



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

**Επέκταση Δικτύου Διανομής
με χρήση Γενετικού Αλγόριθμου
μέσω της βέλτιστης τοποθέτησης Υποσταθμού ΥΤ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μάριος Γ. Μίχας

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Άρης Δημέας
Δρ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών

Αθήνα, Νοέμβριος 2013



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

**Επέκταση Δικτύου Διανομής
με χρήση Γενετικού Αλγόριθμου
μέσω της βέλτιστης τοποθέτησης Υποσταθμού ΥΤ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μάριος Γ. Μίχας

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Άρης Δημέας
Δρ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 12^η Νοεμβρίου 2013

.....
Ν. Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σ. Παπαθανασίου
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Π. Γεωργιλάκης
Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2013

.....
Μάριος Γ. Μίχας

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

Copyright © Μάριος Γ. Μίχας, 2013

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.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί ο σχεδιασμός της επέκτασης ενός δικτύου διανομής, λόγω της αύξησης της ζήτησης φορτίου. Η επέκταση του δικτύου έγινε μέσω της εγκατάστασης νέου Υποσταθμού YT, με χρήση Γενετικού Αλγόριθμου. Για την διαδικασία της βελτιστοποίησης με χρήση του Γενετικού Αλγόριθμου, χρησιμοποιήθηκε το Optimization Tool της Matlab R2011a και για την επίλυση ροών φορτίου των εκάστοτε δικτύων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Matpower (έκδοση 4.1), ένα λογισμικό του Matlab για την επίλυση ροών φορτίου και βέλτιστων ροών φορτίου.

Αρχικά, το δίκτυο διανομής που χρησιμοποιήθηκε, κωδικοποιήθηκε κατάλληλα για να είναι δυνατή η επεξεργασία του από τον Γενετικό Αλγόριθμο. Στη συνέχεια, υλοποιήθηκε η προς ελαχιστοποίηση αντικειμενική συνάρτηση και λόγω της αδυναμίας των προϋπαρχόντων επιλογών της Matlab, να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις του προβλήματος, σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν κατάλληλες συναρτήσεις για τις λειτουργίες Mutation και Crossover του Γενετικού Αλγόριθμου.

Ακολούθησε η διαδικασία της βελτιστοποίησης, η οποία υπέδειξε την βέλτιστη λύση για την τοποθέτηση του νέου Υποσταθμού YT και τη σύνδεσή του με το εξεταζόμενο δίκτυο διανομής. Η λύση αυτή αποτελεί το ολικό βέλτιστο (ελάχιστο) του προβλήματος, κάτι που εξακριβώθηκε με την υλοποίηση ενός απλού και αρκετά αργού ευρετικού αλγόριθμου, ο οποίος εξέτασε όλες τις πιθανές λύσεις και επέστρεψε τις βέλτιστες.

Στη συνέχεια, μετά την εύρεση της θέσης εγκατάστασης του νέου Υποσταθμού YT, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Matpower 4.1 στο περιβάλλον της Matlab, για την προσομοίωση του δικτύου διανομής και την επίλυση ροών φορτίου για δύο πιθανά σενάρια.

Το πρώτο σενάριο αφορούσε την ύπαρξη ενός δικτύου διανομής χωρίς διεσπαρμένη παραγωγή, με έναν εγκατεστημένο Υποσταθμό YT. Το δεύτερο σενάριο αφορούσε την ύπαρξη του ίδιου δικτύου διανομής με τον αρχικά εγκατεστημένο Υποσταθμό YT, αυτή τη φορά με διεσπαρμένη παραγωγή σε όλη την έκταση του δικτύου. Για τα δύο αυτά σενάρια έγινε η υπόθεση αύξησης φορτίου σε τέτοια επίπεδα, που το υπάρχον δίκτυο αδυνατούσε λειτουργώντας εντός ορίων τάσης και απωλειών ισχύος, να καλύψει.

Μετά την επίλυση ροών φορτίου για τα δύο παραπάνω σενάρια – δίκτυα ώστε να εξακριβωθεί η αποκατάσταση της σωστής λειτουργίας του δικτύου μετά την εγκατάσταση του νέου Υποσταθμού YT, έγινε σύγκριση των επιπέδων αύξησης φορτίου της κάθε περίπτωσης για τα οποία απαιτήθηκε η ύπαρξη επιπλέον Υποσταθμού.

Λέξεις-Κλειδιά

Γενετικός Αλγόριθμος, Βελτιστοποίηση, Βέλτιστη Τοποθέτηση Υποσταθμού, Δίκτυο Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, Διεσπαρμένη Παραγωγή, Ροή Φορτίου, Επέκταση Δικτύου Διανομής.

Abstract

The purpose of this diploma thesis is the planning of the expansion of a distribution network, due to a load growth. The distribution network was expanded by optimally sitting a new High Voltage Substation and the optimization method which was chosen is Genetic Algorithm. The Optimization Tool of Matlab R2001a was implemented in order to run the Genetic Algorithm and the power flow problem of the network was solved with the Matpower software (version 4.1), which is a Matlab software for solving the power flow and optimal power flow problems.

Initially, the distribution network was encoded properly in order to be able to be processed by the Genetic Algorithm. After that, the objective function was created and due to the fact that the existing functions for Mutation and Crossover did not meet the problem requirements, new ones were designed and developed.

The optimization procedure followed and the optimal solution for the sitting of the new High Voltage substation and its connection to the distribution system, was indicated. This solution is the global optimal one for this optimization problem and this was confirmed by a simple and really slow heuristic algorithm, which went over all the possible solutions of the problem and returned the optimal ones.

Then, after the indication of the suitable sitting of the High Voltage Substation, Matpower software was used in order for the distribution network to be simulated and the power flow problems to be solved, for two possible scenarios.

The first scenario concerned a distribution network without distributed generation, with only one High Voltage Substation sited. The second one concerned the same distribution network with distributed generation throughout this network. For these two scenarios, a load growth was considered which was not able to be met by the distribution system with the adequate functionality (the proper voltage levels and power losses).

Finally, after solving these two network cases so that the right operation is restored after the sitting of the new High Voltage Substation, a comparison was made between the two scenarios and the voltage level a new High Voltage Substation should be sited in each case.

Keywords

Genetic Algorithm, Optimization, Optimal Substation Sitting, Electrical Distribution Network, Distributed Generation, Power flow, Distribution Network Expansion

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2012-2013 στον τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών.

Υπεύθυνος κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας ήταν ο Καθηγητής κ. Ν. Χατζηαργυρίου, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της και την ευκαιρία που μου δόθηκε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Δρ. Δημέα Άρη, καθώς οι γνώσεις του, η συνεχής καθοδήγησή του, και η εξαιρετική μας συνεργασία ήταν καθοριστικής σημασίας για την ολοκλήρωση της εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την υποψήφια Διδάκτορα Δέσποινα Κουκουλά για την πολύτιμη βοήθειά της.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω όλους τους φίλους και συναδέλφους που μου συμπαραστάθηκαν κατά τη διάρκεια της φοιτητικής μου ζωής, και κυρίως την οικογένειά μου που με στήριξε σε όλη τη διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων και με στηρίζει ένθερμα σε κάθε βήμα της ζωής μου.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	15
1.1 Δομή Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	15
1.2 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	15
1.3 Μεταφορά Ηλεκτρικής Ενέργειας	16
1.4 Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας	17
1.4.1 Εξοπλισμός δικτύων διανομής.....	18
1.4.2 Στοιχεία Ελληνικού Δικτύου Διανομής.....	19
1.5 Επέκταση Δικτύου Διανομής	20
Κεφάλαιο 2: Αυτοματοποιημένα εργαλεία και μέθοδοι για τον σχεδιασμό του δικτύου διανομής	25
2.1 Γενικά.....	25
2.2 Βασικά βήματα σχεδιασμού ενός δικτύου διανομής	25
2.3 Γενική κατηγοριοποίηση και σύγκριση των μεθόδων βέλτιστου σχεδιασμού ..	26
2.4 Υπολογιστικά εργαλεία και μέθοδοι βέλτιστου σχεδιασμού δικτύου διανομής	28
2.5 Μέθοδοι σχεδιασμού γραμμών δικτύου διανομής.....	32
2.5.1 Επιθυμητά χαρακτηριστικά μεθόδων βέλτιστου σχεδιασμού γραμμών δικτύου διανομής	33
2.5.2 Τρεις περιπτώσεις εφαρμογής μεθόδων σχεδιασμού γραμμών δικτύου διανομής.....	35
2.5.3 Ακτινικότητα του βέλτιστου σχεδιασμού των γραμμών	38
2.5.4 Τυπική δομή αλγόριθμων βελτιστοποίησης γραμμών.....	39
2.6 Μέθοδοι σχεδιασμού βέλτιστης τοποθεσίας ΥΣ δικτύου διανομής	41
2.6.1 Γενικά χαρακτηριστικά.....	41
2.6.2 Βελτιστοποίηση μεγέθους υποσταθμών διανομής.....	42
2.6.3 Βελτιστοποίηση εξυπηρετούμενης περιοχής (SAO)	43
2.6.4 Αντοχή υποσταθμών και χρήση μεθόδων σχεδιασμού.....	47
2.7 Χρησιμότητα αλγόριθμων βελτιστοποίησης σχεδιασμού δικτύου διανομής	49
Κεφάλαιο 3: Γενετικοί Αλγόριθμοι	51
3.1 Ιστορία των εξελκτικών αλγόριθμων.....	51
3.2 Ορολογία Γενετικών Αλγορίθμων	52
3.3 Βασικά χαρακτηριστικά των Γενετικών Αλγορίθμων	54

3.4 Βασικά στοιχεία Γενετικών Αλγόριθμων	55
3.5 Πλεονεκτήματα Γενετικών Αλγόριθμων	59
3.6 Μειονεκτήματα Γενετικών Αλγόριθμων.....	60
3.7 Γενετικοί Αλγόριθμοι στο MATLAB	61
3.7.1 Fitness Function - Number of Variables	62
3.7.2 Περιγραφή Options	63
Κεφάλαιο 4: Διατύπωση Προβλήματος και Παραμετροποίηση Γενετικού Αλγόριθμου	77
4.1 Γενικά.....	77
4.2 Κωδικοποίηση.....	78
4.3 Αντικειμενική Συνάρτηση.....	79
4.4 Η συνάρτηση Mutation	81
4.5 Η συνάρτηση Crossover.....	83
4.6 Παραμετροποίηση των υπόλοιπων επιλογών του Γενετικού Αλγόριθμου	85
4.6.1 Population	85
4.6.2 Fitness Scaling	85
4.6.3 Selection.....	85
4.6.4 Reproduction.....	86
4.7 Προετοιμασία της διαδικασίας βελτιστοποίησης.....	86
4.8 Αποτελέσματα διαδικασίας βελτιστοποίησης.....	86
Κεφάλαιο 5: Σενάρια Φορτίου και Ροές Φορτίου με Χρήση Matpower	89
5.1 Σύντομη Περιγραφή Λογισμικού Matpower 4.1	89
5.1.1 Εκτέλεση Ροής Φορτίου.....	89
5.1.2 Διάταξη Αρχείου Δεδομένων	89
5.1.3 Μοντελοποίηση: AC Διατύπωση.....	91
5.2 Γενική Περιγραφή Σεναρίων Φορτίου	93
5.3 Σενάριο 1: Αρχικό Δίκτυο Διανομής χωρίς διεσπαρμένη παραγωγή	94
5.3.1 Ροή φορτίου για το αρχικό δίκτυο διανομής	94
5.3.2 Ροές φορτίου για αύξηση του φορτίου του αρχικού δικτύου χωρίς Δ.Π....	95
5.3.3 Αντιμετώπιση αύξησης φορτίου του αρχικού δικτύου χωρίς Δ.Π.	97
5.4 Σενάριο 2: Δίκτυο Διανομής με Διεσπαρμένη Παραγωγή.....	99
5.4.1 Ροή φορτίου για το Δίκτυο Διανομής με Δ.Π. σε ελάχιστο φορτίο.....	99
5.4.2 Ροή φορτίου για το Δίκτυο Διανομής με Δ.Π. σε πλήρες φορτίο.....	100

5.4.3 Ροές φορτίου για αύξηση του φορτίου του δικτύου διανομής με Δ.Π.	101
5.4.4 Αντιμετώπιση αύξησης φορτίου του αρχικού δικτύου με Δ.Π.....	103
Συμπεράσματα.....	105
Βιβλιογραφία	106

Εικόνες

Εικόνα 2.1: Γραμμικοποιημένα Κόστη Αγωγών Δικτύου Διανομής [6].....	36
Εικόνα 2.2: Τυπική δομή αλγόριθμων βελτιστοποίησης γραμμών [6].....	40
Εικόνα 2.3: Καμπύλη Αξιοπιστίας Μετασηματιστών [6].....	47
Εικόνα 2.4: Τιμή Μελλοντικής Χρησιμοποίησης [6]	48
Εικόνα 2.5: Κόστη Ενεργού Ισχύος κατά την πάροδο των χρόνων [6]	48
Εικόνα 3.1: Optimization Tool του Matlab με επιλογή Γενετικό Αλγόριθμο	62
Εικόνα 4.1: Σχέδιο Δικτύου Διανομής.....	77
Εικόνα 4.2: Τετραγωνισμένος Χάρτης Δικτύου Διανομής.....	79
Εικόνα 4.3: Βήματα Αντικειμενικής Συνάρτησης	80
Εικόνα 4.4: Βήματα Συνάρτησης Mutation	82
Εικόνα 4.5: Βήματα Συνάρτησης Crossover	84
Εικόνα 4.6: Βελτιστοποίηση με προεπιλεγμένες συναρτήσεις Mutation και Crossover	87
Εικόνα 4.7: Βελτιστοποίηση με τις νέες συναρτήσεις Mutation και Crossover.....	88
Εικόνα 4.8: Σημείο Τοποθέτησης Νέου Υποσταθμού ΥΤ.....	88

Πίνακες

Πίνακας 4.1: Συντεταγμένες βέλτιστων σημείων βάσει απλού ευρετικού αλγόριθμου	86
Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου για το αρχικό δίκτυο χωρίς Δ.Π.	94
Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου για το δίκτυο χωρίς Δ.Π. για $PL = 1,8 \times P_{max}$	95
Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου για το δίκτυο χωρίς Δ.Π. για $PL = 2,5 \times P_{max}$	96
Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου για το πρώτο υπο-δίκτυο χωρίς Δ.Π.	97
Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου για το δεύτερο υπο-δίκτυο χωρίς Δ.Π.	98
Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου για το αρχικό δίκτυο με Δ.Π. για ελάχιστο φορτίο	99
Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου για το αρχικό δίκτυο με Δ.Π. για μέγιστο φορτίο.....	100
Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου για το δίκτυο με Δ.Π. για $PL = 2,1 \times P_{max}$	101
Πίνακας 5.9: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου για το δίκτυο με Δ.Π. για $PL = 2,6 \times P_{max}$	102
Πίνακας 5.10: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου για το πρώτο υπο-δίκτυο με Δ.Π.	103
Πίνακας 5.11: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου για το δεύτερο υπο-δίκτυο με Δ.Π. ...	104

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Δομή Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ), καλείται το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Βασικές προϋποθέσεις καλής λειτουργίας ενός ΣΗΕ είναι η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις, εξασφαλίζοντας σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης.

Οι βασικές λειτουργίες ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η παραγωγή, η μεταφορά και η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας τους τελικούς καταναλωτές. Έτσι λοιπόν, σε ένα ΣΗΕ είναι δυνατόν να διακριθούν ειδικότερα συστήματα: το Σύστημα Παραγωγής, το Σύστημα Διασύνδεσης και Μεταφοράς, το Σύστημα Υπομεταφοράς και το Σύστημα Διανομής. Η ηλεκτρική ενέργεια βρίσκεται σε συνεχή ροή στο δίκτυο και λόγω του ότι δε γίνεται να αποθηκευτεί, επιβάλλεται η παραγωγή της ακριβώς τη στιγμή που καταναλώνεται, γεγονός που καθιστά την ακριβέστερη δυνατή πρόβλεψη ηλεκτρικού φορτίου ιδιαίτερα σημαντική.

Παρόλο που, όπως είναι λογικό, το μέγεθος των ΣΗΕ διαφέρει, υπάρχουν κοινά χαρακτηριστικά μεταξύ τους. Αρχικά, τα χρησιμοποιούμενα συστήματα είναι τριφασικά εναλλασόμενου ρεύματος, συχνότητας 50 ή 60 Hz, ενώ σε ειδικές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται και συστήματα συνεχούς ρεύματος για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας. Οι γραμμές μεταφοράς και οι γραμμές διανομής μέσης τάσης έχουν τρεις αγωγούς φάσεων, ενώ οι γραμμές διανομής χαμηλής τάσης έχουν και έναν, επιπλέον, ουδέτερο αγωγό. Στη διανομή χαμηλής τάσης, υπάρχουν και γραμμές μονοφασικές, δύο αγωγών.

Στα δίκτυα υψηλής και μέσης τάσης είναι συνδεδεμένοι κυρίως βιομηχανικοί καταναλωτές (τριφασικές παροχές), ενώ στα δίκτυα χαμηλής τάσης συνδέονται οικιακοί καταναλωτές και ένα μεγάλο μέρος πελατών εμπορικής χρήσης (μονοφασικές παροχές).

1.2 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί επί της ουσίας τη μετατροπή μιας μορφής πρωτογενούς ενέργειας σε ηλεκτρική. Σήμερα, χρησιμοποιείται κυρίως η

μετατροπή κάποιας άλλης μορφής ενέργειας πρώτα σε μηχανική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω γεννητριών.

Το Σύστημα παραγωγής περιλαμβάνει τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μαζί με τους υποσταθμούς ανυψώσεως της τάσης για τη μεταφορά του ρεύματος υπό υψηλή τάση.

Η ηλεκτρική ενέργεια που παρέχεται στους καταναλωτές παράγεται από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς (ατμοηλεκτρικοί, ντιζελοηλεκτρικοί και αεριοστροβιλικοί σταθμοί) με την καύση ορυκτών καυσίμων (άνθρακας, λιγνίτης, πετρέλαιο, φυσικό αέριο), από υδροηλεκτρικούς σταθμούς με τη ροή ή την πτώση των υδάτων (φυσικής ροής, ρυθμιζόμενης ροής, αντλητικοί) και από πυρηνικούς σταθμούς με την πυρηνική σχάση (ουράνιο, θόριο, πλουτόνιο). Τα τελευταία χρόνια, με μεγαλύτερη ένταση απ' ό,τι παλιότερα, ηλεκτρική ενέργεια παράγεται και από σταθμούς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως άνεμος (αιολικά πάρκα), τα θαλάσσια κύματα, η ηλιακή ενέργεια (φωτοβολταϊκοί σταθμοί), η γεωθερμία, η βιομάζα κ.α.

1.3 Μεταφορά Ηλεκτρικής Ενέργειας

Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας είναι το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου των εγκαταστάσεων και μέσων, που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από την έξοδο των σταθμών παραγωγής, μέχρι τους υποσταθμούς που τροφοδοτούν μεγάλα κέντρα κατανάλωσης, από τους οποίους ξεκινούν και τα δίκτυα διανομής, όπως επίσης και τους μεγάλους καταναλωτές υψηλής τάσης, οι οποίοι είναι κυρίως μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις (εγκατεστημένη ισχύς πάνω από 10 MW) και διαθέτουν δικό τους υποσταθμό υποβιβασμού της υψηλής τάσης σε μέση, όπως επίσης και εσωτερικά δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης.

Το Σύστημα Μεταφοράς περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υψηλής τάσης, τους υποσταθμούς ζεύξεως των δικτύων αυτών, τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διαφόρων τάσεων του δικτύου και τους υποσταθμούς υποβιβασμού της υψηλής τάσης σε μέση τάση για την τροφοδότηση των δικτύων διανομής.

Τα συστήματα μεταφοράς έχουν κυρίως βροχοειδή διάταξη, γεγονός που επιτρέπει περισσότερες διαδρομές ροής ενέργειας και συνεπώς εξυπηρετεί καλύτερα τους σκοπούς μεταφοράς, ενώ κατά τη σχεδίαση της γραμμής μεταφοράς πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η τοπογραφία της περιοχής που διατρέχει η γραμμή.

Η μεταφορά του ηλεκτρικού ρεύματος γίνεται με υψηλή τάση, διότι αυτό συνεπάγεται μικρότερες ηλεκτρικές απώλειες και άρα οικονομικότερη λειτουργία του συστήματος. Χρησιμοποιούνται διάφορα επίπεδα τάσεων μεταφοράς και η επιλογή τους γίνεται βάση της απόστασης και του μεγέθους της ισχύος που μεταφέρεται. Στις μέρες μας, οι εφαρμοζόμενες τάσεις μεταφοράς είναι 66 kV, 110 kV, 132 kV, 138 kV, 150 kV, 220 kV, 275kV, 345 kV, 400 kV, 500 kV και 750 kV. Έτσι, προκύπτουν τρεις βαθμίδες τάσεων : η βαθμίδα υψηλών τάσεων (ΥΤ) που περιλαμβάνει τις τάσεις μέχρι 220 kV, η βαθμίδα των υπερυψηλών τάσεων (ΥΥΤ) με τάσεις από 275 kV

μέχρι 500 kV και η βαθμίδα εξαιρετικά υψηλών τάσεων (EYT) με τάσεις πάνω από 500 kV. Πειραματικά, βρίσκονται υπό μελέτη και οι τάσεις 1100 kV και 1500 kV, οι οποίες πιθανότατα θα χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας στο μέλλον.

Οι αγωγοί υψηλής τάσης των εναέριων γραμμών μεταφοράς αναρτώνται από τους πυλώνες της γραμμής (ξύλινοι ή χαλύβδινοι για πάνω από 100 kV) διαμέσου σειράς μονωτήρων, οι οποίοι αποτελούνται από αλυσίδα πορσελάνινων ή γυάλινων δίσκων. Όσο μεγαλύτερη είναι η εφαρμοζόμενη τάση μεταφοράς τόσο περισσότεροι δίσκοι τοποθετούνται στους αλυσοειδείς μονωτήρες, ώστε να αυξηθεί η μόνωση. Μεταξύ αγωγών και αγωγών και γης, η μόνωση επιτυγχάνεται λόγω της παρουσίας του αέρα ανάμεσά τους.

Κριτήριο για την επιλογή μιας τάσης μεταφοράς αποτελεί η ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς, το οποίο περιέχει τα επιμέρους κόστη της εγκατάστασης, των απωλειών και της συντήρησης της γραμμής. Παρόλο που όσο μεγαλύτερη είναι η εφαρμοζόμενη τάση μεταφοράς του ηλεκτρικού ρεύματος, τόσο μικρότερες είναι οι ηλεκτρικές απώλειες (άρα και το κόστος απωλειών), όσο μεγαλώνει το επίπεδο της εφαρμοζόμενης τάσης μεταφοράς τόσο πιο υψηλό γίνεται το κόστος του εξοπλισμού της εγκατάστασης. Επομένως, για την επιλογή του επιπέδου της τάσης μεταφοράς απαιτείται η εύρεση της χρυσής τομής μεταξύ του κόστους απωλειών και του κόστους εγκατάστασης.

Ένα σύστημα παραγωγής και μεταφοράς μπορεί να λειτουργήσει μεμονωμένο ή διασυνδεδεμένο με άλλα γειτονικά ΣΗΕ. Η διασύνδεση γίνεται κυρίως σε επίπεδο εθνικών συστημάτων με οφέλη τόσο τεχνικά όσο και οικονομικά. [1]

1.4 Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας

Διανομή ηλεκτρικής ενέργειας ορίζεται ως το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου με τις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στους καταναλωτές. Τα δίκτυα διανομής περιλαμβάνουν τις γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας, που τροφοδοτούν μια εξυπηρετούμενη περιοχή και φθάνουν μέχρι και τον τελευταίο καταναλωτή και τους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσης, οι οποίοι τις συνδέουν με το σύστημα μεταφοράς. Παρόλο που τα δίκτυα μεταφοράς είναι διεθνώς όμοια, τα δίκτυα διανομής κάθε χώρας εμφανίζουν δικά τους χαρακτηριστικά.

Στα επίπεδο της διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας, διακρίνουμε δύο βαθμίδες:

- α) Διανομή Μέσης Τάσης (MT) ή πρωτεύουσα διανομή και
- β) Διανομή Χαμηλής Τάσης (XT) ή δευτερεύουσα διανομή

Οι χρησιμοποιούμενοι στύλοι είναι συνήθως ξύλινοι ή τσιμεντένιοι, ενώ σπανιότερα μεταλλικοί. Στα δίκτυα χαμηλής τάσης οι αγωγοί είναι συνήθως από απλό αλουμίνιο και στα δίκτυα μέσης τάσης από αλουμίνιο ενισχυμένο με χάλυβδα ή

κράματα αλουμινίου. Βέβαια, συνηθίζεται πλέον, η χρήση μονωμένων αγωγών στα δίκτυα χαμηλής τάσης αντί γυμνών αγωγών, γεγονός που διασφαλίζει αυξημένη ασφάλεια λειτουργίας.

Το δίκτυο διανομής MT τροφοδοτείται από τους υποσταθμούς υποβιβασμού ΥΤ/MT και τροφοδοτεί τους υποσταθμούς διανομής MT/XT, όπως επίσης και τους καταναλωτές MT (βιομηχανίες, νοσοκομεία, μεγάλα πολυκαταστήματα, τράπεζες). Τα εν λόγω δίκτυα είναι συνήθως βροχοειδή ώστε να επιτυγχάνεται οικονομία γραμμών, αλλά λειτουργούν ακτινικά για να εξασφαλίζεται ευκολότερα η προστασία τους, όπως επίσης και η ροή ενέργειας στα δίκτυα αυτά.

Τα δίκτυα διανομής MT είναι άλλοτε εναέρια και άλλοτε υπόγεια. Ο κύριος λόγος διαχωρισμού τους είναι η πυκνότητα φορτίου στην εκάστοτε εξυπηρετούμενη περιοχή. Επί παραδείγματι, στα μεγάλα αστικά κέντρα, ή γενικότερα σε περιοχές μεγάλης πυκνότητας φορτίου, τα δίκτυα είναι κατά κύριο λόγο υπόγεια, δηλαδή οι γραμμές διανομής αποτελούνται από καλώδια, ενώ σε περιοχές με λιγότερο πυκνό φορτίο, τα δίκτυα είναι κυρίως εναέρια. Πλεονεκτήματα των εναερίων δικτύων έναντι των υπογείων είναι ότι κοστίζουν λιγότερο και η αποκατάσταση των βλαβών τους γίνεται ταχύτερα.

Κόμβους του δικτύου διανομής MT αποτελούν οι υποσταθμοί διανομής, από τους οποίους ξεκινούν οι γραμμές του δικτύου χαμηλής τάσης. Πρόκειται για υποσταθμούς που διαθέτουν μετασχηματιστές διανομής, με τους οποίους γίνεται υποβιβασμός της τάσης από μέση σε χαμηλή. Σε πυκνοκατοικημένες περιοχές είναι εσωτερικού ή υπόγειου τύπου, ενώ σε πιο αραιοκατοικημένες συναντούμε εναέριους (πάνω σε στύλους) ή επίγειους.

Τα δίκτυα διανομής XT τροφοδοτούν τις παροχές των καταναλωτών χαμηλής τάσης (οικιακοί καταναλωτές) και λόγω του γεγονότος ότι οι παροχές χαμηλής τάσης, μπορεί να είναι είτε τριφασικές είτε μονοφασικές, η χαμηλή τάση αναφέρεται με δύο τιμές: πολική τάση/φασική τάση του συστήματος. Στις χώρες της ευρωπαϊκής ένωσης συναντούμε τριφασικά συστήματα 400/230 V.

Αξίζει εδώ να σημειωθεί, ότι οι απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας σε επίπεδο διανομής είναι περίπου διπλάσιες απ' ότι στο επίπεδο μεταφοράς. Επίσης, η αξία εγκαταστάσεων διανομής, είναι γύρω στο 30 % του συνόλου των εγκαταστάσεων και ακόμη μεγαλύτερη είναι η ποσοστιαία συμμετοχή στις δαπάνες εκμετάλλευσης. [2]

1.4.1 Εξοπλισμός δικτύων διανομής

Ο εξοπλισμός των δικτύων διανομής αποτελείται από τα «μέσα ζεύξεως» και τα «μέσα προστασίας», τα οποία χρησιμοποιούνται συχνά σε συνδυασμό και η κατασκευαστική τους διαμόρφωση ποικίλει ανάλογα με τον αν χρησιμοποιούνται σε εσωτερικό ή εξωτερικό χώρο και φυσικά με τα επίπεδα της τάσης του δικτύου.

Τα μέσα ζεύξεως χρησιμεύουν για τη ζεύξη και την απόζευξη τμημάτων του δικτύου. Έχουν την ικανότητα να διαρρέονται συνεχώς από το ονομαστικό τους ρεύμα και όταν είναι σε κλειστή θέση επιτρέπουν τη διέλευση, για μικρό χρονικό

διάστημα, μεγάλων ρευμάτων που οφείλονται σε βραχυκυκλώματα. Οι κύριες κατηγορίες των μέσων ζεύξεως είναι:

1. *Οι αποζεύκτες* : ανοίγουν όταν δεν υπάρχει σημαντική διαφορά τάσης ανάμεσα στους δύο πόλους τους ή όταν το ρεύμα που διακόπτεται είναι αμελητέο (π.χ. χωρικά ρεύματα μονωτήρων, ζυγών, μετασχηματιστών τάσεων ή μικρού μήκους καλωδίων.
2. *Διακόπτες φορτίου*: χρησιμοποιούνται κυρίως σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας του κυκλώματος για την διακοπή ή την αποκατάσταση εντάσεων ρεύματος. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως αυτή του βραχυκυκλώματος, χρησιμεύουν για την αποκατάσταση -όχι όμως και τη διακοπή- των ρευμάτων βραχυκυκλώσεως.
3. *Διακόπτες ισχύος*: χρησιμοποιούνται κυρίως για την διακοπή ή την αποκατάσταση εντάσεων ρευμάτων σε κάποιες μη κανονικές συνθήκες, όπως κατά την εξέλιξη ενός βραχυκυκλώματος. Χρησιμεύουν, σπανιότερα βέβαια, για την διακοπή ή την αποκατάσταση ρευμάτων και σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας. [3]

Τα μέσα προστασίας χρησιμεύουν για την αυτόματη απομόνωση τμημάτων του δικτύου για την πρόληψη βλάβης ή σε περίπτωση βλάβης. Ως μέσα προστασίας χρησιμοποιούνται:

1. Οι διακόπτες ισχύος, όταν δέχονται εντολές από Ηλεκτρονόμους Προστασίας
2. Οι ασφάλειες

1.4.2 Στοιχεία Ελληνικού Δικτύου Διανομής

Η διαχείριση του ελληνικού δικτύου διανομής γίνεται από την ΔΕΔΔΗΕ ΑΕ (Διαχειριστής του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας), η οποία αποτελεί θυγατρική της ΔΕΗ ΑΕ (Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού). Αποστολή του ΔΕΔΔΗΕ είναι η λειτουργία, η συντήρηση και η ανάπτυξη του ελληνικού δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να διασφαλιστεί η αξιόπιστη τροφοδοσία των καταναλωτών, η ποιότητα της τάσης του ρεύματος και η βελτίωση της ποιότητας εξυπηρέτησης. Σύμφωνα με τον ΔΕΔΔΗΕ [4] τα ποσοτικά μεγέθη του δικτύου ηλεκτρισμού της Ελλάδας για το 2011 είναι :

- Δίκτυο Μέσης Τάσης (Μ.Τ.) : 107.500 km
- Δίκτυο Χαμηλής Τάσης (Χ.Τ.): 121.400 km
- **Συνολικά km Δικτύου:** **228.900 km**

- Υποσταθμοί Μέσης Τάσης προς Χαμηλή Τάση (Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ) : **155.000**
Δίκτυο Υψηλή Τάσης (Υ.Τ.) : **949 km** (205 km στην Αττική και 744 km στα μη διασυνδεδεμένα νησιά)
Υποσταθμοί Υψηλής Τάσης προς Μέση Τάση (Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ): **224** (εκ των οποίων 20 κλειστού τύπου και κατανεμημένοι: 199 στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα και 25 στα μη Διασυνδεδεμένα νησιά)
- Αριθμός Πελατών : **7.503.265** (10.147 ΜΤ & 7.493.118 ΧΤ)
Καταναλώσεις Πελατών: **47.716 GWh** (11.587 ΜΤ & 34.129 ΧΤ)
- **Κύρια οικονομικά μεγέθη του δικτύου Διανομής:**
 - ✓ **Επενδύσεις** (Ετήσιες δαπάνες επενδύσεων): **300 εκ. €**
 - ✓ **Εκμετάλλευση** (Ετήσιες λειτουργικές δαπάνες): **440 εκ. €**
 - ✓ **Ετήσια έσοδα από χρήση δικτύου** της τάξης των: **800 εκ. €**
 - ✓ **Πάγια Δικτύων Διανομής** με αναπόσβεστη αξία: **5 δις €**

1.5 Επέκταση Δικτύου Διανομής

Για τον σχεδιασμό και την επέκταση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητη η διασφάλιση ότι η αυξανόμενη ζήτηση του ηλεκτρικού φορτίου μπορεί να ικανοποιηθεί από την επέκταση του δικτύου διανομής με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούνται ορισμένοι τεχνικοί και οικονομικοί περιορισμοί. Παρόλο που έχει γίνει σημαντική έρευνα για την εφαρμογή ορισμένων συστηματικών προσεγγίσεων για την παραγωγή και την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας, δε δόθηκε εξ αρχής η ανάλογη σημασία για την διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Πλέον, περισσότερο από τα προηγούμενα χρόνια, οι επιχειρήσεις ηλεκτρικής ενέργειας (ΔΕΗ για την Ελλάδα) χρειάζονται γρήγορα και οικονομικά σχεδιαστικά εργαλεία, για την αξιολόγηση των συνεπειών των διαφόρων προτεινόμενων εναλλακτικών και των επιπτώσεων, που πιθανώς έχουν, στην οικονομική, αξιόπιστη και ασφαλή διάθεση ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές από το συνολικό ΣΗΕ. [5]

Βασικός στόχος κατά τον σχεδιασμό της επέκτασης του δικτύου διανομής είναι να εξασφαλιστεί ότι η αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρική ενέργειας θα ικανοποιείται κατά τον βέλτιστο τρόπο σε ό,τι αφορά τους τεχνικούς και οικονομικούς περιορισμούς, από προσθήκες στο δίκτυο διανομής που βρίσκονται σε όλη την έκταση από τις γραμμές μέσης τάσης μέχρι τους ογκώδεις υποσταθμούς. Οι τεχνικοί και οικονομικοί αυτοί περιορισμοί, αλλά και άλλοι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό, όπως για παράδειγμα η έλλειψη χώρου σε αστικές περιοχές και οι οικολογικές επιπτώσεις, καθιστούν το πρόβλημα του βέλτιστου σχεδιασμού των δικτύων διανομής ιδιαίτερα δύσκολο και σίγουρα πέρα από τις δυνατότητες του ανθρώπινου μυαλού. Οι μηχανικοί σχεδιασμού των δικτύων διανομής πρέπει να καθορίσουν το μέγεθος του φορτίου, καθώς επίσης και την γεωγραφική του τοποθεσία. Στη συνέχεια, ακολουθεί η επιλογή του μεγέθους και της

τοποθεσίας των υποσταθμών διανομής με τέτοιο τρόπο, ώστε να εξυπηρετεί το φορτίο με τον πιο αποδοτικό οικονομικά τρόπο, ελαχιστοποιώντας τις απώλειες των γραμμών και το κόστος κατασκευής, χωρίς να παραβιάζονται προφανώς οι περιορισμοί που αφορούν την αξιοπιστία του συστήματος.

Λόγω του αυξανόμενου κόστους ενέργειας, εξοπλισμού καθώς και εργατικών καθίσταται αναπόφευκτη και απαραίτητη η εφαρμογή αποδοτικών μεθόδων και τεχνικών για την βελτίωση του σχεδιασμού του συστήματος διανομής. Το δίκτυο διανομής είναι πολύ σημαντικό για μία επιχείρηση ηλεκτρισμού, διότι αφενός αποτελεί το εγγύτερο μέρος του συστήματος στον τελικό καταναλωτή και αφετέρου, το κόστος επένδυσής του είναι αρκετά υψηλό. Από τη στιγμή, λοιπόν, που το δίκτυο διανομής αποτελεί το μέρος του ευρύτερου ηλεκτρικού συστήματος που βρίσκεται πιο κοντά στον καταναλωτή, η οποιαδήποτε επιπλοκή στο δίκτυο αυτό επηρεάζει πολύ πιο άμεσα την εξυπηρέτηση πελατών απ' ό,τι, για παράδειγμα, κάποια επιπλοκή στο σύστημα μεταφοράς ή παραγωγής, η οποία σπάνια προκαλεί προβλήματα αντιληπτά από τους τελικούς καταναλωτές.

