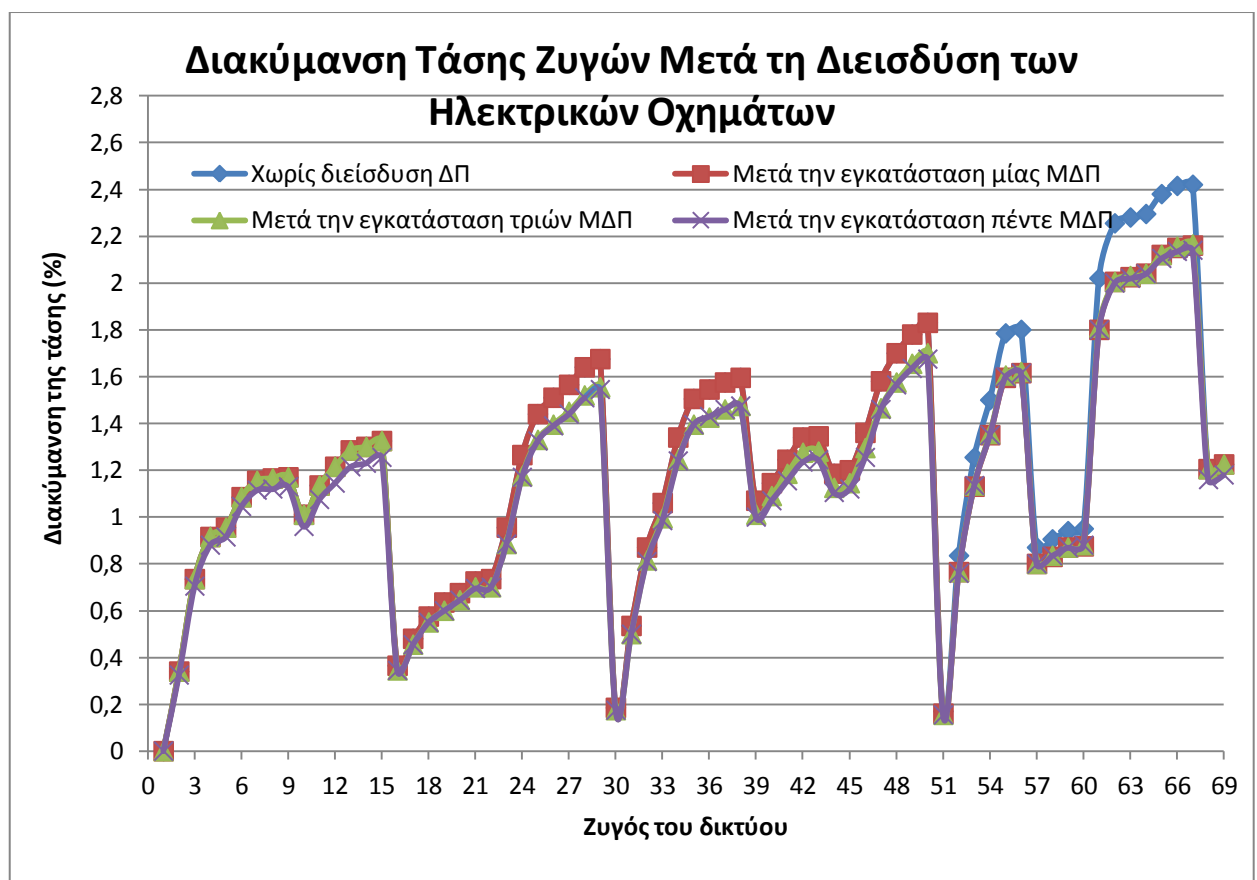
Ζυγός	Μέγιστη Τάση $V_{max}$ (α.μ)	Ελάχιστη Τάση $V_{min}$ (α.μ)	Διακύμανση Τάσεως (%)
1	1,06	1,06	0
2	1,0552	1,0487	0,325
3	1,0506	1,0365	0,705
4	1,0487	1,0311	0,88
5	1,0477	1,0294	0,915
6	1,0438	1,0229	1,045
7	1,0416	1,0193	1,115
8	1,0414	1,019	1,12
9	1,0413	1,0187	1,13
10	1,0508	1,0316	0,96
11	1,0543	1,0328	1,075
12	1,0568	1,0339	1,145
13	1,0546	1,0303	1,215
14	1,0541	1,0295	1,23
15	1,0534	1,0283	1,255
16	1,056	1,0491	0,345
17	1,0549	1,0458	0,455
18	1,0521	1,0411	0,55
19	1,0504	1,0384	0,6
20	1,049	1,0361	0,645
21	1,0475	1,0336	0,695

22	1,0472	1,0332	0,7
23	1,0539	1,0362	0,885
24	1,0541	1,0307	1,17
25	1,0552	1,0287	1,325
26	1,0562	1,0284	1,39
27	1,0577	1,0289	1,44
28	1,0555	1,0253	1,51
29	1,0545	1,0236	1,545
30	1,0582	1,0547	0,175
31	1,0552	1,0452	0,5
32	1,0526	1,0364	0,81
33	1,0511	1,0314	0,985
34	1,0492	1,0244	1,24
35	1,0483	1,0204	1,395
36	1,0473	1,0187	1,43
37	1,0465	1,0173	1,46
38	1,0459	1,0164	1,475
39	1,0512	1,0312	1
40	1,0512	1,0298	1,07
41	1,0528	1,0297	1,155
42	1,0576	1,0329	1,235
43	1,0574	1,0325	1,245
44	1,05	1,0279	1,105
45	1,0495	1,0271	1,12
46	1,057	1,0319	1,255
47	1,0487	1,0195	1,46
48	1,0505	1,0192	1,565
49	1,053	1,0203	1,635
50	1,0566	1,0231	1,675
51	1,0577	1,0546	0,155
52	1,0495	1,0343	0,76
53	1,0486	1,0259	1,135
54	1,0484	1,0214	1,35
55	1,0486	1,0166	1,6
56	1,0481	1,0158	1,615
57	1,0484	1,0324	0,8
58	1,0475	1,0308	0,835
59	1,0463	1,0289	0,87
60	1,046	1,0284	0,88
61	1,0499	1,0139	1,8
62	1,0513	1,0113	2
63	1,0507	1,0103	2,02
64	1,0503	1,0095	2,04
65	1,055	1,0129	2,105
66	1,0541	1,0114	2,135

67	1,0538	1,011	2,14
68	1,0402	1,017	1,16
69	1,0396	1,016	1,18

**Πίνακας 3.18:** Μέγιστη, ελάχιστη τάση και διακύμανση τάσης για κάθε ζυγό του δικτύου μετά την εγκατάσταση πέντε ΜΔΠ

Στο Διάγραμμα 3.5 που ακολουθεί, απεικονίζεται η διακύμανση της τάσης κάθε ζυγού του δικτύου, μετά τη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων, όταν δεν παρουσιάζεται διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής, αλλά και όταν εγκαθίστανται μία, τρεις και πέντε μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής αντίστοιχα.



**Διάγραμμα 3.5:** Διακύμανση της τάσης κάθε ζυγού, χωρίς διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής και μετά την εγκατάσταση μίας, τριών και πέντε ΜΔΠ

### 3.2 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ ΜΕ ΒΑΣΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ

Θεωρείται το δίκτυο διανομής των 69 ζυγών το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1 και στο οποίο οι περιορισμοί παραμένουν ίδιοι με αυτούς που περιγράφηκαν στην ενότητα 3.1.1. Ωστόσο, τα δεδομένα του δικτύου τροποποιούνται, και στον Πίνακα 3.19 που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα νέα δεδομένα αυτού.

Γραμμή	Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	R (α.μ)	Χ(α.μ)	P ζυγού άφιξης (α.μ)	Q ζυγού άφιξης(α.μ )
1	1	2	0,000907	0,000888	0,08	0,072
2	2	3	0,001209	0,001183	0,048	0,032
3	3	4	0,000604	0,000592	0,12	0,104
4	4	5	0,000302	0,000296	0,06	0,04
5	5	6	0,001511	0,001479	0,012	0,0072
6	6	7	0,000907	0,000888	0,0144	0,0112
7	7	8	0,000604	0,000592	0,0104	0,008
8	8	9	0,000604	0,000592	0,0128	0,0088
9	4	10	0,000893	0,000607	0,016	0,008
10	10	11	0,001339	0,00091	0,0128	0,0072
11	11	12	0,000893	0,000607	0,04	0,032
12	12	13	0,001116	0,000758	0,084	0,072
13	13	14	0,000669	0,000455	0,02	0,012
14	14	15	0,001607	0,001092	0,032	0,02
15	7	68	0,000893	0,000607	0,08	0,048
16	68	69	0,001339	0,00091	0,032	0,024
17	1	16	0,000907	0,000888	0,048	0,024
18	16	17	0,000302	0,000296	0,032	0,02
19	17	18	0,001209	0,001183	0,012	0,0072
20	18	19	0,000755	0,00074	0,0104	0,0056
21	19	20	0,000664	0,00065	0,024	0,016
22	20	21	0,000936	0,000917	0,072	0,04
23	21	22	0,000393	0,000384	0,04	0,024
24	17	23	0,00183	0,001244	0,048	0,032
25	23	24	0,001339	0,000917	0,08	0,064
26	24	25	0,000893	0,000607	0,064	0,052
27	25	26	0,000446	0,000303	0,08	0,048
28	26	27	0,000446	0,000303	0,08	0,044
29	27	28	0,000893	0,000607	0,096	0,056
30	28	29	0,000893	0,000607	0,084	0,056
31	1	30	0,000302	0,000296	0,064	0,04
32	30	31	0,000604	0,000592	0,048	0,032