Ως εκ τούτου, ο σχεδιασμός της ανάπτυξης ή της επέκτασης του συστήματος διανομής ξεκινάει από το επίπεδο των καταναλωτών. Έτσι, λοιπόν, η ζήτηση, ο τύπος, ο συντελεστής και άλλα χαρακτηριστικά του φορτίου των καταναλωτών υποδεικνύουν τον τρόπο που θα σχεδιαστεί η ανάπτυξη ή η επέκταση του δικτύου διανομής. Αφού καθορίζονται τα φορτία των καταναλωτών, ομαδοποιούνται σε κατηγορίες προς εξυπηρέτηση από τις γραμμές χαμηλής τάσης, οι οποίες συνδέονται με τους υποσταθμούς διανομής, και κατ' επέκταση τους μετασχηματιστές ΜΤ/ΧΤ. Τα φορτία, λοιπόν, που συνδέονται στους μετασχηματιστές διανομής συνδυάζονται και αποτελούν τα φορτία του δικτύου διανομής μέσης τάσης, τα οποία εξυπηρετούνται μέσω των γραμμών μέσης τάσης, από τους υποσταθμούς μέσης τάσης, στους οποίους γίνεται υποβιβασμός της τάσης από το δίκτυο μεταφοράς. Τελικά, τα φορτία του συστήματος διανομής καθορίζουν το μέγεθος και την τοποθεσία των υποσταθμών, όπως επίσης και τη δρομολόγηση και την χωρητικότητα των συνδεδεμένων γραμμών μεταφοράς. Με λίγα λόγια, κάθε βήμα της παραπάνω διαδικασίας, χρησιμοποιείται ως δεδομένο εισόδου για το επόμενο βήμα.

Ο σχεδιαστής του δικτύου διανομής διαιρεί το ολικό πρόβλημα σχεδιασμού του δικτύου διανομής σε υποπροβλήματα τα οποία αντιμετωπίζονται με τη χρήση των διαθέσιμων μεθόδων και τεχνικών. Στην περίπτωση όμως που οι σχεδιαστές του δικτύου δε διαθέτουν αποδεκτές τεχνικές σχεδιασμού, καταφεύγουν στην επαναδιατύπωση του προβλήματος σε μια προσπάθεια ελαχιστοποίησης του κόστους υπομεταφοράς, υποσταθμών, γραμμών όπως και επίσης, του κόστους των απωλειών. Βέβαια, κατά τη διαδικασία αυτή, ο σχεδιαστής περιορίζεται από διάφορους περιορισμούς, όπως η συνεχής και αξιόπιστη εξυπηρέτηση των καταναλωτών καθώς και οι επιτρεπτές τιμές τάσης και τα επιτρεπτά όρια βύθισης τάσης κτλ. Για την ικανοποίηση, λοιπόν, αυτών των στόχων και των περιορισμών, ο σχεδιαστής προβαίνει σε προσθήκες ή τροποποιήσεις του δικτύου υπομεταφοράς, της τοποθεσίας και του μεγέθους των υποσταθμών, την εξυπηρετούμενη περιοχή από τον κάθε υποσταθμό, την τοποθεσία των διακοπών, τα χαρακτηριστικά και την έκταση των

γραμμών του δικτύου, τα επίπεδα τάσης και τα περιθώρια πτώσης τάσης του συστήματος, την τοποθεσία των πυκνωτών και των ρυθμιστών τάσεως και το φορτίο των μετασχηματιστών και των γραμμών.

Υπάρχουν, φυσικά, αρκετοί ακόμα παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό, όπως η αντίσταση του μετασχηματιστή, τα επίπεδα μόνωσης, η διαθεσιμότητα εφεδρικών μετασχηματιστών και κινητών υποσταθμών, καθώς επίσης, και η τιμή χρέωσης των καταναλωτών. Επίσης, υπάρχουν παράγοντες οι οποίοι δεν επηρεάζονται από τις επιλογές και τις αποφάσεις των σχεδιαστών του δικτύου, μα παράλα αυτά πρέπει να ληφθούν υπόψη για τον μακροπρόθεσμο σχεδιασμό του δικτύου διανομής, όπως: τα χρονικά και χωρικά χαρακτηριστικά της ζήτησης του φορτίου, τα αυξανόμενα κόστη καυσίμων, η διάρκεια και η συχνότητα των διακοπών, το κόστος εξοπλισμού, η αύξηση ή η μείωση των τιμών των εναλλακτικών πηγών ενέργειας, η αλλαγή των κοινωνικοοικονομικών συνθηκών, όπως η μη αναμενόμενη αύξηση ή μείωση του τοπικού πληθυσμού, η αλλαγή των καταναλωτικών συνθηκών λόγω της ανάπτυξης της τεχνολογίας, η αλλαγή των περιβαλλοντικών ανησυχιών, η αλλαγή των οικονομικών συνθηκών, όπως η αύξηση ή η μείωση του ακαθάριστου εγχώριου προϊόντος (ΑΕΠ).

Ο βασικότερος παράγοντας που επηρεάζει τον σχεδιασμό της επέκτασης ενός δικτύου διανομής είναι η *αύξηση του φορτίου* της γεωγραφικής περιοχής που εξυπηρετείται από το εν λόγω δίκτυο. Απαιτείται, λοιπόν, η όσο το δυνατόν καλύτερη πρόβλεψη της αύξησης του φορτίου, η οποία γίνεται είτε μακροπρόθεσμα, δηλαδή με ορίζοντα χρόνου από 15 έως 20 χρόνια, είτε βραχυπρόθεσμα, με χρονικό ορίζοντα μέχρι 5 χρόνια. Παράγοντες που επηρεάζουν την *πρόβλεψη του φορτίου* είναι:

- ✓ Αύξηση πληθυσμού
- ✓ Πυκνότητα φορτίου
- ✓ Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
- ✓ Σχέδια ανάπτυξης της περιοχής
- ✓ Βιομηχανικός σχεδιασμός
- ✓ Αστικός σχεδιασμός
- ✓ Χρήση γης
- ✓ Γεωγραφικοί παράγοντες
- ✓ Ιστορικά δεδομένα

Καθοριστικό ρόλο στο σχεδιασμό ενός δικτύου διανομής, εκτός από την αύξηση φορτίου, διαδραματίζει και η επιλογή των κατάλληλων χαρακτηριστικών των υποσταθμών του δικτύου. Παράγοντες, λοιπόν, που επηρεάζουν την *επέκταση και την τοποθεσία των υποσταθμών* αποτελούν:

- ✓ Παρούσα χωρητικότητα και διαμόρφωση των υποσταθμών
- ✓ Πρόβλεψη φορτίου
- ✓ Περιορισμοί χωρητικότητας
- ✓ Περιορισμοί των γραμμών

- ✓ Απώλειες ισχύος
- ✓ Περιορισμοί σχεδιασμού
- ✓ Οικονομικοί παράγοντες
- ✓ Τελικοί περιορισμοί μεγέθους
- ✓ Εγγύτητα στα κέντρα των φορτίων
- ✓ Ήδη υπάρχουσες τοποθεσίες υποσταθμών
- ✓ Κόστος γης
- ✓ Φυσικά εμπόδια
- ✓ Διαθεσιμότητα φυσικού χώρου

Εκτός από τους παραπάνω παράγοντες, που αφορούν στην πρόβλεψη φορτίου και στις επιλογές υποσταθμών, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τον σχεδιασμό του δικτύου διανομής. Ενδεικτικά, αναφέρονται τα εξής *κόστη*:

- ✓ Υλικών
- ✓ Κατασκευής
- ✓ Εγκατάστασης
- ✓ Κεφαλαίου
- ✓ Φορολογίας
- ✓ Λειτουργίας
- ✓ Συντήρησης

Κεφάλαιο 2

Αυτοματοποιημένα εργαλεία και μέθοδοι για τον σχεδιασμό του δικτύου διανομής

2.1 Γενικά

Τα «εργαλεία υποστήριξης αποφάσεων» βοηθούν τους σχεδιαστές του συστήματος, να διαλέξουν ανάμεσα στις διαθέσιμες εναλλακτικές για τη μελλοντική μορφή, τον προγραμματισμό της επέκτασης και τη λειτουργία του δικτύου διανομής. Σε αντίθεση με τους εξομοιωτές απόδοσης, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της απόδοσης ενός συγκεκριμένου σχεδιασμού του συστήματος, τα εργαλεία υποστήριξης αποφάσεων χρησιμοποιούνται με σκοπό να συμβάλουν στην επιλογή του καταλληλότερου από όλους τους πιθανούς σχεδιασμούς. Η χρήση των εργαλείων αυτών άρχισε να γίνεται σε μεγαλύτερη κλίμακα με την πρόοδο της τεχνολογίας και την εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Η εφαρμογή τους σε προβλήματα σχεδιασμού ανέδειξε δύο πολύ σημαντικά πλεονεκτήματά τους. Το πρώτο αφορά στην αυτοματοποιημένη μορφή τους, η οποία επιτρέπει την αυτόματη εκτέλεση κάποιων διαδικασιών του σχεδιασμού μειώνοντας τον απαιτούμενο χρόνο, αλλά και την απαιτούμενη προσπάθεια από τους σχεδιαστές. Το δεύτερο, ως επακόλουθο του πρώτου, είναι η δυνατότητα εφαρμογής μέσω των εργαλείων αυτών μεθόδων βελτιστοποίησης για την εύρεση, όχι απλά ενός καλού σχεδίου επέκτασης δικτύου διανομής, αλλά του βέλτιστου. [6]

2.2 Βασικά βήματα σχεδιασμού ενός δικτύου διανομής

Ο σχεδιασμός του δικτύου διανομής πραγματοποιείται με τρία βασικά βήματα. Αρχικά, *καθορίζονται όλα τα εναλλακτικά σχέδια*, στη συνέχεια *αξιολογούνται βάσει συγκεκριμένων κριτηρίων και επιθυμητών χαρακτηριστικών*, ώστε να ακολουθήσει, τελικά, *η επιλογή της καλύτερης εναλλακτικής*. Το κάθε βήμα από αυτά καθίσταται συχνά ιδιαίτερα δύσκολο και χαοτικό, λόγω της μεγάλης πολυπλοκότητας του δικτύου διανομής, καθώς αποφάσεις σχετικές με την επιλογή του εξοπλισμού, την τοποθεσία και το μέγεθος των υποσταθμών και των γραμμών του δικτύου διανομής είναι αλληλένδετες και η τελική λήψη μιας απόφασης για κάτι από τα παραπάνω επηρεάζει τις αποφάσεις για τα υπόλοιπα.

Επιπρόσθετα, οι περισσότερες αποφάσεις σχετικά με τον σχεδιασμό ενός δικτύου διανομής περιλαμβάνουν πολυάριθμα κριτήρια και περιορισμούς. Σαν αποτέλεσμα, οι μηχανικοί-σχεδιαστές αντιμετωπίζουν μονίμως προβλήματα με

εκατομμύρια εναλλακτικές λύσεις, κάθε μία από τις οποίες πρέπει να αξιολογηθεί με βάση πολυπληθή κριτήρια, όπως επίσης και τα αρχικά και τα μακροπρόθεσμα κόστη. Παρόλο, λοιπόν, που η κρίση και η εμπειρία των μηχανικών μπορούν να βοηθήσουν στη λήψη των σχετικών με τον σχεδιασμό αποφάσεων, η χειροκίνητη αξιολόγηση τόσων πολλών εναλλακτικών που αφορούν πολυπληθή χαρακτηριστικά είναι μια επίπονη και εκτενής διαδικασία, πολύ χρονοβόρα και δαπανηρή και αρκετά επιρρεπής σε λάθη και παραλείψεις. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη πολλών υπολογιστικών εργαλείων που είναι διαθέσιμα, ώστε να αυτοματοποιηθεί η παραπάνω διαδικασία, παρέχοντας ταυτόχρονα τη δυνατότητα τυποποίησης της διαδικασίας του σχεδιασμού, αλλά και της τεκμηριωμένης αιτιολόγησης του τελικού σχεδίου του δικτύου. [7]

2.3 Γενική κατηγοριοποίηση και σύγκριση των μεθόδων βέλτιστου σχεδιασμού

Η χρήση μιας μεθόδου βελτιστοποίησης για τον σχεδιασμό ενός δικτύου διανομής προϋποθέτει τη ύπαρξη κάποιων συμβιβασμών μεταξύ των υπαρχόντων επικαλυπτόμενων στόχων της μεθόδου. Υπάρχει πάντοτε, για παράδειγμα, συμβιβασμός μεταξύ του μεγέθους του προβλήματος (π.χ. ο αριθμός των γραμμών ή των υποσταθμών που μελετούνται) και του υπολογιστικού χρόνου. Οι περισσότερες μέθοδοι βελτιστοποίησης έχουν σχέσεις εκθετικού χρόνου εκτέλεσης. Μάλιστα, μέθοδοι που είναι γρήγορες και ικανές για την επίλυση μεγάλων προβλημάτων επιτυγχάνουν τέτοιες ταχύτητες κατά κανόνα προσεγγιστικά (συνήθως μέσω της γραμμικοποίησης). Οι ακριβείς μέθοδοι είναι αργές και περιορισμένες ως προς την εφαρμογή τους σε μία ή δύο γραμμές τη φορά.

Αυτό που είναι σημαντικό για μία μέθοδο βελτιστοποίησης, δεν είναι η ταχύτητα, το μέγεθος προβλήματος ή η ακρίβεια, αλλά το πώς η μέθοδος αυτή με τη βοήθεια ενός γρήγορου ηλεκτρονικού υπολογιστή θα αποδειχθεί ένα πολύτιμο εργαλείο.

Περιορισμοί

Μία σημαντική παράμετρος που καθορίζει αν μία μέθοδος βελτιστοποίησης είναι κατάλληλη για την επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος, είναι ο τύπος των περιορισμών που μπορεί να διαχειριστεί. Οι περιορισμοί αποτελούν μέρος των περισσότερων περιπτώσεων σχεδιασμού δικτύων διανομής. Παραδείγματα τέτοιων περιορισμών αποτελούν η διατήρηση της ακτινικότητας του δικτύου, ο περιορισμός του φορτίου από την υπέρβαση των ονομαστικών τιμών κτλ. Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό από το πόσο καλά μπορούν να διαχειριστούν τους περιορισμούς του προβλήματος. Μερικές μέθοδοι δε μπορούν να ανταποκριθούν στη διαχείριση των περιορισμών, ενώ κάποιες άλλες μπορούν προσεγγιστικά.

Διακριτές έναντι Συνεχών

Οι «διακριτές» μέθοδοι βελτιστοποίησης διαχειρίζονται προβλήματα σχεδιασμού στα οποία ο αριθμός των επιλογών είναι περιορισμένος σε ένα σύνολο διακριτών τιμών. Για παράδειγμα, οι μετασχηματιστές των υποσταθμών που είναι διαθέσιμοι μπορεί να είναι των τύπων 7.5, 15, 20 και 24 MVA. Μία μέθοδος βελτιστοποίησης που μπορεί να λάβει υπόψη αυτά τα διακριτά μεγέθη μετασχηματιστών, που θα επιλέξει δηλαδή κάποιον μετασχηματιστή από τους συγκεκριμένους τύπους, λέγεται «διακριτή μέθοδος» (*integer method*). Ο όρος αυτός δε σημαίνει ότι τα μεγέθη ή οι τιμές που χρησιμοποιούνται είναι ακέραιοι, αλλά υπονοεί πως η συγκεκριμένη μέθοδος βελτιστοποίησης διαχειρίζεται ένα διακριτό σύνολο μεγεθών.

Αντίθετα, κάποιες μέθοδοι βελτιστοποίησης είναι *συνεχείς μέθοδοι* (*continuous methods*). Οι μέθοδοι αυτές, λειτουργούν χρησιμοποιώντας κάθε τιμή που βρίσκεται μέσα σε ένα συγκεκριμένο επιτρεπόμενο εύρος και είναι κατάλληλες για συγκεκριμένους τύπους προβλημάτων, όπως για παράδειγμα τον καθορισμό των βέλτιστων ορίων της πτώσης τάσης σε μία γραμμή, όπου η βέλτιστη τιμή θα μπορούσε να είναι οποιαδήποτε τιμή ανάμεσα στα 113 και τα 126 Volt.

Οι διακριτές μέθοδοι εφαρμόζονται καλύτερα στα προβλήματα σχεδιασμού δικτύων διανομής στα οποία υπάρχουν μόνο διακριτά μεγέθη πιθανών λύσεων, ενώ οι συνεχείς μέθοδοι αποδίδουν καλύτερα σε περιπτώσεις που οι πιθανές λύσεις καλύπτουν όλες τις τιμές ενός προκαθορισμένου εύρους τιμών. Υπάρχουν βέβαια και περιπτώσεις προβλημάτων που εφαρμόζεται η μία μέθοδος στη θέση της άλλης.

Μία μέθοδος βελτιστοποίησης που μπορεί να διαχειριστεί ένα πρόβλημα στο οποίο απαιτείται η ταυτόχρονη επιλογή από εναλλακτικές λύσεις, οι οποίες έχουν και διακριτά και συνεχή χαρακτηριστικά, λέγεται *μικτή διακριτή μέθοδος* (*mixed integer method*).

Γραμμικές έναντι Μη γραμμικών

Πολλές από τις πιο γρήγορες και αξιόπιστες μεθόδους βελτιστοποίησης είναι οι *γραμμικές μέθοδοι* (*linear methods*). Οι γραμμικές μέθοδοι βρίσκουν εφαρμογή μόνο σε προβλήματα στα οποία οι σχέσεις που αναλύονται είναι γραμμικές (π.χ. μηδενική χωρητικότητα έχει μηδενικό κόστος, διπλάσια χωρητικότητα κοστίζει διπλό κόστος κτλ). Τα προβλήματα σχεδιασμού δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σπάνια περιλαμβάνουν γραμμικές σχέσεις. Πάραυτα, οι γραμμικές μέθοδοι εφαρμόζονται σε τέτοιου είδους προβλήματα λόγω του γεγονότος ότι είναι γρήγορες, μπορούν να χειριστούν μεγαλύτερα (ευρύτερα) προβλήματα από τις μη γραμμικές σχέσεις και είναι ευκολότερες στη χρήση. Ένα πρόβλημα σχεδιασμού δικτύου διανομής «γραμμικοποιείται» με κάποιο τρόπο, συνήθως με τη δημιουργία μίας μικρής προσέγγισης που κρίνεται αποδεκτή από τους σχεδιαστές, ώστε να είναι δυνατή η εκμετάλλευση της ταχύτητας και της ευκολίας της χρήσης μιας γραμμικής

μεθόδου έναντι μιας μη γραμμικής. Οι *τμηματικά γραμμικές μέθοδοι* αναπαριστούν μη γραμμικές σχέσεις με μία σειρά από μικρά γραμμικά τμήματα.

Μεταφόρτωση (Transshipment)

Με τον όρο *Μεταφόρτωση* εννοείται η μεταφορά ενός πόρου (π.χ. ισχύος) σε μία ενδιάμεση τοποθεσία στην πορεία του προς έναν τελικό προορισμό. Για παράδειγμα, ένας διανομέας τροφίμων μπορεί να μεταφέρει καρβέλια ψωμιού από το εργοστάσιο σε διάφορες τοπικές αποθήκες, πριν τα ξαναφορτώσει σε φορτηγά τοπικής διανομής για της μεταφορά τους στον τελικό τους προορισμό, τα παντοπωλεία. Η μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων από κοινού, για το μεγαλύτερο μέρος του «ταξιδιού» της διανομής τους, επιτρέπει εξοικονόμηση σε μια οικονομία κλίμακος.

Από την άποψη της βελτιστοποίησης και της μείωσης του κόστους, το γεγονός ότι υπάρχει μία ενδιάμεση στάση στην μεταφορά του προϊόντος είναι σχεδόν άσχετο. Αυτό που είναι σημαντικό, είναι ότι με τη *μεταφόρτωση (transshipment)*, το μεγαλύτερο μέρος της διαδρομής πόρων που πηγαίνουν σε διαφορετικούς προορισμούς, μπορούν να μετακινηθούν ομαδικά, προσφέροντας εξοικονόμηση σε οικονομία κλίμακος. Τα περισσότερα συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργούν με τέτοιο τρόπο, καθώς η ροή ισχύος σε οποιοδήποτε μεγάλο τμήμα του συστήματος αποτελείται από ισχύ με κατεύθυνση προς πολλούς διαφορετικούς κόμβους προς τα κάτω.

Μερικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης δε μπορούν να αντιμετωπίσουν αποδοτικά προβλήματα, στα οποία οι πόροι συνδυάζονται σε ομάδες για μεγάλο μέρος της διαδρομής τους προς τους τελικούς περιορισμούς, όπου και διαχωρίζονται ξανά. Το αδύνατο σημείο αυτών των αλγορίθμων είναι ότι δε μπορούν να αναγνωρίσουν ταυτόχρονα τις ποσότητες που μεταφέρουν, όπως για παράδειγμα την ισχύ, ως αυτόνομες ποσότητες που προορίζονται για διαφορετικό προορισμό και ως μέλη μεγαλύτερων ομάδων.

Μέθοδοι που μπορούν να κάνουν την παραπάνω διάκριση είναι συχνά δομημένες ώστε να βασίζονται στη δομή αλγορίθμων μεταφόρτωσης (transshipment algorithms), όπως το πρόγραμμα ροής ισχύος. Πολλά προγράμματα βελτιστοποίησης γραμμών διανομής χρησιμοποιούν τη *μεταφόρτωση*: καθώς δημιουργούν τα ποικίλα σχέδια μετάθεσης τα οποία εξετάζονται κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης, λειτουργούν με την εφαρμογή της μεταφόρτωσης. [8]

2.4 Υπολογιστικά εργαλεία και μέθοδοι βέλτιστου σχεδιασμού δικτύου διανομής

Στις μέρες μας, οι μηχανικοί-σχεδιαστές έχουν στη διάθεσή τους πληθώρα υπολογιστικών εργαλείων και μεθόδων, που τους βοηθούν στην επιλογή του βέλτιστου, από όλα τα εναλλακτικά, σχεδίου επέκτασης ενός δικτύου διανομής.

Μερικές, λοιπόν, από τις μεθόδους βελτιστοποίησης που βρίσκουν εφαρμογή στον σχεδιασμό των δικτύων διανομής είναι:

- **Προσαρμοστικά Νευρωνικά Δίκτυα (Adaptive Neural Nets-ANN):** Πρόκειται για μια εφαρμογή που αποτελείται από συνεχείς εξισώσεις ή λογικά σύνολα σε έναν συγκεκριμένο τύπο προβλήματος δομημένης μορφής. Τα Νευρωνικά Δίκτυα μπορούν να ρυθμιστούν με έναν μηχανισμό ανατροφοδότησης, ο οποίος βάσει τον προηγούμενων αποτελεσμάτων, προκαλεί την αλλαγή των παραμέτρων και συντελεστών των Νευρωνικών Δικτύων με σκοπό την παραγωγή όλο και καλύτερων αποτελεσμάτων. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται συχνά σε προβλήματα πρόβλεψης, βρίσκει όμως πεδία εφαρμογής και σε προβλήματα αποφάσεων. Στους ακαδημαϊκούς κύκλους βέβαια, οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν Προσαρμοστικά Νευρωνικά Δίκτυα χρησιμοποιούνται περισσότερο ως αναγνωριστές προτύπων σε ανάλογα συστήματα, παρά ως μέθοδοι βελτιστοποίησης σχεδιασμού. Γενικά χρησιμοποιείται ως *συνεχής μέθοδος*.
- **Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence-AI):** Αποτελείται από πολλές διαφορετικές μη αριθμητικές προσεγγίσεις που δομούν ένα σύνολο κανόνων βασισμένων στην ανθρώπινη εμπειρία, σε συνδυασμό με κάποιες χειροκίνητες προσεγγίσεις ενός προβλήματος, ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία τους από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η Τεχνητή Νοημοσύνη βρίσκει εφαρμογή σε μεθόδους τόσο *συνεχούς* όσο και *διακριτής μορφής*, και επιλύει είτε *γραμμικά* είτε *μη γραμμικά προβλήματα*.
- **Κλάδοι και όρια (Branch and Bound-BB):** Πρόκειται για μία προσέγγιση βελτιστοποίησης που ανήκει στην κατηγορία των *διακριτών μεθόδων*. Η διαδικασία της βελτιστοποίησης ξεκινάει διερευνώντας ρητά κάθε μία εναλλακτική λύση, εξετάζοντας την ικανοποίηση ή όχι ορισμένων χαρακτηριστικών που πρέπει να έχει η βέλτιστη λύση, όπως για παράδειγμα τα όρια των τιμών των χαρακτηριστικών της γραμμής. Καθώς εξακριβώνονται τα όρια αυτά, στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για τον αποκλεισμό όλων εκείνων των εναλλακτικών που δεν τα ικανοποιούν.
- **Μέθοδος Συνεχούς Προγραμματισμού (Continuous method):** Μία μέθοδος βελτιστοποίησης που θεωρεί όλες τις πιθανές τιμές –και όχι κάποιες συγκεκριμένες διακριτές τιμές- μεταξύ μιας μέγιστης και μιας ελάχιστης τιμής, ως πιθανές λύσεις του προβλήματος.
- **Μέθοδος Αποσύνθεσης (Decomposition method):** Η μέθοδος αυτή προβλέπει την εφαρμογή οποιασδήποτε από τις γνωστές μαθηματικές μεθόδους διαίρεσης του αρχικού μεγάλου προβλήματος σε μικρότερα, απόλυτα σχετικά, τα οποία μπορούν να επιλυθούν ανεξάρτητα.

- **Δυναμικός Προγραμματισμός (Dynamic Programming-DP):** Οι μέθοδοι Δυναμικού Προγραμματισμού δημιουργούν μία ολοκληρωμένη λύση για ένα στάδιο τη φορά, και επιλύουν το πρόβλημα με σειριακή προσέγγιση, στην οποία ένα μέρος του προβλήματος βελτιστοποιείται, κάποιο άλλο μέρος αξιολογείται κτλ, μέχρι ολόκληρο το πρόβλημα να έχει μελετηθεί και να προκύψει η βέλτιστη λύση. Φυσικά, δεν πρόκειται για ανάπτυξη προγράμματος υπολογιστή, αλλά για προγραμματισμό με την έννοια της δρομολόγησης. Η εφαρμογή του Δυναμικού Προγραμματισμού σε ένα πρόβλημα είναι δυνατή, όπως εύκολα μπορεί κανείς να συμπεράνει από τα παραπάνω, μόνο στην περίπτωση που το αρχικό πρόβλημα μπορεί να διαιρεθεί σε επιμέρους στάδια, τα οποία μπορούν να βελτιστοποιηθούν σειριακά. Ο Δυναμικός Προγραμματισμός, χρησιμοποιείται σε *συνεχείς ή διακριτές μεθόδους*, εφαρμόζεται για *γραμμικά ή μη γραμμικά προβλήματα* και δε μπορεί να διαχειριστεί με σωστό τρόπο τους όποιους πιθανούς περιορισμούς ενός προβλήματος.
- **Εξαντλητική Αναζήτηση (Exhaustive Search):** Πρόκειται για μία τεχνική βελτιστοποίησης που απλά εξετάζει κάθε πιθανή λύση για να βρει τη βέλτιστη. Μία τεχνική αξιόπιστη αλλά αργή για όλους τους τύπους προβλημάτων, εκτός από αυτά που έχουν περιορισμένη έκταση. Οι σύγχρονοι ηλεκτρονικοί υπολογιστές είναι αρκετά γρήγοροι, οπότε η Εξαντλητική Αναζήτηση αποτελεί μία πρακτική μέθοδο για πολλές μικρές εφαρμογές, καθώς επίσης και για βοηθητικές λειτουργίες βελτιστοποίησης. Οι τεχνικές Εξαντλητικής Αναζήτησης μπορούν να αναπτυχθούν είτε με *συνεχή* είτε με *διακριτό* τρόπο, τόσο για *γραμμικά* όσο και για *μη γραμμικά προβλήματα*.
- **Έμπειρα Συστήματα (Expert System):** Πρόκειται για μία προσέγγιση που βασίζεται στη εφαρμογή Τεχνητής Νοημοσύνης με την ταυτόχρονη χρήση εμπειρικών κανόνων. Αναφέρονται συχνά ως *συστήματα βασισμένα σε κανόνες (rule based systems)* ή *πλαίσια γνώσης (knowledge frameworks)*. [9]
- **Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms):** *Μη αριθμητική και διακριτού τύπου* μέθοδος. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι χρησιμοποιούν μία μεγάλη δυαδική συμβολοσειρά για την αναπαράσταση πιθανών εναλλακτικών και τροποποιούν τις τιμές αυτής της συμβολοσειράς με σκοπό την εύρεση μίας καλύτερης λύσης. Για παράδειγμα μία συμβολοσειρά από διακόσια μηδέν (0) και ένα (1) θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση διακοσίων διακοπών με την εξής αντιστοίχιση: Μηδέν → Κλειστός, Ένα → Ανοιχτός. Ο Γενετικός Αλγόριθμος στη συνέχεια μετατρέπει τυχαία τους άσους σε μηδενικά προσπαθώντας να βρει καλές λύσεις για το εκάστοτε πρόβλημα. Τα χαρακτηριστικά των λύσεων αυτών συνδυάζονται ώστε να προκύψουν λύσεις με καλύτερα ακόμη χαρακτηριστικά. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι είναι εύκολοι στον προγραμματισμό, εύρωστοι, ευέλικτοι και γρήγοροι, σε λογικά πάντα πλαίσια. Δεν παρέχουν καμία διαβεβαίωση ότι η

καλύτερη λύση θα ευρεθεί πάντοτε, καθώς πρέπει να ληφθούν υπόψη παράμετροί τους που θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο. [10]

- **Ευρετικοί Αλγόριθμοι (Heuristic Algorithms):** Μέθοδοι βασισμένες στο πως ο προγραμματιστής-σχεδιαστής θα μπορούσε να λύσει το πρόβλημα χειροκίνητα. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και με συνεχή και με διακριτό τρόπο, τόσο για γραμμικά όσο και για μη γραμμικά προβλήματα. Γενικά, οι Ευρετικοί Αλγόριθμοι δεν είναι αυστηροί και ως εργαλεία σχεδιασμού δικτύων διανομής κρίνονται αναξιόπιστοι.
- **Διακριτή Μέθοδος (Integer method-IP):** Μέθοδος βελτιστοποίησης, η οποία χρησιμοποιεί μόνο διακριτές τιμές σαν πιθανές λύσεις.
- **Γραμμικός Προγραμματισμός (Linear Programming-LP):** Αποτελεί μέθοδο για την επίλυση προβλημάτων στα οποία όλες οι σχέσεις είναι γραμμικές. Σε τέτοιες περιπτώσεις, επιστρατεύονται μαθηματικά εργαλεία τα οποία αποδεικνύουν ότι η βέλτιστη λύση βρίσκεται ανάμεσα σε ένα μικρό υποσύνολο λύσεων, οι οποίες μπορούν να βρεθούν και να ελεγχθούν γρήγορα. Οι μέθοδοι γραμμικού προγραμματισμού μπορούν να διαχειριστούν τους περιορισμούς με πολύ ικανοποιητικό τρόπο, μόνο βέβαια στην περίπτωση που οι περιορισμοί αυτοί είναι γραμμικοί. Επίσης, οι μέθοδοι αυτές λειτουργούν καλύτερα σε περιπτώσεις προβλημάτων συνεχών τιμών και όχι τόσο καλά σε προβλήματα διακριτών τιμών.
- **Μικτή Διακριτή Μέθοδος (Mixed Integer Method):** Μπορεί να διαχειριστεί πολύπλευρα προβλήματα στα οποία κάποιες παράμετροι έχουν διακριτή μορφή, ενώ άλλες συνεχή.
- **Βέλτιστη ροή ηλεκτρικής ισχύος (Optimal Power Flows-OPF):** Εφαρμόζεται κάποιος αλγόριθμος βελτιστοποίησης σε μία ροή φορτίου, ο οποίος καθώς βρίσκει λύσεις για τις τάσεις και τις ροές ισχύος στο σύστημα, μπορεί παράλληλα να προσαρμόσει τις παραγόμενες από τις γεννήτριες ενεργές και άεργες ισχύεις καθώς επίσης και τους ρυθμιστές τάσης, με σκοπό την εύρεση της βέλτιστης λειτουργίας του συστήματος, αφού θα έχουν ελαχιστοποιηθεί οι απώλειες.
- **Μέθοδος Προσομοιωμένης Ανόπτησης (Simulated Annealing Method-SA):** Όπως ένα υγρό μέταλλο κρυσταλλώνει μέσα στο καλούπι, σκληραίνει με τέτοιο τρόπο που ελαχιστοποιεί τις εσωτερικές πιέσεις των μορίων του μετάλλου. Η μαθηματική μοντελοποίηση αυτής της διαδικασίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση ποικίλων μη γραμμικών προβλημάτων με μικτές τιμές (συνεχείς και διακριτές).
- **Μέθοδος Μεταφόρτωσης (Transshipment method):** Αποτελεί μία προσέγγιση βελτιστοποίησης που εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι η ενέργεια μπορεί να

«μεταφορτωθεί», να μετακινηθεί δηλαδή από έναν κόμβο σε έναν άλλο, μέσω ενός τρίτου κόμβου.

- **Μέθοδος Βελτιστοποίησης Χωρίς Περιορισμούς (Unconstrained optimization method):** Αλγόριθμος, ο οποίος δε μπορεί να διαχειριστεί περιορισμούς, στους οποίους υπόκεινται οι αποδεκτές εναλλακτικές λύσεις του προβλήματος. [11]

2.5 Μέθοδοι σχεδιασμού γραμμών δικτύου διανομής

Για την βελτίωση του σχεδιασμού των γραμμών του δικτύου διανομής, η διαδικασία της βελτιστοποίησης πρέπει να λάβει χώρα αντιμετωπίζοντας τρεις πτυχές της διαμόρφωσης της διανομής: *την τελική διάταξη, την μετάθεση των αγωγών και το μέγεθος των αγωγών*. Ανεξάρτητα από τον αλγόριθμο ανάπτυξής τους, οι μέθοδοι αυτές στηρίζονται σε βάσεις δεδομένων και δυνατότητες επεξεργασίας και προβολής, προσαρμοσμένες ειδικά στη βάση δεδομένων των εναλλακτικών λύσεων που απαιτείται για την βελτιστοποίηση του προβλήματος του σχεδιασμού και δεν ταυτίζονται με εφαρμογές ροής φορτίου. Η εφαρμογή της κατάλληλης μεθόδου για τον σχεδιασμό του συστήματος διανομής μπορεί να μειώσει τον απαιτούμενο χρόνο και να βελτιώσει την ποιότητα και το κόστος του σχεδίου που τελικά προκύπτει.

Τρία αλληλένδετα μέρη της διαμόρφωσης του δικτύου διανομής πρέπει να αξιολογηθούν ταυτόχρονα σε κάθε προσπάθεια ελαχιστοποίησης του κόστους και να συμπεριληφθούν στην διάρκεια οποιουδήποτε προγράμματος βελτιστοποίησης για σχεδιασμό γραμμών. Το σημαντικότερο από αυτά τα μέρη είναι η *τελική διάταξη* του δικτύου διανομής, ο τρόπος δηλαδή με τον οποίο τα μονοπάτια της διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, διαιρούνται και ξαναδιαιρούνται στη διαδρομή από τους ζυγούς των υποσταθμών μέχρι τους τελικούς καταναλωτές. Οι περισσότεροι σχεδιαστές μηχανικοί δείχνουν προτίμηση στη λεπτομερή προσέγγιση της διάταξης των γραμμών, υπάρχει όμως αξιοσημείωτη ευελιξία σχεδιασμού στις περισσότερες περιπτώσεις και δεν υπάρχουν σταθερές κατευθυντήριες γραμμές από την εταιρία ηλεκτρισμού.

Εξίσου σημαντική είναι η επιλογή της *μετάθεσης των αγωγών*, ξεκινώντας από τον καθορισμό των υπό κανονικές συνθήκες ανοιχτών σημείων, που μαζί με την τελική διαμόρφωση της διάταξης του δικτύου διανομής, καθορίζουν το πώς το φορτίο διανέμεται ανάμεσα στους υποσταθμούς, τις γραμμές και τις διακλαδώσεις των γραμμών κατά την διάρκεια, πάντα, της κανονικής λειτουργίας του συστήματος. Επιπρόσθετοι κλειστοί διακόπτες πρέπει να τοποθετηθούν καθ' όλη την έκταση του συστήματος διανομής, για να εξασφαλιστεί η ευελιξία της λειτουργίας και να καθίσταται δυνατή η απομόνωση μικρών τμημάτων του δικτύου κατά τη διάρκεια διακοπών για τη συντήρηση του εξοπλισμού του συστήματος.

Δεδομένου του ότι η τελική διάταξη και η μετάθεση των αγωγών έχουν προκαθοριστεί και δεν υπόκεινται πλέον σε αναθεώρηση, ακολουθεί η διαδικασία της

επιλογής του καταλληλότερου τύπου γραμμής (μέγεθος των αγωγών και αριθμός φάσεων) για κάθε τμήμα του συστήματος. Το μέγεθος των αγωγών των βασικών στοιχείων του δικτύου, επηρεάζει καθοριστικά το ποια διάταξη και ποια μετάθεση είναι βέλτιστες για την εκάστοτε περίπτωση. Γενικά, για την τελική διαμόρφωση ενός σχεδιασμού, κατά τον οποίο έχει ελαχιστοποιηθεί το κόστος, επιβάλλεται η ταυτόχρονος καθορισμός της τελικής διάταξης, της μετάθεσης και του τύπου των αγωγών, λαμβάνοντας υπόψη το πώς οι επιλογές για το ένα επηρεάζει τα υπόλοιπα.