33	31	32	0,000604	0,000592	0,0104	0,0064
34	32	33	0,000664	0,00065	0,0128	0,0072
35	33	34	0,000967	0,000946	0,04	0,024
36	34	35	0,000635	0,000621	0,032	0,0224
37	35	36	0,000604	0,000592	0,048	0,032
38	36	37	0,000907	0,000888	0,032	0,024
39	37	38	0,001209	0,001183	0,024	0,02
40	32	39	0,000893	0,000607	0,12	0,08
41	39	40	0,000446	0,000303	0,048	0,028
42	40	41	0,000893	0,000607	0,096	0,056
43	41	42	0,001517	0,001031	0,072	0,048
44	42	43	0,001071	0,000728	0,0144	0,008
45	40	44	0,000982	0,000667	0,0128	0,008
46	44	45	0,000446	0,000303	0,08	0,04
47	42	46	0,000893	0,000607	0,048	0,032
48	35	47	0,000446	0,000303	0,072	0,056
49	47	48	0,000893	0,000607	0,068	0,044
50	48	49	0,000893	0,000607	0,08	0,056
51	49	50	0,000893	0,000607	0,112	0,072
52	1	51	0,000302	0,000296	0,048	0,032
53	51	52	0,001209	0,001183	0,016	0,0088
54	52	53	0,001209	0,001183	0,032	0,024
55	53	54	0,000755	0,00074	0,0288	0,0192
56	54	55	0,000907	0,000888	0,024	0,016
57	55	56	0,000907	0,000888	0,0344	0,024
58	52	57	0,000223	0,000151	0,064	0,04
59	57	58	0,000223	0,000151	0,192	0,096
60	58	59	0,000669	0,000455	0,1	0,088
61	59	60	0,001071	0,000728	0,02	0,008
62	55	61	0,000982	0,000667	0,008	0,004
63	61	62	0,000982	0,000667	0,12	0,104
64	62	63	0,000669	0,000455	0,04	0,024
65	63	64	0,001339	0,00091	0,024	0,016
66	62	65	0,000893	0,000607	0,104	0,096
67	65	66	0,000446	0,000303	0,12	0,104
68	66	67	0,000893	0,000607	0,02	0,012

**Πίνακας 3.19:** Νέα δεδομένα δικτύου

### 3.2.1. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΙΑΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟ ΝΕΟ ΔΙΚΤΥΟ

Στο δίκτυο που περιγράφηκε παραπάνω, πρόκειται να συνδεθεί μια μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής και ζητείται να βρεθεί ποιος είναι ο βέλτιστος ζυγός στον οποίο θα συνδεθεί, καθώς και ποια θα πρέπει να είναι η βέλτιστη ονομαστική ισχύς εξόδου αυτής.

Ο επενδυτής μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής υποχρεούται να καταβάλει στον διαχειριστή του δικτύου διανομής 2.5€/year για κάθε kW διεσπαρμένης παραγωγής που εγκαθίσταται στο δίκτυο, έτσι ώστε όπως αναφέρθηκε και στο παράδειγμα των 4 ζυγών στο Κεφάλαιο 2, να δικαιολογείται η χρήση του δικτύου από την μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής, αλλά και να καλύπτονται έξοδα από πιθανές βελτιώσεις που μπορεί να χρειαστεί το δίκτυο, εξαιτίας της εγκατάστασης των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Επιπλέον, εάν οι απώλειες μειωθούν κάτω από ένα όριο απωλειών ενεργού ισχύος, τότε υπάρχει μία επιβράβευση της τάξης των 48€/MWh για κάθε MW απωλειών που μειώνεται. Αντιθέτως, αν οι απώλειες αυξηθούν σε σχέση με αυτό το όριο, ο διαχειριστής είναι υποχρεωμένος να πληρώσει ένα πρόστιμο, το οποίο είναι ίσο με 48€/MWh για κάθε MW απωλειών που αυξάνεται.

Έτσι η αντικειμενική συνάρτηση παίρνει την παρακάτω μορφή:

$F = -c_g \cdot P_{DG} - c_L \cdot (P_{LOSSES}^{withoutDG} - P_{LOSSES}^{withDG})$ , όπου  $P_{DG}$  η ισχύς εξόδου της γεννήτριας διεσπαρμένης παραγωγής,  $P_{LOSSES}^{withoutDG}$  οι απώλειες του δικτύου πριν τη διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής,  $P_{LOSSES}^{withDG}$  οι απώλειες του δικτύου μετά τη διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής και  $c_g, c_L$  οι δύο προαναφερθέντες συντελεστές, οι οποίοι εκφράζουν τα κίνητρα για την εγκατάσταση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής και για τη μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος, αντίστοιχα.

Για το δίκτυο που εξετάζεται, θα πρέπει και σε αυτήν την περίπτωση τα μέτρα των τάσεων σε κάθε ζυγό να μην ξεπερνάνε το  $\pm 6\%$  της ονομαστικής τιμής της τάσης, οι γωνίες να κυμαίνονται μεταξύ  $-360^\circ$  και  $360^\circ$ , και τα θερμικά όρια των γραμμών να είναι ίσα με 3MVA. Θεωρείται επίσης ότι ο συντελεστής ισχύος της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής παραμένει ίσος με 0.9 επαγωγικός [30].

Το πρόβλημα επιλύθηκε με τη χρήση του υβριδικού αλγορίθμου PCLONALG και παρακάτω, στον Πίνακα 3.20, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης	62
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ	0.6987
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου πριν τη σύνδεση της ΜΔΠ	0.142
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου μετά τη σύνδεση της ΜΔΠ	0.0891

Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος (%)	37.254
Χρηματικό κίνητρο (€/h) σύνδεσης ΜΔΠ	0.1994
Χρηματικό κίνητρο (€/h) μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος	2.539
Συνολικό χρηματικό κίνητρο (€/h)-Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	2.738

**Πίνακας 3.20:** Αποτελέσματα για τοποθέτηση μίας ΜΔΠ

Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης χρησιμοποιήθηκαν 30 αντισώματα, ενώ οι τιμές των παραμέτρων ορίστηκαν ως  $c_1=c_2=2.5$ ,  $b=0.1$  και  $b_1=900$ .

### 3.2.2 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΡΙΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟ ΝΕΟ ΔΙΚΤΥΟ

Στη συνέχεια επιλύεται το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης τριών μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο. Τα δεδομένα του προβλήματος παραμένουν τα ίδια με την προηγούμενη περίπτωση, ενώ η αντικειμενική συνάρτηση έχει την παρακάτω μορφή:

$$F = -c_g \cdot \left[ \sum_{i=1}^3 (P_{DG,i}) \right] - c_L \cdot (P_{LOSSES}^{withoutDG} - P_{LOSSES}^{withDG}),$$

με τον όρο  $P_{DG,i}$  να αντιστοιχεί

στην ονομαστική ισχύ εξόδου κάθε μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.

Το πρόβλημα επιλύθηκε με τη βοήθεια του υβριδικού αλγορίθμου PCLONALG, και στον Πίνακα 3.21 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Πρώτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Α)	26
Δεύτερος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Β)	39
Τρίτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Γ)	62
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Α	0.6063
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Β	1.003
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Γ	0.7176
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου πριν τη σύνδεση των ΜΔΠ	0.142
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου μετά τη σύνδεση των ΜΔΠ	0.0435



Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος (%)	69.366
Χρηματικό κίνητρο (€/h) σύνδεσης ΜΔΠ	0.66407
Χρηματικό κίνητρο (€/h) μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος	4.728
Συνολικό χρηματικό κίνητρο (€/h)-Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	5.393

**Πίνακας 3.21:** Αποτελέσματα για τοποθέτηση τριών ΜΔΠ

Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης χρησιμοποιήθηκαν 30 αντισώματα, ενώ οι τιμές των παραμέτρων ορίστηκαν ως  $c_1=c_2=2.5$ ,  $b=1.8$  και  $b_1=1000$ .

### 3.2.3 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΠΕΝΤΕ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟ ΝΕΟ ΔΙΚΤΥΟ

Στη συνέχεια επιλύεται το πρόβλημα της βέλτιστης διαστασιολόγησης πέντε μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο. Τα δεδομένα του προβλήματος παραμένουν ίδια και σε αυτήν την περίπτωση και η μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι η παρακάτω:

$$F = -c_g \cdot \left[ \sum_{i=1}^5 (P_{DG,i}) \right] - c_L \cdot (P_{LOSSES}^{withoutDG} - P_{LOSSES}^{withDG})$$

Το πρόβλημα επιλύθηκε με τη χρήση του υβριδικού αλγορίθμου PCLONALG, και στον Πίνακα 3.22 συνοψίζονται τα τελικά αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Πρώτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Α)	4
Δεύτερος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Β)	26
Τρίτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Γ)	40
Τέταρτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Δ)	48
Πέμπτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Ε)	62
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Α	0.7714
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Β	0.6174
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Γ	0.6365
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Δ	0.5198
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Ε	0.7185
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου πριν τη σύνδεση των ΜΔΠ	0.142

Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου μετά τη σύνδεση των ΜΔΠ	0.0178
Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος (%)	87,465
Χρηματικό κίνητρο (€/h) σύνδεσης ΜΔΠ	0.9314
Χρηματικό κίνητρο (€/h) μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος	5,962
Συνολικό χρηματικό κίνητρο (€/h)-Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	6.895

**Πίνακας 3.22:** Αποτελέσματα για τοποθέτηση πέντε ΜΔΠ

Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης χρησιμοποιήθηκαν 30 αντισώματα, ενώ οι τιμές των παραμέτρων ορίστηκαν ως  $c1=c2=2.5$ ,  $b=7$  και  $b1=1500$ .