Επομένως, το πρόβλημα του σχεδιασμού της επέκτασης των γραμμών του δικτύου ορίζεται ως ο καθορισμός της καλύτερης διάταξης ενός συστήματος γραμμών βάσει δεδομένων που περιγράφουν το υπάρχον δίκτυο και όποιες περιοχές θα μπορούσαν να αναβαθμιστούν, τα φορτία, τα κριτήρια και τον δείκτη απόδοσης. Η μέθοδος σχεδιασμού πρέπει να καθορίζει ποια τμήματα θα κατασκευαστούν, τί τύπος γραμμής θα χρησιμοποιηθεί και πώς οι γραμμές θα συνδεθούν μεταξύ τους. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να λυθεί χειροκίνητα από έμπειρους σχεδιαστές δικτύων διανομής, με τη χρήση απλών εργαλείων όπως αυτά της ροής φορτίου, που στην ουσία υποδεικνύουν στους σχεδιαστές αν ένα συγκεκριμένο σχέδιο του δικτύου αποδίδει καλά, αλλά δε μπορούν να προσδιορίσουν το αν αυτό το σχέδιο είναι καλύτερο από κάθε άλλο, υπονήφιο προς υλοποίηση, σχέδιο. [12]

2.5.1 Επιθυμητά χαρακτηριστικά μεθόδων βέλτιστου σχεδιασμού γραμμών δικτύου διανομής

Ανεξάρτητα από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης που θα επιλεγεί για την βελτιστοποίηση των γραμμών διανομής, όλες οι μέθοδοι αντιμετωπίζουν όπως προαναφέρθηκε την ίδια πρόκληση: την επιλογή του καλύτερου συνδυασμού διάταξης, μετάθεσης και τύπου αγωγών. Τα επιθυμητά χαρακτηριστικά προγραμμαμάτων για τον σχεδιασμό των γραμμών ενός δικτύου διανομής είναι:

Μέγεθος προβλήματος

Βασικό πλεονέκτημα μίας μεθόδου βελτιστοποίησης έναντι των υπολοίπων αποτελεί η δυνατότητα εφαρμογής της σε μία μεγαλύτερη περιοχή του συστήματος. Ένα πρόγραμμα του οποίου η «μηχανή» βελτιστοποίησης μπορεί με ένα «τρέξιμο» να βελτιστοποιήσει 10 γραμμές διανομής (π.χ. 5.000 με 10.000 κόμβους) είναι πολύ καλύτερη από μια μέθοδο που μπορεί να βελτιστοποιήσει μόνο μία γραμμή (π.χ. 500 με 100 κόμβους). Η εφαρμογή σε μία ευρύτερη περιοχή του δικτύου, έναντι μικρότερων τμημάτων επιτρέπει την μετατόπιση του φορτίου και την επαναδιαμόρφωση με αποδοτικότερο τρόπο, με αποτέλεσμα την μεγαλύτερη εξοικονόμηση πόρων.

Μεταφόρτωση (Transshipment)

Η μεταφόρτωση, όπως περιγράφηκε παραπάνω, αποτελεί κύριο χαρακτηριστικό των συστημάτων διανομής και γι' αυτόν τον λόγο τα περισσότερα προγράμματα αυτόματου σχεδιασμού γραμμών χρησιμοποιούν μεθόδους τύπου μεταφόρτωσης, για τη βελτιστοποίηση του προς επίλυση προβλήματος.

Περιορισμοί δυνατότητας δικτύου (Capacity constraints)

Τα εργαλεία σχεδιασμού που δε μπορούν να χειριστούν περιορισμούς δυνατότητας κρίνονται από τους σχεδιαστές άνευ αξίας για πρακτική εφαρμογή. Οι περιορισμοί αυτοί, εξάλλου, είναι που δημιουργούν την ανάγκη για ενίσχυση, πρόσθεση κυκλωμάτων και γενικότερα την εισαγωγή στο δίκτυο των απαιτούμενων προσθηκών. Στα σύγχρονα δίκτυα διανομής, στα οποία το φορτίο αυξάνεται αργά και τα κεφάλαια είναι αρκετά περιορισμένα, η ικανότητα της μεθόδου βελτιστοποίησης να επιλύει τους εν λόγω περιορισμούς, είναι ιδιαίτερα σημαντική. Γενικά, επιτρέπει στους σχεδιαστές να αναβάλουν τις νέες προσθήκες στο δίκτυο, μέσω μιας πολύ δημιουργικής εξισορρόπησης φορτίου και ταυτόχρονα να προσδιορίζουν τον ελάχιστο αριθμό προσθηκών, ώστε το δίκτυο να λειτουργεί γύρω από τα όρια δυνατότητας.

Έμμεση δρομολόγηση (Implicit routing)

Γενικά, τα προγράμματα που χρησιμοποιούν μία μέθοδο βελτιστοποίησης που λειτουργεί με βάση την *έμμεση δρομολόγηση*, είναι πολύ εύκολο να χρησιμοποιηθούν για τον σχεδιασμό της διαμόρφωσης των γραμμών, παρόλο που δεν δημιουργούν αυτόματα διαδρομές, αλλά απαιτείται η είσοδος των ανάλογων δεδομένων από τον χρήστη. Τα προγράμματα μεθόδων που δε βασίζονται στην έμμεση δρομολόγηση συνήθως είναι δύσκολα στον έλεγχο, καθώς είναι δύσκολος ο περιορισμός τους ώστε να αποφύγουν την κατασκευή γραμμών σε μέρη που αυτή δεν είναι εφικτή ή δεν επιτρέπεται, κάτι που δε συμβαίνει με μια μέθοδο έμμεσης δρομολόγησης, η οποία απαιτεί εξακρίβωση των σημείων που μπορούν να κατασκευαστούν οι νέες γραμμές.

Η χρήση της έμμεσης δρομολόγησης γίνεται ευκολότερη όταν το πρόγραμμα παρέχει δύο χρήσιμα χαρακτηριστικά:

1. Την ικανότητα να παράγει ένα σύνολο πιθανών διαδρομών που ακολουθούν όλους τους δρόμους και
2. Μία επιλογή «σύνδεσης» με την οποία ο χρήστης μπορεί να ορίσει μία απόσταση και να αναπτύξει κατάλληλα το πρόγραμμα βελτιστοποίησης ώστε να θεωρεί ότι δύο κόμβοι που απέχουν λιγότερο από αυτήν την απόσταση μπορούν να συνδεθούν, ακόμη κι αν δεν έχει δοθεί καμία διαδρομή μεταξύ τους ως είσοδος.

Γενικά, τα αυτοματοποιημένα προγράμματα που χρησιμοποιούν γραμμικές συναρτήσεις κόστους εκτελούνται πολύ αργά όταν λύνουν προβλήματα έμμεσης δρομολόγησης, διότι υπάρχουν πολυπληθείς διαδρομές με ακριβώς το ίδιο εκτιμώμενο κόστος. Χρειάζονται, λοιπόν, πάρα πολύ χρόνο για να επιλύσουν τέτοιου είδους πρόβλημα, καθώς επεξεργάζονται χιλιάδες επιλογές, οι οποίες αντιμετωπίζονται από τα προγράμματα ως πανομοιότυπες.

Σταθερό Κόστος (Fixed cost)

Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που χειρίζονται σταθερά κόστη αργούν πολύ περισσότερο για την επίλυση των αντίστοιχων προβλημάτων από εκείνα που δε μπορούν να μοντελοποιήσουν σταθερά κόστη. Τείνουν να έχουν πολύ μικρότερες δυνατότητες και να αντιμετωπίζουν περισσότερα προβλήματα εκτέλεσης (σύγκλισης, στρογγυλοποίησης). Γενικά, μέθοδοι μη σταθερού κόστους δίνουν πολύ πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα για υπέργεια δίκτυα διανομής, αλλά και οι μέθοδοι σταθερού κόστους είναι απαραίτητες για την γρήγορη, αποδοτική και ακριβή βελτιστοποίηση υπόγειων δικτύων που απαιτούν «τράπεζες» αγωγών. [13]

2.5.2 Τρεις περιπτώσεις εφαρμογής μεθόδων σχεδιασμού γραμμών δικτύου διανομής

Από την άποψη της αυτοματοποιημένης εφαρμογής τους, τα προβλήματα σχεδιασμού δικτύων διανομής κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες, με διαφορετικές ανάγκες ανάλυσης. Πρόκειται για την *νέα επέκταση του συστήματος*, την *αύξηση ενός υφιστάμενου συστήματος* και τον *σχεδιασμό της λειτουργίας*, κατηγορίες που αναλύονται διεξοδικά παρακάτω.

Σχεδιασμός νέας επέκτασης του δικτύου

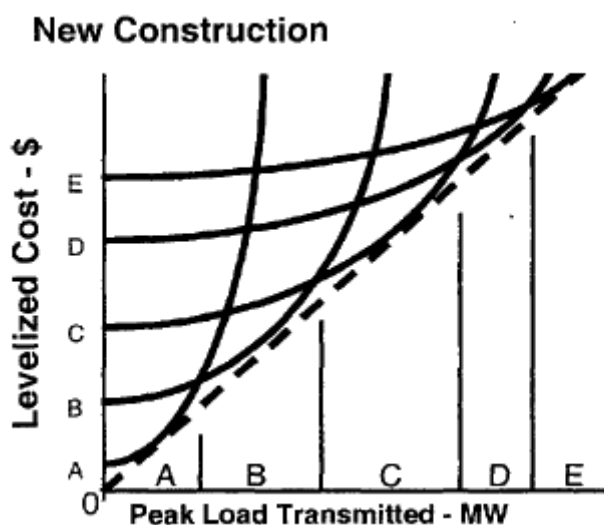
Ο σχεδιασμός της επέκτασης του δικτύου διανομής σε περιοχές που προς το παρόν δεν υπάρχουν εγκαταστάσεις, αλλά αναμένεται αύξηση του φορτίου, ίσως φαίνεται η μεγαλύτερη πιθανή πρόκληση για τους σχεδιαστές του δικτύου, παραδόξως όμως τα εργαλεία βελτιστοποίησης παρέχουν ευκολότερα σωστές επιλύσεις για τέτοιου είδους προβλήματα. Όταν ο μηχανικός καλείται να σχεδιάσει την επέκταση ενός δικτύου, ξεκινάει από το μηδέν και σχεδιάζει ένα εντελώς καινούριο σύστημα σε συνεννόηση πάντοτε με την ανάπτυξη της περιοχής. Η κύρια πρόκληση σε τέτοιες περιπτώσεις είναι η επιλογή του βέλτιστου σχεδίου αυτού του νέου συστήματος από ένα πολύ μεγάλο εύρος πιθανών εναλλακτικών.

Η γραμμικοποίηση της οικονομίας των αγωγών επιτρέπει τη χρήση μίας γραμμικής μεθόδου βελτιστοποίησης σε τέτοιου είδους προβλήματα (επέκτασης)

όταν ο δείκτης επίδοσής τους είναι το κόστος. Η χρήση μίας γραμμικής μεθόδου μειώνει τρομερά τους χρόνους υπολογισμού και επιτρέπει μεγάλο μέγεθος προβλήματος, ενώ διακρίνεται για πολύ μικρά προσεγγιστικά λάθη στα αποτελέσματα τέτοιου τύπου προβλημάτων.

Το διάγραμμα της **Εικόνα 2.1** απεικονίζει μία γραμμικοποίηση της παραπάνω μορφής, καθώς χρησιμοποιείται μία γραμμή που διέρχεται από την αρχή των αξόνων για να αναπαραστήσει την «καλύτερη» επιλογή ανάμεσα στις πέντε καμπύλες που αντιπροσωπεύουν τα κόστη των αγωγών για κάθε τύπο γραμμής διανομής. Κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης, η ευθεία διακεκομμένη γραμμή δείχνει το κόστος έναντι της ικανότητας για κάθε νέο τμήμα που θεωρείται υπό ένταξη στο δίκτυο- όσο μεγαλύτερη ισχύ μεταφέρει, τόσο μεγαλύτερο είναι και το κόστος. Η βελτιστοποίηση χρησιμοποιεί αυτή τη γραμμικοποιημένη σχέση με δύο τρόπους:

1. Κατά τη διάρκεια της σύγκρισης της δύναμης των οικονομικών μεγεθών μιας γραμμής ή μιας συνολικής διαμόρφωσης, έναντι κάποιας άλλης. Η βελτιστοποίηση κατασκευάζει, ή λύνει, μία διαμόρφωση που κρίνει βέλτιστη χρησιμοποιώντας αυτή τη σχέση κόστους/ικανότητας. Μετά από αυτό, αναθέτει μία τιμή ροής σε κάθε τμήμα του συστήματος.
2. Για να καθορίσει τον τύπο γραμμής για κάθε τμήμα. Η τιμή της ροής που έχει επιλεγεί για κάθε τμήμα, χρησιμοποιείται για να καθοριστεί ο τύπος της γραμμής για το τμήμα αυτό.



Εικόνα 2.1:Γραμμικοποιημένα Κόστη Αγωγών Δικτύου Διανομής [6]

Πολλοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης δικτύου διανομής χρησιμοποιούν γραμμικοποίηση που αντιπροσωπεύει κάθε τμήμα σε ένα δυνητικό σύστημα με δύο μόνο τιμές: ένα γραμμικό κόστος με μία κλίση kW (που μπορεί να είναι διαφορετική για κάθε τμήμα) και ένα όριο ικανότητας που καθορίζει τους περιορισμούς της μέγιστης φόρτισης της γραμμής.

Όταν εφαρμόζεται σε ένα καλά σχεδιασμένο πρόβλημα, ο συνδυασμός της γραμμικοποίησης του κόστους των αγωγών με την έμμεση δρομολόγηση προσφέρει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Αύξηση και ενίσχυση του υπάρχοντος δικτύου

Η περίπτωση ανάπτυξης νέας επέκτασης δικτύου σε περιοχή που δεν υφίσταται προηγουμένως οποιαδήποτε εγκατάσταση, η οποία περιγράφηκε παραπάνω, αποτελεί μειονότητα των αναγκών για σχεδιασμό του δικτύου διανομής. Αυτό που εμφανίζεται συχνότερα ως ανάγκη σε ένα δίκτυο διανομής είναι η οικονομική αναβάθμιση του συστήματος διανομής, που βρίσκεται ήδη εγκατεστημένο, πιθανότατα σε μία γειτονιά που μία αργή αύξηση του φορτίου υποδεικνύει την επερχόμενη υπερφόρτωση τμημάτων του υπάρχοντος δικτύου. Όπως και στην προηγούμενη κατηγορία, έτσι και εδώ στόχο αποτελεί η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους.

Παρόλο που ο επανασχεδιασμός ενός ήδη εγκατεστημένου δικτύου φαίνεται να είναι ευκολότερος από την ανάπτυξη νέου, λόγω του ότι το εύρος των επιλογών είναι περιορισμένο και το δίκτυο των γραμμών είναι ήδη εγκατεστημένο, στην πραγματικότητα τα προβλήματα αύξησης του δικτύου είναι δύσκολο να βελτιστοποιηθούν, για δύο κυρίως λόγους.

Αρχικά, στην πλειονότητα των περιπτώσεων, οι νέες διαδρομές και οι τοποθετήσεις εξοπλισμού, καθώς επίσης και οι επιτρεπόμενες αναβαθμίσεις του προϋπάρχοντος εξοπλισμού είναι αρκετά περιορισμένες εξαιτίας πρακτικών, λειτουργικών, αισθητικών, περιβαλλοντικών ή άλλων λόγων. Η πρόκληση για έναν σχεδιαστή είναι να επεξεργαστεί τέτοιου είδους περιορισμούς, εξισορροπώντας τη διαθεσιμότητα και το κόστος με την επιρροή στο σύστημα και τις ανάγκες του. Σκοπός, λοιπόν, κατά τον σχεδιασμό της αύξησης του δικτύου είναι ο σωστός χειρισμός των περιορισμών ικανότητας του υπάρχοντος δικτύου και των περιορισμών που αφορούν νέες προσθήκες ή αλλαγές και αναφέρθηκαν παραπάνω. Προφανώς, οι τελευταίοι είναι σχεδόν πάντοτε διαφορετικοί για κάθε περίπτωση και τοποθεσία και δε μπορούν να γενικευτούν. Πρέπει να αναπαρασταθούν πολύ καλά στα δεδομένα ώστε να αναγνωρισθούν από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης.

Επιπλέον, οι επιλογές για αναβάθμιση των ήδη υπάρχοντων γραμμών δε μπορούν να γραμμικοποιηθούν τόσο καλά όσο στην περίπτωση νέας επέκτασης δικτύου. Παρά το γεγονός αυτό, γραμμικά προγράμματα «μεταφόρτωσης» έχουν εφαρμοστεί σε μελέτες αύξησης του δικτύου διανομής, κυρίως λόγω του ότι ήταν ευρέως διαδεδομένη η χρήση τους για την περίπτωση της νέας επέκτασης και δεν υπήρχε διαθέσιμο κάποιο καλύτερο λογισμικό. Σε αυτές τις περιπτώσεις όμως, παρόλο που το κόστος μειώνεται, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων της γραμμικής βελτιστοποίησης απαιτεί μεγάλες ικανότητες και εμπειρία των σχεδιαστών, ενώ παράλληλα η τελική διαμόρφωση του δικτύου δεν είναι η βέλτιστη, αφού δε λαμβάνονται υπόψη περιορισμοί που δε μπορούν να γραμμικοποιηθούν.

Για τον λόγο αυτό, έχει αναπτυχθεί ένας αριθμός «μη γραμμικών» αλγόριθμων ειδικά για προβλήματα αύξησης του δικτύου, που συμπεριλαμβάνουν τμήματα γραμμικών και μη γραμμικών αλγόριθμων μεταφόρτωσης προσαρμοσμένα στο σχέδιο του δικτύου διανομής. Αυτό πάντως που κάνει αποδοτικό έναν αλγόριθμο για την περίπτωση ανάπτυξης υφιστάμενου δικτύου, είναι η υποστήριξη από το λογισμικό γρήγορης εισόδου, επιβεβαίωσης και επανεξέτασης της βάσης δεδομένων των ασυνήθιστων συνθηκών και του ασυνήθιστου κόστους που είναι τα κύρια στοιχεία υπό διερεύνηση σε τέτοιες περιπτώσεις σχεδιασμού. Η πραγματική πρόκληση για τον σχεδιασμό της αύξησης/ενίσχυσης του δικτύου διανομής είναι η αναπαράσταση του υπάρχοντος δικτύου και οι περιορισμοί των νέων κατασκευών με ακρίβεια και όσο το δυνατόν λιγότερη προσπάθεια.

Σχεδιασμός λειτουργίας

Οι μόνες εναλλακτικές της διαμόρφωσης ενός συστήματος στον σχεδιασμό λειτουργίας είναι αλλαγές που μπορούν να γίνουν στην ακτινικότητα του δικτύου. Σε μερικές περιπτώσεις, αυτό περιλαμβάνει μετάθεση και επαναδιαμόρφωση ανοιχτών σημείων, ενώ σε άλλες περιλαμβάνει απλά τον τρόπο αλλαγής της κατάστασης των διακοπών.

Ο δείκτης επίδοσης για τέτοιου είδους σχεδιασμό είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους -εδώ πρόκειται μόνο για κόστη απωλειών, καθώς δεν υπάρχουν κόστη κεφαλαίου- αν και σε πολλές περιπτώσεις σχεδιασμού λειτουργίας ενός δικτύου διανομής υπάρχουν απαιτήσεις έκτακτης ανάγκης -όπως για παράδειγμα σε περίπτωση καταιγίδας όταν πολλά τμήματα γραμμής είναι αποκομμένα. Στόχος σε τέτοιες επείγουσες καταστάσεις είναι η μεγιστοποίηση του ποσού του φορτίου που θα αποκατασταθεί γρήγορα και παράλληλα, η ελαχιστοποίηση της υπερβολικής πτώσης τάσης και των υπερφορτώσεων.

Στον σχεδιασμό λειτουργίας, μιας και δεν υπάρχουν εναλλακτικοί τύποι τμημάτων γραμμής, η καμπύλη κόστους κάθε τμήματος γραμμής είναι μία τετραγωνική συνάρτηση (I^2R). Παρόλο που η εφαρμογή γραμμικής βελτιστοποίησης μπορεί να έχει κάποια πλεονεκτήματα, μία τμηματικά γραμμική προσέγγιση δίνει καλύτερα σε ακρίβεια αποτελέσματα. Μη γραμμικές μέθοδοι μεταφόρτωσης (αλγόριθμοι που αναπαριστούν τις απώλειες I^2R χωρίς προσέγγιση) δίνουν καλύτερα αποτελέσματα, αλλά είναι πιο δύσκολο να αναπτυχθούν και να χρησιμοποιηθούν από τους χρήστες. [6]

2.5.3 Ακτινικότητα του βέλτιστου σχεδιασμού των γραμμών

Η συντριπτική πλειοψηφία των δικτύων διανομής λειτουργεί με ακτινικό τρόπο και επομένως, οι σχεδιαστές και οι υπεύθυνοι λειτουργίας του δικτύου συνήθως επιθυμούν η διαδικασία της βελτιστοποίησης να υπολογίζει την καλύτερη δυνατή ακτινική διαμόρφωση. Η ακτινικότητα είναι ένας περιορισμός του τύπου της λύσης που θεωρείται εφικτή και το να εξασφαλιστεί ότι η βελτιστοποίηση παράγει

αποτέλεσμα ακτινικής διαμόρφωσης είναι ένα σημαντικό μέρος του σχεδιασμού οποιουδήποτε προγράμματος βελτιστοποίησης.

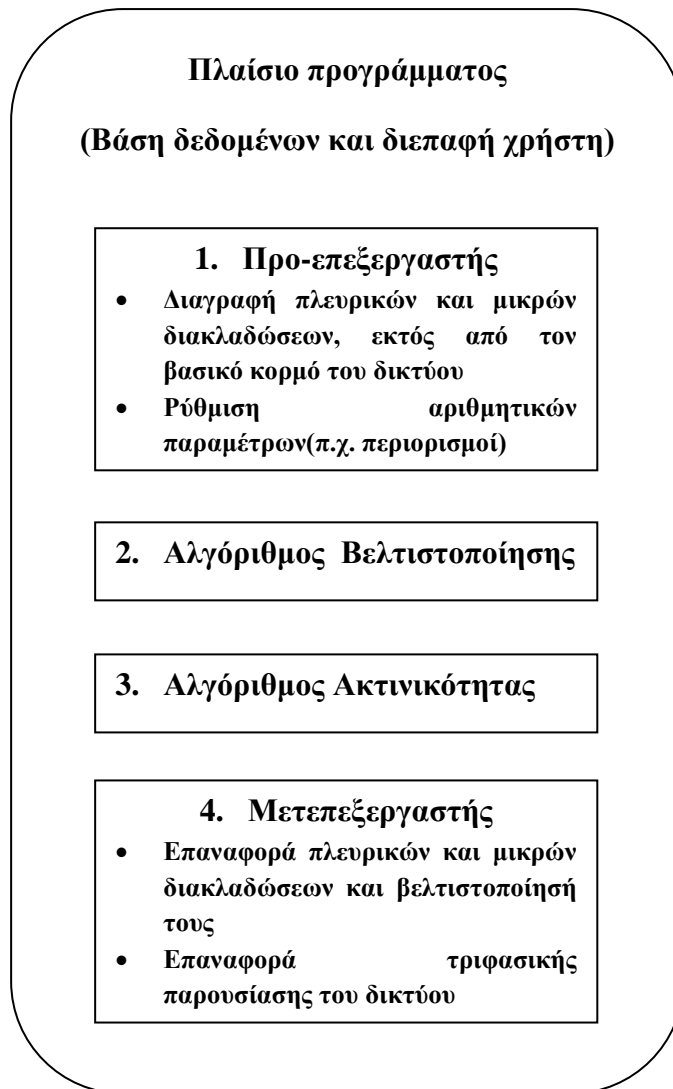
Ο εξαναγκασμός των μεθόδων *μεταφόρτωσης* να μειώσουν το κόστος ικανοποιώντας παράλληλα τον περιορισμό ακτινικότητας αποτελεί την κύρια πρόκληση κατά τον σχεδιασμό του αλγόριθμου, ειδικά όταν μοντελοποιούνται μη γραμμικά κόστη. Η ακτινική διαμόρφωση είναι δύσκολο να επιβληθεί όταν το κόστος είναι μη γραμμικό, διότι ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης «διστά» (και μάλιστα σωστά) ότι η διάσπαση ενός φορτίου ανάμεσα σε δύο διαδρομές γραμμών θα ελαχιστοποιήσει τις απώλειες- δεδομένου ότι δύο παρόμοιες ακτινικές διαδρομές μπορούν να εξυπηρετήσουν ένα συγκεκριμένο φορτίο, οι απώλειες μπορεί να ελαττωθούν στο μισό αφήνοντας και τις δύο γραμμές συνδεδεμένες στο φορτίο, μοιράζοντας το ανάμεσά τους.

Υπάρχουν κάποιες μέθοδοι που εξαναγκάζουν την ακτινικότητα πάνω στο υπολογισμένο δίκτυο από μια βελτιστοποίηση ή περιορίζουν τις λύσεις που προκύπτουν μόνο σε αυτές που δημιουργούν ακτινικές διαμορφώσεις του δικτύου. Μερικές μέθοδοι περιλαμβάνουν πολύ παρατεταμένη ανάλυση της διαμόρφωσης, αν και η λογική της ακτινικότητας μπορεί να οδηγήσει σε υπέρβαση του μήκους και της πολυπλοκότητας του αλγόριθμου βελτιστοποίησης. [14]

2.5.4 Τυπική δομή αλγόριθμων βελτιστοποίησης γραμμών

Συνήθως, ένα πρόγραμμα αυτοματοποιημένου σχεδιασμού έχει τη δομή του σχήματος της *Εικόνα 2.1*, που αποτελείται από ένα κέλυφος που παρέχει δεδομένα και τη διεπαφή του χρήστη και μέχρι τέσσερα στάδια λειτουργίας.

Το πρώτο στάδιο είναι ένας προ-επεξεργαστής του κυκλώματος, που αποκλείει από τη βελτιστοποίηση τα πάντα εκτός από τους κύριους κορμούς και διακλαδώσεις του δικτύου και μεταθέτει όλο το φορτίο στους κόμβους του κύριου κορμού. Πλευρικές, μικρές διακλαδώσεις και κάθε μέρος του δικτύου που καθορίζει ο προ-επεξεργαστής δεν υπόκεινται σε επεξεργασία και μπορούν να διαγραφούν χωρίς τη βλάβη της γενικότητας τους αποτελέσματος και να βελτιστοποιηθούν αργότερα (στο τέταρτο στάδιο). Η διαγραφή των πλευρικών και μικρών διακλαδώσεων μειώνει τον αριθμό των κόμβων της αναπαράστασης του δικτύου που πρέπει να περάσει στο στάδιο της βελτιστοποίησης. Αυτό συνεπάγεται ότι ακόμα μεγαλύτερη περιοχή του συστήματος μπορεί να ταιριάζει παρά τον οποιοδήποτε περιορισμό μεγέθους του αλγόριθμου, μιας και όλοι οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης έχουν κάποια ανώτατα όρια μεγέθους του συστήματος που μπορούν να επεξεργαστούν. Ακόμη, η βελτιστοποίηση θα συντελεστεί με ακόμα πιο γρήγορο



Εικόνα 2.2: Τυπική δομή αλγόριθμων βελτιστοποίησης γραμμών [6]

τρόπο, αφού μερικοί αλγόριθμοι έχουν κυβική ή χειρότερη σχέση μεταξύ χρόνου εκτέλεσης και αριθμού κόμβων, κάτι που από μόνο του αποτελεί σημαντικό λόγο ύπαρξης ενός προ-επεξεργαστή.

Το δεύτερο στάδιο υπολογισμού είναι η ίδια η βελτιστοποίηση, που ακολουθείται αμέσως από το τρίτο στάδιο: την ακτινικότητα. Το τέταρτο και τελευταίο στάδιο είναι ένας μετεπεξεργαστής, ο οποίος προσθέτει τις διαγραμμένες πλευρικές και μικρές διακλαδώσεις στην ολική διαμόρφωση του κυκλώματος ενώ ταυτόχρονα εφαρμόζονται απλοί κανόνες για τον καθορισμό του βέλτιστου μεγέθους των αγωγών. [13]

2.6 Μέθοδοι σχεδιασμού βέλτιστης τοποθεσίας ΥΣ δικτύου διανομής

2.6.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Η χωροθέτηση των υποσταθμών, η εξακρίβωση δηλαδή των μελλοντικών τοποθεσιών, μεγεθών και σχεδίων επέκτασης των υποσταθμών, είναι μία καίρια λειτουργία του «στρατηγικού» σχεδιασμού ενός δικτύου διανομής. Η στρατηγική σημασία της κατάλληλης τοποθεσίας των υποσταθμών φαίνεται από τους παρακάτω τρεις λόγους:

- ✓ Οι τοποθεσίες και τα φορτία των υποσταθμών διανομής καθορίζουν τις απαιτήσεις του δικτύου διανομής από το δίκτυο μεταφοράς
- ✓ Οι υποσταθμοί είναι πολύ ακριβοί και μάλιστα αποτελούν το 10-20% του συνολικού κόστους του δικτύου διανομής.
- ✓ Τα μεγέθη και οι τοποθεσίες των υποσταθμών καθορίζουν τις τοποθεσίες και τους περιορισμούς για όλο το δίκτυο διανομής. Η τοποθεσία ενός υποσταθμού σε συνδυασμό με το φορτίο, τους γειτονικούς υποσταθμούς και την γεωγραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την τοπολογία των γραμμών του δικτύου.

Παρόλο που η επιλογή της τοποθεσίας και του μεγέθους των υποσταθμών διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στον σχεδιασμό ενός δικτύου διανομής, το κόστος τους αντιπροσωπεύει ένα μικρό ποσοστό του συνολικού κόστους. Η δυνητική επιρροή των επιλογών του σχεδιαστή του συστήματος, για την τοποθεσία και το μέγεθος των υποσταθμών, στο κόστος του συστήματος των γραμμών του δικτύου είναι γενικά μεγαλύτερο από το κόστος καθαυτού του υποσταθμού. Τόσο η τοποθεσία, όσο και το μέγεθος των υποσταθμών και η σχέση των δύο αυτών μεγεθών μεταξύ τους, αλλάζουν τα οικονομικά μεγέθη του συστήματος των γραμμών του δικτύου (π.χ. κόστος ανάλογα τον τύπο γραμμής). Επακόλουθα, τα προγράμματα σχεδιασμού μεγάλης εμβέλειας και «χωροθέτησης υποσταθμών» για να είναι πρακτικά χρήσιμα στους σχεδιαστές, πρέπει να διαχειρίζονται τα κόστη των γραμμών του δικτύου.

Πληθώρα διαφορετικών αυτοματοποιημένων διαδικασιών και εργαλείων έχουν προταθεί ή χρησιμοποιηθεί για την επιλογή της τοποθεσίας και του μεγέθους των υποσταθμών. Μερικές από αυτές είναι ευρετικές και ανακριβείς ή εφαρμόσιμες μόνο σε πολύ περιορισμένο εύρος περιπτώσεων. Άλλες χρησιμοποιούν τυπικές διαδικασίες/μεθόδους/αλγόριθμους που αναλύθηκαν παραπάνω.

2.6.2 Βελτιστοποίηση μεγέθους υποσταθμών διανομής

Πολλά αυτοματοποιημένα εργαλεία επιλογής τοποθεσίας και μεγέθους υποσταθμών εστιάζουν στην βελτιστοποίηση του μεγέθους των υποσταθμών. Ο τρόπος που διαμορφώνεται το «πρόβλημα σχεδιασμού υποσταθμών» που εφαρμόζεται σε αυτά τα εργαλεία είναι, κατά γενικό κανόνα, ο επόμενος:

1. Υπάρχουν N διαθέσιμες τοποθεσίες, από τις οποίες μερικές έχουν ήδη εγκατεστημένους υποσταθμούς.
2. Κάθε τοποθεσία έχει διαφορετικά κόστη και περιορισμούς που συνδέονται με προσθήκες στο μέγεθός τους- για παράδειγμα, νέες τοποθεσίες πρέπει να καθαριστούν και να προετοιμαστούν κατάλληλα, κτλ.
3. Κάθε θέση έχει ένα ελάχιστο και ένα μέγιστο φορτίο (με τη διαφορά τι μπορεί να μεταφερθεί από και προς τα γειτονικά σημεία)
4. Υπάρχει ένα καθολικό συνολικό φορτίο που πρέπει να εξυπηρετηθεί (π.χ., το άθροισμα των μεγεθών όλων των υποσταθμών πρέπει να ξεπερνά ένα δεδομένο καθολικό όριο)
5. Υπάρχουν ποικίλοι περιορισμοί μέγιστου μεγέθους και ορίων εξυπηρέτησης των υποσταθμών.

Κατά το παρελθόν, έγιναν αρκετές προσπάθειες ανάπτυξης προγραμμάτων του παραπάνω τύπου, με χαρακτηριστικό παράδειγμα το EPRI project RP-570. Το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε, παρά το γεγονός ότι διάφορες παράμετροί του (π.χ. βάση δεδομένων, γραφικά, κτλ) ήταν σε πρώιμο, για τα σημερινά δεδομένα, στάδιο εφάρμοσε έναν αλγόριθμο διακλαδώσεων και ορίων (*branch and bound*) για να παρέχει επέκταση της ικανότητας ενός αριθμού N υποψήφιων θέσεων στα πλαίσια μιας ολικής λύσης ελαχιστοποίησης κόστους.

Το γεγονός ότι δε λήφθηκε υπόψη, το κόστος της διάταξης των γραμμών του δικτύου που προέκυψε βάσει των νέων θέσεων των υποσταθμών, οδήγησε σε παρέκκλιση από την βέλτιστη λύση. Συνεπώς, προγράμματα που δε διαχειρίζονται τα κόστη των γραμμών, αλλά και των όποιων προσθηκών στο δίκτυο, παράλληλα με τα κόστη των υποσταθμών, δεν κρίνονται ως αποδοτικά από τους σχεδιαστές δικτύων διανομής.

2.6.3 Βελτιστοποίηση εξυπηρετούμενης περιοχής (SAO)

Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης εξυπηρετούμενης περιοχής (Service Area Optimization- SAO) διαχειρίζονται απευθείας τις επιδράσεις της τοποθεσίας των υποσταθμών, στο δίκτυο γραμμών διανομής του συστήματος, αναπαριστώντας τους υποσταθμούς σαν θέσεις πηγών, η καθεμιά με ένα δίκτυο γραμμών. Η βελτιστοποίηση επεκτείνει ένα σύνολο εξυπηρετούμενων από τους υποσταθμούς περιοχών, μέχρι να καλύψουν συλλογικά όλη την περιοχή του φορτίου. Καλά σχεδιασμένα προγράμματα SAO αποδεικνύονται αρκετά αποδοτικά και πολύτιμα εργαλεία σχεδιασμού.

Μερικές μέθοδοι SAO αναπαριστούν τους υποσταθμούς σαν «πλακάκια», με έναν τύπο ελαστικής πίεσης (οικονομικές διαφορές κόστους) στα σύνορα μεταξύ των υποσταθμών που πιέζουν τα όρια της εξυπηρετούμενης περιοχής (ώστε να τείνουν να γίνουν μεγαλύτερα) και των τοποθεσιών των υποσταθμών που οδηγούν σε διαμόρφωση δικτύου ελαχίστου κόστους. Άλλες μέθοδοι SAO, αναπαριστούν έναν υποσταθμό ως μία μονάδα, αποτελούμενη από έναν υποσταθμό και ένα δίκτυο γραμμών που συνδέει τον υποσταθμό με τα περιβάλλοντα σημεία φορτίου. Μερικές μέθοδοι, επίσης, μοντελοποιούν τα τμήματα υπομεταφοράς που απαιτούνται για να μεταφερθεί η ενέργεια από το δίκτυο υψηλής τάσης στη θέση ενός υποσταθμού.

Ανεξαρτήτως μεθόδου, το κοινό στοιχείο των μεθόδων SAO είναι ότι ένας υποσταθμός περιλαμβάνει ένα σύστημα γραμμών που οδηγεί από τον εν λόγω υποσταθμό σε κοντινά σημεία φορτίου, μαζί με έναν περιορισμό λειτουργίας ώστε αυτό το σύστημα γραμμών να φτάνει έως όλα τα σημεία φορτίου από και μέσω οποιουδήποτε υποσταθμού. Τοιουτοτρόπως, αν κατά τη διάρκεια μιας βελτιστοποίησης, η μέθοδος SAO αναπαριστά έναν νέο υποσταθμό 50 MVA, τότε προσομοιώνει την κατασκευή των γραμμών και των απωλειών για ένα σύστημα γραμμών 50 MVA, κατασκευασμένο έξω από τον υποσταθμό ώστε να εξυπηρετήσει το φορτίο γύρω του. Αν το μέγεθος του υποσταθμού αυξηθεί σε 75 MVA, τότε τα κόστη και οι απώλειες του συστήματος γραμμών αυξάνονται ανάλογα και παράλληλα καθορίζεται το αν έχει πραγματοποιηθεί εξοικονόμηση πόρων ή όχι. Σε κάθε περίπτωση, η μέθοδος SAO εφαρμόζει βελτιστοποίηση ώστε να εξισορροπήσει τα κόστη χρήσης των 50 ή των 75 MVA έναντι των δυνατοτήτων, των περιορισμών και των οικονομικών των γειτονικών υποσταθμών.