### 3.2.4 ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Θεωρείται ότι στο δίκτυο που περιγράφηκε παραπάνω, παρουσιάζεται διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων, σε ποσοστό ίσο με το 20% του φορτίου, τα οποία φορτίζονται με ομοιόμορφο τρόπο στους διάφορους ζυγούς του δικτύου. Επομένως το φορτίο θα αυξηθεί και τα νέα δεδομένα του δικτύου παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.23 που ακολουθεί.

Γραμμή	Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	P ζυγού άφιξης (α.μ)	Q ζυγού άφιξης(α.μ)
1	1	2	0,1	0,09
2	2	3	0,06	0,04
3	3	4	0,15	0,13
4	4	5	0,075	0,05
5	5	6	0,015	0,009
6	6	7	0,018	0,014
7	7	8	0,013	0,01
8	8	9	0,016	0,011
9	4	10	0,02	0,01
10	10	11	0,016	0,009
11	11	12	0,05	0,04
12	12	13	0,105	0,09
13	13	14	0,025	0,015
14	14	15	0,04	0,025
15	7	68	0,1	0,06
16	68	69	0,04	0,03
17	1	16	0,06	0,03
18	16	17	0,04	0,025
19	17	18	0,015	0,009

20	18	19	0,013	0,007
21	19	20	0,03	0,02
22	20	21	0,09	0,05
23	21	22	0,05	0,03
24	17	23	0,06	0,04
25	23	24	0,1	0,08
26	24	25	0,08	0,065
27	25	26	0,1	0,06
28	26	27	0,1	0,055
29	27	28	0,12	0,07
30	28	29	0,105	0,07
31	1	30	0,08	0,05
32	30	31	0,06	0,04
33	31	32	0,013	0,008
34	32	33	0,016	0,009
35	33	34	0,05	0,03
36	34	35	0,04	0,028
37	35	36	0,06	0,04
38	36	37	0,04	0,03
39	37	38	0,03	0,025
40	32	39	0,15	0,1
41	39	40	0,06	0,035
42	40	41	0,12	0,07
43	41	42	0,09	0,06
44	42	43	0,018	0,01
45	40	44	0,016	0,01
46	44	45	0,1	0,05
47	42	46	0,06	0,04
48	35	47	0,09	0,07
49	47	48	0,085	0,055
50	48	49	0,1	0,07
51	49	50	0,14	0,09
52	1	51	0,06	0,04
53	51	52	0,02	0,011
54	52	53	0,04	0,03
55	53	54	0,036	0,024
56	54	55	0,03	0,02
57	55	56	0,043	0,03
58	52	57	0,08	0,05
59	57	58	0,24	0,12
60	58	59	0,125	0,11
61	59	60	0,025	0,01
62	55	61	0,01	0,005
63	61	62	0,15	0,13
64	62	63	0,05	0,03

65	63	64	0,03	0,02
66	62	65	0,13	0,12
67	65	66	0,15	0,13
68	66	67	0,025	0,015

**Πίνακας 3.23:** Δεδομένα δικτύου μετά τη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων

### 3.2.4.1 Τοποθέτηση μίας μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής

Αρχικά επιλύεται το πρόβλημα της βέλτιστης διαστασιολόγησης μίας μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο παραπάνω δίκτυο. Τα δεδομένα και οι περιορισμοί του δικτύου παραμένουν ίδια με πριν, και επομένως το μόνο που διαφέρει είναι το φορτίο του δικτύου. Η αντικειμενική συνάρτηση δεν διαφέρει σε σχέση με αυτή του προβλήματος της τοποθέτησης μίας μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο που δεν περιλαμβάνει τη διείσδυση των οχημάτων. Δηλαδή η μορφή της είναι η παρακάτω:

$$F = -c_g \cdot P_{DG} - c_L \cdot (P_{LOSSES}^{withoutDG} - P_{LOSSES}^{withDG})$$
, με τις παραμέτρους  $c_g$  και  $c_L$  να παραμένουν ίδιες με πριν.

Το πρόβλημα επιλύθηκε με τη βοήθεια του υβριδικού αλγορίθμου PCLONALG ο οποίος χρησιμοποιήθηκε και για την επίλυση των προηγούμενων προβλημάτων. Στο Πίνακα 3.24 που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης	62
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ	0.887
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου πριν τη σύνδεση της ΜΔΠ	0.228
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου μετά τη σύνδεση της ΜΔΠ	0.1421
Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος (%)	37.675
Χρηματικό κίνητρο (€/h) σύνδεσης ΜΔΠ	0.25314
Χρηματικό κίνητρο (€/h) μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος	4.1232
Συνολικό χρηματικό κίνητρο (€/h)-Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	4.3765

**Πίνακας 3.24:** Αποτελέσματα για τοποθέτηση μίας ΜΔΠ

Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης χρησιμοποιήθηκαν 30 αντισώματα, ενώ οι τιμές των παραμέτρων ορίστηκαν ως  $c_1=c_2=2.5$ ,  $b=0.1$  και  $b_1=800$ .

### 3.2.4.2 Τοποθέτηση τριών μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής

Στη συνέχεια, πρόκειται να εγκατασταθούν τρεις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής στο υπάρχον δίκτυο και ζητείται η εύρεση των βέλτιστων ζυγών στους οποίους θα τοποθετηθούν, καθώς και η βέλτιστη ισχύς εξόδου αυτών. Τα δεδομένα και οι περιορισμοί του προβλήματος παραμένουν ίδια με πριν, ενώ η μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι η ίδια με αυτήν της ενότητας 3.2.1.2, δηλαδή πριν τη διεξόδυση των οχημάτων στο δίκτυο. Το πρόβλημα επιλύθηκε με τη βοήθεια του αλγορίθμου PCLONALG και ο Πίνακας 3.25 περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Πρώτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Α)	26
Δεύτερος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Β)	35
Τρίτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Γ)	62
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Α	0.7377
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Β	1.0285
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Γ	0.8890
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου πριν τη σύνδεση των ΜΔΠ	0.228
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου μετά τη σύνδεση των ΜΔΠ	0.062
Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος (%)	72.807
Χρηματικό κίνητρο (£/h) σύνδεσης ΜΔΠ	0.7578
Χρηματικό κίνητρο (£/h) μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος	7.968
Συνολικό χρηματικό κίνητρο (£/h)-Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	8.726

**Πίνακας 3.25:** Αποτελέσματα για τοποθέτηση τριών ΜΔΠ

Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης χρησιμοποιήθηκαν 30 αντισώματα, ενώ οι τιμές των παραμέτρων ορίστηκαν ως  $c_1=c_2=2.5$ ,  $b=1.5$  και  $b_1=1500$ .

### 3.2.4.3 Τοποθέτηση πέντε μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής

Στη συνέχεια, επιλύεται το πρόβλημα της βέλτιστης διαστασιολόγησης πέντε μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο υπάρχον δίκτυο. Τα δεδομένα και οι περιορισμοί του προβλήματος παραμένουν και σε αυτήν την περίπτωση ίδια με πριν, ενώ η μορφή της

αντικειμενικής συνάρτησης είναι η ίδια με αυτήν πριν τη διεύθυνση των οχημάτων στο δίκτυο. Το πρόβλημα επιλύθηκε ξανά με τη βοήθεια του αλγορίθμου PCLONALG, ενώ στον Πίνακα 3.26 συνοψίζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Πρώτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Α)	4
Δεύτερος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Β)	26
Τρίτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Γ)	35
Τέταρτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Δ)	40
Πέμπτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Ε)	62
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Α	0.9409
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Β	0.7597
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Γ	0.7627
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Δ	0.7096
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Ε	0.8894
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου πριν τη σύνδεση των ΜΔΠ	0.228
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου μετά τη σύνδεση των ΜΔΠ	0.0284
Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος (%)	87.5439
Χρηματικό κίνητρο (€/h) σύνδεσης ΜΔΠ	1.159
Χρηματικό κίνητρο (€/h) μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος	9.5808
Συνολικό χρηματικό κίνητρο (€/h)-Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	10.739

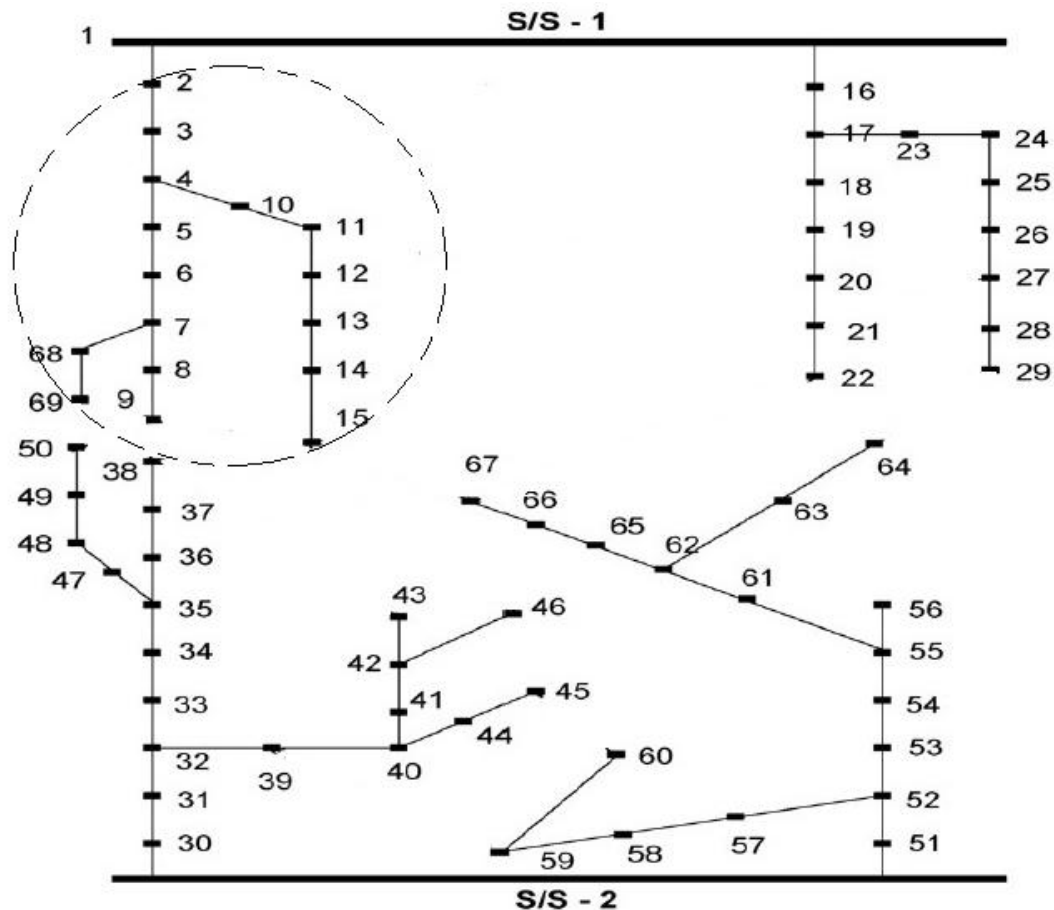
**Πίνακας 3.26:** Αποτελέσματα για την τοποθέτηση πέντε ΜΔΠ

Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης χρησιμοποιήθηκαν 30 αντισώματα, ενώ οι τιμές των παραμέτρων ορίστηκαν ως  $c_1=c_2=2.5$ ,  $b=8$  και  $b_1=1500$ . Θα μπορούσε να επιτευχθεί καλύτερη λύση, με μία διαφορά της τάξεως του 0.02, αλλά ο χρόνος υπολογισμού της λύσης θα αυξανόταν σε πολύ μεγάλο βαθμό, ενώ το ποσοστό επιτυχίας θα κυμαινόταν γύρω στο 5%.

### 3.2.5 ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΝΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Θεωρείται το δίκτυο που περιγράφεται στον Πίνακα 3.19. Σε αυτό το δίκτυο παρατηρείται διεύθυνση ηλεκτρικών οχημάτων σε ποσοστό ίσο με το 20% του φορτίου, τα οποία, σε αυτήν την περίπτωση, δε φορτίζονται με ομοιόμορφο τρόπο στους ζυγούς του δικτύου.

Αντιθέτως, θεωρείται ότι η φόρτιση του 50% των ηλεκτρικών οχημάτων κατανέμεται στο λιγότερο φορτισμένο τμήμα του δικτύου. Το τμήμα αυτό του δικτύου φαίνεται στο Σχήμα 3.2, που ακολουθεί. Τα υπόλοιπα οχήματα φορτίζονται ομοιόμορφα στους υπόλοιπους ζυγούς του δικτύου.



**Σχήμα 3.2:** Τμήμα του δικτύου στο οποίο κατανέμεται το 50% της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων

### 3.2.5.1 Τοποθέτηση μίας μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής

Στο υπάρχον δίκτυο πρόκειται να εγκατασταθεί μία μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής και ζητείται να βρεθεί ο βέλτιστος ζυγός στον οποίο θα εγκατασταθεί, όπως και η βέλτιστη ονομαστικής ισχύς αυτής. Τα δεδομένα και οι περιορισμοί του δικτύου παραμένουν ίδια με πριν, και επομένως το μόνο που διαφέρει και σε αυτήν την περίπτωση είναι το φορτίο του δικτύου. Ομοίως, η αντικειμενική συνάρτηση παραμένει ίδια με αυτήν της ενότητας 3.2.1.1. Δηλαδή η μορφή της είναι η παρακάτω:

$F = -c_g \cdot P_{DG} - c_L \cdot (P_{LOSSES}^{withoutDG} - P_{LOSSES}^{withDG})$ , με τις παραμέτρους  $c_g$  και  $c_L$  να μην αλλάζουν τιμές σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις.

Το πρόβλημα επιλύθηκε με τη χρήση του υβριδικού αλγορίθμου PCLONALG και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συνοψίζονται στον Πίνακα 3.27.

Βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης	62
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ	0.7667
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου πριν τη σύνδεση της ΜΔΠ	0.195
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου μετά τη σύνδεση της ΜΔΠ	0.1273
Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος (%)	34.718
Χρηματικό κίνητρο (£/h) σύνδεσης ΜΔΠ	0.2188
Χρηματικό κίνητρο (£/h) μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος	3.2496
Συνολικό χρηματικό κίνητρο (£/h)-Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	3.469

**Πίνακας 3.27:** Αποτελέσματα για τοποθέτηση μίας ΜΔΠ

Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης, χρησιμοποιήθηκαν 30 αντισώματα, ενώ οι τιμές των παραμέτρων ορίστηκαν ως  $c_1=c_2=2.5$ ,  $b=0.1$  και  $b_1=800$ .

### 3.2.5.2 Τοποθέτηση τριών μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής

Στη συνέχεια, επιλύεται το πρόβλημα της βέλτιστης διαστασιολόγησης τριών μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο υπάρχον δίκτυο. Τα δεδομένα και οι περιορισμοί του προβλήματος παραμένουν ίδια με τις προηγούμενες περιπτώσεις, ενώ η μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι η ίδια με αυτήν της ενότητας 3.2.1.2, πριν τη διείσδυση των οχημάτων. Το πρόβλημα επιλύθηκε με τη χρήση του αλγορίθμου PCLONALG και ο Πίνακας 3.28 περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Πρώτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Α)	4
Δεύτερος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Β)	35
Τρίτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Γ)	62
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Α	1.0555
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Β	0.9411



Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Γ	0.7942
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου πριν τη σύνδεση των ΜΔΠ	0.195
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου μετά τη σύνδεση των ΜΔΠ	0.0595
Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος (%)	69.487
Χρηματικό κίνητρο (€/h) σύνδεσης ΜΔΠ	0.7965
Χρηματικό κίνητρο (€/h) μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος	6.504
Συνολικό χρηματικό κίνητρο (€/h)-Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	7.2985

**Πίνακας 3.28:** Αποτελέσματα για τοποθέτηση τριών ΜΔΠ

Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης χρησιμοποιήθηκαν 30 αντισώματα, ενώ οι τιμές των παραμέτρων ορίστηκαν ως  $c_1=c_2=2.5$ ,  $b=1.5$  και  $b_1=1500$ .

### 3.2.5.3 Τοποθέτηση πέντε μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής

Τέλος, στο υπάρχον δίκτυο πρόκειται να εγκατασταθούν πέντε μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και ζητείται η εύρεση των βέλτιστων ζυγών στους οποίους θα τοποθετηθούν, όπως και η βέλτιστη ονομαστική ισχύς αυτών. Οι περιορισμοί και τα δεδομένα του δικτύου παραμένουν ίδια με τους προηγούμενες περιπτώσεις, ενώ η μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι ίδια με αυτή της ενότητας 3.2.1.3, πριν δηλαδή τη διεύθυνση των ηλεκτρικών οχημάτων. Το πρόβλημα επιλύθηκε, χρησιμοποιώντας τον υβριδικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης PCLOALG, και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.29 που ακολουθεί.

Πρώτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Α)	4
Δεύτερος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Β)	26
Τρίτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Γ)	39
Τέταρτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Δ)	48
Πέμπτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ (ΖΥΓΟΣ Ε)	62
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Α	1.0913
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Β	0.6857
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Γ	0.7791
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Δ	0.5572

<i>Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ΖΥΓΟ Ε</i>	0.7935
<i>Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου πριν τη σύνδεση των ΜΔΠ</i>	0.195
<i>Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου μετά τη σύνδεση των ΜΔΠ</i>	0.0231
<i>Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος (%)</i>	88.154
<i>Χρηματικό κίνητρο (€/h) σύνδεσης ΜΔΠ</i>	1.1149
<i>Χρηματικό κίνητρο (€/h) μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος</i>	8.2512
<i>Συνολικό χρηματικό κίνητρο (€/h)-Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης</i>	9.3648

**Πίνακας 3.29:** Αποτελέσματα για τοποθέτηση πέντε ΜΔΠ

Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης χρησιμοποιήθηκαν 30 αντισώματα, ενώ οι τιμές των παραμέτρων ορίστηκαν ως  $c_1=c_2=2.5$ ,  $b=6.5$  και  $b_1=1500$ .