Σύνθετο μοντέλο γραμμών και αλγόριθμοι ρητής δρομολόγησης

Η μέθοδος βελτιστοποίησης εξυπηρετούμενης περιοχής (SAO) συνήθως πραγματοποιούν την ανάλυσή τους με ρητή δρομολόγηση των γραμμών (π.χ., δεν απαιτεί είσοδο για πιθανή διαδρομή των γραμμών) σε μία μικρή περιοχή του δικτύου. Αυτή η προσέγγιση του δικτύου επεξεργάζεται το σύστημα των γραμμών με μία αναπαράσταση *σύνθετου μοντέλου γραμμών*. Με τη χρήση αυτής της αναπαράστασης, το πρόγραμμα του υπολογιστή, μπορεί να εφαρμόσει μία μέθοδο δυναμικού ή

γραμμικού προγραμματισμού σε μία πολύ γρήγορη διαμόρφωση, επιτρέποντάς της να εξερευνήσει μία πληθώρα επιλογών που περιλαμβάνει ποικιλία αριθμών, διαδρομών, εξυπηρετούμενων περιοχών, αρχικά επίπεδα τάσης και όρια φόρτισης των γραμμών, όπως επίσης, αλλαγές στη χωρητικότητα των υποσταθμών, μέσα σε ένα λογικό χρονικό διάστημα. Το υπάρχον σύστημα αναπαριστάται με αυτόν τον τρόπο και μοντέλα της απαιτούμενης μελλοντικής επέκτασης παράγονται αυτόματα από το πρόγραμμα, καθώς οι υποσταθμοί επεκτείνονται και μετατίθενται και καθώς αυξάνεται το φορτίο.

Το μοντέλο της σύνθετης αναπαράστασης του συστήματος των γραμμών, παρόλο που δεν είναι αρκετά ακριβές για λεπτομερή σχεδιασμό των γραμμών του δικτύου, έχει αποδειχθεί πολύ ακριβές για σχεδιασμό μεγάλης κλίμακας, όπου οι κύριοι στόχοι του σχεδιασμού των γραμμών είναι η ανάλυση του κόστους και αποφάσεις για τα επίπεδα τάσης, της εξυπηρετούμενη περιοχή και τον αριθμό των γραμμών.

Όσον αφορά στους αλγόριθμους ρητής δρομολόγησης, παρόλο που συνήθως αποδεικνύονται καλύτεροι για σκοπούς σχεδιασμού γραμμών του δικτύου, η ικανότητά τους να παράγουν αυτόματα μοντέλα δρομολόγησης γραμμών του συστήματος, χωρίς την απαίτηση εισαγωγής στοιχείων από τον χρήστη, τους κάνει περισσότερο χρήσιμους για σχεδιασμό μεγάλης κλίμακας. Μέγιστης σημασίας για τη χρησιμότητα αυτής της προσέγγισης του δικτύου, είναι η ικανότητα του προγράμματος να παράγει το σύνθετο σύστημα γραμμών από μία μικρή περιγραφή των συνόλων των αγωγών και των προτύπων που χρησιμοποιεί η εταιρία ηλεκτρισμού. Συνεπώς, όταν υποστηρίζεται από ρητή δρομολόγηση, η μέθοδος βελτιστοποίησης εξυπηρετούμενης περιοχής δεν απαιτεί την ύπαρξη εκτενούς βάσης δεδομένων για τις γραμμές διανομής, ώστε να γίνει η ανάλυση του δικτύου. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε μελέτες επέκτασης του δικτύου διανομής πολύ οικονομικά, μιας και δεν απαιτείται η συλλογή των παραπάνω δεδομένων. Ακόμα πιο σημαντικό είναι το γεγονός ότι η εφαρμογή της μεθόδου για το μέλλον είναι εξίσου σημαντική, καθώς τα συστήματα γραμμών του μέλλοντος θα έχουν χαρακτηριστικά που πιθανότατα στο παρόν δε γνωρίζουμε, και ως εκ τούτου δεν είναι δυνατόν να υπάρχει βάση δεδομένων για αυτά. Η επεξεργασία της ίδιας αναπαράστασης των γεωγραφικών δεδομένων ως χωρική προσομοίωση της αύξησης του φορτίου είναι ένας ακόμα λόγος που καταδεικνύει την χρησιμότητα της μεθόδου SAO. Τυπικά, η βελτιστοποίηση εξυπηρετούμενης περιοχής (SAO) επιτρέπει στον χρήστη να καθορίσει τους σχετικούς με τις γραμμές διανομής περιορισμούς, ώστε να αποτρέψει την τοποθέτησή τους από το πρόγραμμα, σε μέρη που αυτή είναι αδύνατη, όπως πάνω από πλατιά ποτάμια, μέσα από νεκροταφεία κτλ.

Εφαρμογή της μεθόδου βελτιστοποίησης εξυπηρετούμενης περιοχής (SAO)

Παρόλο που τα προγράμματα βελτιστοποίησης εξυπηρετούμενης περιοχής διαφέρουν, συνήθως το προκύπτον ως αποτέλεσμα σχέδιο, που εμφανίζεται και γραφικά και ως κείμενο, δίνει το βέλτιστο φορτίο, τη βέλτιστη χωρητικότητα και τη

βέλτιστη εξυπηρετούμενη περιοχή από κάθε υποσταθμό και παρέχει εκτιμήσεις για την επίδοση, το κόστος και την τοπολογία του αναμενόμενου συστήματος γραμμών. Συνήθως, αυτός ο τύπος προσέγγισης εφαρμόζεται με περιορισμούς, που περιορίζουν την λύση που πρέπει να βρεθεί, ώστε να προκύψει ένα σχέδιο του δικτύου, στο οποίο:

- ✓ Εξυπηρετείται ικανοποιητικά όλο το φορτίο των καταναλωτών, τόσο από την άποψη της τάσης, όσο και της αξιοπιστίας
- ✓ Δεν υπερφορτώνεται κανένας εξοπλισμός του δικτύου
- ✓ Οι υπάρχοντες υποσταθμοί χρησιμοποιούνται όπου αυτό είναι εφικτό
- ✓ Τα κόστη και οι απώλειες του συστήματος των γραμμών του δικτύου ελαχιστοποιούνται. Η έκταση των γραμμών μεγιστοποιείται.
- ✓ Υπάρχουν λύσεις έκτακτης ανάγκης σε περίπτωση απώλειας κάποιου υποσταθμού

Η μέθοδος βελτιστοποίησης χρησιμοποιείται για την ανάλυση της επέκτασης στην οποία το σύστημα διαμορφώνεται ώστε να παραμείνει εντός των απαιτούμενων περιορισμών που προαναφέρθηκαν, ενώ παράλληλα πετυχαίνει ελαχιστοποίηση του κόστους. Αυτό καθορίζει:

- ✓ Ποιοι υπάρχοντες υποσταθμοί πρέπει να επεκταθούν και σε τι μέγεθος
- ✓ Πόσοι νέοι υποσταθμοί θα κατασκευαστούν, σε ποια θέση και τι μέγεθος θα έχουν
- ✓ Ποιο είναι το καλύτερο αρχικό επίπεδο τάσης για κάθε σύστημα γραμμών σε έναν νέο υποσταθμό
- ✓ Σε ποιο σημείο προβλήματα λειτουργίας θα μπορούσαν να αποκόψουν τη λειτουργία του δικτύου των γραμμών
- ✓ Ένα συνολικό κεφάλαιο επέκτασης υποσταθμών-γραμμών

Ένα σχέδιο δικτύου διανομής πρέπει να προσαρμόζεται σε μία μεγάλη λίστα περιορισμών και κανόνων κοινής λογικής. Οι πιο χρήσιμες μέθοδοι βελτιστοποίησης εξυπηρετούμενης περιοχής σχεδιάζουν το σύστημα γραμμών/υποσταθμών, ενώ αυτόματα:

- ✓ Περιορίζουν το σχέδιο να χρησιμοποιεί μόνο εξοπλισμό ενός συγκεκριμένου συνόλου σχεδιαστικών προτύπων, όπως περιορισμοί του μεγέθους των μετασχηματιστών
- ✓ Δεν κατασκευάζουν γραμμές διανομής μέσα από νεκροταφεία, εγκάρσια των λιμνών κτλ, καθώς τέτοιες περιοχές αναγνωρίζονται με χρήση δεδομένων γης που παρέχονται από τη βάση δεδομένων πρόβλεψης μικρής περιοχής.
- ✓ Κατασκευάζουν μόνο υπόγεια, ή μόνο υπέργεια δίκτυα γραμμών, σε περιοχές στις οποίες έχει ορισθεί από τον χρήστη ο τύπος των γραμμών (υπέργειες/υπόγειες)
- ✓ Εφαρμόζουν μία προκαθορισμένη τάση σε μία συγκεκριμένη περιοχή (π.χ. 34.5 kV σε μία μόνο περιοχή και 25 kV σε όλες τις υπόλοιπες)
- ✓ Ικανοποιούν τα κριτήρια έκτακτης ανάγκης

Τελικά, δεδομένου ενός συγκεκριμένου πλαισίου χαρακτηριστικών των υποσταθμών – μίας ολοκληρωμένης περιγραφής των τοποθεσιών και δυνατοτήτων όλων των υποσταθμών και των συνδεδεμένων σε αυτούς δικτύων γραμμών – μία μέθοδος βελτιστοποίησης εξυπηρετούμενης περιοχής μπορεί να αποτιμήσει τρεις σημαντικές πτυχές του τελικού σχεδίου:

- ✓ Περιοχές του συστήματος που το φορτίο δε μπορεί να εξυπηρετηθεί το σύστημα δεν έχει την απαιτούμενη εγκατεστημένη δυνατότητα ή δεν είναι αρκετή η έκταση των γραμμών
- ✓ Περιοχές του συστήματος που εξυπηρετούνται με ένα μεγαλύτερο από το μέσο κόστος
- ✓ Περιοχές που δεν εξυπηρετούνται αξιόπιστα, με βάση μία εκτίμηση της αξιοπιστίας βασισμένη στο σύνθετο σύστημα γραμμών

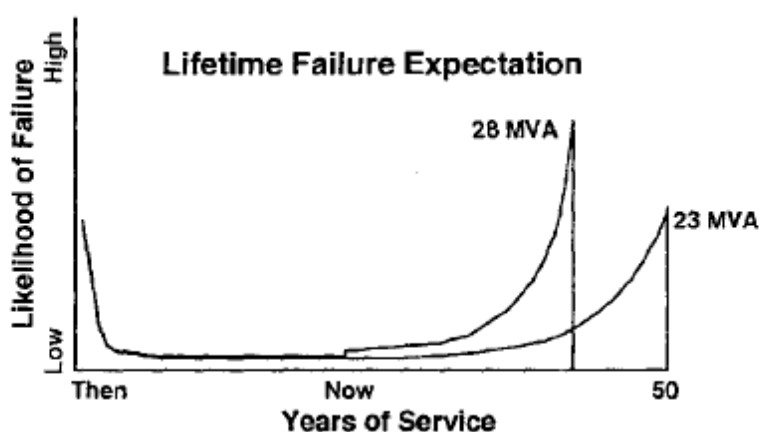
Η ικανότητα αξιολόγησης αυτών των τριών παραμέτρων του τελικού σχεδίου του δικτύου έναντι οποιασδήποτε πρόβλεψης φορτίου, παρέχει ένα πολύ δυνατό εργαλείο σχεδιασμού μεγάλης κλίμακας. Συγκρίνοντας το παρόν σύστημα με τη μελλοντική διαμόρφωση του φορτίου, το πρόγραμμα σχεδιασμού εξακριβώνει τη φύση και την τοποθεσία των προβλημάτων του δικτύου.

Μία, επιπλέον, χρησιμότητα ενός προγράμματος βελτιστοποίησης εξυπηρετούμενης περιοχής (SAO) είναι η εφαρμογή του για την εξυπηρέτηση μακροπρόθεσμων -άνω των 10 χρόνων- φορτίων, χρησιμοποιώντας μόνο το υπάρχον σύστημα, αντιμετωπίζοντας γραμμές και επαναδρομολογώντας την ροή ισχύος όσο αυτό είναι πρακτικό, χωρίς την κατασκευή νέων εγκαταστάσεων. Στις περισσότερες περιπτώσεις, και σίγουρα αν υπάρχει κάποια ουσιαστική αύξηση του φορτίου, η

βελτιστοποίηση κρίνει εφικτό τον παραπάνω στόχο, και μάλιστα με την ύπαρξη περιορισμών. Η βελτιστοποίηση, ως μια διαδικασία ελαχιστοποίησης κόστους, ρίχνει το πιο ακριβό προς εξυπηρέτηση φορτίο πρώτα, χρησιμοποιώντας το υπάρχον δίκτυο, στα πλαίσια πάντα των περιορισμών λειτουργίας του, ώστε να «σηκώσει» όλο το φορτίο που μπορεί να εξυπηρετήσει, περισσότερο οικονομικά. Ο σχεδιασμός αυτού του «μη εξυπηρετούμενου φορτίου» σαν ένα χάρτη, παρέχει μία πολύ χρήσιμη εικόνα στον σχεδιαστή, τόσο για την εξυπηρέτηση του φορτίου, όσο και για την μείωση του κόστους. Με την επανεκτέλεση του προγράμματος με όρια έκτασης γραμμής ορισμένα στο άπειρο, δηλαδή με την απαλοιφή των αντίστοιχων περιορισμών, ο σχεδιαστής μπορεί να προσδιορίσει ποιο μέρος του χάρτη μη εξυπηρετούμενου φορτίου οφείλεται στα όρια χωρητικότητας των υποσταθμών. Παρόμοια, με την επανεκτέλεση του προγράμματος με χωρητικότητες υποσταθμών ορισμένες στο άπειρο, είναι δυνατός ο προσδιορισμός του μη εξυπηρετούμενου φορτίου που οφείλεται στα όρια έκτασης των γραμμών. Έτσι, προσδιορίζεται ο τρόπος σχεδιασμού της επέκτασης ενός δικτύου διανομής, ώστε να εξυπηρετηθεί η αύξηση του φορτίου. [6]

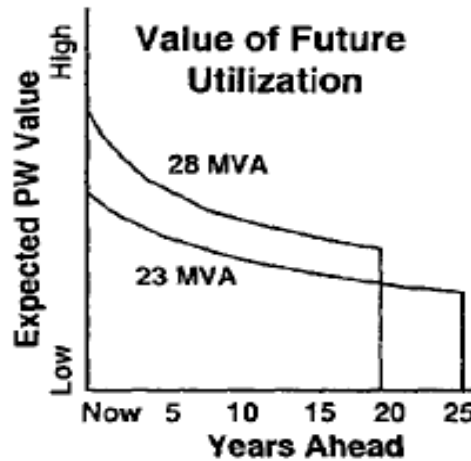
2.6.4 Αντοχή υποσταθμών και χρήση μεθόδων σχεδιασμού

Η αντοχή, η αναμενόμενη δηλαδή αξιοπιστία σε συνάρτηση χρόνου ζωής/φορτίου, ενός υποσταθμού μπορεί να συμπεριληφθεί σε μερικές προσεγγίσεις επιλογής τοποθεσίας υποσταθμών και βελτιστοποίησης. Στο διάγραμμα της **Εικόνα 2.3**, η τυπική καμπύλη αξιοπιστίας των μετασχηματιστών και του εξοπλισμού ενός υποσταθμού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του εναπομείναντος χρόνου ζωής. Η περιοχή κάτω από την καμπύλη υποτίθεται πως είναι το 100%. Το μέρος που έχει ήδη «εξαντληθεί» υπολογίζεται βάσει της ηλικίας, παλιότερων καταγραφών φορτίου, κτλ.



Εικόνα 2.3: Καμπύλη Αξιοπιστίας Μετασχηματιστών [6]

Η τιμή της ενεργού ισχύος των μετασχηματιστών που εξυπηρετούν ποικίλα επίπεδα φορτίων στο μέλλον μπορεί να υπολογιστεί, από το διάγραμμα της **Εικόνα 2.4**, το οποίο συγκρίνει την τιμή χρησιμοποίησης αν οι μετασχηματιστές είναι περιορισμένοι ο καθένας σε ένα μέγιστο 23 MVA, με την οικονομική τους τιμή σε ένα όριο φορτίου των 28 MVA. Η μελλοντική τιμή της ενεργού ισχύος για κάθε σχέδιο είναι η περιοχή κάτω από την αντίστοιχη καμπύλη.



Εικόνα 2.4: Τιμή Μελλοντικής Χρησιμοποίησης [6]

Μεγαλύτερα φορτία δημιουργούν μία επιταχυνόμενη απώλεια ζωής και μεγαλύτερη πιθανότητα βραχυπρόθεσμης αποτυχίας των μετασχηματιστών. Το αναμενόμενο κόστος ενεργού ισχύος λόγω αποτυχιών μπορεί να εκτιμηθεί από το παρακάτω διάγραμμα. Το κόστος αυτό μπορεί να περιλαμβάνει μόνο το κόστος αντικατάσταση, ή το κόστος κακής εξυπηρέτησης των πελατών κατά τη διάρκεια της αποτυχίας του συστήματος και της αποκατάστασης. Προφανώς με την πάροδο του χρόνου, κάθε μονάδα του συστήματος θα αχρηστευτεί, όμως ο εξοπλισμός που εξυπηρετεί «ελαφρύ» φορτίο μπορεί να έχει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, και συνεπώς λιγότερα κόστη ενεργού ισχύος.



Εικόνα 2.5: Κόστη Ενεργού Ισχύος κατά την πάροδο των χρόνων [6]

2.7 Χρησιμότητα αλγόριθμων βελτιστοποίησης σχεδιασμού δικτύου διανομής

Η *μείωση του κόστους* είναι ο πρωταρχικός λόγος χρήσης μίας μεθόδου βελτιστοποίησης, καθώς εξοικονόμηση 5-10% είναι πραγματοποιήσιμη με τη χρήση καλά σχεδιασμένων, αυτόματων και βασισμένων στη βελτιστοποίηση προγραμμάτων για σχεδιασμό μικρής και μεγάλης κλίμακας. Οι επικαλούμενες οικονομίες που προκύπτουν από την βελτιστοποίηση υπόκεινται πάντοτε σε αξιολόγηση ως προς τη ρεαλιστικότητά τους. Από τη διαδικασία της βελτιστοποίησης προκύπτει μεγαλύτερη εξοικονόμηση σε περιπτώσεις νέας επέκτασης του δικτύου, χωρίς την ύπαρξη παροντικών εγκαταστάσεων, πιθανότατα λόγω του ότι ο τύπος του συγκεκριμένου προβλήματος είναι πιο δεκτικός από τις σύγχρονες μεθόδους βελτιστοποίησης, αλλά ίσως επίσης υπάρχουν απλά περισσότεροι πόροι προς εξοικονόμηση σε αυτήν την περίπτωση.

Η *μείωση του χρόνου και της απαιτούμενης προσπάθειας* για την ανάπτυξη και την τεκμηρίωση ενός σχεδίου επέκτασης δικτύου διανομής αποτελεί ακόμα ένα πλεονέκτημα των μεθόδων βελτιστοποίησης. Παρόλο, βέβαια, που μειώνεται κατά πολύ ο χρόνος προσδιορισμού του βέλτιστου σχεδιασμού, οι περισσότεροι σχεδιαστές καταφεύγουν στη χρήση των εν λόγω προγραμμάτων για τη βελτίωση της ποιότητας της δουλειάς τους.

Τα αυτοματοποιημένα εργαλεία βέλτιστου σχεδιασμού δικτύου διανομής αποτελούν και ένα *εργαλείο μάθησης*, καθώς συμβάλλουν στην κατανόηση του συστήματος διανομής από τους μηχανικούς, όπως επίσης και της αλληλεπίδρασης των διαφόρων μορφών κόστους, της επίδοσης και τους συμβιβασμούς μεταξύ τους, και τα μέτρα που μπορούν να βοηθήσουν στη μείωση του κόστους. Αρκετά χρήσιμες επίσης, είναι οι δοκιμές διαφόρων τιμών των παραμέτρων εισόδου, ώστε να γίνει εκμάθηση του πως αλληλεπιδρούν οι διάφορες πτυχές του σχεδιασμού. Για παράδειγμα, θέτοντας μηδενικά κόστη απωλειών, ένα πρόγραμμα σχεδιασμού οδηγεί σε λύση που αγνοεί τη συμβολή των απωλειών στο συνολικό κόστος. Η σύγκριση του προκύπτοντος σχεδίου με το πραγματικό θα αποκαλύψει χαρακτηριστικά και πρακτικές σχεδιασμού που οφείλονται στις απώλειες.

Τυποποίηση και αξιοπιστία. Η σωστή παραμετροποίηση και εφαρμογή των αυτοματοποιημένων προγραμμάτων εφαρμόζει τους ίδιους κανόνες, τα ίδια κόστη και την ίδια μεθοδολογία αξιολόγησης σε όλες τις περιπτώσεις σχεδιασμού, τυποιώντας την διαδικασία σχεδιασμού και βοηθώντας στη διαβεβαίωση ότι πληρούνται όλες οι απαιτήσεις του σχεδιασμού. Η βελτιστοποίηση, αν χρησιμοποιηθεί σωστά, αγνοεί τις εναλλακτικές που δεν είναι βιώσιμες, κάτι που βελτιώνει την αξιοπιστία του προκύπτοντος σχεδίου – καμία προκατάληψη δεν υπήρξε κατά την επιλογή του βέλτιστου σχεδίου, καθώς όλες οι επιλογές αξιολογήθηκαν σε κοινή βάση.

Τεκμηρίωση. Η αυτοματοποίηση (και όχι η βελτιστοποίηση) βοηθά σημαντικά στην τεκμηρίωση της ανάγκης για προσθήκες και στην απόδειξη ότι επιμελής προσπάθεια αφιερώθηκε για την εξέταση όλων των εναλλακτικών και τον καθορισμό του βέλτιστου σχεδίου.

Αιτιολόγηση. Πέρα από την ικανότητα της αυτοματοποιημένης βελτιστοποίησης να βελτιώνει την αξιοπιστία και την τεκμηρίωση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μελέτες αιτιολόγησης, για την υπεράσπιση κριτικών ή αμφιλεγόμενων στοιχείων του τελικού σχεδίου. [15]

Κεφάλαιο 3

Γενετικοί Αλγόριθμοι

3.1 Ιστορία των εξελικτικών αλγόριθμων

Τις δεκαετίες του 50' και του 60' αρκετοί επιστήμονες των υπολογιστών ερεύνησαν εξελικτικά συστήματα, πιστεύοντας πως η εξέλιξη θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σαν εργαλείο βελτιστοποίησης για προβλήματα μηχανικών. Η βασική ιδέα αυτών των συστημάτων ήταν η εξέλιξη ενός πληθυσμού πιθανών λύσεων σε ένα δεδομένο δοσμένο πρόβλημα, χρησιμοποιώντας λειτουργίες εμπνευσμένες από τη φυσική γενετική μετάλλαξη και τη φυσική επιλογή.

Τη δεκαετία του 60', ο Rechenberg εισήγαγε τις «στρατηγικές εξέλιξης» (evolution strategies), μία μέθοδο για την βελτιστοποίηση παραμέτρων με πραγματικές τιμές για συσκευές όπως αεροτομές και η ιδέα του αυτή αναπτύχθηκε περαιτέρω από τον Schwefel. Το πεδίο των στρατηγικών εξέλιξης συνεχίζει στις μέρες μας να τελεί υπό έρευνα. Το 1966 οι Fogel, Owens και Walsh ανέπτυξαν τον «εξελικτικό προγραμματισμό» (evolutionary programming), μία τεχνική με την οποία υποψήφιες λύσεις για δοσμένα προβλήματα παρουσιάζονταν ως μηχανές πεπερασμένης κατάστασης, οι οποίες εξελίσσονταν μεταλλάσσοντας τυχαία τα διαγράμματα κατάστασης-μεταβασης με την επιλογή αυτού που ταίριαζε καλύτερα. Μία κάπως ευρύτερη διατύπωση του εξελικτικού προγραμματισμού παραμένει υπό έρευνα στις μέρες μας. Οι στρατηγικές εξέλιξης, ο εξελικτικός προγραμματισμός και οι Γενετικοί Αλγόριθμοι αποτελούν το πεδίο του εξελικτικού υπολογισμού.

Πολλοί ακόμη άνθρωποι ασχολήθηκαν με την ανάπτυξη αλγορίθμων εμπνευσμένων από την εξέλιξη για βελτιστοποίηση και εκμάθηση, όπως οι Box, Friedman, Bledsoe, Bremermann και οι Reed, Toombs και Baricelli. Παρόλα αυτά, δε δόθηκε στην έρευνα τους η σημασία και η προσοχή που δόθηκε στις στρατηγικές εξέλιξης, τον εξελικτικό προγραμματισμό και τους Γενετικούς Αλγόριθμους. Επιπρόσθετα, αρκετοί βιολόγοι που ασχολήθηκαν με την εξέλιξη χρησιμοποίησαν υπολογιστές για να προσομοιώσουν την εξέλιξη για σκοπούς ελέγχου των πειραμάτων.

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms) επινοήθηκαν από τον John Holland τη δεκαετία του 60' και αναπτύχθηκαν από το πανεπιστήμιο του Michigan τις δεκαετίες του 60' και του 70'. Σε αντίθεση με τις στρατηγικές εξέλιξης και τον εξελικτικό προγραμματισμό, αρχικός στόχος του Holland δεν ήταν να σχεδιάσει αλγόριθμους για να λύσει συγκεκριμένα προβλήματα, αλλά περισσότερο να μελετήσει το φαινόμενο της προσαρμογής όπως προκύπτει στη φύση και να αναπτύξει τρόπους με τους οποίους μηχανισμοί της φυσικής προσαρμογής θα μπορούσαν να εισαχθούν στα υπολογιστικά συστήματα.

Ο Holland παρουσίασε τον Γενετικό Αλγόριθμο σαν ένα μέρος της βιολογικής εξέλιξης και έδωσε το θεωρητικό πλαίσιο για προσαρμογή χρησιμοποιώντας γενετικούς αλγόριθμους. Ο Γενετικός Αλγόριθμος του Holland είναι μία μέθοδος για τη μετάβαση από έναν πληθυσμό χρωμοσωμάτων(π.χ., συμβολοσειρές από «0» και «1») σε έναν νέο πληθυσμό χρησιμοποιώντας ένα είδος «φυσικής επιλογής» μαζί με τελεστές (operators) εμπνευσμένους από τη γενετική: τη διασταύρωση (crossover), τη μετάλλαξη (mutation) και την αντιστροφή (inversion). Κάθε χρωμόσωμα αποτελείται από γονίδια (π.χ., ψηφία).

Με τη διαδικασία της *επιλογής*, διαλέγονται εκείνα τα χρωμοσώματα του πληθυσμού, των οποίων επιτρέπεται η αναπαραγωγή και κατά μέσο όρο τα χρωμοσώματα που ταιριάζουν καλύτερα, παράγουν περισσότερους απογόνους από αυτά που ταιριάζουν λιγότερο. Κατά τη διαδικασία της *διασταύρωσης*, ο αλγόριθμος μιμούμενος τον βιολογικό συνδυασμό μεταξύ δύο απλοϊκών οργανισμών (αποτελούμενων από ένα χρωμόσωμα), εναλλάσσει τμήματα των εκάστοτε δύο χρωμοσωμάτων. Με τη μετάλλαξη γίνεται τυχαία αλλαγή των αλληλόμορφων τιμών μερικών γονιδίων μέσα στο χρωμόσωμα και τέλος με την εναλλαγή συντελείται αντιστροφή της σειράς ενός συνεχούς τμήματος του χρωμοσώματος, δηλαδή της σειράς που έχουν ταξινομηθεί τα γονίδια. Στον Γενετικό Αλγόριθμο διασταύρωση (crossover) και επανασυνδυασμός (recombination) νοούνται ως το ίδιο.

Η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου βασισμένο σε πληθυσμό με διασταύρωση, εναλλαγή και μετάλλαξη από τον Holland ήταν μια πολύ μεγάλη καινοτομία. Ο Holland, επίσης, ήταν ο πρώτος που προσπάθησε να θέσει την υπολογιστική εξέλιξη σε μια σταθερή θεωρητική βάση. Μάλιστα, μέχρι πρόσφατα, αυτή η θεωρητική θεμελίωση, βασισμένη στην έννοια των «σχημάτων», ήταν η βάση για σχεδόν ολόκληρο το μεταγενέστερο θεωρητικό υπόβαθρο των Γενετικών Αλγορίθμων.

Τα τελευταία χρόνια υπήρχε μεγάλη αλληλεπίδραση μεταξύ των ερευνητών που μελετούσαν ποικίλες μεθόδους εξελικτικών αλγορίθμων και τα σύνορα μεταξύ των γενετικών αλγορίθμων, των στρατηγικών εξέλιξης, του εξελικτικού προγραμματισμού, καθώς και άλλων αλγοριθμικών προσεγγίσεων έχουν πέσει σε κάποιο βαθμό. Στις μέρες μας, πλέον, οι ερευνητές χρησιμοποιούν τον όρο γενετικοί αλγόριθμοι για να περιγράψουν κάτι αρκετά διαφορετικό από την αρχική σύλληψη του Holland. [16]

3.2 Ορολογία Γενετικών Αλγορίθμων

Η ανάπτυξη των Γενετικών Αλγορίθμων πραγματοποιήθηκε βάσει στοιχείων και μηχανισμών της βιολογίας και ειδικότερα της γενετικής. Από την ορολογία, λοιπόν, αυτών των επιστημών προέκυψε και η ονοματοδοσία βασικών στοιχείων, διαδικασιών και τελεστών των Γενετικών Αλγορίθμων:

- ✓ **Χρωμοσώματα (Chromosomes) και Γονίδια (Genes):** Οι πιθανές τιμές των μεταβλητών μιας συνάρτησης, οι οποίες μπορεί να είναι πραγματικοί ή δυαδικοί

αριθμοί, αποτελούν τα γονίδια. Πολλά γονίδια μαζί, ο αριθμός των οποίων σε κάθε πρόβλημα αντιστοιχεί στον αριθμό των μεταβλητών της συνάρτησης του προβλήματος, αποτελούν ένα χρωμόσωμα.

- ✓ **Αρχικός Πληθυσμός (Initial Population):** Η διαδικασία επίλυσης ενός προβλήματος με Γενετικούς Αλγόριθμους, όπως η βελτιστοποίηση (ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση) μιας συνάρτησης ξεκινάει με έναν αρχικό πληθυσμό, ο οποίος αποτελείται από επιμέρους χρωμοσώματα. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των χρωμοσωμάτων τόσο περισσότερες είναι και οι πιθανότητες ο Γενετικός Αλγόριθμος να βρει την βέλτιστη λύση και να αποφευχθεί η λανθασμένη θεώρηση ενός τοπικού ελαχίστου ως ολικό, γεγονός που θα οδηγούσε τον Γενετικό Αλγόριθμο σε εύρεση λανθασμένης λύσης.
- ✓ **Πληθυσμός (Population) και Γενιές (Generations):** Ξεκινώντας από τον αρχικό πληθυσμό, σε κάθε επανάληψη του αλγόριθμου δημιουργείται ένας νέος πληθυσμός, που στην ουσία αποτελεί τη νέα γενιά του αλγόριθμου. Από τον κάθε πληθυσμό που προκύπτει γίνεται αναζήτηση για την εύρεση του χρωμοσώματος εκείνου που οδηγεί στη βέλτιστη λύση, κάτι που συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθούν κάποια κριτήρια, όπως επί παραδείγματι πλήθος γενεών μεγαλύτερος ενός προκαθορισμένου αριθμού.
- ✓ **Γονείς (Parents) και Τέκνα (Children):** Σε κάθε γενιά του αλγόριθμου επιλέγονται ζεύγη χρωμοσωμάτων – γονείς - για διασταύρωση, ώστε να προκύψουν νέα χρωμοσώματα – τέκνα - και συνεπώς νέος πληθυσμός. Τέκνα, παρόλα αυτά, δεν προκύπτουν μόνο μέσω της διασταύρωσης χρωμοσωμάτων-γονέων, αλλά και μέσω μετάλλαξης.
- ✓ **Καταλληλότητα (Fitness):** Πρόκειται για το σημαντικότερο στοιχείο κατά την διαδικασία βελτιστοποίησης με χρήση Γενετικών Αλγόριθμων. Η συνάρτηση καταλληλότητας (ή αξιολόγησης) που ορίζεται για την εύρεση της βέλτιστης πρέπει να είναι εύστοχη και σωστά διατυπωμένη, ώστε να αυξάνεται η αποδοτικότητα του Γενετικού Αλγόριθμου. Το σύνολο τιμών της συνάρτησης καταλληλότητας κυμαίνεται από 0 μέχρι 1 και συνήθως, τιμές της συνάρτησης κοντά στο 1 ισοδυναμούν με εύρεση του τέλειου χρωμοσώματος, ενώ τιμές κοντά στο 0 υποδηλώνουν αστοχία του αλγόριθμου. Φυσικά, σε περιπτώσεις έτοιμων «πακέτων» που χρησιμοποιούν Γενετικούς Αλγόριθμους, όπως για παράδειγμα στο matlab, η βέλτιστη λύση του προβλήματος προϋποθέτει ελαχιστοποίηση της συνάρτησης καταλληλότητας.
- ✓ **Διασταύρωση (Crossover):** Η διαδικασία κατά την οποία συνδυάζονται δύο χρωμοσώματα (γονείς) για να προκύψει ένα τέκνο. Η πιθανότητα εμφάνισης της διασταύρωσης p_c είναι προκαθορισμένη κατά την εκτέλεση του Γενετικού

Αλγόριθμοι, ενώ υπάρχει περίπτωση να συμβεί σε περισσότερα από ένα σημεία του χρωμοσώματος.

- ✓ **Μετάλλαξη (Mutation):** Κατά τη διαδικασία της μετάλλαξης, η οποία συμβαίνει με μικρή πιθανότητα p_m , συντελούνται τυχαίες αλλαγές στα χρωμοσώματα ενός πληθυσμού με αποτέλεσμα να δημιουργούνται τέκνα χωρίς διασταύρωση. Η ύπαρξη της μετάλλαξης δίνει τη δυνατότητα εύρεσης βέλτιστης λύσης, από τον Γενετικό Αλγόριθμο, σε ακόμα πιο ευρύ διάστημα. [17]

3.3 Βασικά χαρακτηριστικά των Γενετικών Αλγόριθμων

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των Γενετικών Αλγόριθμων είναι πως κατά τη διαδικασία της επίλυσης ενός προβλήματος κωδικοποιούνται οι τιμές των μεταβλητών της συνάρτησης και εν συνεχεία χρησιμοποιείται αυτή η κωδικοποίηση και όχι οι ίδιες οι μεταβλητές. Η κωδικοποίηση γίνεται με τη βοήθεια ενός βοηθητικού αλφάβητου και προκύπτουν συμβολοσειρές πεπερασμένου μήκους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η κωδικοποίηση των πιθανών συνδυασμών των δυαδικών διακοπών (on-off) ενός κουτιού, σε συμβολοσειρές πεπερασμένου μήκους το οποίο ισούται με τον αριθμό των διακοπών, δηλαδή των μεταβλητών και συνεπώς κάθε θέση αντιστοιχεί σε έναν διακόπτη. Σε περίπτωση που ένας διακόπτης είναι στη θέση on, η τιμή της αντίστοιχης θέσης του κωδικοποιημένου διανύσματος είναι «1», ενώ όταν είναι στη θέση off η αντίστοιχη θέση παίρνει την τιμή «0». Έτσι, στη συνέχεια πραγματοποιείται η αναζήτηση της βέλτιστης θέσης των διακοπών για τη λειτουργία που επιτελούν.

Σημαντικό χαρακτηριστικό, επίσης, είναι ότι η αναζήτηση της βέλτιστης λύσης από τους Γενετικούς Αλγόριθμους γίνεται σε πολλά σημεία ταυτόχρονα και όχι μόνο σε ένα. Προφανώς, αυτή η δυνατότητα του Γενετικού Αλγόριθμου δε συναντάται στις παραδοσιακές μεθόδους, στις οποίες η διαδικασία του προσδιορισμού της λύσης γίνεται βήμα-βήμα, με σταδιακή μετάβαση από σημείο σε σημείο στο πεδίο ορισμού της συνάρτησης. Ο κίνδυνος που ελλοχεύει λόγω αυτού του χαρακτηριστικού είναι ο περιορισμός των λύσεων σε ένα συγκεκριμένο σημείο του πεδίου ορισμού της αντικειμενικής συνάρτησης και επομένως τον προσδιορισμό ενός τοπικού ακρότατου αντί ολικού. Η αποφυγή αυτού του ενδεχόμενου αποτελέσματος γίνεται με χρήση ευρύτερου –μεγαλύτερου- συνόλου συμβολοσειρών.

Στην υψηλή αποδοτικότητα, την ευελιξία αλλά και τη δυνατότητα εφαρμογής σε μεγάλο πλήθος προβλημάτων των Γενετικών Αλγόριθμων συμβάλει και η δυνατότητά τους να χρησιμοποιούν μόνο την αντικειμενική συνάρτηση, χωρίς να επιβάλλεται καμία πρόσθετη πληροφορία, όπως ο προσδιορισμός των περιορισμών των παραμέτρων της. Προέκυψε, βέβαια, το ερώτημα αν συμφέρει κατά τη διαδικασία της επίλυσης να αγνοούνται οι όποιες επιπρόσθετες πληροφορίες, και για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκαν επεκτάσεις-τροποποιήσεις των Γενετικών Αλγόριθμων που τις αξιοποιούν και οδηγούν σε ακόμα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό των Γενετικών Αλγόριθμων, επιπλέον, είναι η μετάβαση σε πιθανά σημεία λύσεων βάσει πιθανοθεωρητικών κανόνων και όχι ντετερμινιστικών. Για την αποφυγή παρερμηνεύσεων, τονίζεται πως ο παράγοντας της τύχης κατά την εκτέλεση ενός Γενετικού Αλγόριθμου επιδρά μόνο στην αναζήτηση σημείων σε περιοχές που αναμένεται να δώσουν καλά αποτελέσματα. [18]

3.4 Βασικά στοιχεία Γενετικών Αλγόριθμων

Για να χαρακτηριστεί Γενετικός ένας αλγόριθμος πρέπει να διαθέτει κάποια απαραίτητα στοιχεία. Τα βασικά αυτά συστατικά ενός Γενετικού Αλγόριθμου είναι: η κωδικοποίηση των πιθανών λύσεων, η αντικειμενική συνάρτηση, η αρχικοποίηση, η αποκωδικοποίηση, ο υπολογισμός ικανότητας ή αξιολόγησης, η αναπαραγωγή (επιλογή, διασταύρωση, μετάλλαξη). Στη συνέχεια, παρατίθεται σύντομη περιγραφή των παραπάνω στοιχείων.

Κωδικοποίηση (Coding)

Στο αρχικό στάδιο εκτέλεσης του Γενετικού Αλγόριθμου, την κωδικοποίηση, κύρια επιδίωξη αποτελεί η αναπαράσταση του συνόλου των πιθανών λύσεων με τέτοιο τρόπο ώστε να διευκολύνονται οι επόμενες λειτουργίες του αλγόριθμου. Η κωδικοποίηση πρέπει να γίνεται με ένα μαθηματικά μοντελοποιημένο τρόπο για να καθιστά δυνατή την επεξεργασία των πληθυσμών που προκύπτουν από τον υπολογιστή.

Ο τρόπος που γίνεται η κωδικοποίηση διαφέρει ανάλογα τη φύση του προβλήματος. Συνηθισμένος τρόπος κωδικοποίησης –και ταυτόχρονα αρκετά απλός– είναι τα δυαδικά ψηφία (π.χ. 0, 1) με αποτέλεσμα τη δημιουργία δυαδικής συμβολοσειράς καθορισμένου μήκους – ίσου με τον αριθμό των μεταβλητών, αφού σε κάθε θέση του χρωμοσώματος (γονίδιο) αντιστοιχεί και ένα χαρακτηριστικό ή λειτουργία. Εκτός της δυαδικής κωδικοποίησης, έχει αναφερθεί πληθώρα άλλων κωδικοποιήσεων ανάλογα πάντα τη φύση του υπό εξέταση προβλήματος. Το προφανές είναι ότι δεν υφίσταται μία καθολική και αποτελεσματική κωδικοποίηση για κάθε είδους πρόβλημα. Μάλιστα ακόμα και προφανείς τρόποι κωδικοποίησης του συνόλου των πιθανών λύσεων ενός προβλήματος, στην πορεία εκτέλεσης του αλγόριθμου μπορεί να αποδειχθούν αναποτελεσματικοί. Στην εκάστοτε περίπτωση, η επιλογή του τρόπου κωδικοποίησης επαφίεται στην πείρα του σχεδιαστή του προβλήματος, αλλά και στην αντίληψη που έχει για το πρόβλημα –και επομένως τη διατύπωσή του– και τη διαίσθηση που έχει για τον εντοπισμό των λύσεών του.

Αντικειμενική Συνάρτηση (Fitness Function)

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι το επόμενο, και επίσης βασικό, στάδιο της επίλυσης ενός προβλήματος με Γενετικό Αλγόριθμο. Ο ορισμός της εν λόγω συνάρτησης πρέπει να γίνεται με πολύ προσοχή, αφού αποτελεί την μόνη πληροφορία που έχει ο αλγόριθμος για το πρόβλημα και όσο πιο εύκολα υπολογίσιμη είναι η συνάρτηση αυτή τόσο πιο γρήγορος και αποδοτικός είναι ο αλγόριθμος. Επί της ουσίας, η αντικειμενική συνάρτηση διαδραματίζει το ρόλο του περιβάλλοντος, το οποίο ευθύνεται για την εξέλιξη των γενεών, στο τεχνικό μοντέλο. Η τιμή αυτής της συνάρτησης υπολογίζεται για κάθε συμβολοσειρά που δημιουργείται σε κάθε επανάληψη του Γενετικού Αλγόριθμου και ουσιαστικά, η τιμή αυτή καθορίζει την επιβίωση και την εξέλιξη ή όχι ενός ατόμου (χρωμοσώματος). Σε κάθε πιθανή τιμή της μεταβλητής της αντικειμενικής συνάρτησης, αντιστοιχεί μια τιμή ικανότητας ή απόδοσης (fitness ή score), η οποία ευθύνεται για την αξιολόγηση της εκάστοτε λύσης για την μεγιστοποίηση ή την ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης.

- Οι δύο αυτές φάσεις, της κωδικοποίησης και της δημιουργίας της αντικειμενικής συνάρτησης ορίζουν το προς επίλυση πρόβλημα και λαμβάνουν χώρα σε κάθε Γενετικό Αλγόριθμο, ανεξαρτήτως προβλήματος. Μετά το πέρας αυτών των δύο φάσεων, συντελούνται οι παρακάτω αναλυόμενες γενετικές διαδικασίες, οι οποίες λειτουργούν ανεξάρτητα από τον τρόπο αναπαράστασης των ατόμων και της αξιολόγησης των ικανοτήτων και των χαρακτηριστικών τους.

Αρχικοποίηση (Initialization)

Στο στάδιο της αρχικοποίησης, καθορίζεται ο αρχικός πληθυσμός που αποτελεί την εναρκτήρια πληροφορία του Γενετικού Αλγόριθμο. Οι τιμές και το πλήθος του αρχικού πληθυσμού, το μέγεθός του δηλαδή, επιλέγεται από τον χρήστη-σχεδιαστή του προβλήματος, ενώ η τιμή του κάθε χρωμοσώματος συνήθως επιλέγεται τυχαία ανάμεσα σε όλες τις δυνατές τιμές του προβλήματος, παρόλο που μην υπάρχουν προβλήματα που καθορίζονται και αυτές από τον χρήστη ή επιστρατεύονται ευρετικές μέθοδοι για τον προσδιορισμό τους. Στη συνέχεια, ο αρχικός πληθυσμός αξιολογείται, δηλαδή προσδιορίζεται η ικανότητα επιβίωσης του κάθε ατόμου του.

Αποκωδικοποίηση (Decoding)

Για την αξιολόγηση του αρχικού ή οποιασδήποτε γενιάς πληθυσμού πρέπει να προηγηθεί η αποκωδικοποίησή του. Προκειμένου να γίνει ευκολότερα κατανοητή αυτή η διαδικασία, αξίζει να παραλληλίσουμε την τεχνική αυτή διαδικασία με την αντίστοιχη φυσική. Το σύνολο της κωδικοποιημένης γενετικής πληροφορίας στα γονίδια των χρωμοσωμάτων ενός οργανισμού, ο γονότυπός του, δε γίνεται αντιληπτός με γυμνό μάτι, αλλά ορατή είναι η εμφάνιση των χαρακτηριστικών του ατόμου λόγω της αλληλεπίδραση του γονότυπου με το περιβάλλον. Σε τεχνητό επίπεδο, όπως προαναφέρθηκε, τον ρόλο του περιβάλλοντος διαδραματίζει η αντικειμενική

συνάρτηση και τον ρόλο του γονότυπου η δομή της συμβολοσειράς. Ο φαινότυπος είναι η ορατή εμφάνιση μιας συμβολοσειράς, δηλαδή η αποκωδικοποιημένη συμβολοσειρά που ανήκει στο πεδίο ορισμού της αντικειμενικής συνάρτησης.

Υπολογισμός Ικανότητας ή Αξιολόγησης (Fitness Value)

Ο υπολογισμός της ικανότητας αξιολόγησης αποτελεί θεμελιώδες στάδιο της εκτέλεσης του Γενετικού Αλγόριθμου. Έπεται της αποκωδικοποίησης, και στην ουσία αξιολογείται η ικανότητα επιβίωσης του εκάστοτε ατόμου. Συγκρίνοντας πάλι με τη φύση, οι ικανότητες των όντων είναι καθορισμένες από τα γονίδια των χρωμοσωμάτων τους. Δεν υπάρχει αυστηρή διαδικασία αξιολόγησης των ικανοτήτων αυτών, αλλά ως παράδειγμα έμμεσης αξιολόγησης μπορεί να δοθεί το γεγονός ότι στο ζωικό βασίλειο ζώα που επιβιώνουν είναι αυτά που έχουν καλύτερες ικανότητες και καταφέρνουν να ξεφεύγουν από αρπαγές και να αντέχουν σε αντίξοες συνθήκες. Σε τεχνητό επίπεδο, η απόδοση μιας συμβολοσειράς αξιολογείται από την αντικειμενική συνάρτηση, ενώ σε πιο σύνθετα προβλήματα η αξιολόγηση γίνεται με την εκτέλεση εργαστηριακής προσομοίωσης.

Αναπαραγωγή (Creating Next Generation)

Πρόκειται για μια σύνθετη διαδικασία, άκρως σημαντική για την λειτουργία του Γενετικού Αλγόριθμου, που αποτελείται από την επιλογή των ατόμων που θα γίνουν γονείς για τη δημιουργία της επόμενης γενιάς, τη διασταύρωση και τη μετάλλαξη.

Επιλογή (Selection)

Σε αυτό το στάδιο του αλγόριθμου, αξιολογούνται τα άτομα ώστε να επικρατήσουν τα ικανότερα. Με λίγα λόγια, επιλέγονται τα άτομα που θα λάβουν μέρος στην αναπαραγωγή ως γονείς και θα κληροδοτήσουν στα νέα άτομα-τέκνα μέρος ή το σύνολο των χαρακτηριστικών τους. Ο σκοπός της λειτουργίας αυτής είναι η επιβίωση των ικανότερων ατόμων μετά από αναπαραγωγή πολλών γενεών, ενώ η εκτέλεση Γενετικού Αλγόριθμου χωρίς επιλογή ισοδυναμεί με τυχαίο ψάξιμο στο πεδίο των λύσεων. Τεχνικές επιλογής υπάρχουν αρκετές και καθεμιά από αυτές κρίνεται ως ικανοποιητική αν αυξάνει τις πιθανότητες επικράτησης των αξιολογημένων ως ικανών ατόμων. Ο τελεστής αναπαραγωγής μπορεί να εκφραστεί με πολλούς τρόπους, ο πιο απλοϊκός από τους οποίους είναι η εξαναγκασμένη ρουλέτα, σε ένα μέρος της οποίας αντιστοιχεί ανάλογα με την απόδοσή της κάθε συμβολοσειρά του πληθυσμού.

Επειδή, κατά την διαδικασία της επιλογής είναι αναπόφευκτη η επικράτηση ατόμων που δεν είναι τα ικανότερα του πληθυσμού, εφαρμόζεται μια τεχνική που λέγεται ελιτισμός (elitism) με την οποία, πριν από την επιλογή, γίνεται αντιγραφή του ικανότερου ατόμου στην επόμενη γενιά (ή και περισσότερων) και εξασφαλίζεται η επιβίωσή του. Ο κίνδυνος που υπάρχει, όμως, λόγω της εφαρμογής του ελιτισμού

εντοπίζεται στην επικράτηση, από νωρίς κατά την εκτέλεση, ατόμου που παρά την μεγάλη του ικανότητα, δεν αποτελεί το βέλτιστο σημείο του χώρου αναζήτησης και καθιστά τον αλγόριθμο λιγότερο αποδοτικό. Για τον λόγο αυτό αρκετοί ερευνητές προτείνουν την εφαρμογή του ελιτισμού σε περιπτώσεις αναζήτησης τοπικών βέλτιστων σημείων και όχι ολικών.

Διασταύρωση (Crossover)

Μετά το πέρας της λειτουργίας της επιλογής, προέκυψε ένας προσωρινός πληθυσμός, ο οποίος πρέπει να περάσει από τη διαδικασία «ζευγαρώματος», όπως συμβαίνει και στη φύση, ώστε να δημιουργηθούν τα τέκνα και κατά συνέπεια ο νέος πληθυσμός. Ο τρόπος επιλογής των ομάδων ζευγαρώματος από τα άτομα του προσωρινού πληθυσμού, παρόλο που μπορεί να επηρεάζει την ταχύτητα σύγκλισης του αλγόριθμου, δεν έχει μοντελοποιηθεί ακόμη, οπότε το ζευγάρι πραγματοποιείται τυχαία. Η διασταύρωση των χρωμοσωμάτων-γονέων κάθε ομάδας, η ανταλλαγή, δηλαδή, γενετικού υλικού μεταξύ τους, αποτελεί μια διαδικασία καθοριστικής σημασίας για την αποτελεσματικότητα ενός Γενετικού Αλγόριθμου γι' αυτό και έχει γίνει αρκετή έρευνα για τους τρόπους υλοποίησής της. Στόχο της διασταύρωσης αποτελεί η σύσταση της εκάστοτε νέας γενιάς που προκύπτει, από άτομα στα οποία έχουν κληροδοτηθεί τα καλύτερα χαρακτηριστικά των γονέων τους, από τους οποίους συνεπώς διαφέρουν αρκετά. Αρκετές φορές, βέβαια, προκύπτουν τέκνα με χειρότερα χαρακτηριστικά από τους γονείς, κάτι που δεν αποτελεί σημαντικό πρόβλημα, αφού λόγω μικρής απόδοσης έχουν μειωμένες πιθανότητες επιβίωσης.

Η διασταύρωση συμβάλει στην καλύτερη και αποδοτικότερη λειτουργία του Γενετικού Αλγόριθμου, καθώς με τον συνδυασμό των καλύτερων χαρακτηριστικών των γονέων προκύπτουν συνδυασμοί υψηλής ικανότητας. Ακόμα, το γεγονός ότι η ομαδοποίηση των ατόμων-γονέων γίνεται με τυχαίο τρόπο, οδηγεί το ψάξιμο για τη βέλτιστη λύση σε νέα σημεία του πεδίου αναζήτησης συμβάλλοντας στην καθολικότητα –και όχι την τοπικότητα- της τελικής λύσης.

Κατά την αναζήτηση της βέλτιστης λύσης από τον Γενετικό Αλγόριθμο, η διασταύρωση συμβαίνει με πιθανότητα διασταύρωσης p_c , που καθορίζεται από τον χρήστη και ποικίλει από πρόβλημα σε πρόβλημα. Ο καθορισμός της τιμής της πιθανότητας αυτής επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ταχύτητα εκτέλεσης του αλγόριθμου. Για μεγάλες τιμές της πιθανότητας διασταύρωσης, η αναζήτηση της βέλτιστης λύσης γίνεται σχεδόν σε όλο το πεδίο των πιθανών λύσεων και παρόλο που ο αλγόριθμος καταλήγει σε ολικό ακρότατο, συγκλίνει πολύ αργά. Αντίθετα, για μικρές τιμές της p_c , μπορεί η διασταύρωση γίνεται με μεγάλο βήμα και ο αλγόριθμος συγκλίνει γρηγορότερα, ελλοχεύει όμως ο κίνδυνος να ξεπεράσει το ολικό βέλτιστο και να αποκλίνει. Συνηθίζεται, λοιπόν, για την αύξηση της ταχύτητας αναζήτησης, η επιλογή μεγάλης τιμής p_c , στην αρχή της αναζήτησης και μικρότερης όταν έχει προσεγγιστεί η τιμή του βέλτιστου.

Μετάλλαξη (Mutation)

Η διαδικασία της μετάλλαξης ακολουθεί της διαδικασίας της διασταύρωσης, είναι αρκετά χρήσιμη αν και λιγότερο σημαντική από τη διασταύρωση και συμβαίνει πιο σπάνια στη φύση συμβάλλοντας στην βελτίωση των οργανισμών και, συνεπώς, στην εξέλιξή τους. Η μετάλλαξη συμβαίνει μόνο σε έναν οργανισμό κάθε φορά. Στην περίπτωση της δυαδικής κωδικοποίησης, όταν έχει οριστεί μετάλλαξη με μικρή πιθανότητα μετάλλαξης p_m , ένα ψηφίο του χρωμοσώματος αντιστρέφεται (από 0 σε 1 ή το αντίστροφο). Η πιθανότητα μετάλλαξης πρέπει να είναι αρκετά μικρή πάντοτε διότι σε διαφορετική περίπτωση ο Γενετικός Αλγόριθμος ισοδυναμεί με τυχαία αναζήτηση.

Η σημασία της μετάλλαξης εντοπίζεται στο γεγονός ότι συμβάλει στη διατήρηση πολύτιμων γενετικών πληροφοριών, σε περίπτωση που αυτές κινδυνεύουν να χαθούν κατά τις διαδικασίες της επιλογής και της διασταύρωσης ή ισοδύναμα διευρύνει το πεδίο αναζήτησης αποτρέποντας τον αποκλεισμό οποιουδήποτε σημείου του πεδίου των λύσεων, από τη διαδικασία αναζήτησης της βέλτιστης λύσης. [18]

3.5 Πλεονεκτήματα Γενετικών Αλγόριθμων

Η ανάπτυξη των Γενετικών Αλγόριθμων και η εφαρμογή τους για την ελαχιστοποίηση/μεγιστοποίηση συναρτήσεων ποικίλων προβλημάτων ανέδειξε πολλά πλεονεκτήματα της χρήσης τους, έναντι άλλων μεθόδων βελτιστοποίησης:

- ✓ *Λύνουν δύσκολα προβλήματα με μεγάλη αξιοπιστία σε αρκετά μικρό χρόνο. Σε αρκετά προβλήματα, οι αντικειμενικές συναρτήσεις των οποίων παρουσιάζουν λύσεις με μεγάλη διακύμανση και δυσκολία προσδιορισμού, επιβάλλεται η χρήση των Γενετικών Αλγόριθμων λόγω της εξαιρετικά υψηλής αποδοτικότητάς τους. Έτσι, το ευάλωτο σημείο αρκετών μεθόδων βελτιστοποίησης, που αφορά στην δυσκολία προσδιορισμού ολικών ελαχίστων για τέτοιου είδους συναρτήσεις, για τους Γενετικούς Αλγόριθμους δε συνιστά ανασταλτικό παράγοντα.*
- ✓ *Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι είναι εύκολα επεκτάσιμοι και εξελίξιμοι. Πολλά προβλήματα στα οποία εφαρμόζονται οι Γενετικοί Αλγόριθμοι, χρήζουν ιδιαίτερης αντιμετώπισης, με αποτέλεσμα όχι απλά να συνιστάται, αλλά να επιβάλλεται η τροποποίηση λειτουργιών τους. Αυτές οι παραλλαγές, επεκτάσεις και εξελίξεις τμημάτων του Γενετικού Αλγόριθμου, τον καθιστούν αποδοτικό σε ακόμα μεγαλύτερο εύρος προβλημάτων.*
- ✓ *Εύκολα αλληλεπιδρούν με υπάρχοντα μοντέλα και συστήματα. Δεν απαιτείται η επανασχεδίαση των Γενετικών Αλγόριθμων για τη χρήση τους σε συνδυασμό με άλλα συστήματα και μοντέλα, καθώς χρησιμοποιούν πληροφορίες της εκάστοτε διαδικασίας και απλά συνιστούν τμήμα του ευρύτερου κώδικα.*

- ✓ *Είναι ευέλικτοι και μπορούν να συμμετέχουν σε υβριδικές μορφές με άλλες μεθόδους. Σε περιπτώσεις που κάποιες μέθοδοι είναι ειδικά σχεδιασμένες για την αντιμετώπιση συγκεκριμένων προβλημάτων και άρα είναι εξαιρετικά αποδοτικές, οι Γενετικοί Αλγόριθμοι μπορούν να συνυπάρξουν υβριδικά με αυτές τις μεθόδους.*
- ✓ *Έχουν πολύ πιο ευρύ πεδίο εφαρμογών σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη μέθοδο. Οι τομείς εφαρμογής τους είναι πάρα πολλοί. Ενδεικτικά, αναφέρεται η εκπαίδευση Νευρωνικών Δικτύων, ο σχεδιασμός μηχανών και η επίλυση δύσκολων μαθηματικών εξισώσεων.*
- ✓ *Δεν απαιτείται η ύπαρξη περιορισμών στην αντικειμενική συνάρτηση που καλούνται να βελτιστοποιήσουν. Οι παραδοσιακές μέθοδοι αδυνατούν να επεξεργαστούν συναρτήσεις χωρίς περιορισμούς (π.χ. παράγωγοι).*
- ✓ *Βασικό τους στοιχείο είναι ο παραλληλισμός. Με τη χρήση της κωδικοποίησης, ένα άτομο αντιπροσωπεύει πολλά άλλα, με αποτέλεσμα οι Γενετικοί Αλγόριθμοι να μπορούν να αναζητούν λύσεις σε πολύ μεγάλο εύρος τιμών σε σχετικά μικρούς χρόνους.*
- ✓ *Επιτυγχάνουν τον συνδυασμό της εξερεύνησης του χώρου αναζήτησης και της εκμετάλλευσης της ήδη επεξεργασμένης πληροφορίας. Το γεγονός αυτό, καθιστά τους Γενετικούς Αλγόριθμους ιδιαίτερα αποδοτικούς και ελκυστικούς για τους ερευνητές, καθώς είναι πολύ δύσκολο να βρεθεί άλλη μέθοδος ικανή να συγκεράσει αυτά τα δύο χαρακτηριστικά.*
- ✓ *Δέχονται εύκολα παράλληλη υλοποίηση. Χαρακτηριστικό που εντοπίζεται σπάνια σε άλλες μεθόδους και καθιστά εφικτή και αποδοτική την υλοποίηση Γενετικών Αλγόριθμων με χρήση παράλληλων μηχανών. [17]*

3.6 Μειονεκτήματα Γενετικών Αλγόριθμων

Παρά το γεγονός ότι οι Γενετικοί Αλγόριθμοι εφαρμόζονται αποδοτικά σε ένα αρκετά μεγάλο πεδίο προβλημάτων, υπάρχουν χαρακτηριστικά τους που αποτελούν τροχοπέδη για την ευρύτερη διάδοση και χρήση τους.

Ο βασικότερος λόγος που καθιστά δυσχερή την υιοθέτησή τους για τη βελτιστοποίηση συναρτήσεων είναι η *έλλειψη εξοικείωσης με την γενετική*. Η συντριπτική πλειοψηφία των επιστημόνων που ασχολούνται με τους υπολογιστές και την πληροφορική είναι ανεξοικείωτη με την επιστήμη της βιολογίας και ειδικότερα της γενετικής, με αποτέλεσμα όροι όπως Εξέλιξη και Φυσική Επιλογή να ηχούν παράξενα. Καθώς, λοιπόν, η ορολογία των Γενετικών Αλγόριθμων έχει δημιουργηθεί βάσει όρων της βιολογίας, πιστεύεται εκ πρώτης όψεως πως απαιτείται καλή γνώση της γενετικής για την κατανόηση της λειτουργίας των Γενετικών Αλγόριθμων.

Προφανώς, η άποψη αυτή που λειτουργεί ανασταλτικά στην διάδοση και επέκταση των Γενετικών Αλγόριθμων, κυριαρχεί εσφαλμένα στον επιστημονικό κόσμο της πληροφορικής. Ο λόγος έγκειται στο γεγονός ότι οι όροι είναι δανεισμένοι από τη βιολογία για την καλύτερη κατανόηση της λογικής των Γενετικών Αλγόριθμων και όχι την παραπομπή όσων ασχολούνται με αυτούς στην μελέτη της επιστήμης της βιολογίας, καθώς οι Γενετικοί Αλγόριθμοι λειτουργούν αφαιρετικά και χρησιμοποιούνται για την αναζήτηση λύσεων δύσκολων προβλημάτων παντός πεδίου έρευνας. Κατά τη δημιουργία των Γενετικών Αλγόριθμων θα μπορούσε να αποφευχθεί ο δανεισμός όρων από τη γενετικά, αλλά αυτό θα λειτουργούσε ανασταλτικά στην κατανόηση, την ευχρηστία και την εξέλιξή τους. Εξάλλου, υπάρχουν αρκετές θεωρίες εμπνευσμένες από άλλες επιστήμες που χρησιμοποιούν την αυθεντική ορολογία αυτών των επιστημών (π.χ. Νευρωνικά Δίκτυα: νευρώνες, συνάψεις κτλ)

Πέρα, όμως, από την έλλειψη εξοικείωσης με τη γενετική, το βασικό χαρακτηριστικό των Γενετικών Αλγόριθμων, *η εξέλιξη, λειτουργεί με πάρα πολύ αργούς ρυθμούς*. Στη φύση, ως γνωστόν, απαιτούνται χιλιάδες γενιές για την εξέλιξη των ειδών, τη διαφοροποίηση δηλαδή βασικών χαρακτηριστικών τους, όπως οι ικανότητες και η συμπεριφορά τους. Τίθεται, επομένως, το ερώτημα πως μία μέθοδος αναζήτησης λύσεων και μάλιστα σε σύνθετα προβλήματα, μπορεί να έχει καλές χρονικές επιδόσεις όταν είναι εμπνευσμένη από μία φυσικές διεργασία που συντελείται με πολύ αργούς ρυθμούς. Για να απαντηθεί το ερώτημα αυτό πρέπει να γίνει εστίαση στον τρόπο που συμβαίνει η εξέλιξη των ειδών στη φύση. Η εξέλιξη παρατηρείται μόνο όταν αλλάζει το περιβάλλον των διαφόρων ειδών και για την επιβίωση τους απαιτείται η προσαρμογή τους στα νέα δεδομένα. Συνεπώς, όσο γρηγορότερα αλλάζουν οι συνθήκες του περιβάλλοντος, τόσο ταχύτερα συμβαίνει η εξέλιξη ενός είδους. Σε επίπεδο υπολογιστών, οι συνθήκες του περιβάλλοντος αποδίδονται με μοντελοποίηση με απλές μαθηματικές σχέσεις και οι οργανισμοί-άτομα κωδικοποιούνται συνήθως ως συμβολοσειρές και το πλήθος τους κυμαίνεται συνήθως από μερικές δεκάδες μέχρι μερικές χιλιάδες, σε πολύ λιγότερα επίπεδα από αυτά των έμβιων όντων. Σε έναν αρκετά γρήγορο υπολογιστή, οι διασταυρώσεις μπορούν να φτάσουν και το ένα εκατομμύριο ανά δευτερόλεπτο, οπότε όσο μεγάλο κι αν είναι το εύρος των πιθανών λύσεων, η αναζήτηση της βέλτιστης λύσης συντελείται σε αρκετά γρήγορο χρόνο. [16]

3.7 Γενετικοί Αλγόριθμοι στο MATLAB

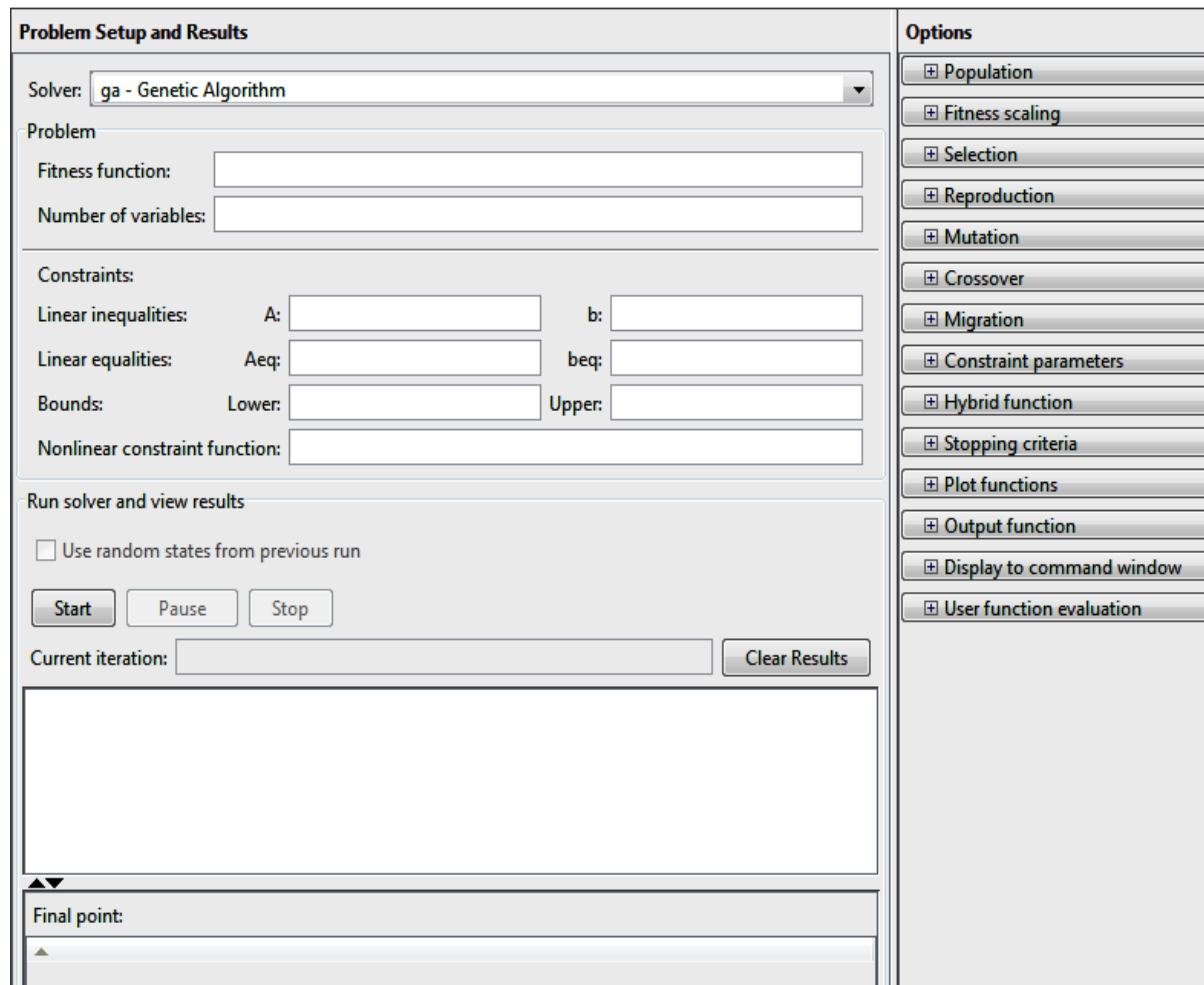
Ανάμεσα στις εργαλειοθήκες του matlab για την επίλυση προβλημάτων διακρίνεται και η εργαλειοθήκη των Γενετικών Αλγόριθμων με τους οποίους γίνεται αναζήτηση του ελαχίστου της δοθείσης συνάρτησης. Έτσι, καθίσταται δυνατή η επίλυση προβλημάτων με χρήση Γενετικών Αλγόριθμων είτε σε γραφικό περιβάλλον (Optimization Tool), είτε χρησιμοποιώντας κώδικα. Στη συνέχεια, θα γίνει λεπτομερής ανάλυση των επιλογών της εργαλειοθήκης των Γενετικών Αλγόριθμων

χρησιμοποιώντας κώδικα, ενώ θα δοθεί και μία γενική εικόνα των επιλογών όπως αναπαριστώνται στο Optimization Tool.

Στην περίπτωση, λοιπόν, που προτιμάται η χρήση του Optimization Tool έναντι του κώδικα, ο χρήστης πρέπει να επιλέξει στο αρχικό παράθυρο του Matlab:

Start → Toolboxes → more... → Global Optimization → Optimization Tool ,

οπότε ανοίγει το παράθυρο της *Εικόνας 3.1*:



Εικόνα 3.1: Optimization Tool του Matlab με επιλογή Γενετικό Αλγόριθμο

Ευκολότερος, ακόμα, τρόπος είναι γράφοντας στο Command Window του Matlab: `gatoool` .

3.7.1 Fitness Function - Number of Variables

Ξεκινώντας το «στήσιμο» του προς επίλυση προβλήματος, απαιτείται η συμπλήρωση των εξής δύο πεδίων από την παραπάνω εικόνα : Fitness Function και Number of Variables. Με τη συμπλήρωση αυτών των δύο πεδίων, μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία ελαχιστοποίησης, καθώς και να μην οριστούν οι υπόλοιπες

επιλογές (options) χρησιμοποιούνται οι προκαθορισμένες τιμές που θα αναφερθούν παρακάτω. Στο πεδίο Fitness Function συμπληρώνεται το όνομα ενός αρχείου τύπου matlab το οποίο περιέχει την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος. Αν για παράδειγμα, το όνομα του αρχείου είναι my_fitness.m, στο πεδίο Fitness Function συμπληρώνεται: @my_fitness. Στο πεδίο Number of Variables, συμπληρώνεται ο αριθμός των μεταβλητών της προς ελαχιστοποίηση συνάρτησης (π.χ. 2).

Για την κλήση του Γενετικού Αλγόριθμου για το ίδιο πρόβλημα από τη γραμμή εντολών, πρέπει να δοθούν οι εξής εντολές :

```
FitnessFunction = @my_fitness;  
numberOfVariables = 2;  
[x, Fval] = ga(FitnessFunction, numberOfVariables)
```

όπου, το x είναι το διάνυσμα με τις τιμές των μεταβλητών που ελαχιστοποιούν τη συνάρτηση και Fval η τιμή της ελαχιστοποιημένης συνάρτησης.

3.7.2 Περιγραφή Options

Population

➤ **Population Type:** Με την επιλογή αυτή ορίζεται ο τύπος των δεδομένων του πληθυσμού, τα οποία θα δεχθεί ως ορίσματα η συνάρτηση αξιολόγησης. Οι δυνατοί τύποι δεδομένων είναι:

- ✓ *Double Vector* ('doubleVector'): ο προκαθορισμένος τύπος
- ✓ *Bit string* ('bitstring'): συμβολοσειρά δυαδικών ψηφίων
- ✓ *Custom*: ορίζεται από τον χρήστη ο τύπος των δεδομένων του πληθυσμού (π.χ. ακέραιοι, δεκαδικοί). Στην περίπτωση επιλογής custom επιβάλλεται και η δημιουργία συναρτήσεων για τη δημιουργία του αρχικού πληθυσμού, τη διασταύρωση και τη μετάλλαξη.

Σε μορφή κώδικα, η επιλογή του τύπου δεδομένων (για παράδειγμα custom) γίνεται με τον εξής τρόπο:

```
options = gaoptimset('PopulationType','custom')
```

➤ **Population size:** Με την επιλογή αυτή καθορίζεται ο αριθμός των ατόμων κάθε γενιάς. Όσο μεγαλύτερος είναι ένας πληθυσμός, τόσο αυξάνει ο χρόνος εκτέλεσης του αλγόριθμου, μειώνονται όμως και οι πιθανότητες προσδιορισμού ενός

τοπικού έναντι του ολικού ακρότατου. Όπως φαίνεται παραπάνω, το μέγεθος του πληθυσμού έχει προκαθοριστεί 20 άτομα ανά γενιά, δεν είναι όμως αρκετό όταν το πλήθος το μεταβλητών του προβλήματος είναι μεγάλο. Σε περιπτώσεις προβλημάτων με λιγότερες μεταβλητές κρίνεται ικανοποιητικός μικρότερος πληθυσμός. Για παράδειγμα σε πρόβλημα 2 μεταβλητών, μπορεί να επιλεγεί πληθυσμός 10 ατόμων.

Αξίζει εδώ να αναφερθεί, ότι από τους σημαντικότερους παράγοντες για την απόδοση του Γενετικού Αλγόριθμου είναι η ποικιλομορφία (πυκνότητα) του πληθυσμού. Η σωστή επιλογή της πυκνότητας προκύπτει κυρίως μετά από δοκιμές, αφού όσο μικραίνει η απόσταση μεταξύ των ατόμων του πληθυσμού τόσο μεγαλώνει η ποικιλομορφία.