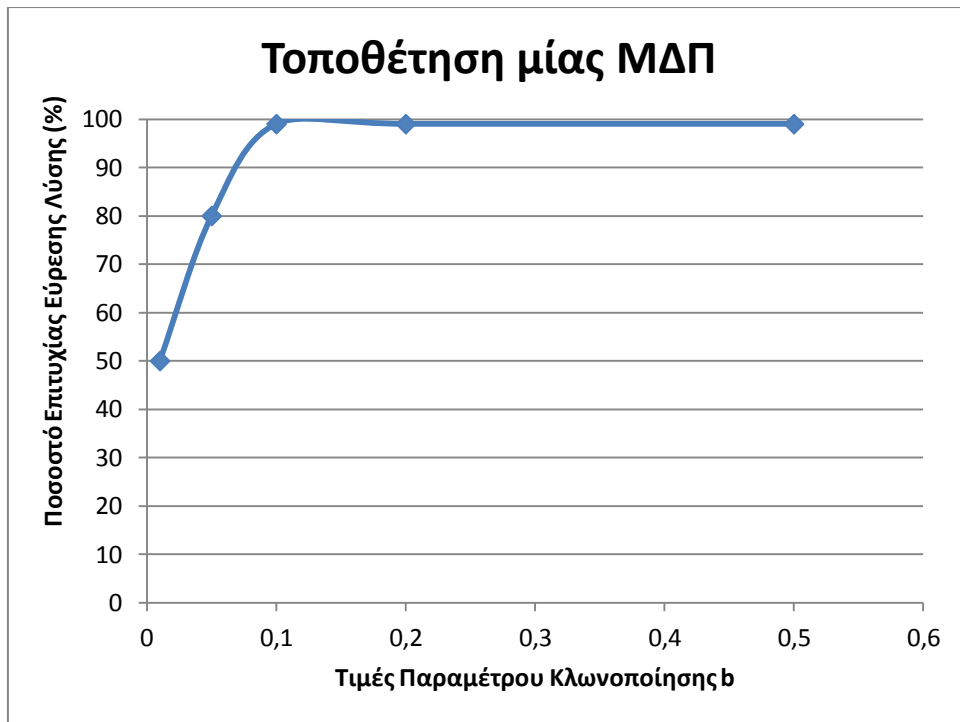
## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

### **4.1 ΥΒΡΙΔΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ PCLONALG**

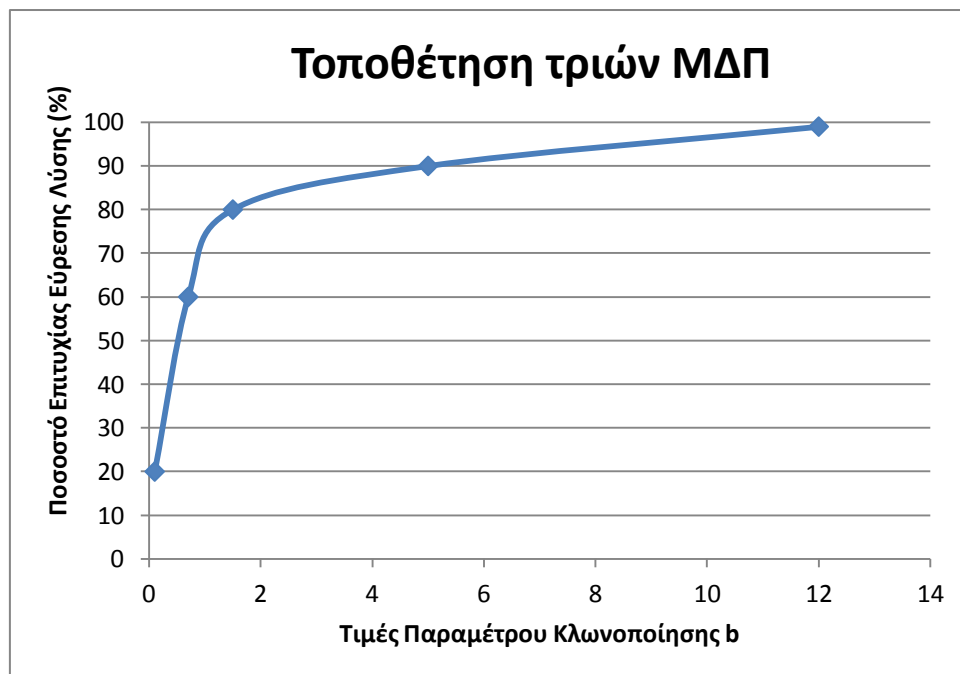
Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και τις πολλαπλές δοκιμές για την εύρεση της βέλτιστης λύσης κάθε προβλήματος, προέκυψαν ορισμένα συμπεράσματα όσον αφορά τις διάφορες παραμέτρους που χρησιμοποιεί ο υβριδικός αλγόριθμος PCLONALG. Πιο συγκεκριμένα, βρέθηκε ότι η παράμετρος κλωνοποίησης,  $b$ , είναι αυτή που επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό τόσο την επιτυχία εύρεσης της βέλτιστης λύσης ενός προβλήματος, όσο και το χρόνο υπολογισμού της λύσης. Αυτό συμβαίνει διότι η παράμετρος αυτή καθορίζει το πλήθος των κλώνων που παράγονται για κάθε αντίσωμα, ανάλογα με την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που επιτυγχάνει το αντίσωμα. Επομένως, μία μεγάλη τιμή της παραμέτρου κλωνοποίησης εξασφαλίζει περισσότερους κλώνους για τα αντισώματα εκείνα που επιτυγχάνουν τις καλύτερες λύσεις και αντίστοιχα περισσότερες πιθανότητες εύρεσης της ολικής βέλτιστης λύσης. Παράλληλα όμως, μία τέτοια τιμή αυξάνει σε μεγάλο βαθμό τον υπολογιστικό χρόνο του προβλήματος, διότι χρειάζεται να πραγματοποιηθούν οι κατάλληλοι υπολογισμοί για ένα μεγαλύτερο πλήθος αντισωμάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα ποσοστά επιτυχίας και ο υπολογιστικός χρόνος κάθε προβλήματος εξαρτώνται και από την πολυπλοκότητα αυτού, ενώ ιδιαίτερα ο χρόνος εξαρτάται και από άλλες παραμέτρους, όπως ο υπολογιστής στον οποίον εκτελείται ο αλγόριθμος.

#### **4.1.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ ΚΛΩΝΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ**

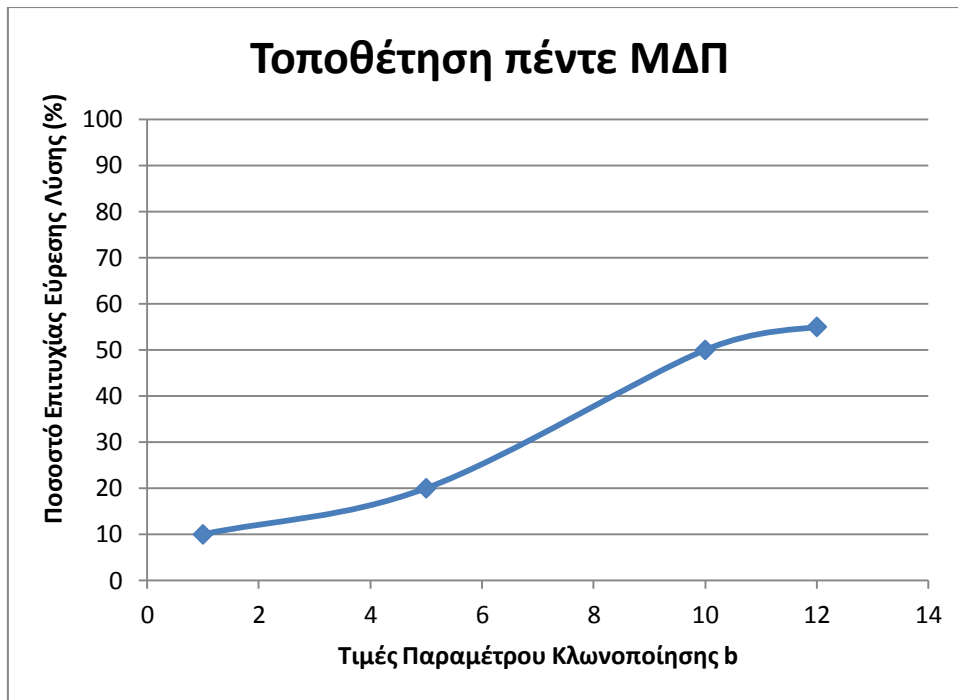
Για το πρόβλημα της τοποθέτησης ΜΔΠ το οποίο περιγράφεται στην ενότητα 3.2.4, αναλύθηκε η επίδραση της παραμέτρου κλωνοποίησης στην επιτυχία εξεύρεσης της βέλτιστης λύσης για την τοποθέτηση μίας, τριών και πέντε ΜΔΠ αντίστοιχα, καθώς και στον υπολογιστικό χρόνο του προβλήματος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με γραφικό τρόπο στα Διαγράμματα 4.1, 4.2, 4.3 και 4.4, που ακολουθούν.



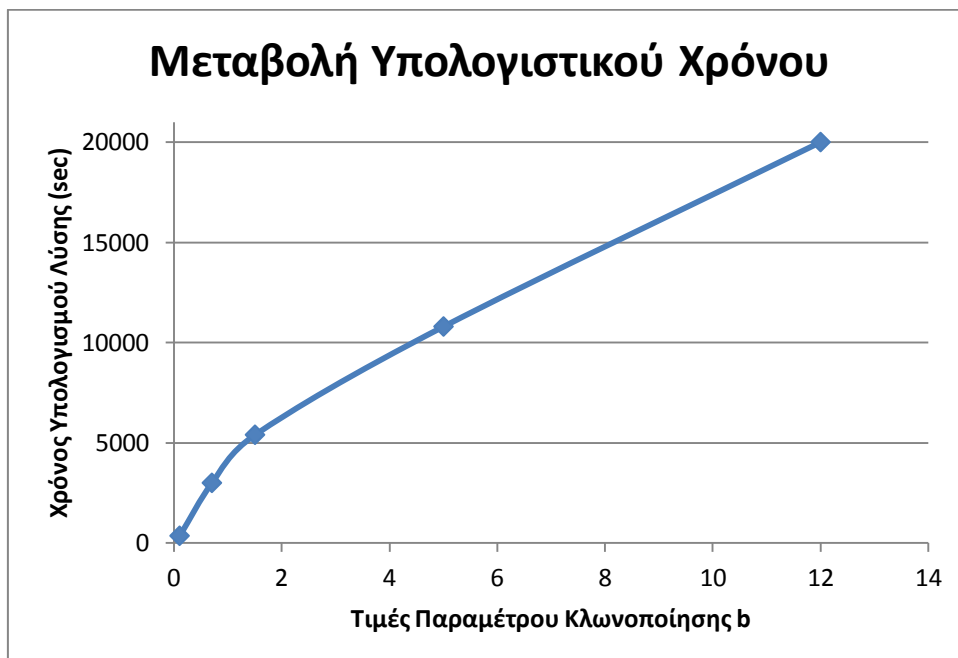
**Διάγραμμα 4.1:** Ποσοστό επιτυχίας εύρεσης βέλτιστης λύσης για την τοποθέτηση μίας ΜΔΠ