Σε μορφή κώδικα, η επιλογή του μεγέθους του πληθυσμού (για παράδειγμα 10) γίνεται με τον εξής τρόπο:

```
options = gaoptimset('PopulationSize','10')
```

➤ **Creation function:** Πρόκειται για μια σημαντική επιλογή για την αρχικοποίηση του προβλήματος, καθώς με την Creation function, ορίζεται η συνάρτηση δημιουργίας του αρχικού πληθυσμού. Ο χρήστης καλείται να επιλέξει μεταξύ των τριών επόμενων επιλογών:

- ✓ *Constraint dependent:* η προεπιλεγμένη συνάρτηση
- ✓ *Uniform:* η προεπιλεγμένη συνάρτηση σε περίπτωση απουσίας περιορισμών και πεδίου τιμών, με την οποία δημιουργείται τυχαίος αρχικός πληθυσμός με ομοιόμορφη κατανομή.
- ✓ *Feasible:* προεπιλεγμένη συνάρτηση αν υπάρχουν γραμμικοί περιορισμοί, η οποία δημιουργεί τυχαίο αρχικό πληθυσμό με άτομα εντός των ορίων και των γραμμικών περιορισμών του προβλήματος
- ✓ *Custom:* συνάρτηση που δημιουργείται από τον χρήστη για να ικανοποιούνται συγκεκριμένες ιδιότητες κατά την δημιουργία του αρχικού πληθυσμού, ο οποίος πρέπει να ικανοποιεί τον τύπο που επιλέχθηκε στο PopulationType.

Σε μορφή κώδικα, η επιλογή της συνάρτησης δημιουργίας του αρχικού πληθυσμού (για παράδειγμα custom με όνομα myfun.m) γίνεται με τον εξής τρόπο:

```
options = gaoptimset('CreationFcn',@myfun)
```


- **Initial population:** Με την επιλογή αυτή δίνεται η δυνατότητα καθορισμού του αρχικού πληθυσμού από τον χρήστη. Σε περίπτωση που το προς επίλυση πρόβλημα δεν απαιτεί την εισαγωγή συγκεκριμένου αρχικού πληθυσμού, χρησιμοποιείται η creation function για τον καθορισμό του.
- **Initial scores:** Με την επιλογή αυτή δίνονται οι αρχικές τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης (αξιολόγησης) για τον αρχικό πληθυσμό. Αν δεν δοθούν οι αρχικές τιμές υπολογίζονται από την συνάρτηση αξιολόγησης
- **Initial range:** Η επιλογή αυτή χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του ανώτερου και του κατώτερου ορίου των τιμών των διανυσμάτων στον αρχικό πληθυσμό, δηλαδή της διακύμανσης των τιμών.

Fitness scaling

Η επιλογή fitness scaling χρησιμοποιείται για την μετατροπή των αρχικών τιμών της συνάρτησης αξιολόγησης στην κατάλληλη μορφή για τη σωστή λειτουργία της συνάρτησης επιλογής, η οποία περιγράφεται παρακάτω. Αλλάζει, λοιπόν, η κλίμακα τιμών και, όπως είναι προφανές, το εύρος της συμβάλει στην απόδοση του Γενετικού Αλγόριθμου. Μεγάλο εύρος αυτής της κλίμακας τιμών οδηγεί στην αναπαραγωγή ατόμων με τις πιο υψηλές τιμές και αποτρέπει την αναζήτηση του Γενετικού Αλγόριθμου σε άλλα σημεία του πεδίου τιμών, κινδυνεύοντας η λύση να βρεθεί σε κάποιο τοπικό και όχι ολικό ελάχιστο. Μικρό εύρος της κλίμακας τιμών προσφέρει στα άτομα ίσες περίπου πιθανότητες αναπαραγωγής, καθυστερώντας όμως την διαδικασία ελαχιστοποίησης. Στο matlab, οι διαθέσιμες προς επιλογή συναρτήσεις για το fitness scaling είναι οι εξής:

- ✓ *Rank:* αποτελεί την προεπιλεγμένη συνάρτηση, δεν χρησιμοποιείται οποιαδήποτε παράμετρος και τα άτομα ταξινομούνται από το μικρότερο προς το μεγαλύτερο βάσει της τιμής της συνάρτησης αξιολόγησης. Ανάλογα με την κατάταξή του ατόμου, προκύπτει και η καταλληλότητά του. Με αυτή την επιλογή αποκλείεται η περίπτωση να διαδοθούν αποτελέσματα που είναι ακατέργαστα
- ✓ *Proportional:* Δημιουργείται μια ταξινομημένη λίστα που αποτελείται από τα άτομα με βάση τις ικανότητές τους και εφαρμόζοντας τον μετασχηματισμό $s = f^k$, όπου k συνήθως είναι η κατάταξη του κάθε ατόμου στην ταξινομημένη λίστα, προκύπτει η νέα εκθετικά διαβαθμισμένη ικανότητάς τους s. Βέβαια, η τιμή του k ποικίλει ανάλογα της φύσης του προβλήματος και αρκετά συχνά παρατηρείται και η αλλαγή του κατά την εκτέλεση.

- ✓ *Top*: Ο χρήστης καλείται να επιλέξει τον αριθμό των ατόμων που έχουν την καλύτερη απόδοση. Στα άτομα αυτά επιτρέπεται η αναπαραγωγή τους και παράλληλα μηδενίζεται η πιθανότητα αναπαραγωγής των υπόλοιπων ατόμων. Το πλήθος τους είναι είτε ένα κλάσμα μεταξύ 0 και 1, είτε ένας ακέραιος μεταξύ του 1 και του μεγέθους του πληθυσμού. Ως προεπιλογή έχει καθοριστεί η τιμή 0.4.
- ✓ *Shift linear*: Γίνεται μετασχηματισμός των τιμών των ικανοτήτων του πληθυσμού με βάση μια γραμμική σχέση που έχει τη μορφή $s = a * f + b$, όπου οι τιμές των a και b επιλέγονται κατάλληλα για τη διατήρηση του μέσου όρου των νέων ικανοτήτων στα ίδια επίπεδα με των προηγούμενων.
- ✓ *Custom*: Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ορίσει με κατάλληλο τρόπο νέα συνάρτηση που ικανοποιεί τις ανάγκες του προβλήματος.

Σε μορφή κώδικα, η επιλογή της συνάρτησης fitness scaling (για παράδειγμα custom με όνομα myfun.m) γίνεται με τον εξής τρόπο:

```
options = gaoptimset('FitnessScalingFcn', @myfun)
```

Selection

Βάσει της συνάρτησης που επιλέγεται στο πεδίο Selection, επιλέγονται από τον Γενετικό Αλγόριθμο οι γονείς, από τους οποίους θα προκύψουν τα άτομα-τέκνα και συνακόλουθα η επόμενη γενιά. Οι διαθέσιμες συναρτήσεις για την επιλογή Selection είναι:

- ✓ *Stochastic uniform*: Η βάση της λειτουργίας αυτής της συνάρτησης είναι η δημιουργία μίας ευθείας στην οποία τα άτομα του πληθυσμού καταλαμβάνουν κάποια μήκη. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαβαθμισμένη ικανότητα του ατόμου, τόσο μεγαλύτερο είναι και το μήκος που του αντιστοιχεί. Ο αλγόριθμος κινείται σε όλο το μήκος της ευθείας γραμμής με σταθερό βήμα και στο σημείο που καταλήγει το κάθε βήμα, επιλέγεται ο γονέας, το αντίστοιχο μήκος του οποίου περιλαμβάνει το εν λόγω σημείο. Αποτελεί την προεπιλεγμένη συνάρτηση.
- ✓ *Remainder*: Η λειτουργία αυτής της συνάρτησης βασίζεται στη διαβαθμισμένη τιμή των ατόμων. Το ακέραιο μέρος της διαβαθμισμένης τιμής ενός ατόμου, ορίζει το πλήθος των φορών που θα επιλεγεί το άτομο αυτό ως γονέας, ενώ το κλασματικό μέρος χρησιμοποιείται για τον ορισμό των υπόλοιπων με στοχαστικό τρόπο. Επί παραδείγματι, αν η διαβαθμισμένη τιμή ενός ατόμου είναι 3.6, τότε το άτομο αυτό επιλέγεται τρεις φορές ως γονέας, ενώ οι υπόλοιποι γονείς ορίζονται με τη βοήθεια μιας ρουλέτας, στοχαστικά, αναλόγως του κλασματικού μέρους της παραπάνω τιμής.

- ✓ *Uniform*: Επιλέγονται γονείς ανάλογα με τις προσδοκίες και τον απαιτούμενο αριθμό γονέων. Δεν κρίνεται ως αποτελεσματική συνάρτηση αναζήτησης, χρησιμεύει όμως αρκετά για την εύρεση σφαλμάτων και τις δοκιμές.
- ✓ *Roulette*: Χρησιμοποιείται μια ρουλέτα, τα τμήματα του τροχού της οποίας είναι ανάλογα της διαβαθμισμένης τιμής των ατόμων. Εκλέγεται ένας τυχαίος αριθμός τμημάτων και τα άτομα τα οποία αντιστοιχούν στα τμήματα αυτά επιλέγονται ως γονείς.
- ✓ *Tournament*: Σε αυτή την περίπτωση τα άτομα χωρίζονται τυχαία σε ομάδες, το πλήθος των οποίων ορίζεται από τον χρήστη και το άτομο με την καλύτερη απόδοση από κάθε ομάδα γίνεται γονέας. Η προεπιλεγμένη τιμή για το πλήθος των ατόμων της ομάδας είναι 4, ενώ δε μπορεί να οριστεί πλήθος μικρότερο από 2.
- ✓ *Custom*: Και σε αυτήν την περίπτωση, δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να καθορίσει δική του συνάρτηση.

Σε μορφή κώδικα, η επιλογή της συνάρτησης `selection` (για παράδειγμα `custom` με όνομα `myfun.m`) γίνεται με τον εξής τρόπο:

```
options = gaoptimset('FitnessScalingFcn', @myfun)
```

Reproduction

Πρόκειται για τον καθορισμό δύο σημαντικών για την αναπαραγωγή πεδίων, του ελιτισμού (`elite count`) και του ποσοστού διασταύρωσης (`crossover fraction`).

- **Elite count**: Αριθμός που ισούται με το πλήθος των ατόμων με την καλύτερη διαβαθμισμένη τιμή, τα οποία πρόκειται να επιβιώσουν στην επόμενη γενιά. Τα άτομα αυτά ονομάζονται `elite children` και ως προκαθορισμένη επιλογή έχει επιλεχθεί το 2.

Στην επιλογή `elite count` δεν πρέπει να δίνονται πολύ μεγάλες τιμές, διότι όταν το μεγαλύτερο μέρος των ατόμων ενός πληθυσμού επιλέγεται να επιζήσει και κατά συνέπεια, ελάχιστα μόνο άτομα περνούν από τις διαδικασίες της διασταύρωσης και της μετάλλαξης, τότε το πεδίο αναζήτησης της βέλτιστης λύσης περιορίζεται και μειώνεται η αποδοτικότητα του αλγόριθμου. Όταν, αντίθετα, η τιμή που δίνεται είναι μικρότερη – και προφανώς μεγαλύτερη από 1 – τότε η συνάρτηση αξιολόγησης μειώνεται από γενιά σε γενιά, οδηγείται σταδιακά στην ελαχιστοποίησή της, διαδικασία απόλυτα επιθυμητή κατά την εφαρμογή του Γενετικού Αλγόριθμου.

Σε μορφή κώδικα, η επιλογή των ατόμων που επιβιώνουν κατά την αναπαραγωγή, γίνεται με την εντολή:

```
options = gaoptimset('Elite count', 4)
```

- **Crossover Fraction:** Η τιμή της επιλογής αυτής καθορίζει το ποσοστό του εκάστοτε νέου πληθυσμού που προέρχεται από διασταύρωση. Από το ποσοστό αυτό, προφανώς, εξαιρούνται τα τέκνα που έχουν επιβιώσει αυτούσια λόγω της επιλογής elite. Προκαθορισμένη τιμή για αυτή την επιλογή είναι το 0.8. Τιμή ίση με μηδέν σημαίνει ότι κανένα παιδί δεν έχει προκύψει από διασταύρωση και όλα είναι προϊόντα μετάλλαξης. Τιμή ίση με ένα, σημαίνει ότι όλα τα παιδιά, έχουν προκύψει από διασταυρώσεις. Βέβαια, οι παραπάνω δύο περιπτώσεις δεν αποτελούν την βέλτιστη επιλογή.

Σε μορφή κώδικα, επιλογή του Crossover Fraction ίση με ένα για παράδειγμα, γίνεται με την εντολή:

```
options = gaoptimset('Elite count', 4)
```

Mutation

Η αναπαραγωγή τέκνων κατά την εφαρμογή του Γενετικού Αλγόριθμου γίνεται, όπως προαναφέρθηκε, με τους τελεστές της διασταύρωσης και της μετάλλαξης. Η μετάλλαξη αποτελεί σημαντική λειτουργία και στην ουσία επιτρέπει στον Γενετικό Αλγόριθμο την πραγματοποίηση τυχαίων αλλαγών σε κάποια άτομα του πληθυσμού. Η επιλογή mutation ορίζει τον τρόπο που γίνεται η μετάλλαξη των ατόμων μιας γενιάς και συνακόλουθα διευρύνει το πεδίο αναζήτησης της βέλτιστης λύσης. Οι διαθέσιμες συναρτήσεις στο matlab που τίθενται προς επιλογή στο πεδίο του mutation είναι:

- ✓ *Gaussian:* Η συνάρτηση αυτή, που αποτελεί προεπιλογή για το mutation αν δεν υπάρχουν περιορισμοί, προσθέτει έναν τυχαίο αριθμό σε κάθε διάνυσμα γονέα που εισάγεται. Ο τυχαίος αριθμός προέρχεται από την Γκαουσιανή κατανομή με μέση τιμή το μηδέν. Η τυπική απόκλιση της Γκαουσιανής κατανομής ρυθμίζεται με δύο παραμέτρους: τη *Scale* που καθορίζει την τυπική απόκλιση της πρώτης γενιάς και τη *Shrink* που ελέγχει το πώς συρρικνώνεται η τυπική απόκλιση κατά την πάροδο των γενεών. Αν η παράμετρος *Shrink* οριστεί ίση με μηδέν, η τυπική απόκλιση είναι σταθερή, ενώ αν οριστεί ίση με ένα η τυπική απόκλιση τείνει στο μηδέν γραμμικά καθώς πλησιάζει η τελευταία γενιά.

Για δισδιάστατο διάνυσμα v που αποτελεί το αρχικό εύρος, η τυπική απόκλιση της πρώτης γενιάς (*scale*) προκύπτει από τον τύπο: $scale * (v(2) - v(1))$ και είναι ίδια για όλες τις θέσεις του διανύσματος ενός γονέα. Για διάνυσμα αρχικού εύρους v , με δύο γραμμές και πλήθος στηλών ίσο με τον αριθμό των

μεταβλητών, η αντίστοιχη τυπική απόκλιση της πρώτης γενιάς είναι: $scale * (v(i, 2) - v(i, 1))$.

Η αρχική τυπική απόκλιση που ορίζεται όπως περιγράφηκε, συρρικνώνεται καθώς περνούν οι γενιές. Για δισδιάστατο διάνυσμα αρχικού εύρους v , στην k γενιά η τυπική απόκλιση είναι ίδια για όλες τις θέσεις και εξάγεται από τον τύπο: $\sigma_k = \sigma_{k-1} (1 - shrink \frac{k}{Generations})$, ενώ αν το διάνυσμα αυτό αποτελείται από δύο γραμμές και πλήθος στηλών ίσο με τον αριθμό των μεταβλητών ο ανάλογος τύπος είναι: $\sigma_{i,k} = \sigma_{i,k-1} (1 - shrink \frac{k}{Generations})$

Οι προεπιλεγμένες τιμές των δύο παραμέτρων ($scale$ και $shrink$) είναι ίσες με ένα. Για την αλλαγή τους με τη βοήθεια κώδικα χρησιμοποιείται η εντολή:

```
options = gaoptimset('MutationFcn', {mutationgaussian, scale, shrink})
```

- ✓ *Uniform*: Πρόκειται για μία διαδικασία δύο σταδίων. Αρχικά, ο αλγόριθμος επιλέγει ένα ποσοστό των χρωμοσωμάτων για μετάλλαξη, από τα οποία χρωμοσώματα το καθένα έχει μια πιθανότητα μετάλλαξης, η οποία προεπιλεγμένα έχει οριστεί 0.01. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος αντικαθιστά κάθε επιλεγμένο διάνυσμα από έναν τυχαίο αριθμό που επιλέγεται ομοιόμορφα από το πεδίο τιμών των χρωμοσωμάτων.
- ✓ *Adaptive feasible*: Η συνάρτηση αυτή δημιουργεί τυχαία κατευθύνσεις που είναι προσαρμοστικές σε σχέση με την τελευταία επιτυχή ή ανεπιτυχή γενιά. Η *adaptive feasible* αποτελεί προεπιλογή για το *mutation* σε περίπτωση ύπαρξης περιορισμών γραμμικών και ανισότητας, οι οποίοι οριοθετούν και την εφικτή περιοχή. Η διαδικασία πραγματοποιείται με μήκος βήματος που επιλέγεται σύμφωνα με τους εκάστοτε γραμμικούς περιορισμούς.
- ✓ *Custom*: Συνάρτηση ορισμένη από τον χρήστη κατάλληλα παραμετροποιημένη. Η σύνταξη της συνάρτησης αυτής πρέπει να έχει τη μορφή :

```
function mutationChildren = myfun(parents, options, nvars,
    FitnessFcn, state, thisScore, thisPopulation)
```

Crossover

Με την επιλογή αυτή καθορίζεται ο τρόπος διασταύρωσης των ατόμων για την αναπαραγωγή των νέων πληθυσμών. Οι συναρτήσεις που είναι διαθέσιμες στο matlab για την επιλογή *crossover* είναι:

- ✓ *Scattered (δισεπαρμένη)*: Η συνάρτηση αυτή δημιουργεί ένα τυχαίο δυαδικό διάνυσμα και στη συνέχεια, όπου το διάνυσμα είναι ένα (1) επιλέγονται γονίδια από τον πρώτο γονέα, ενώ όπου το διάνυσμα αυτό είναι μηδέν (0) επιλέγονται γονίδια από τον δεύτερο γονέα. Έπειτα, συνδυάζονται τα γονίδια και προκύπτει το νέο τέκνο. Για παράδειγμα αν $p_1 = [a b c d e f g h]$ και $p_2 = [1 2 3 4 5 6 7]$ είναι οι γονείς και το δυαδικό διάνυσμα είναι $[1 1 0 0 1 0 0 0]$ το παιδί που επιστρέφει η συνάρτηση είναι: $child = [a b 3 4 e 6 7 8]$.
- ✓ *Single point (μονού σημείου)*: Με την επιλογή αυτής της συνάρτησης επιλέγεται τυχαία ένας αριθμός v , από το 1 έως τον αριθμό των μεταβλητών ($nvars$) και ακολούθως, κληροδοτούνται στο διάνυσμα-τέκνο από 1 έως v , τα γονίδια του πρώτου γονέα και από $v+1$ μέχρι το τέλος τα γονίδια του δεύτερου γονέα. Για παράδειγμα, αν οι γονείς είναι $p_1 = [a b c d e f g h]$ και $p_2 = [1 2 3 4 5 6 7]$ για $v=4$ προκύπτει το $child = [a b c d 6 7 8]$
- ✓ *Two point (διπλού σημείου)*: Η συνάρτηση αυτή εφαρμόζει τη διασταύρωση μονού σημείου δύο φορές, αφού πρώτα επιλεγούν τυχαία οι δύο θέσεις κοπής, οι οποίες όπως και στην περίπτωση μονού σημείου βρίσκονται μεταξύ του 1 και του πλήθους των μεταβλητών. Για παράδειγμα, αν $p_1 = [a b c d e f g h]$ και $p_2 = [1 2 3 4 5 6 7]$ για $v=3$ και $\mu=6$ τότε $child = [a b c 4 5 6 g h]$.
- ✓ *Intermediate (ενδιάμεσο)*: Η αναπαραγωγή τέκνων γίνεται τυχαία με τη χρήση ενός τυχαίου σταθμισμένου μέσου όρου των γονέων. Κατά την επιλογή της *intermediate*, ο χρήστης καλείται να ορίσει το βάρος, δίνοντας τιμή στην παράμετρο *Ratio*. Το *Ratio* μπορεί να είναι βαθμωτό μέγεθος ή διάνυσμα με μήκους ίσου με το πλήθος των μεταβλητών. Στην πρώτη περίπτωση, που το *ratio* είναι βαθμωτό μέγεθος, όλα τα τέκνα βρίσκονται στη γραμμή ανάμεσα από τους γονείς. Στη δεύτερη περίπτωση, που το *ratio* είναι διάνυσμα, τα τέκνα μπορεί να είναι οποιοδήποτε σημείο του υπερκύβου. Τα τέκνα δημιουργούνται μέσω της εξίσωσης: $child = parent1 + rand * ratio * (parent2 - parent1)$.
- ✓ *Heuristic (ευρετική)*: Δημιουργείται τέκνο που βρίσκεται τυχαία στη γραμμή που περιέχει τους δύο γονείς, σε μικρή απόσταση από τον γονέα με την καλύτερη τιμή της συνάρτησης αξιολόγησης και σε μεγάλη απόσταση από τον γονέα με τη χειρότερη τιμή. Η απόσταση αυτή ορίζεται μέσω της παραμέτρου *Ratio*, της οποίας προεπιλεγμένη τιμή είναι το 1.2 και το τέκνο δημιουργείται με τη συνάρτηση $child = parent2 + R * (parent1 - parent2)$, όπου *parent1* ο γονέας με την καλύτερη διαβαθμισμένη τιμή.
- ✓ *Arithmetic (μέσου όρου)*: Τα τέκνα που δημιουργούνται είναι ο αριθμητικός μέσος όρος των γονέων τους και βρίσκονται ομοίμορφα πάνω στη γραμμή μεταξύ των γονέων τους. Μερικές φορές, βέβαια, οι γονείς δε συμμετέχουν ισότιμα αλλά με διαφορετικά βάρη.

- ✓ *Custom*: Ορίζεται από τον χρήστη ο τρόπος διασταύρωσης και η συνάρτηση που δημιουργείται έχει την εξής μορφή:

*function xoverKids = myfun(parents, options, nvars,
unused, thisPopulation)*

Migration

Η μετανάστευση (migration) είναι η μετακίνηση των ατόμων μεταξύ των υποπληθυσμών, την οποία δημιουργεί ο αλγόριθμος όταν επιλέγεται το μέγεθος του πληθυσμού (population size) να είναι ένα διάνυσμα με μήκος μεγαλύτερο από ένα (1). Όποτε εμφανίζεται η μετανάστευση, τα ικανότερα άτομα ενός υποπληθυσμού αντικαθιστούν τα άτομα ενός άλλου υποπληθυσμού που έχουν την χειρότερη τιμή συνάρτησης αξιολόγησης. Η διαδικασία της μετανάστευσης μπορεί να ελεγχθεί με την κατάλληλη επιλογή των παρακάτω τριών παραμέτρων:

- **Direction**: Καθορίζει την διεύθυνση στην οποία συντελείται η μετανάστευση. Οι επιλογές για αυτήν την παράμετρο είναι:
 - ✓ *Forward*: Η μετανάστευση πραγματοποιείται προς τον τελευταίο υποπληθυσμό, δηλαδή άτομα του n-οστού υποπληθυσμού μεταναστεύουν στον n+1 υποπληθυσμό.
 - ✓ *Both*: Ο n-οστός υποπληθυσμός μεταναστεύει και προς τον (n-1) υποπληθυσμό και προς τον (n+1) υποπληθυσμό.

Για μεταβολή αυτής της παραμέτρου (π.χ. σε both) με την βοήθεια κώδικα, δίνεται η εντολή:

options = gaoptimset('MigrationDirection','both')

- **Fraction**: Καθορίζει τον αριθμό των ατόμων που μετακινούνται μεταξύ των υποπληθυσμών. Για την ακρίβεια, καθορίζει τον αριθμό των ατόμων του μικρότερου υποπληθυσμού που πρόκειται να μεταναστεύσουν. Αν για παράδειγμα, μεταναστεύουν άτομα από ένα υποπληθυσμό 40 ατόμων σε έναν υποπληθυσμό 100 ατόμων και η παράμετρος fraction έχει τιμή 0.1, τότε μεταναστεύουν από τον μικρότερο υποπληθυσμό : $0,1 * 40 = 4$ άτομα. Ως προεπιλογή έχει οριστεί η τιμή 0.2.

Για μεταβολή αυτής της παραμέτρου (π.χ. σε 0.1) με την βοήθεια κώδικα, δίνεται η εντολή:

```
options = gaoptimset('MigrationFraction', '0.1')
```

- **Interval:** Ελέγχει ανά πόσες γενιές πραγματοποιείται μετανάστευση. Αν για παράδειγμα, η τιμή της παραμέτρου τεθεί ίση με 30, η μετανάστευση μεταξύ των υποπληθυσμών συντελείται κάθε 30 γενιές. Η προκαθορισμένη τιμή είναι 20. Για μεταβολή αυτής της παραμέτρου (π.χ. σε 30) με την βοήθεια κώδικα, δίνεται η εντολή:

```
options = gaoptimset('MigrationInterval', '30')
```

Constraint parameters

Οι παρακάτω παράμετροι είναι διαθέσιμες προς χρήση μόνο στην περίπτωση που ο τύπος του πληθυσμού (population type) είναι “Double vector”.

- **Initial penalty:** Με την επιλογή αυτή καθορίζεται η αρχική τιμή της παραμέτρου «ποινή», η οποία πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση από το 1. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 10.
- **Penalty factor:** Όταν δεν προκύπτει η ζητούμενη ακρίβεια για το επιλυόμενο πρόβλημα και δεν ικανοποιούνται οι περιορισμοί, ο «παράγοντας ποινή» αυξάνει την τιμή της παραμέτρου «ποινή». Το penalty factor πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 1 και η προεπιλεγμένη τιμή είναι 100.

Hybrid function

Η υβριδική συνάρτηση επιτρέπει στον χρήστη να καθορίσει, σε περίπτωση που το επιθυμεί, μία άλλη συνάρτηση ελαχιστοποίησης η οποία «τρέχει» μετά τον τερματισμό του Γενετικού Αλγόριθμου. Η επιλογή της hybrid function είναι δυνατή μόνο για την περίπτωση που ο τύπος πληθυσμού είναι “Double vector”. Οι διαθέσιμες προς επιλογή συναρτήσεις είναι:

- ✓ fminsearch (για αντικειμενική συνάρτηση χωρίς περιορισμούς)
- ✓ patternsearch (για αντικειμενική συνάρτηση με ή χωρίς περιορισμούς)
- ✓ fminunc (για αντικειμενική συνάρτηση χωρίς περιορισμούς)
- ✓ fmincon (για αντικειμενική συνάρτηση με περιορισμούς)

Stopping Criteria

Πρόκειται για τις συνθήκες (ή κριτήρια) τερματισμού του Γενετικού Αλγόριθμου. Ο χρήστης καλείται να καθορίσει τις τιμές των παρακάτω επιλογών για

να προσδιορίσει έτσι τον τρόπο τερματισμού της διαδικασίας ελαχιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος με Γενετικό Αλγόριθμο. Σε περίπτωση που δεν καθοριστεί κάποιο από τα παρακάτω κριτήρια, χρησιμοποιούνται οι προεπιλεγμένες τιμές.

- **Generations:** Με την επιλογή αυτή συγκεκριμενοποιείται ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων που πραγματοποιεί ο Γενετικός Αλγόριθμος. Σε περίπτωση, για παράδειγμα, που έχει οριστεί η τιμή του πλήθους γενεών ίση με 200 γενιές, αν δεν τερματιστεί ο αλγόριθμος λόγω κάποιου από τα υπόλοιπα κριτήρια, θα σταματήσει όταν εκτελεστεί για τον μέγιστο αριθμό των γενεών, δηλαδή μετά από 200 γενιές. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 100 γενιές και σε μορφή κώδικα το πλήθος των γενεών (π.χ. για 300 γενιές) ορίζεται ως εξής:

$$options = gaoptimset('Generations', 300)$$

- **Time limit:** Καθορίζει τον μέγιστο χρόνο σε δευτερόλεπτα που επιτρέπεται στον Γενετικό Αλγόριθμο να εκτελείται πριν σταματήσει. Προκαθορισμένη τιμή για αυτήν την επιλογή είναι το *inf*, δηλαδή το άπειρο, επιτρέπεται στον χρήστη όμως η εισαγωγή συγκεκριμένου χρόνου. Σε μορφή κώδικα η εισαγωγή συγκεκριμένου χρόνου (π.χ. 1h=3600s) για το time limit ορίζεται ως εξής:

$$options = gaoptimset('TimeLimit', 3600)$$

- **Fitness limit:** Ο αλγόριθμος σταματά όταν η καλύτερη τιμή της συνάρτησης αξιολόγησης είναι μικρότερη ή ίση με την τιμή της επιλογής fitness limit. Ως προεπιλογή έχει οριστεί το *-inf*, δηλαδή το μείον άπειρο και η ρύθμιση της επιλογής αυτής με τη βοήθεια κώδικα γίνεται μέσω της εντολής:

$$options = gaoptimset('FitnessLimit', Τιμή)$$

- **Stall generations:** Με την επιλογή αυτή καθορίζεται από τον χρήστη το πλήθος των συνεχόμενων γενεών, στις οποίες δεν βελτιώνεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και όταν αυτό επιτευχθεί ο αλγόριθμος τερματίζεται. Προκαθορισμένη τιμή για το stall generations είναι 50 γενιές και η ρύθμιση της επιλογής αυτής (π.χ. για 20 συνεχόμενες γενιές χωρίς βελτίωση της συνάρτησης αξιολόγησης) με τη βοήθεια κώδικα, μέσω εντολής, γίνεται ως εξής:

$$options = gaoptimset('StallGenLimit', 20)$$

- **Stall time limit:** Παρόμοια με την προηγούμενη επιλογή (stall generations), έτσι και εδώ καθορίζεται ο μέγιστος χρόνος για τον οποίο δεν παρατηρείται βελτίωση της τιμής της συνάρτησης αξιολόγησης. Με το πέρας του χρόνου αυτού, ο

Γενετικός Αλγόριθμος τερματίζεται. Προκαθορισμένη τιμή για αυτήν την επιλογή είναι το *inf*, δηλαδή το άπειρο, υπάρχει όμως η δυνατότητα αλλαγής (π.χ. σε 3600s) και σε μορφή κώδικα η εντολή πρέπει να έχει τη μορφή:

```
options = gaoptimset('StallTimeLimit', 3600)
```

- **Function tolerance:** Αν η αθροιστική αλλαγή στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης ανάμεσα σε διαδοχικές γενιές είναι μικρότερη από το *function tolerance*, η εκτέλεση του Γενετικού Αλγόριθμου σταματά. Προκαθορισμένη τιμή είναι το $1e-6$, δηλαδή το 10^{-6} , ενώ αν απαιτείται αλλαγή της τιμής αυτής (π.χ. για 10^{-9}) γίνεται μέσω εντολής :

```
options = gaoptimset('TolFun', 1.0000e - 009)
```

Plot functions

Στο πεδίο αυτό του optimization tool για ελαχιστοποίηση με Γενετικό Αλγόριθμο, επιλέγονται οι διαθέσιμες από το matlab συναρτήσεις για εκτύπωση μέσω του Γενετικού Αλγόριθμου. Πριν την αναλυτική τους παρουσίαση πρέπει να αναφερθεί η παράμετρος **Plot interval**, η τιμή της οποίας καθορίζει τον αριθμό των γενεών ανάμεσα σε διαδοχικές κλήσεις των συναρτήσεων εκτύπωσης από τον Γενετικό Αλγόριθμο. Αναλυτικά, οι επιλογές εκτύπωσης είναι:

- ✓ *Best Fitness*: εκτυπώνει την καλύτερη τιμή της συνάρτησης αξιολόγησης σε κάθε γενιά.
- ✓ *Best individual*: σχεδιάζει το διάγραμμα του ατόμου με την καλύτερη τιμή αξιολόγησης σε κάθε γενιά.
- ✓ *Distance*: σχεδιάζει τη μέση απόσταση μεταξύ των ατόμων σε κάθε γενιά.
- ✓ *Expectation*: εκτυπώνει τον αναμενόμενο αριθμό τέκνων σε κάθε γενιά, σε σχέση με τις πρώτες τιμές.
- ✓ *Genealogy*: σχεδιασμός της γενεαλογίας των ατόμων. Οι γραμμές από τη μία γενιά στην άλλη κωδικοποιούνται χρωματικά ως εξής:
 - Κόκκινη γραμμή για τα παιδιά από μετάλλαξη (mutation)
 - Μπλε γραμμή για τα παιδιά από διασταύρωση (crossover)
 - Μαύρη γραμμή για τα παιδιά του ελιτισμού (elite children)
- ✓ *Range*: εκτυπώνει τις ελάχιστες, τις μέγιστες και τις μέσες τιμές της συνάρτησης αξιολόγησης σε κάθε γενιά.
- ✓ *Score diversity*: σχεδιάζει το ιστόγραμμα βαθμολογιών σε κάθε γενιά

- ✓ *Scores*: εκτυπώνει τις βαθμολογίες κάθε γενιάς
- ✓ *Selection*: σχεδιάζει ιστόγραμμα των γονέων, που δείχνει ποιοί γονείς συμβάλουν σε κάθε γενιά
- ✓ *Stopping*: εκτυπώνει τα κριτήρια τερματισμού του Γενετικού Αλγόριθμου
- ✓ *Max constraint*: εκτύπωση της μέγιστης παραβίασης των μη γραμμικών περιορισμών
- ✓ *Custom*: συνάρτηση εκτύπωσης που δημιουργείται από τον χρήστη και έχει τη μορφή:

function stop = plotfun(options, state, flag)

Output function

Οι συναρτήσεις που μπορεί να εισάγει ο χρήστης στο πεδίο custom της output function καλούνται από τον Γενετικό Αλγόριθμο σε κάθε επανάληψη. Ο Γενετικός Αλγόριθμος ελέγχει τα αποτελέσματα αυτά χωρίς, όμως, να επηρεάζονται οι υπόλοιπες επιλογές. Η συνάρτηση πρέπει να έχει την ακόλουθη σύνταξη:

[stop, options, optchanged] = myfun(options, state, flag, interval)

Display to command window

Σε αυτό το πεδίο επιλέγεται το Level of display, το οποίο καθορίζει το ποσό της πληροφορίας που παρουσιάζεται στο command window του Matlab, καθώς εκτελείται ο Γενετικός Αλγόριθμος. Οι διαθέσιμες επιλογές είναι οι εξής:

- ✓ *Off*: Δεν παρουσιάζεται αποτέλεσμα
- ✓ *Iterative*: Παρουσιάζονται πληροφορίες σε κάθε επανάληψη του Γενετικού Αλγόριθμου
- ✓ *Diagnose*: Παρουσιάζονται και εδώ πληροφορίες σε κάθε επανάληψη του Γενετικού Αλγόριθμου και επιπλέον, διάφορα προβλήματα που προέκυψαν κατά την εκτέλεση, αλλά και επιλογές (options) που έχουν μεταβληθεί.
- ✓ *Final*: Παρουσιάζεται μόνο ο λόγος τερματισμού του Γενετικού Αλγόριθμου.

User function evaluation

Σε αυτό το πεδίο καθορίζεται ο τρόπος που αξιολογούνται οι συναρτήσεις αξιολόγησης και περιορισμών που εισάγει ο χρήστης, μέσω των τριών επιλογών που υπάρχουν για το “evaluate fitness and constraint function” :

- ✓ *in serial*: οι συναρτήσεις αξιολόγησης και περιορισμών αξιολογούνται χωριστά για κάθε μέλος του πληθυσμού
- ✓ *vectorized*: οι συναρτήσεις αξιολόγησης και περιορισμών αξιολογούνται για έναν ολόκληρο τον πληθυσμό με την κλήση μίας συνάρτησης.
- ✓ *in parallel*: συντελείται παράλληλη επεξεργασία του προβλήματος με αποτέλεσμα την μείωση του χρόνου εκτέλεσης του Γενετικού Αλγόριθμου. Η επιλογή αυτή προϋποθέτει την ύπαρξη περισσότερων του ενός επεξεργαστών στον υπολογιστή. [19]

Κεφάλαιο 4

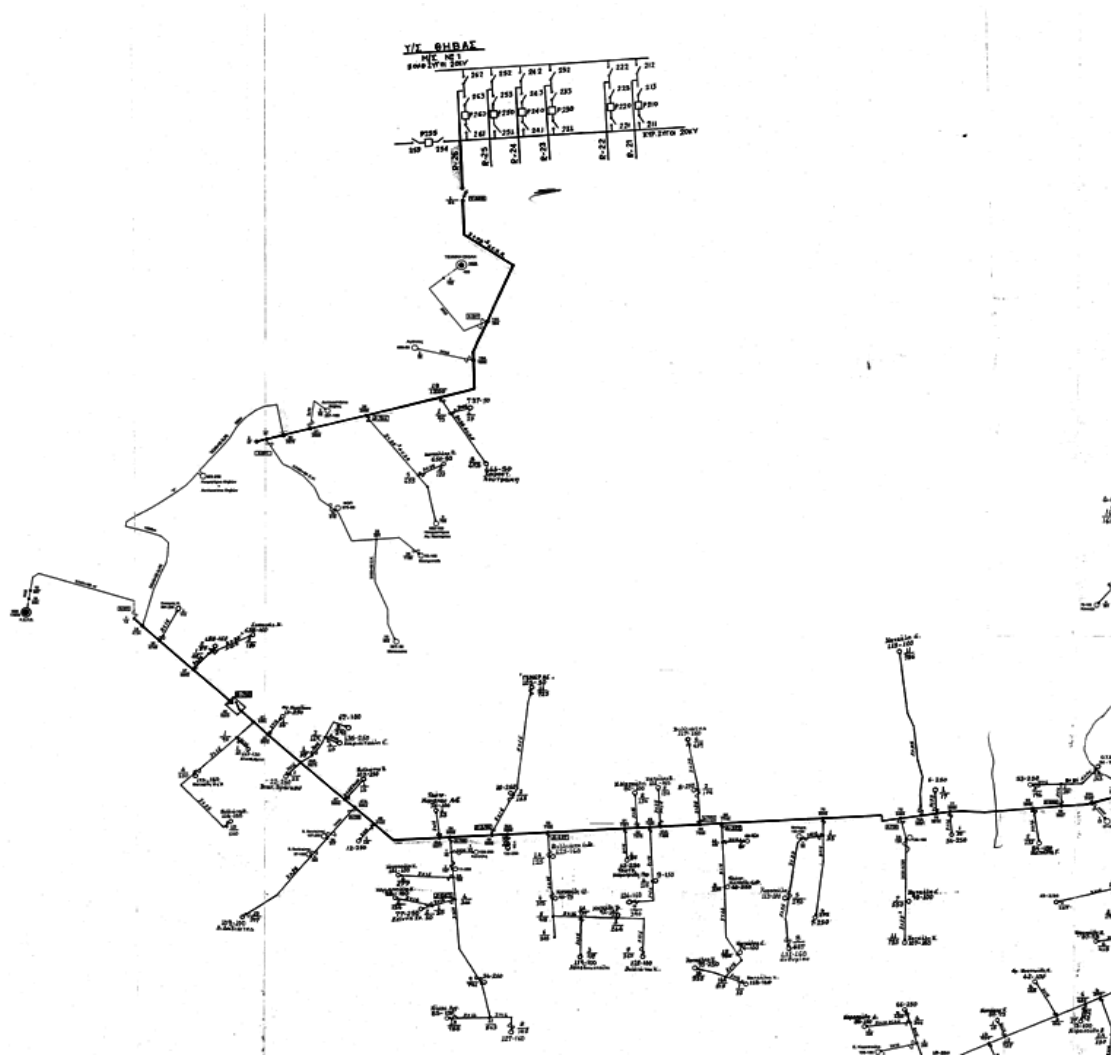
Διατύπωση Προβλήματος

και

Παραμετροποίηση Γενετικού Αλγόριθμου

4.1 Γενικά

Βασικό στόχο της παρούσας διπλωματικής αποτελεί η εύρεση της βέλτιστης θέσης, για την εγκατάσταση ενός Υποσταθμού Υψηλής Τάσης (ΥΤ) με σκοπό την μακροπρόθεσμη κάλυψη της αύξησης του παρόντος φορτίου του δικτύου, της **Εικόνα 4.1**.



Εικόνα 4.1: Σχέδιο Δικτύου Διανομής

Για την εύρεση της βέλτιστης θέσης του Υποσταθμού ΥΤ πραγματοποιήθηκε κατάλληλη παραμετροποίηση των επιλογών του Γενετικού Αλγόριθμου του MATLAB, η οποία αναλύεται παρακάτω διεξοδικά. Στη συνέχεια, έγινε έλεγχος της καταλληλότητας των λύσεων, μέσω της ανάλυσης ροής φορτίου, με τη βοήθεια του MATPOWER, που παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

Όσον αφορά στις τυπικές απαιτήσεις του συστήματος, ώστε να είναι δυνατή η υποστήριξη του λογισμικού MATLAB και συγκεκριμένα της έκδοσης 7.12.0 (R2001a) είναι για την περίπτωση του λειτουργικού συστήματος Windows νεότερες εκδόσεις από αυτή των Windows XP Service Pack 3, επεξεργαστή Intel ή AMDx86 που υποστηρίζει το σύνολο εντολών SSE2, 3-4 GB ελεύθερο χώρο σκληρού δίσκου για την εγκατάσταση του MATLAB και 1024 MB RAM.

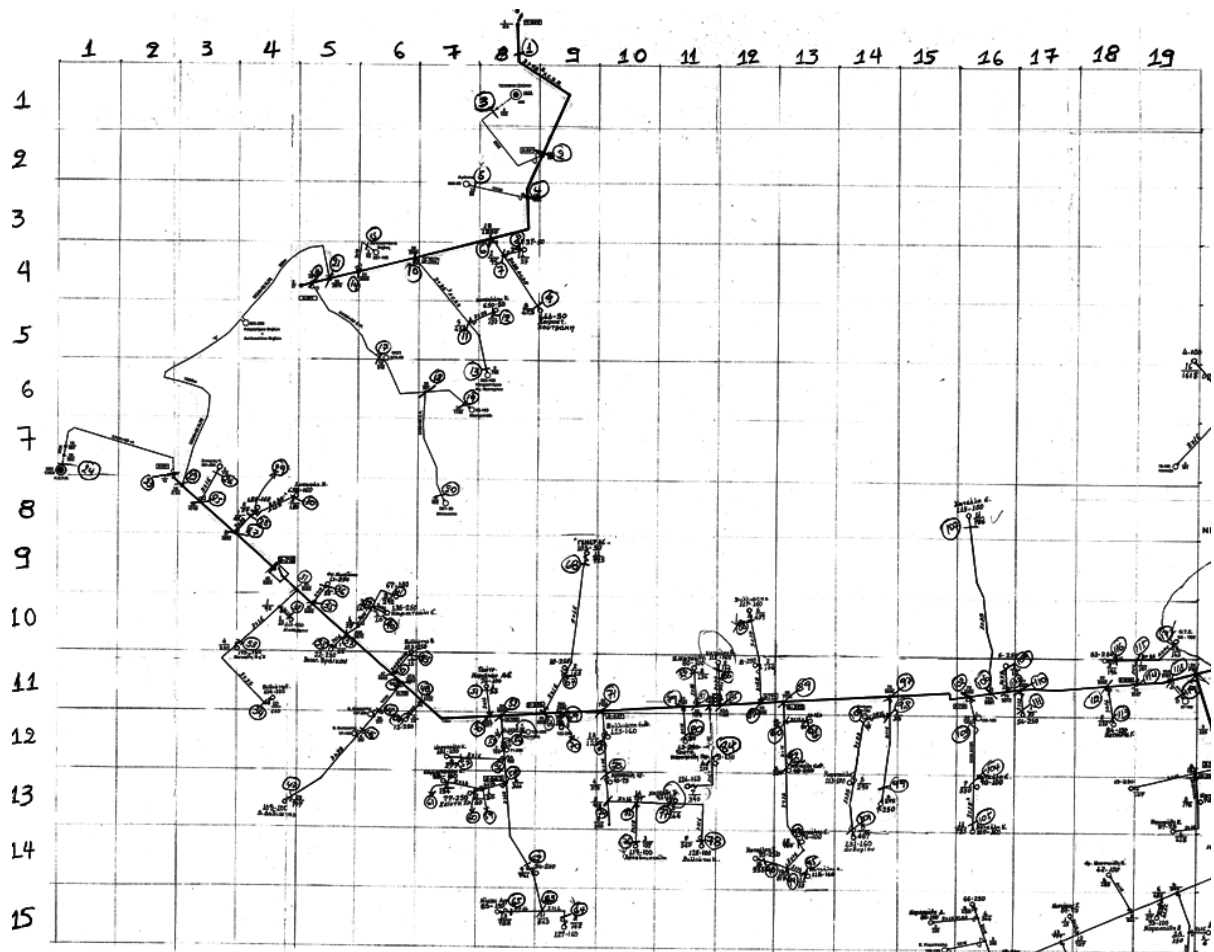
Ο υπολογιστής στον οποίο αναπτύχθηκε το λογισμικό MATLAB (R2011a) είχε λειτουργικό σύστημα Windows 7 Home Premium 64-bit, version 2009, Service Pack 1, επεξεργαστή Intel®Core™ i7 2.2 GHz και εγκατεστημένη μνήμη RAM 4 GB.

4.2 Κωδικοποίηση

Για την κωδικοποίηση του προς επίλυση από τον Γενετικό Αλγόριθμο προβλήματος, ο αρχικός χάρτης με το μονογραμμικό σχέδιο της **Εικόνα 4.1** χωρίστηκε σε τετράγωνα πλευράς τριών (3) εκατοστών, με αποτέλεσμα να προκύψει ο τετραγωνικός χάρτης, διαστάσεων 15x19 της **Εικόνα 4.2**. Στη συνέχεια, για μεγαλύτερη ακρίβεια στην εύρεση της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης του νέου Υποσταθμού ΥΤ, με τη βοήθεια του κατάλληλου αλγορίθμου έγινε μετατροπή των διαστάσεων σε 150x190 τετράγωνα. Ουσιαστικά, υποδιαιρέθηκε κάθε αρχικό τετράγωνο σε δέκα (10) επιμέρους.

Στο παραπάνω σχέδιο, βασίστηκε η δημιουργία του κατάλληλου για το πρόβλημα χρωμοσώματος, με *δυναδική κωδικοποίηση (bit string)*. Κάθε γονίδιο του εκάστοτε χρωμοσώματος αντιπροσωπεύει ένα τετράγωνο του χάρτη της **Εικόνα 4.2**. Σε περίπτωση που σε μία θέση έχει τοποθετηθεί ο Υποσταθμός ΥΤ, το γονίδιο που αντιπροσωπεύει τη θέση αυτή στο χρωμόσωμα παίρνει την τιμή «1», ενώ τα υπόλοιπα γονίδια έχουν την τιμή «0». Ουσιαστικά, λοιπόν, όλα τα γονίδια έχουν την τιμή «0» και κάθε φορά το γονίδιο που αντιπροσωπεύει την εκάστοτε πιθανή θέση Υποσταθμού ΥΤ παίρνει την τιμή «1».

Κατά την υλοποίηση του Γενετικού Αλγόριθμου, όμως, το κάθε χρωμόσωμα είναι ένας μονοδιάστατος πίνακας. Λόγω του γεγονότος ότι ο χάρτης της **Εικόνα 4.2** έχει δύο διαστάσεις, προέκυψε η ανάγκη τροποποίησής του ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία του από τον Γενετικό Αλγόριθμο. Έτσι, λοιπόν, κατά την αναπαράσταση του χάρτη της **Εικόνα 4.2** σε χρωμόσωμα, έγινε μετατροπή του δισδιάστατου αυτού πίνακα σε μονοδιάστατο, απλά θεωρώντας πως το επόμενο στοιχείο του τελευταίου της κάθε γραμμής, είναι το πρώτο στοιχείο της ακριβώς επόμενης. Με αυτόν τον τρόπο, προέκυψε ένα διάνυσμα διαστάσεων 1x28500 που αντιστοιχεί στο δισδιάστατο διαστάσεων 150x190. [20]



Εικόνα 4.2: Τετραγωνισμένος Χάρτης Δικτύου Διανομής

4.3 Αντικειμενική Συνάρτηση

Βασική ιδέα για την υλοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης που καλείται να ελαχιστοποιήσει ο Γενετικός Αλγόριθμος, αποτέλεσε η ελαχιστοποίηση της απόστασης της θέσης του νέου Υποσταθμού ΥΤ από τους δέκα (10) κοντινότερους Υποσταθμούς ΜΤ. Η αντικειμενική συνάρτηση, λοιπόν, υπολογίζει την απόσταση της εκάστοτε θέσης του Υποσταθμού ΥΤ από τους δέκα (10) κοντινότερους Υποσταθμούς ΜΤ, ώστε με τις ανάλογες λειτουργίες του Γενετικού Αλγόριθμου και μετά από κάποιες επαναλήψεις να βρεθεί η βέλτιστη θέση του νέου Υποσταθμού ΥΤ.

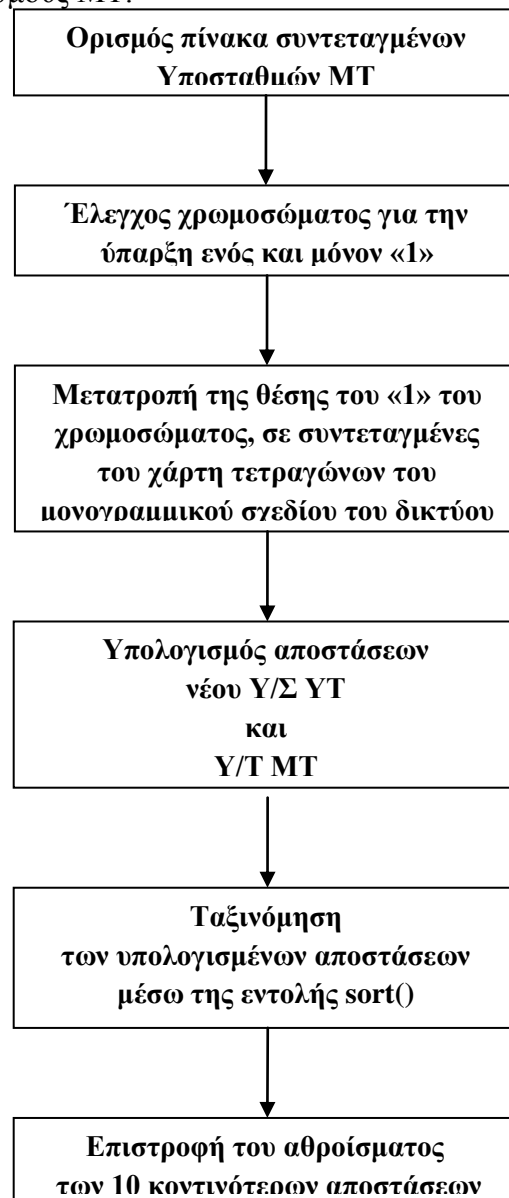
Αναλυτικότερα, η αλγοριθμική διαδικασία σύμφωνα με την οποία υλοποιήθηκε η αντικειμενική συνάρτηση, όπως φαίνεται στο **Σφάλμα! Το αρχείο ροέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.** έχει ως εξής:

Αρχικά, η συνάρτηση δέχεται ως όρισμα το διάνυσμα *pop*, που στην ουσία αποτελεί ένα χρωμόσωμα του πληθυσμού της εκάστοτε γενιάς. Στη συνέχεια, ορίζεται πίνακας των θέσεων των Υποσταθμών ΜΤ του δικτύου, οι οποίες προφανώς είναι σταθερές και αμετάβλητες κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Με αυτόν τον τρόπο διατηρείται και η ακτινικότητα του δικτύου. Αξίζει σε αυτό το σημείο να αναφερθεί πως χάριν απλούστευσης στα πλαίσια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής, ως θέσεις Υποσταθμών ΜΤ επιλέχθηκαν τα κέντρα των τετραγώνων με τα οποία δημιουργήθηκε ο παραπάνω δισδιάστατος χάρτης.

Στη συνέχεια, γίνεται έλεγχος του χρωμοσώματος για την ύπαρξη ενός και μόνο «1», καθώς μόνο ένας Υποσταθμός YT θα εγκατασταθεί στο υπάρχον δίκτυο. Μετά τον έλεγχο αυτό, ακολουθεί η μετατροπή της θέσης του άσσου του μονοδιάστατου διανύσματος του χρωμοσώματος, σε συντεταγμένες του χάρτη τετραγώνων του μονογραμμικού σχεδίου του δικτύου, ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός των αποστάσεων από τους Υποσταθμούς MT.

Ακολουθεί η καταχώρηση σε μονοδιάστατο πίνακα - αριθμού στηλών ίσου με τον αριθμό των Υποσταθμών MT (64) - των αποστάσεων της επιλεγμένης θέσης του Υποσταθμού YT από όλους τους Υποσταθμούς MT του δικτύου. Έπεται η ταξινόμηση των αποστάσεων αυτών κατά αύξουσα σειρά με χρήση της εντολής *sort* και τέλος, η άθροιση των δέκα (10) κοντινότερων αποστάσεων του νέου Υποσταθμού YT από τους γειτονικούς Υποσταθμούς MT.

Η αντικειμενική συνάρτηση επιστρέφει την τιμή του αθροίσματος των αποστάσεων του νέου Υποσταθμού YT από τους δέκα (10) κοντινότερους και άρα γειτονικούς Υποσταθμούς MT.



Εικόνα 4.3: Βήματα Αντικειμενικής Συνάρτησης

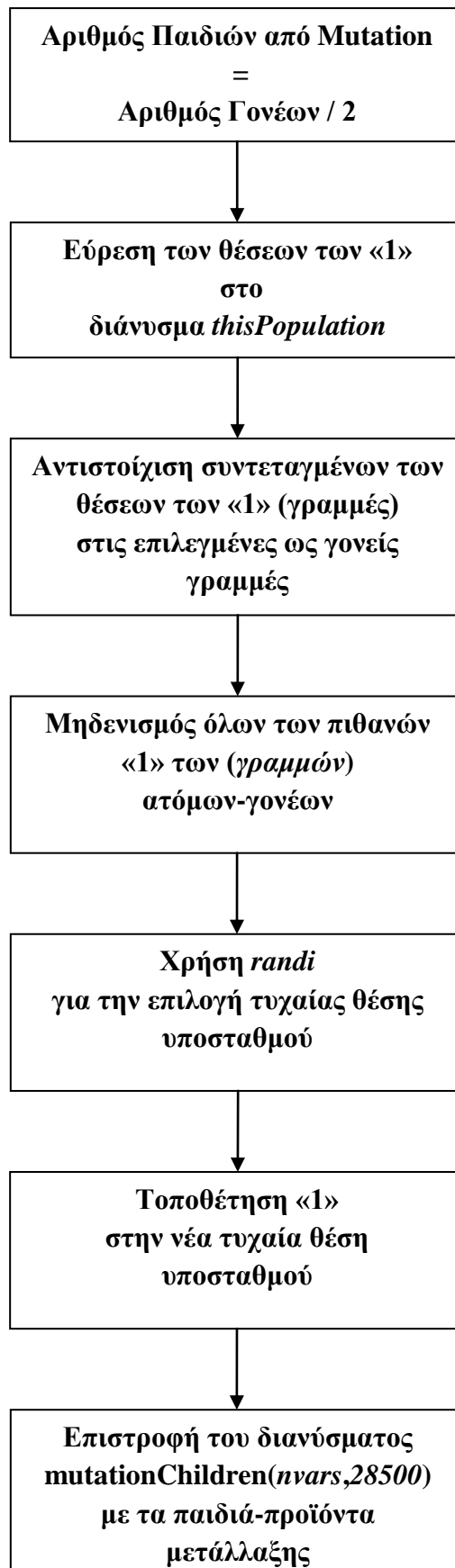
4.4 Η συνάρτηση *Mutation*

Για την βελτιστοποίηση του εν λόγω προβλήματος απαιτήθηκε η υλοποίηση νέας συνάρτησης *Mutation*, καθώς οι προϋπάρχουσες διαθέσιμες συναρτήσεις του Matlab κρίθηκαν ακατάλληλες.

Η βασική λειτουργία που καλείται να επιτελέσει η συνάρτηση *Mutation* είναι η μετάλλαξη των εκάστοτε επιλεγμένων διανυσμάτων-ατόμων, με τέτοιο τρόπο ώστε τα άτομα του νέου πληθυσμού να διατηρούν την βασική τους ιδιότητα: να αποτελούνται εξ' ολοκλήρου από μηδενικά, εκτός από ένα γονίδιο, η θέση του οποίου επιλέγεται στην τύχη κάθε φορά και βρίσκεται στο διάστημα [1,28500] και το οποίο έχει την τιμή 1. Στην ουσία, το εν λόγω γονίδιο με την τιμή 1, αναπαριστά την εκάστοτε επιλεγμένη θέση του Υποσταθμού YT. Με αυτόν τον τρόπο, «ελέγχεται» με τυχαίο τρόπο όλη η περιοχή, για την ανεύρεση του βέλτιστου σημείου εγκατάστασης του νέου Υποσταθμού.

Η υλοποίηση της συνάρτησης *Mutation* είναι σχετικά απλή. Αρχικά, η συνάρτηση δέχεται ως ορίσματα τα εξής: το μοναδιαίο διάνυσμα *parents* που περιέχει τους γονείς που έχουν επιλεγεί από την συνάρτηση *selection*, τη δομή *options*, τον αριθμό των μεταβλητών *nvars*, τη συνάρτηση *FitnessFcn*, τη δομή *state* που περιέχει πληροφορίες για την εκάστοτε γενιά, το διάνυσμα *thisScore* με τα αποτελέσματα του εκάστοτε πληθυσμού και τέλος, τον πίνακα *thisPopulation* που περιέχει τα άτομα του εκάστοτε πληθυσμού. Μετά την αλγοριθμική εκτέλεση, η συνάρτηση *Mutation* επιστρέφει τον πίνακα *mutationChildren*, του οποίου οι γραμμές αντιστοιχούν στα παιδιά και οι στήλες στον αριθμό των μεταβλητών (*nvars*).

Η βασική αλγοριθμική διαδικασία, όπως φαίνεται και στο **Σφάλμα! Το ρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**, έχει ως εξής: Αρχικά, προσδιορίζονται οι θέσεις των άσσων «1» στον πίνακα *thisPopulation*, γίνεται αντιστοιχία των συντεταγμένων των θέσεων αυτών και συγκεκριμένα των γραμμών στον αριθμό του ατόμου που έχει επιλεγεί κάθε φορά για γονέας, μηδενίζεται ο υπάρχων άσσος «1» και με τη βοήθεια της εντολής *randi* επιλέγεται τυχαία η νέα θέση του «1».



Εικόνα 4.4: Βήματα Συνάρτησης Mutation

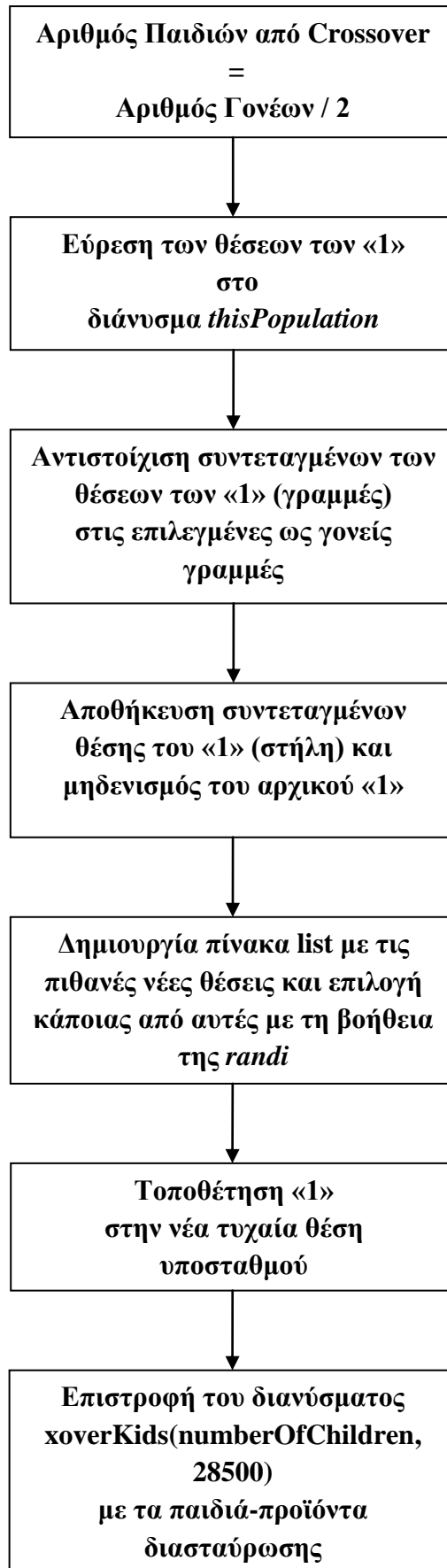
4.5 Η συνάρτηση Crossover

Για τη βελτιστοποίηση του προβλήματος εύρεσης της βέλτιστης τοποθεσίας ενός Υποσταθμού ΥΤ, εκτός από την ανάγκη υλοποίησης νέας συνάρτησης *Mutation* κρίθηκε αναγκαία και η υλοποίηση συνάρτησης *Crossover*, επίσης λόγω αδυναμίας των προϋπαρχόντων επιλογών του Matlab να ανταποκριθούν στις ανάγκες του προβλήματος.

Βασική λειτουργία της συνάρτησης *Crossover* αποτελεί η διασταύρωση των ατόμων-γονέων του κάθε πληθυσμού, με σκοπό τη δημιουργία νέων ατόμων για τα οποία η αντικειμενική συνάρτηση έχει τιμή παραπλήσια με αυτή των γονέων, ώστε μετά από αρκετές επαναλήψεις να ευρεθεί η βέλτιστη λύση. Για να επιτευχθεί αυτό, η συνάρτηση *Crossover* αναπτύχθηκε με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιλέγεται στην τύχη μία τιμή στο πεδίο [1,28500], η οποία αντιστοιχεί στη νέα πιθανή θέση Υποσταθμού, βρίσκεται κοντά στην πιθανή θέση του Υποσταθμού των ατόμων-γονέων και μάλιστα σε ακτίνα ενός τετραγώνου από αυτήν. Με αυτόν τον τρόπο, ελέγχονται οι περιοχές γύρω από μία προς το παρόν βέλτιστη θέση, για την εύρεση μιας πιθανής ακόμα καλύτερης θέσης.

Κατά την εκτέλεσή της, η συνάρτηση *Crossover*, δέχεται ως ορίσματα τα εξής: το μοναδιαίο διάνυσμα *parents* που περιέχει τους γονείς που έχουν επιλεγεί από την συνάρτηση *selection*, τη δομή *options*, τον αριθμό των μεταβλητών *nvars*, τη συνάρτηση *FitnessFcn*, την μεταβλητή κράτησης θέσης *unused* (με αρχικοποίηση = not used) και τέλος, τον πίνακα *thisPopulation* που περιέχει τα άτομα του εκάστοτε πληθυσμού. Με το πέρας της εκτέλεσης, η συνάρτηση *Crossover* επιστρέφει τον πίνακα *xoverKids*, του οποίου οι γραμμές αντιστοιχούν στα παιδιά προήλθαν από διασταύρωση (crossover) και οι στήλες στον αριθμό των μεταβλητών (*nvars*).

Η βασική αλγοριθμική διαδικασία, όπως φαίνεται και στο , έχει ως εξής: Αρχικά, προσδιορίζονται οι θέσεις των άσπων «1» στον πίνακα *thisPopulation* και γίνεται αντιστοιχία των συντεταγμένων των θέσεων αυτών και συγκεκριμένα των γραμμών στον αριθμό των ατόμων που έχουν επιλεγεί κάθε φορά ως γονείς. Στη συνέχεια, μηδενίζεται ο άσπος «1» των επιλεγμένων γονέων, ενώ παράλληλα αποθηκεύεται η θέση του στο διάνυσμα και δημιουργείται ένας πίνακας *list*, ο οποίος περιέχει τις πιθανές θέσεις του «1» στο νέο άτομο-παιδί, εάν και εφόσον αυτές βρίσκονται εντός του πεδίου [1,28500]. Οι πιθανές αυτές θέσεις είναι όλες οι θέσεις που βρίσκονται σε ακτίνα ενός τετραγώνου στον χάρτη, από την θέση του «1» στον επιλεγμένο γονέα. Τέλος, από τις αποθηκευμένες στον πίνακα *list* τιμές επιλέγεται μία τυχαία, με τη βοήθεια της εντολής *randi*, η οποία αποτελεί τη θέση του νέου «1».



Εικόνα 4.5: Βήματα Συνάρτησης Crossover

4.6 Παραμετροποίηση των υπόλοιπων επιλογών του Γενετικού Αλγόριθμου

Πέρα από την υλοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης και των βασικών συναρτήσεων *Mutation* και *Crossover*, οι υπόλοιπες επιλογές (*options*) του Γενετικού Αλγόριθμου παραμετροποιήθηκαν με χρήση των προϋπαρχόντων επιλογών με στόχο την όσο το δυνατόν πιο γρήγορη και εύστοχη λειτουργία του Γενετικού Αλγόριθμου. Αναλυτικότερα, τα *options* που παραμετροποιήθηκαν καταγράφονται παρακάτω, ενώ για τα υπόλοιπα διατηρήθηκαν οι προεπιλεγμένες επιλογές.

4.6.1 Population

- ✓ **Population Type:** bit string
- ✓ **Population Size:** 10
- ✓ **Creation function:** Constraint dependent (default)
- ✓ **Initial Population:** Διάνυσμα διαστάσεων 20x28500 μηδενικών στοιχείων εκτός της 1^{ης} στήλης που αρχικοποιήθηκε με το «1», ώστε αφενός να γίνει αρχικοποίηση των χρωμοσωμάτων με αποδεκτή λύση (ένας Y/Σ YT) και να αρχίσει η διαδικασία εύρεσης της βέλτιστης λύσης χωρίς προκατάληψη.
- ✓ **Initial Scores:** [] (default)
- ✓ **Initial Range:** [0;1] (default)

4.6.2 Fitness Scaling

Επιλογή του *rank*, που αποτελεί και προεπιλεγμένη συνάρτηση. Με την επιλογή αυτής της συνάρτησης, τα χρωμοσώματα ταξινομούνται κατά αύξουσα σειρά ανάλογα με την τιμή συνάρτησης καταλληλότητας και έτσι εξασφαλίζεται η επεξεργασία όλων των αποτελεσμάτων.

4.6.3 Selection

Για την συγκεκριμένη λειτουργία του Γενετικού Αλγόριθμου κρίθηκαν κατάλληλες οι επιλογές *Stochastic Uniform* και *Roulette*. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην αξιοποίηση της διαβαθμισμένης τιμής των ατόμων, και κατά συνέπεια της καταλληλότητας τους, κατά τη διαδικασία της επιλογής των γονέων κάθε γενιάς.

4.6.4 Reproduction

- ✓ *Elite count*: 5
- ✓ *Crossover fraction*: 0.8 (default).

4.7 Προετοιμασία της διαδικασίας βελτιστοποίησης

Πριν τη διαδικασία της βελτιστοποίησης, αναπτύχθηκε ένας *απλός ευρετικός αλγόριθμος* για τον προσδιορισμό των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης για όλες τις πιθανές λύσεις, ώστε στη συνέχεια να εξακριβωθεί η αποτελεσματικότητα του Γενετικού Αλγόριθμου για την εκάστοτε παραμετροποίησή του, στην προσπάθεια εύρεσης του ολικού βέλτιστου. Αξίζει να σημειωθεί πως ο απλός αυτός αλγόριθμος εύρεσης βέλτιστων λύσεων ήταν *αρκετά αργός*, παρόλο που έδινε όλες τις πιθανές τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης.

Ο απλός ευρετικός αλγόριθμος έδωσε τα παρακάτω *βέλτιστα* αποτελέσματα τιμής αντικειμενικής συνάρτησης (10 τετράγωνα):

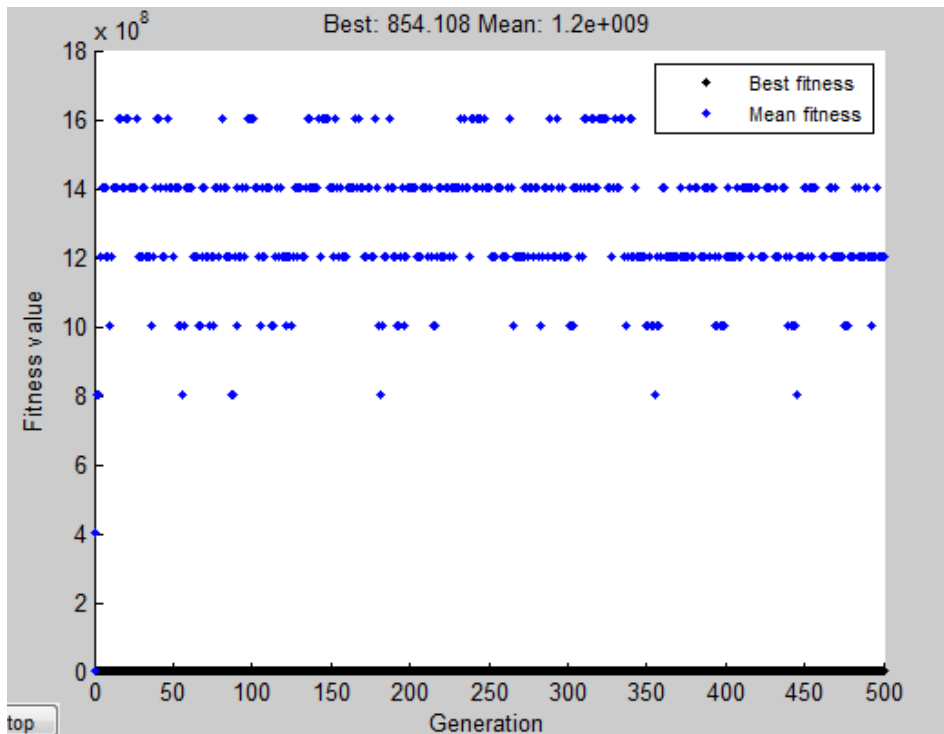
Συντεταγμένες Χρωμοσώματος	Μετατροπή	Συντεταγμένες Δισδιάστατου Χάρτη	
19645	→	104	75
19834	→	105	74
19836	→	105	76
20025	→	106	75

Πίνακας 4.1: Συντεταγμένες βέλτιστων σημείων βάσει απλού ευρετικού αλγόριθμου

Παραπάνω, φαίνεται και η μετατροπή από συντεταγμένες χρωμοσώματος (μονοδιάστατος πίνακας), σε συντεταγμένες τετραγωνισμένου χάρτη (δισδιάστατος πίνακας). Παρατηρείται το γεγονός ότι οι βέλτιστες λύσεις, βρίσκονται στο ίδιο τετράγωνο του αρχικού χάρτη της **Εικόνα 4.2**, διαστάσεων 15x19, οπότε χάριν απλούστευσης θεωρούνται ταυτόσημες και οποιαδήποτε προκύπτει κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης του Γενετικού Αλγόριθμου, θεωρείται ως βέλτιση.

4.8 Αποτελέσματα διαδικασίας βελτιστοποίησης

Κατά την διαδικασία της βελτιστοποίησης, έγιναν δοκιμές αρχικά με τις προκαθορισμένες συναρτήσεις για το *Mutation* και το *Crossover*. Όπως προαναφέρθηκε όμως, όλες απέτυχαν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις του προβλήματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το τρέξιμο του αλγόριθμου με επιλογές: *Uniform* στο *Mutation* και *Scattered* στο *Crossover* που φαίνεται στην **Εικόνα 4.6**.



Εικόνα 4.6: Βελτιστοποίηση με προεπιλεγμένες συναρτήσεις Mutation και Crossover

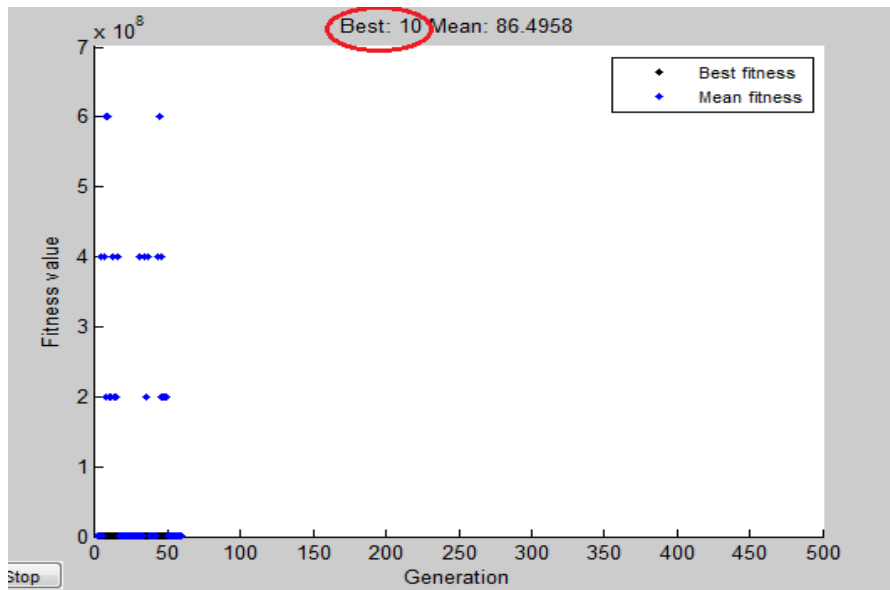
Έτσι, χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά οι συναρτήσεις που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής και έγιναν αρκετές δοκιμές με την μεταβολή των παραμέτρων *PopulationSize*, *Elite count* και *Crossover Fraction*, για να διαπιστωθεί η παραμετροποίηση που οδηγεί στο βέλτιστο αποτέλεσμα γρηγορότερα και με τις λιγότερες επαναλήψεις.

Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν για *Population Size* κοντά στο 100 και *Crossover Fraction* < 0.5, οδήγησαν σε υπερβολικά αργή εκτέλεση του αλγορίθμου, με αποτέλεσμα να απορριφθούν αμέσως.