**Διάγραμμα 4.2:** Ποσοστό επιτυχίας εύρεσης βέλτιστης λύσης για την τοποθέτηση τριών ΜΔΠ



**Διάγραμμα 4.3:** Ποσοστό επιτυχίας εύρεσης βέλτιστης λύσης για την τοποθέτηση πέντε ΜΔΠ

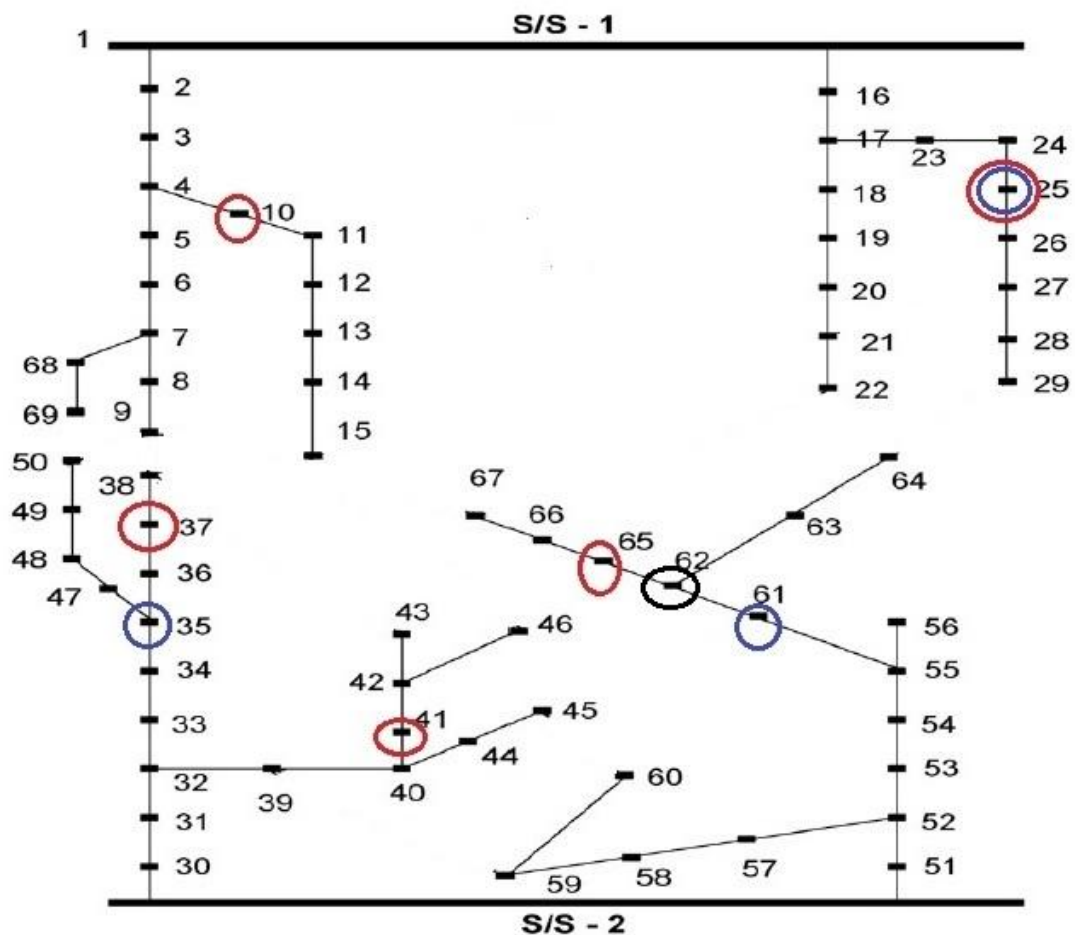


**Διάγραμμα 4.4:** Μεταβολή υπολογιστικού χρόνου εύρεσης λύσης

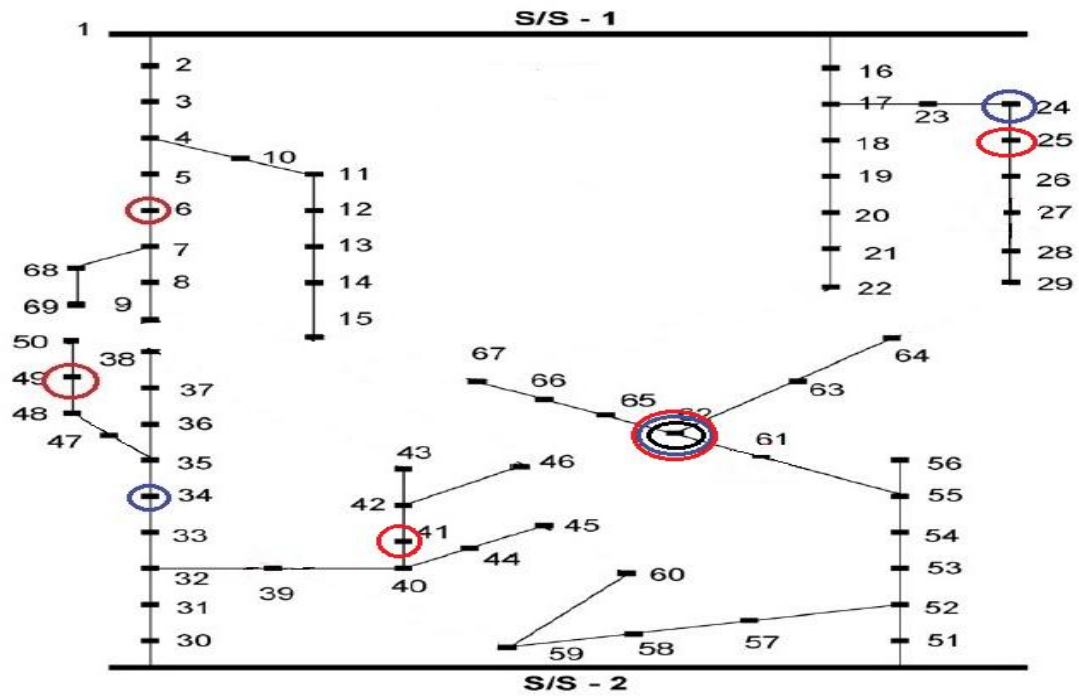
## 4.2 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

### 4.2.1 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΕΧΝΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ

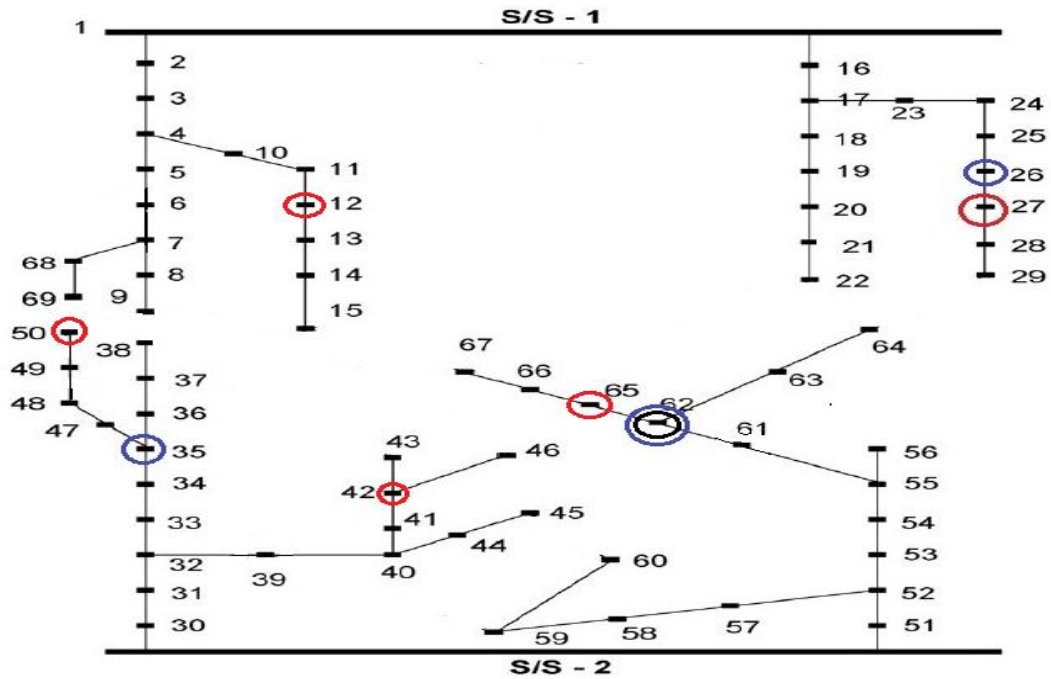
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι ζυγοί οι οποίοι επιλέχθηκαν για κάθε ένα από τα προβλήματα που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 3, και τα οποία αφορούσαν την τοποθέτηση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής με βάση κάποια τεχνικά κριτήρια, όπως οι απώλειες ενεργού ισχύος, το προφίλ της τάσης και η διακύμανση της τάσης του δικτύου. Με το μαύρο χρώμα κυκλώνεται ο ζυγός που επιλέγεται για την τοποθέτηση μίας ΜΔΠ, με το μπλε οι ζυγοί που επιλέγονται για την τοποθέτηση τριών ΜΔΠ και με το κόκκινο οι ζυγοι που επιλέγονται για την τοποθέτηση πέντε ΜΔΠ.



Σχήμα 4.1: Τοποθέτηση ΜΔΠ με βάση τις απώλειες και το προφίλ της τάσης



**Σχήμα 4.2:** Τοποθέτηση ΜΔΠ με βάση τις απώλειες και τη διακύμανση της τάσης, πριν τη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων



**Σχήμα 4.3:** Τοποθέτηση ΜΔΠ με βάση τις απώλειες και τη διακύμανση της τάσης, μετά τη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων

Είναι φανερό από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, ότι ο ζυγός 62 επιλέγεται σε όλες τις περιπτώσεις για την τοποθέτηση μίας μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, ενώ ο ίδιος ζυγός ή οι δύο γειτονικοί του, σε λίγες περιπτώσεις, επιλέγεται και όταν τοποθετούνται άνω των μία ΜΔΠ. Επομένως είναι ξεκάθαρο ότι το συγκεκριμένο τμήμα χρειάζεται υποστήριξη. Επιπλέον, ο ζυγός 62 αποτελεί ζυγό διακλάδωσης, κάτι που επίσης δικαιολογεί την επιλογή του.

Φαίνεται επίσης ότι ο ζυγός τροφοδότησης που περιλαμβάνει τους ζυγούς 6 και 10 είναι αυτός που εξυπηρετεί το λιγότερο φορτίο, σε σύγκριση με τους δύο άλλους ζυγούς τροφοδότησης. Έτσι το τμήμα αυτό παρουσιάζει τα λιγότερα τεχνικά προβλήματα και τη μικρότερη καταπόνηση, με αποτέλεσμα να επιλέγεται μόνο στην περίπτωση που πέντε ΜΔΠ τοποθετούνται στο δίκτυο. Επιπλέον, ο ζυγός τροφοδότησης που περιλαμβάνει τους ζυγούς 30 έως και 50, εξυπηρετεί σχετικά μεγάλο φορτίο σε σύγκριση με τους άλλους τρεις ζυγούς, διότι σε όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν, στο πρόβλημα της τοποθέτησης πέντε ΜΔΠ, οι δύο ΜΔΠ τοποθετούνται σε αυτόν τον κλάδο. Αυτό μπορεί να αποδειχτεί με την άθροιση των φορτίων που εξυπηρετεί αυτός ο ζυγός τροφοδότησης.

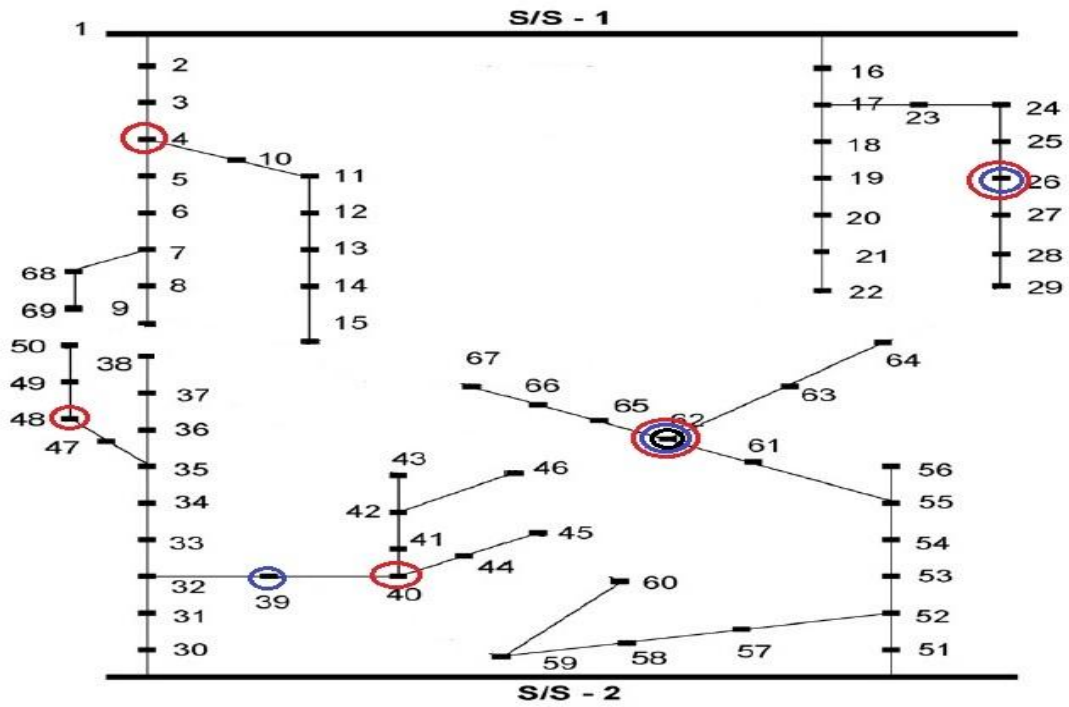
Με τη διεύθυνση των ηλεκτρικών οχημάτων, παρατηρούνται μικρές ή ακόμα και μηδενικές μετατοπίσεις, όσον αφορά την επιλογή τοποθέτησης των ΜΔΠ. Αυτό είναι λογικό καθώς έχει γίνει η παραδοχή ότι η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων κατανέμεται ομοιόμορφα στους διάφορους ζυγούς του δικτύου.

Τέλος, παρατηρείται μία τάση για τοποθέτηση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο κέντρο των διαφόρων κλάδων. Με αυτόν τον τρόπο υποστηρίζεται το δίκτυο τόσο όσον αφορά τις απώλειες ενεργού ισχύος αλλά και όσον αφορά τις πτώσεις τάσης και τη διακύμανση της τάσης.

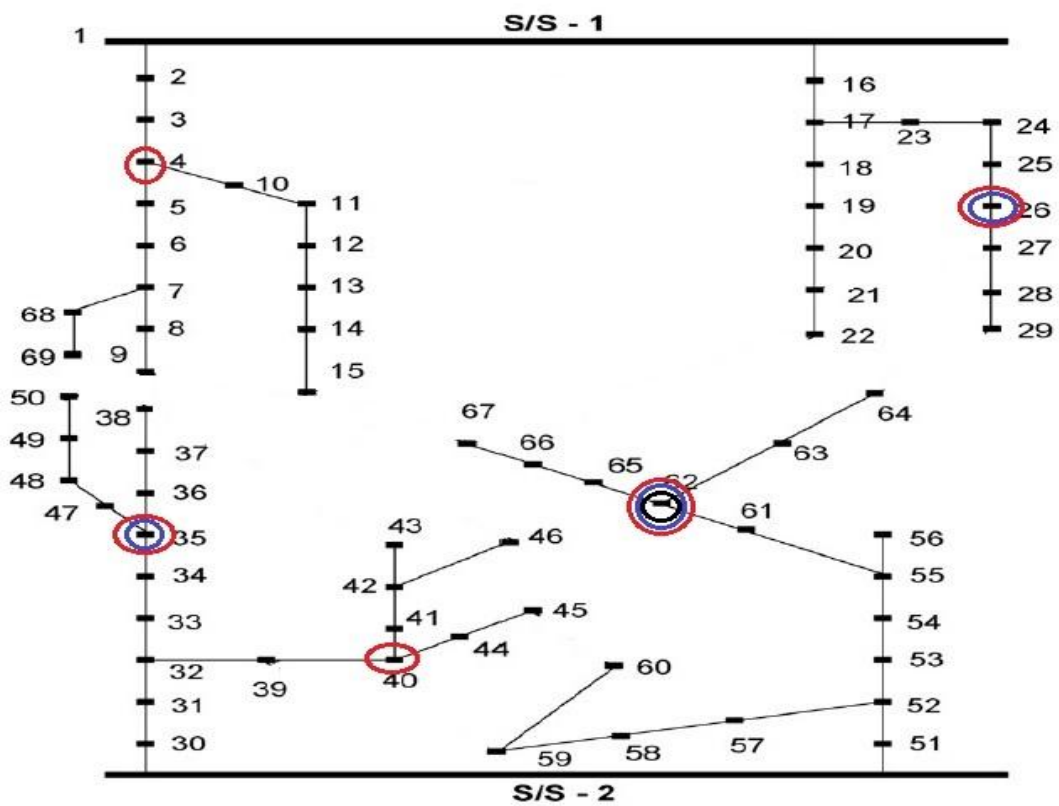
#### **4.2.2 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ**

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι ζυγοί οι οποίοι επιλέχθηκαν για κάθε ένα από τα προβλήματα τα οποία αφορούσαν την τοποθέτηση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, με βάση κίνητρα οικονομικής φύσεως.

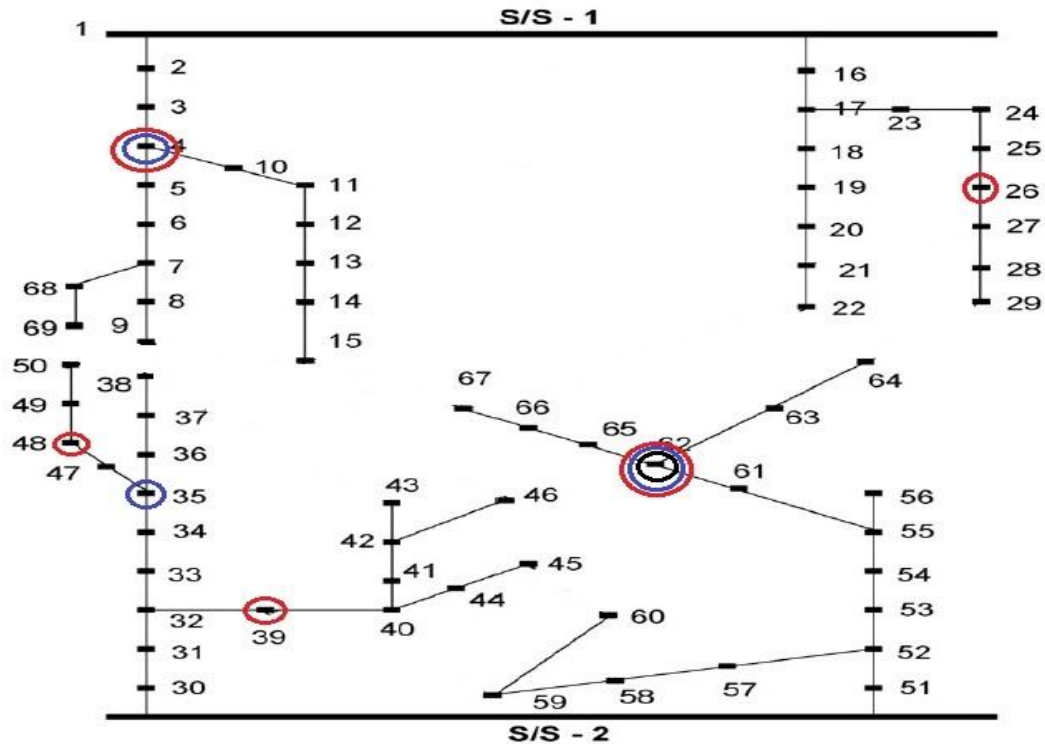




Σχήμα 4.4: Τοποθέτηση ΜΔΠ με βάση οικονομικά κίνητρα



Σχήμα 4.5: Τοποθέτηση ΜΔΠ με βάση οικονομικά κίνητρα, μετά τη διεξόδου των ηλεκτρικών οχημάτων με ομοιόμορφη φόρτιση



**Σχήμα 4.6:** Τοποθέτηση ΜΔΠ με βάση οικονομικά κίνητρα, μετά τη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων με ανομοιόμορφη φόρτιση

Παρατηρείται ότι οι βέλτιστοι ζυγοί τοποθέτησης των ΜΔΠ με βάση τα οικονομικά κριτήρια είναι παρόμοιοι με αυτούς με βάση τα τεχνικά κριτήρια, κύριως λόγω του κινήτρου για ελαχιστοποίηση απωλειών ενεργού ισχύος που κυριαρχεί στην αντικειμενική συνάρτηση αυτού του προβλήματος. Επομένως οι ζυγοί αυτοί επιλέγονται λόγω των παραγόντων που αναφέρθηκαν στην ενότητα 4.2.1. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ισχύες εξόδου των ΜΔΠ που επιλέγονται είναι μεγαλύτερες από αυτές του προβλήματος της τοποθέτησης ΜΔΠ με βάση τεχνικά χαρακτηριστικά, διότι σε αυτήν την περίπτωση υπάρχει ένα επιπλέον κίνητρο για εγκατάσταση διεσπαρμένης παραγωγής. Υπάρχει επίσης μία μεγαλύτερη σταθερότητα στους επιλεγόμενους βέλτιστους ζυγούς καθώς δεν εμπλέκονται οι τάσεις των ζύγων και η πολυπλοκότητα του προβλήματος είναι μικρότερη.

Η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων με ομοιόμορφη φόρτιση προκαλεί μηδενικές μετατοπίσεις στους επιλεγόμενους ζυγούς τοποθέτησης, διότι και σε αυτήν την περίπτωση η φόρτιση των οχημάτων κατανέμεται ομοιόμορφα στο δίκτυο. Αντιθέτως, η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων με ανομοιόμορφη φόρτιση προκαλεί μετατόπιση του ενός επιλεγόμενου ζυγού τοποθέτησης, στο πρόβλημα της τοποθέτησης τριών ΜΔΠ, προς το τμήμα του δικτύου στο οποίο παρουσιάζεται η μεγαλύτερη διείσδυση οχημάτων. Αυτό είναι ένα λογικό αποτέλεσμα διότι το φορτίο αυτού του τμήματος αυξάνεται δυσανάλογα με το φορτίο του υπόλοιπου δικτύου και επομένως αναμένεται το συγκεκριμένο τμήμα να χρειαστεί υποστήριξη. Ωστόσο, δεν είναι τόσο μεγάλη η καταπόνηση που υφίσταται έτσι

ώστε να μετατοπιστεί και ο βέλτιστος ζυγός τοποθέτησης μίας ΜΔΠ σε αυτό το τμήμα του δικτύου, ή να τοποθετηθούν δύο ΜΔΠ στην περίπτωση τοποθέτησης των πέντε ΜΔΠ.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Thomas Ackermann, Goran Andersson, Lennart Soder, "Distributed generation: a definition", Electric Power Systems Research, 2001
- [2] Pepermans, G., Driesen, G. J., Haeseldonckx, D., Belmans, R., D'haeseleer W., 2003. "Distributed generation: definition, benefits and issues", Energy Policy, In Press.
- [3] Αντώνιος Γ. Τσικαλάκης, "Συμβολή στον προγραμματισμό λειτουργίας δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με μεγάλη διείσδυση διεσπαρμένης και ανανεώσιμης παραγωγής και συσκευών αποθήκευσης", Διδακτορική διατριβή Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Ιούλιος 2008
- [4] Μιχ. Π. Παπαδόπουλος, "Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές", Έκδοση Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, 1997
- [5] <http://www.sher-tech.com>
- [6] <http://www.dg.history.vt.edu/ch1/index.html>
- [7] <http://www.wisconsinr.org/technologies.htm>
- [8] [http://northpower.com/network/services/distributed\\_generation/](http://northpower.com/network/services/distributed_generation/)
- [9] Rob van Gerwen, "Distributed Generation and Renewables", 8.1 Introduction, Power Quality and Utilisation Guide, November 2006
- [10] P. Chiradeja, "Benefit of Distributed Generation: A Line Loss Reduction Analysis", IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific Dalian, China, 2005
- [11] M. Sedighzadeh, M. Fallahnejad, M. R. Alemi, M. Omidvaran, D. Arzaghi-haris, "Optimal Placement of Distributed Generation Using Combination of PSO and Clonal Algorithm", IEEE International Conference on Power and Energy, 2010
- [12] L.L. Lai, S.W. Chan, P.K. Lee, C.S. Lai, "Challenges to Implementing Distributed Generation in Area Electric Power System", IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2011
- [13] W. El-Khattam, M.M.A. Salama, "Impact of distributed generation on voltage profile in deregulated distribution system", Proceedings of the Power Systems 2002 Conference
- [14] O. Amanifar, "Optimal Distributed Generation Placement and Sizing for Loss and THD Reduction and Voltage Profile Improvement in Distribution Systems Using Particle Swarm Optimization and sensitivity analysis", 16th Conference on Electrical Power Distribution Networks (EPDC), 2011
- [15] <http://www.peachygreen.com/electric-cars/charging-forward-with-electric-cars-and-recharging-stations>

- [16] Garcia-Valle, Rodrigo, Peças Lopes, João A., “Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks”, Chapter 3, Springer, 2012
- [17] MERGE Deliverable D. 3.2 (PartII), Task 3.2, “Evaluation of the impact that a progressive deployment of EV will provoke on electricity demand, steady state operation, market issue, generation schedules and on the volume of carbon emissions”, Φεβρ. 2012, [Online]: [http://www.evmerge.eu/images/stories/uploads/MERGE\\_WP3\\_Del\\_D3.2\\_Task3.2\\_Part\\_II.pdf](http://www.evmerge.eu/images/stories/uploads/MERGE_WP3_Del_D3.2_Task3.2_Part_II.pdf)
- [18] Διονύσιος Περδίκης, “Τεχνητά ανοσοποιητικά συστήματα”, Διπλωματική εργασία Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, 2006
- [19] Fabio González, “A study of artificial immune systems applied to anomaly detection”, Dissertation for the Doctor of Philosophy Degree, The University of Memphis, 2003
- [20] Jason Brownlee, “CLONAL SELECTION THEORY & CLONALG-THE CLONAL SELECTION CLASSIFICATION ALGORITHM (CSCA)”, Technical Report, 2005
- [21] Βασίλειος Κ. Καρακάσης, “Μοντέλα τεχνητών ανοσοποιητικών συστημάτων για την εξόρυξη γνώσης από σύνολα δεδομένων”, Διπλωματική εργασία Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, 2005
- [22] Leandro N. de Castro, Fernando J. Von Zuben, “Learning and Optimization Using the Clonal Selection Principle”, IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, 2002
- [23] <http://birdcouncil.wordpress.com/>
- [24] <http://globalpolicyinbrief.blogspot.gr/2010/05/who-are-real-pirates.html>
- [25] M. A. Abido, “Optimal Design of Power–System Stabilizers Using Particle Swarm Optimization”, IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 17, NO. 3, SEPTEMBER 2002
- [26] Kitayama, S. and Yasuda, K. (2006), “ A method for mixed integer programming problems by particle swarm optimization”, Elect. Eng. Jpn., 157: 40–49. doi: 10.1002/ej.20337
- [27] Qiaoling Wang, Changhong Wang, X.Z.Gao “Hybrid Optimization Algorithm based on Clonal Selection Principle and Particle Swarm Intelligence”, Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, 2006
- [28] R. D. Zimmerman, MATPOWER4.0b4- 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>.
- [29] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, “Power Generation, Operation and Control”, John Willey & Sons, INC, Second Edition, 1996
- [30] Gareth P. Harrison, Antonio Piccolo, Pierluigi Siano, A. Robin Wallace, “Hybrid GA and OPF evaluation of network capacity for distributed generation connections”, Electric Power Systems Research Volume 78, Issue 3, March 2008, Pages 392–398

[31] Γεώργιος Φίντζος, “Βέλτιστη διαστασιολόγηση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής με χρήση γενετικού αλγορίθμου και βέλτιστης ροής φορτίου”, Διπλωματική εργασία Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, 2012