Παρόλο που τα αποτελέσματα για παραπλήσιες τιμές των παραπάνω παραμέτρων ήταν παρεμφερή, διαπιστώθηκε πως τα καλύτερα αποτελέσματα έδινε η εξής παραμετροποίηση:

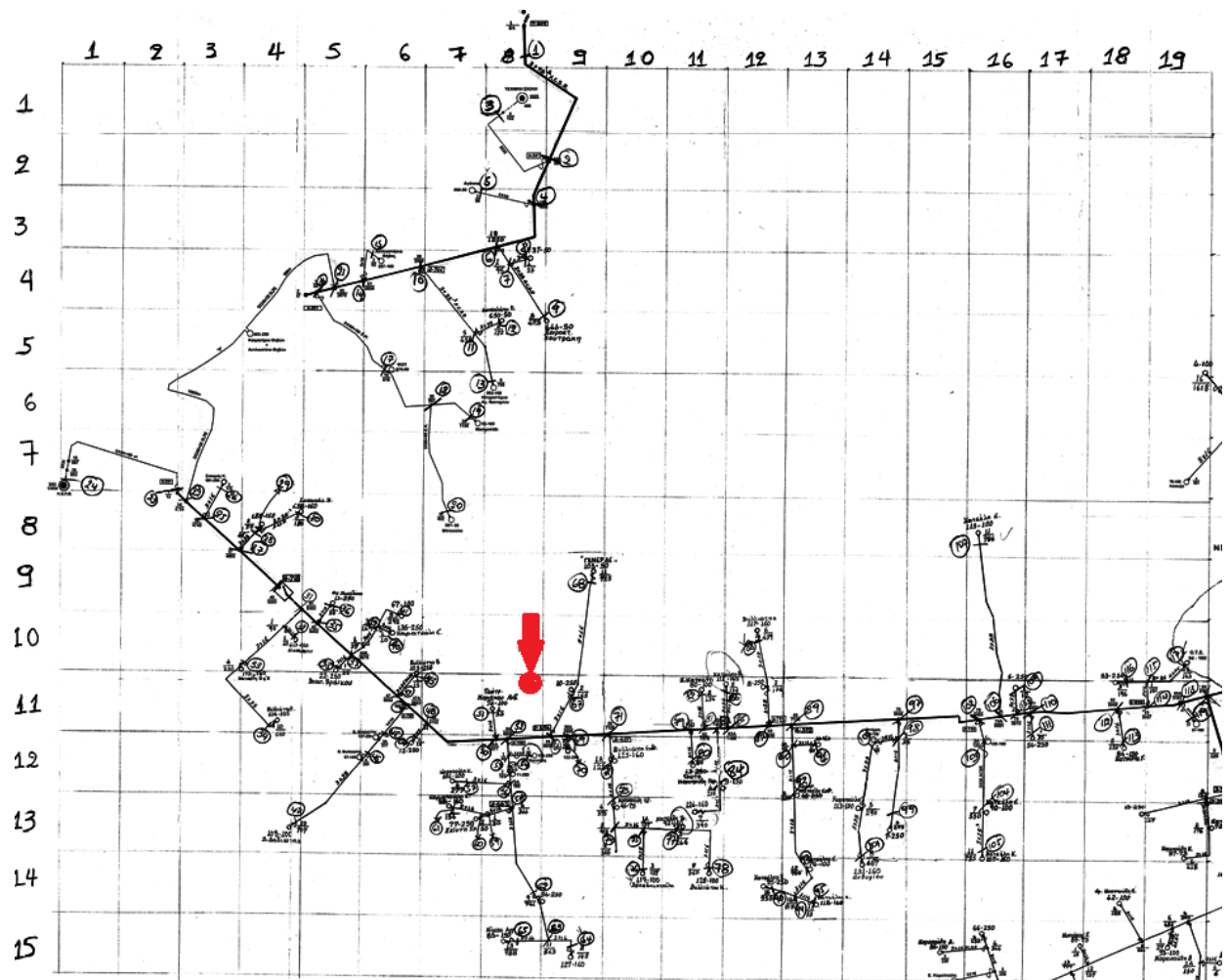
- ✓ **Population Size = 10**
- ✓ **Elite Count = 5**
- ✓ **Crossover Fraction = 0.8**

Η διαδικασία βελτιστοποίησης με την παραπάνω παραμετροποίηση έδωσε τα επιθυμητά αποτελέσματα, όπως φαίνεται στην , σε 58 επαναλήψεις με αποτέλεσμα να ληφθεί η απόφαση εγκατάστασης του Υποσταθμού στο σημείο που φαίνεται στην *Εικόνα 4.7*.



Εικόνα 4.7: Βελτιστοποίηση με τις νέες συναρτήσεις Mutation και Crossover

Τελικά, ο Υποσταθμός ΥΤ πλέον και καθ' υπόδειξη του Γενετικού Αλγορίθμου, τοποθετήθηκε στο σημείο που φαίνεται στην Εικόνα 4.8.



Εικόνα 4.8: Σημείο Τοποθέτησης Νέου Υποσταθμού ΥΤ

Κεφάλαιο 5

Σενάρια Φορτίου και Ροές Φορτίου με Χρήση Matpower

5.1 Σύντομη Περιγραφή Λογισμικού Matpower 4.1

Το Matpower είναι ένα πρόγραμμα από M-files του Matlab για την επίλυση προβλημάτων ροής φορτίου και βέλτιστης ροής φορτίου. Πρόκειται για ένα εργαλείο αρκετά χρήσιμο για εκπαιδευτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, καθώς περιλαμβάνει κώδικα εύκολα κατανοητό και τροποποιήσιμο.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 4.1 του Matpower, για την επίλυση AC ροών φορτίου. Οι αντίστοιχες λειτουργίες του που χρησιμοποιήθηκαν περιγράφονται παρακάτω.

5.1.1 Εκτέλεση Ροής Φορτίου

Για την εκτέλεση απλής ροής φορτίου με τη μέθοδο Newton-Raphson με τις προκαθορισμένες επιλογές για το παράδειγμα των 9 ζυγών (case9) που περιλαμβάνεται στα αρχεία του Matpower, αρκεί η πληκτρολόγηση στο Command Window του Matlab της εντολής:

```
runpf('case9').
```

Αξίζει να σημειωθεί, ότι δίνεται η δυνατότητα επιλογής διαφορετικής τεχνικής επίλυσης ροής φορτίου. Εκτός από την παραπάνω, που αποτελεί μία πρότυπη μέθοδο Newton σε συνδυασμό με μία Ιακωβιανή, ενημερωμένη σε κάθε επανάληψη. Άλλοι αλγόριθμοι που μπορούν να επιλεγούν είναι παραλλαγές της ταχείας αποζευγμένης μεθόδου (XB και BX versions), καθώς επίσης και η μέθοδος Gauss-Seidel.

5.1.2 Διάταξη Αρχείου Δεδομένων

Τα αρχεία δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση ροών φορτίου από το Matpower είναι απλά M-files του Matlab, στα οποία ορίζονται και επιστρέφονται για χρήση οι μεταβλητές *basamva* (βαθμωτή), *bus*, *branches*, *gen*, *areas* και *gencost* (πίνακες). Οι λεπτομέρειες προδιαγραφής των αρχείων case του Matpower αναλύονται παρακάτω και μπορούν να βρεθούν στο αρχείο *caseformat.m*.

Διάταξη Δεδομένων Ζυγών

Bus_i	Αριθμός του ζυγού (1 έως 29997)
Type	Τύπος ζυγού
	1 = PQ Ζυγός
	2 = PV Ζυγός
	3 = Ζυγός Αναφοράς
	4 = Απομονωμένος ζυγός
Pd	Ζήτηση Ενεργού Ισχύος (MW)
Qd	Ζήτηση Άεργου Ισχύος (MVar)
Gs	Εγκάρσια αγωγιμότητα (MW (Ζητούμενη) για V = 1 p.u.)
Bs	Εγκάρσια επιδεκτικότητα (MVar (Ζητούμενη) για V = 1 p.u.)
area	Αριθμός περιοχής
Vm	Μέτρο τάσης (p.u.)
Va	Γωνία τάσης (μοίρες)
baseKV	Βασική τιμή τάσης (kV)
zone	Ζώνη Απωλειών
Vmax	Μέγιστο μέτρο τάσης (p.u.)
Vmin	Ελάχιστο μέτρο τάσης (p.u.)

Διάταξη Δεδομένων Γεννητριών

Bus	Αριθμός ζυγού
Pg	Έξοδος ενεργού ισχύος (MW)
Qg	Έξοδος άεργου ισχύος (MVar)
Qmax	Μέγιστη έξοδος άεργου ισχύος (Mvar)
Qmin	Ελάχιστη έξοδος άεργου ισχύος (Mvar)
Vg	Δεδομένο μέτρο τάσης (p.u.)
mBase	Βασική Ισχύς MVA
status	Κατάσταση Μηχανής
	>0, Μηχανή σε λειτουργία
	<=0, Μηχανή εκτός λειτουργίας
Pmax	Μέγιστη έξοδος ενεργού ισχύος (MW)
Pmin	Ελάχιστη έξοδος ενεργού ισχύος (MW)
Pc1	Κατώτερη έξοδος ενεργού ισχύος της PQ καμπύλης ικανότητας (MW)
Pc2	Ανώτερη έξοδος ενεργού ισχύος της PQ καμπύλης ικανότητας (MW)
Qc1min	Ελάχιστη έξοδος άεργου ισχύος στο Pc1 (Mvar)
Qc1max	Μέγιστη έξοδος άεργου ισχύος στο Pc1 (Mvar)
Qc2min	Ελάχιστη έξοδος άεργου ισχύος στο Pc2 (Mvar)
Qc2max	Μέγιστη έξοδος άεργου ισχύος στο Pc2 (Mvar)
Ramp_agc	Κλίση ράμπας για το επόμενο φορτίο/AGC (MW/min)

Ramp_10	Κλίση ράμπας για 10 λεπτά εφεδρείας (MW)
Ramp_30	Κλίση ράμπας για 30 λεπτά εφεδρείας (MW)
Ramp_q	Κλίση ράμπας για άεργο ισχύ (Mvar/min)
Apf	Παράγοντας συμμετοχής της περιοχής

Διάταξη Δεδομένων Κλάδων

fbus	Αριθμός ζυγού αναχώρησης (from)
tbus	Αριθμός ζυγού άφιξης (to)
r	Αντίσταση (p.u.)
x	Αντίδραση (p.u.)
b	Συνολική Επιδεκτικότητα (p.u.)
rateA	MVA rating A (long term rating)
rateB	MVA rating B (short term rating)
rateC	MVA rating C (emergency rating)
ratio	Λόγος M/Σ με tap (0 για τις γραμμές)
angle	Φασική γωνία μετατόπισης M/Σ (μοίρες)
status	Αρχική κατάσταση κλάδου
	1 = σε λειτουργία
	0 = εκτός λειτουργίας
angmin	Ελάχιστη διαφορά φάσης: angle(Vf)-angle(Vt) (μοίρες)
angmax	Μέγιστη διαφορά φάσης: angle(Vf)-angle(Vt) (μοίρες)

Διάταξη Δεδομένων Περιοχών

area	Αριθμός Περιοχής
ref_bus	Ζυγός αναφοράς στην περιοχή αυτή

5.1.3 Μοντελοποίηση: AC Διατύπωση

Τα σταθερά φορτία μοντελοποιούνται ως εγχύσεις σταθερής ενεργού ισχύος P_d και άεργου ισχύος Q_d και καθορίζονται στην 3^η και την 4^η στήλη του πίνακα *bus*. Στην 5^η και την 6^η στήλη του πίνακα *bus*, καθορίζονται τα G_{sh} και B_{sh} που προκύπτουν από την αντίσταση εισόδου στοιχείων σύνθετης αντίστασης στον εκάστοτε ζυγό:

$$Y_{sh} = \frac{G_{sh} + B_{sh}}{baseMVA}$$

Κάθε κλάδος (γραμμή μεταφοράς/ μετασχηματιστής/ ολισθητής φάσης, μοντελοποιείται ως μια γραμμή μεταφοράς του πρότυπου π-μοντέλου, με αντίσταση σειράς R, αντίδραση σειράς X και συνολική χωρητικότητα φορτίου γραμμής B_c , σε

σειρά με έναν ιδανικό μετασχηματιστή και ολισθητή φάσης, στο άκρο *from*, με λόγο tap τ και ολίσθηση φάσης θ_{shift} . Οι παράμετροι R , X , B_c , τ , θ_{shift} βρίσκονται στην 3^η, την 4^η, την 5^η, την 9^η και την 10^η στήλη του πίνακα *branch*, αντίστοιχα. Η σχέση που συνδέει τις τάσεις και τα ρεύματα στα άκρα *from* και *to* του κλάδου με τον πίνακα αγωγιμοτήτων του κλάδου Y_{br} , ως εξής:

$$\begin{bmatrix} I_f \\ I_t \end{bmatrix} = Y_{br} \begin{bmatrix} V_f \\ V_t \end{bmatrix}$$

$$\text{όπου: } Y_{br} = \begin{bmatrix} (Y_s + j\frac{B}{2})\frac{1}{\tau^2} & -Y_s\frac{1}{\tau e^{j\theta_{shift}}} \\ -Y_s\frac{1}{\tau e^{-j\theta_{shift}}} & (Y_s + j\frac{B}{2}) \end{bmatrix} \text{ με } Y_s = \frac{1}{R+jX}$$

Τα στοιχεία των πινάκων αγωγιμοτήτων κλάδων και των πινάκων αγωγιμοτήτων ζυγών συνδυάζονται για να διαμορφώσουν ένα σύνθετο πίνακα αγωγιμοτήτων ζυγών Y_{bus} , σχετίζοντας το διάνυσμα της σύνθετης τάσης του ζυγού V_{bus} με το διάνυσμα του σύνθετου ρεύματος I_{bus} ως εξής:

$$I_{bus} = Y_{bus}V_{bus}$$

Οι πίνακες αγωγιμοτήτων Y_f και Y_t , με δεδομένες τις τάσεις των ζυγών V_{bus} διαμορφώνονται για να υπολογιστεί το διάνυσμα των σύνθετων εγχύσεων ρεύματος στα άκρα *from* και *to* ως εξής:

$$I_f = Y_f V_{bus}$$

$$I_t = Y_t V_{bus}$$

Αν V_f και V_t τα διανύσματα σύνθετων αντιστάσεων στα άκρα *from* και *to*, τα διανύσματα των σύνθετων εγχύσεων ισχύος ζυγών και κλάδων μπορούν να εκφραστούν ως:

$$S_{bus} = \text{diag}(V_{bus})I_{bus}^*$$

$$S_f = \text{diag}(V_f)I_f^*$$

$$S_t = \text{diag}(V_t)I_t^*$$

όπου το $\text{diag}()$ μετατρέπει ένα διάνυσμα σε ένα διαγώνιο πίνακα με το καθορισμένο διάνυσμα στη διαγώνιο. [21]

5.2 Γενική Περιγραφή Σεναρίων Φορτίου

Μετά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης εξετάστηκαν κάποια σενάρια φορτίου, ώστε να εξετασθεί το κατά πόσο ανταποκρίνεται η εγκατάσταση του νέου Υποσταθμού ΥΤ στην περίπτωση πιθανών αυξήσεων της ζήτησης του φορτίου. Με τη βοήθεια του λογισμικού Matpower, πραγματοποιήθηκαν ροές φορτίου για το δίκτυο της **Εικόνα 4.1**, τόσο πριν την αύξηση του φορτίου για την εξακρίβωση της ομαλής λειτουργίας του εξεταζόμενου δικτύου, όσο και μετά από πιθανές αυξήσεις του φορτίου που επέφεραν προβλήματα Τάσης στους ζυγούς ή/και μεγάλες απώλειες ενεργού ισχύος. Τέλος, πραγματοποιήθηκαν ροές φορτίου μετά την εγκατάσταση του νέου Υποσταθμού ΥΤ με σκοπό τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας για την σωστή λειτουργία του δικτύου της εγκατάστασης αυτής.

Κατά τη διαδικασία των ροών φορτίου για τα διάφορα σενάρια φορτίου, χρησιμοποιήθηκαν Γεννήτριες μεγάλης παραγωγής ισχύος στη θέση των Υποσταθμών ΥΤ, καθώς το Matpower δεν υποστηρίζει ροές φορτίου για δίκτυα διανομής στα οποία πηγή τάσης και ισχύος αποτελούν οι Υποσταθμοί Υψηλής Τάσης. Επίσης, όλα τα σενάρια πραγματοποιήθηκαν για φορτία με συντελεστή $\cos\phi=0.95$.

Αξίζει στο σημείο αυτό να αναφερθεί, πως μετά την εγκατάσταση του Υποσταθμού *το αρχικό δίκτυο χωρίστηκε σε δύο επιμέρους δίκτυα*, ώστε να αποφευχθεί η δημιουργία βρόχου στο δίκτυο διανομής και να διατηρηθεί η ακτινικότητα των επιμέρους δικτύων διανομής.

Αρχικά εξετάστηκε η περίπτωση πλήρους φορτίου για το δίκτυο διανομής με τον υπάρχοντα Υποσταθμό. Έπειτα, πραγματοποιήθηκε αύξηση του φορτίου για την εξακρίβωση των τιμών ενεργού ισχύος για τις οποίες προκύπτουν προβλήματα πτώσης τάσης άνω του 10% ή απωλειών ενεργού ισχύος της τάξης του 5%. Τέλος, εξετάστηκε η ομαλή λειτουργία των νέων υπο-δικτύων που προέκυψαν από την εγκατάσταση του νέου Υποσταθμού ΥΤ.

Στη συνέχεια, θεωρήθηκε το αρχικό δίκτυο διανομής με την ύπαρξη διεσπαρμένης παραγωγής σε όλη την έκτασή του. Μετά την επιβεβαίωση της σωστής λειτουργίας του δικτύου, τόσο σε ελάχιστο φορτίο (για πιθανή υπέρταση άνω των ορίων στους ζυγούς), όσο και σε μέγιστο φορτίο, πραγματοποιήθηκε αύξηση του φορτίου για τον εντοπισμό των τιμών ενεργού ισχύος για τις οποίες προκύπτουν, και πάλι, προβλήματα πτώσης τάσης άνω του 10% ή απωλειών ενεργού ισχύος της τάξης του 5. Σε αυτό το σημείο, έγινε και σύγκριση των τιμών με την πρώτη περίπτωση, στην οποία δεν υπήρχε διεσπαρμένη παραγωγή. Ακολούθως, εξετάστηκε η ομαλή λειτουργία των νέων υπο-δικτύων που προέκυψαν από την εγκατάσταση του νέου Υποσταθμού ΥΤ.

5.3 Σενάριο 1: Αρχικό Δίκτυο Διανομής χωρίς διεσπαρμένη παραγωγή

5.3.1 Ροή φορτίου για το αρχικό δίκτυο διανομής

Αρχικά, όπως προαναφέρθηκε θεωρήθηκε το δίκτυο διανομής της *Εικόνα 4.1*, χωρίς την ύπαρξη διεσπαρμένης παραγωγής. Πραγματοποιήθηκε ροή φορτίου με τον υπάρχοντα Υποσταθμό *YT* σε πλήρες φορτίο με συντελεστή ισχύος $\cos\phi=0.95$, για τιμές ενεργού και άεργου ισχύος : $P_L = 4,186 MW$ και $Q_L = 2,749 MVar$. Τα αποτελέσματα της ροής φορτίου για αυτήν την περίπτωση, φαίνονται στον Πίνακας 5.1.

System Summary				
How many?		How much?	P (MW)	Q (MVar)
Buses	119	Total Gen Capacity	100.0	-30.0 to 30.0
Generators	1	On-line Capacity	100.0	-30.0 to 30.0
Committed Gens	1	Generation (actual)	4.3	2.9
Loads	64	Load	4.2	2.7
Fixed	64	Fixed	4.2	2.7
Dispatchable	0	Dispatchable	-0.0 of -0.0	-0.0
Shunts	0	Shunt (inj)	-0.0	0.0
Branches	118	Losses ($I^2 * Z$)	0.11	0.14
Transformers	0	Branch Charging (inj)	-	0.0
Inter-ties	0	Total Inter-tie Flow	0.0	0.0
Areas	1			
		Minimum	Maximum	
Voltage Magnitude	0.961 p.u. @ bus 96		1.000 p.u. @ bus 1	
Voltage Angle	-0.80 deg @ bus 119		0.00 deg @ bus 1	
P Losses ($I^2 * R$)	-		0.02 MW @ line 1-2	
Q Losses ($I^2 * X$)	-		0.03 MVar @ line 1-2	

Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου για το αρχικό δίκτυο χωρίς Δ.Π.

Όπως φαίνεται και στον Πίνακας 5.1 η πτώση τάσης των ζυγών είναι εντός ορίων (<10%) και οι απώλειες ενεργού ισχύος (0,107 MW) αντιστοιχούν στο 2.6% της συνολικής ενεργού ισχύος.

5.3.2 Ροές φορτίου για αύξηση του φορτίου του αρχικού δικτύου χωρίς Δ.Π.

Για το δίκτυο διανομής της **Εικόνα 4.1**, πραγματοποιήθηκε αύξηση φορτίου υπό την ύπαρξη μόνο του υπάρχοντος Υποσταθμού YT και διαπιστώθηκαν οι τιμές της ενεργού ισχύος για τις οποίες η πτώση τάσης στους ζυγούς του δικτύου ξεπερνά το 10% και οι απώλειες ενεργούς ισχύος αγγίζουν το 5%.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε ροή φορτίου για το δίκτυο με τον *υπάρχοντα Υποσταθμό YT* για *φορτίο 1.8 φορές μεγαλύτερο του Μέγιστου Φορτίου* του αρχικού δικτύου, με συντελεστή ισχύος $\cos\phi=0.95$., για τιμές ενεργού και άεργου ισχύος : $P_L = 7,535 MW (= 1,8 \times P_{max})$ και $Q_L = 4,948 MVar$. Τα αποτελέσματα της ροής φορτίου για αυτήν την περίπτωση, φαίνονται στον *Πίνακας 5.2*.

System Summary			
How many?		How much?	
		P (MW)	Q (MVar)
Buses	119	Total Gen Capacity	100.0
Generators	1	On-line Capacity	100.0
Committed Gens	1	Generation (actual)	7.9
Loads	64	Load	7.5
Fixed	64	Fixed	7.5
Dispatchable	0	Dispatchable	-0.0 of -0.0
Shunts	0	Shunt (inj)	-0.0
Branches	118	Losses (I ² * Z)	0.37
Transformers	0	Branch Charging (inj)	-
Inter-ties	0	Total Inter-tie Flow	0.0
Areas	1		
		Minimum	Maximum
Voltage Magnitude	0.927 p.u. @ bus 96	1.000 p.u. @ bus 1	
Voltage Angle	-1.50 deg @ bus 119	0.00 deg @ bus 1	
P Losses (I ² *R)	-	0.07 MW @ line 1-2	
Q Losses (I ² *X)	-	0.10 MVar @ line 1-2	

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου για το δίκτυο χωρίς Δ.Π. για $P_L = 1,8 \times P_{max}$

Όπως φαίνεται στον *Πίνακας 5.2* η *πτώση τάσης των ζυγών* είναι σχεδόν οριακά εντός ορίων (<10%), αλλά οι *απώλειες ενεργού ισχύος (0,368 MW)* αντιστοιχούν στο **4,9%** της συνολικής ενεργού ισχύος. Η λειτουργία, λοιπόν, του

δικτύου για αυτό το μέγεθος φορτίου δεν είναι ομαλή, κάτι που χρήζει αντιμετώπισης.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ροή φορτίου για το δίκτυο με τον *υπάρχοντα Υποσταθμό YT* για φορτίο 2,5 φορές μεγαλύτερο του Μέγιστου Φορτίου του αρχικού δικτύου, με συντελεστή ισχύος $\cos\phi=0.95$, για τιμές ενεργού και άεργου ισχύος : $P_L = 10,465 MW (= 2,5 \times P_{max})$ και $Q_L = 6,783 MVar$. Τα αποτελέσματα της ροής φορτίου για αυτήν την περίπτωση, φαίνονται στον Πίνακα 5.3

System Summary					
How many?		How much?		P (MW)	Q (MVar)
Buses	119	Total Gen Capacity	100.0	-30.0 to 30.0	
Generators	1	On-line Capacity	100.0	-30.0 to 30.0	
Committed Gens	1	Generation (actual)	11.2	7.9	
Loads	64	Load	10.5	6.9	
Fixed	64	Fixed	10.5	6.9	
Dispatchable	0	Dispatchable	-0.0 of -0.0	-0.0	
Shunts	0	Shunt (inj)	-0.0	0.0	
Branches	118	Losses (I ² * Z)	0.75	0.99	
Transformers	0	Branch Charging (inj)	-	0.0	
Inter-ties	0	Total Inter-tie Flow	0.0	0.0	
Areas	1				
		Minimum		Maximum	
Voltage Magnitude	0.896 p.u. @ bus 96		1.000 p.u. @ bus 1		
Voltage Angle	-2.15 deg @ bus 119		0.00 deg @ bus 1		
P Losses (I ² *R)	-		0.13 MW @ line 1-2		
Q Losses (I ² *X)	-		0.20 MVar @ line 1-2		

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου για το δίκτυο χωρίς Δ.Π. για $P_L = 2,5 \times P_{max}$

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.3 η *πτώση τάσης των ζυγών* είναι εκτός ορίων (>10%) και οι *απώλειες ενεργού ισχύος (0,368 MW)* αντιστοιχούν στο **7,2%** της συνολικής ενεργού ισχύος. Η λειτουργία, λοιπόν, του δικτύου για αυτό το μέγεθος φορτίου δεν είναι ομαλή κάτι που, επίσης, χρήζει αντιμετώπισης.

5.3.3 Αντιμετώπιση αύξησης φορτίου του αρχικού δικτύου χωρίς Δ.Π.

Για την αντιμετώπιση της παραπάνω αύξησης του φορτίου που οδηγεί στην μη ομαλή λειτουργία του δικτύου, εγκαθίσταται Υποσταθμός ΥΤ στο σημείο που έχει υποδείξει ο Γενετικός Αλγόριθμος και ελέγχεται η αποτελεσματικότητά του. Το αρχικό δίκτυο διαιρείται σε δύο επιμέρους υπο-δίκτυα, το ένα με αρχή τον Υποσταθμό ΥΤ του αρχικού δικτύου και το άλλο με αρχή το σημείο όπου δημιουργείται ο νέος Υποσταθμός ΥΤ. Το άθροισμα των φορτίων των δύο δικτύων είναι **7,535 MW** (η μικρότερη τιμή ενεργού ισχύος για το αρχικό δίκτυο, για την οποία προκύπτει πρόβλημα).

Για το *πρώτο υπο-δίκτυο* που δημιουργήθηκε με την εγκατάσταση του νέου Υποσταθμού ΥΤ και ξεκινά από τον προϋπάρχοντα Υποσταθμό ΥΤ, πραγματοποιήθηκε ροή φορτίου για το *πλήρες φορτίο* με συντελεστή ισχύος $\cos\phi=0.95$, για τιμές ενεργού και άεργου ισχύος : $P_L = 2,959 MW$ και $Q_L = 1,942 MVar$. Τα αποτελέσματα της ροής φορτίου για αυτήν την περίπτωση, φαίνονται στον Πίνακα 5.4.

System Summary				
How many?		How much?	P (MW)	Q (MVar)
Buses	51	Total Gen Capacity	100.0	-30.0 to 30.0
Generators	1	On-line Capacity	100.0	-30.0 to 30.0
Committed Gens	1	Generation (actual)	3.0	2.0
Loads	27	Load	3.0	1.9
Fixed	27	Fixed	3.0	1.9
Dispatchable	0	Dispatchable	-0.0 of -0.0	-0.0
Shunts	0	Shunt (inj)	-0.0	0.0
Branches	50	Losses (I ² * Z)	0.04	0.05
Transformers	0	Branch Charging (inj)	-	0.0
Inter-ties	0	Total Inter-tie Flow	0.0	0.0
Areas	1			
		Minimum		Maximum
Voltage Magnitude	0.981 p.u. @ bus 47		1.000 p.u. @ bus 1	
Voltage Angle	-0.38 deg @ bus 50		0.00 deg @ bus 1	
P Losses (I ² *R)	-		0.01 MW @ line 1-2	
Q Losses (I ² *X)	-		0.01 MVar @ line 1-2	

Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου για το πρώτο υπο-δίκτυο χωρίς Δ.Π.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.4, η *πτώση τάσης των ζυγών* είναι εντός ορίων (<10%) και οι *απώλειες ενεργού ισχύος (0,036 MW)* αντιστοιχούν στο **1,2%** της συνολικής ενεργού ισχύος. Η εύρυθμη λειτουργία, λοιπόν, του δικτύου για αυτό το υπο-δίκτυο, αποκαταστάθηκε.

Για το *δεύτερο υπο-δίκτυο* που δημιουργήθηκε με την εγκατάσταση του νέου Υποσταθμού ΥΤ και ξεκινά από τον νέο Υποσταθμό ΥΤ, πραγματοποιήθηκε ροή φορτίου για το *πλήρες φορτίο* με συντελεστή ισχύος $\cos\phi=0.95$, για τιμές ενεργού και άεργου ισχύος : $P_L = 4,576 MW$ και $Q_L = 3,006 MVar$. Τα αποτελέσματα της ροής φορτίου για αυτήν την περίπτωση, φαίνονται στον Πίνακα 5.5.

System Summary				
How many?		How much?	P (MW)	Q (MVar)
Buses	69	Total Gen Capacity	100.0	-30.0 to 30.0
Generators	1	On-line Capacity	100.0	-30.0 to 30.0
Committed Gens	1	Generation (actual)	4.6	3.1
Loads	37	Load	4.6	3.0
Fixed	37	Fixed	4.6	3.0
Dispatchable	0	Dispatchable	-0.0 of -0.0	-0.0
Shunts	0	Shunt (inj)	-0.0	0.0
Branches	68	Losses (I ² * Z)	0.05	0.06
Transformers	0	Branch Charging (inj)	-	0.0
Inter-ties	0	Total Inter-tie Flow	0.0	0.0
Areas	1			
		Minimum	Maximum	
Voltage Magnitude	0.983 p.u. @ bus 96		1.000 p.u. @ bus 120	
Voltage Angle	-0.36 deg @ bus 119		0.00 deg @ bus 120	
P Losses (I ² *R)	-		0.02 MW @ line 120-52	
Q Losses (I ² *X)	-		0.04 MVar @ line 120-52	

Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου για το δεύτερο υπο-δίκτυο χωρίς Δ.Π.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.5, η *πτώση τάσης των ζυγών* είναι εντός ορίων (<10%) και οι *απώλειες ενεργού ισχύος (0,047 MW)* αντιστοιχούν στο **1%** της συνολικής ενεργού ισχύος. Η εύρυθμη λειτουργία, λοιπόν, του δικτύου και για αυτό το υπο-δίκτυο, αποκαταστάθηκε.

Από τα παραπάνω, εξάγεται το συμπέρασμα ότι τα δύο υπο-δίκτυα που αποτελούν το αρχικό δίκτυο, ανταποκρίνονται επιτυχώς στην κάλυψη του φορτίου που αδυνατούσε να καλύψει επιτυχώς το αρχικό δίκτυο (αφού οι απώλειες ενεργού ισχύος έφταναν το 4,9%).

5.4 Σενάριο 2: Δίκτυο Διανομής με Διεσπαρμένη Παραγωγή

Για τις ανάγκες εκτέλεσης του σεναρίου αυτού χρησιμοποιήθηκε το αρχικό δίκτυο της *Εικόνα 4.1*. Στο δίκτυο αυτό προστέθηκε *διεσπαρμένη παραγωγή* από φωτοβολταϊκά σε όλη την έκτασή του *συνολικής ισχύος 1 MW* σε δέκα (10) ζυγούς των 100 kW, και επανεξετάστηκαν οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν και παραπάνω.

5.4.1 Ροή φορτίου για το Δίκτυο Διανομής με Δ.Π. σε ελάχιστο φορτίο

Για το νέο δίκτυο διανομής με διεσπαρμένη παραγωγή, πραγματοποιήθηκε ροή φορτίου με τον *υπάρχοντα Υποσταθμό YT σε ελάχιστο φορτίο* με συντελεστή ισχύος $\cos\phi=0.95.$, για τιμές ενεργού και άεργου ισχύος : $P_L = 1,047MW$ και $Q_L = 0,687MVar$. Κάτι τέτοιο συνέβη για την εξασφάλιση της εντός ορίων τάσης ακόμα και σε χαμηλό φορτίο. Τα αποτελέσματα της ροής φορτίου για αυτήν την περίπτωση, φαίνονται στον Πίνακα 5.1

System Summary					
How many?		How much?		P (MW)	Q (MVar)
Buses	129	Total Gen Capacity	100.0	-30.0 to 30.0	
Generators	1	On-line Capacity	100.0	-30.0 to 30.0	
Committed Gens	1	Generation (actual)	0.0	0.7	
Loads	74	Load	0.0	0.7	
Fixed	74	Fixed	0.0	0.7	
Dispatchable	0	Dispatchable	-0.0 of -0.0	-0.0	
Shunts	0	Shunt (inj)	-0.0	0.0	
Branches	128	Losses (I ² * Z)	0.00	0.00	
Transformers	0	Branch Charging (inj)	-	0.0	
Inter-ties	0	Total Inter-tie Flow	0.0	0.0	
Areas	1				
		Minimum		Maximum	
Voltage Magnitude	0.995 p.u. @ bus 96		1.000 p.u. @ bus 1		
Voltage Angle	0.00 deg @ bus 1		0.19 deg @ bus 129		
P Losses (I ² *R)	-		0.00 MW @ line 1-2		
Q Losses (I ² *X)	-		0.00 MVar @ line 1-2		

Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου για το αρχικό δίκτυο με Δ.Π. για ελάχιστο φορτίο

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.1, η *πτώση τάσης των ζυγών* είναι εντός ορίων (<10%) και οι *απώλειες ενεργού ισχύος (0,002 MW)* αντιστοιχούν στο **0,2%** της συνολικής ενεργού ισχύος.

5.4.2 Ροή φορτίου για το Δίκτυο Διανομής με Δ.Π. σε πλήρες φορτίο

Για το δίκτυο διανομής με διεσπαρμένη παραγωγή, πραγματοποιήθηκε ροή φορτίου με τον *υπάρχοντα Υποσταθμό YT* και σε *μέγιστο φορτίο* με συντελεστή ισχύος $\cos\phi=0.95$., για τιμές ενεργού και άεργου ισχύος : $P_L = 4,186MW$ και $Q_L = 2,749MVar$. Τα αποτελέσματα της ροής φορτίου για αυτήν την περίπτωση, φαίνονται στον Πίνακα 5.7.

System Summary				
How many?		How much?	P (MW)	Q (MVar)
Buses	129	Total Gen Capacity	100.0	-30.0 to 30.0
Generators	1	On-line Capacity	100.0	-30.0 to 30.0
Committed Gens	1	Generation (actual)	3.3	2.8
Loads	74	Load	3.2	2.7
Fixed	74	Fixed	3.2	2.7
Dispatchable	0	Dispatchable	-0.0 of -0.0	-0.0
Shunts	0	Shunt (inj)	-0.0	0.0
Branches	128	Losses (I ² * Z)	0.07	0.10
Transformers	0	Branch Charging (inj)	-	0.0
Inter-ties	0	Total Inter-tie Flow	0.0	0.0
Areas	1			
		Minimum	Maximum	
Voltage Magnitude	0.966 p.u. @ bus 96		1.000 p.u. @ bus 1	
Voltage Angle	-0.40 deg @ bus 114		0.00 deg @ bus 1	
P Losses (I ² *R)	-		0.01 MW @ line 1-2	
Q Losses (I ² *X)	-		0.02 MVar @ line 1-2	

Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου για το αρχικό δίκτυο με Δ.Π. για μέγιστο φορτίο

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.7, η *πτώση τάσης των ζυγών* είναι εντός ορίων (<10%) και οι *απώλειες ενεργού ισχύος (0,075 MW)* αντιστοιχούν στο **1,8%** της συνολικής ενεργού ισχύος.

5.4.3 Ροές φορτίου για αύξηση του φορτίου του δικτύου διανομής με Δ.Π.

Για το δίκτυο διανομής με *δισπαρμένη παραγωγή*, πραγματοποιήθηκε αύξηση φορτίου υπό την ύπαρξη μόνο του υπάρχοντος Υποσταθμού ΥΤ και διαπιστώθηκαν οι τιμές της ενεργού ισχύος για τις οποίες η πτώση τάσης στους ζυγούς του δικτύου ξεπερνά το 10% και οι απώλειες ενεργούς ισχύος αγγίζουν το 5%.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε ροή φορτίου για το δίκτυο με δισπαρμένη παραγωγή, με τον *υπάρχοντα Υποσταθμό ΥΤ* για *φορτίο 2,1 φορές μεγαλύτερο του Μέγιστου Φορτίου* του αρχικού δικτύου, με συντελεστή ισχύος $\cos\phi=0.95$, για τιμές ενεργού και άεργου ισχύος : $P_L = 8,791MW (= 2,1 \times P_{max})$ και $Q_L = 5,773MVar$. Τα αποτελέσματα της ροής φορτίου για αυτήν την περίπτωση, φαίνονται στον Πίνακα 5.8.

System Summary			
How many?		How much?	
		P (MW)	Q (MVar)
Buses	130	Total Gen Capacity	100.0
Generators	1	On-line Capacity	100.0
Committed Gens	1	Generation (actual)	8.2
Loads	74	Load	7.8
Fixed	74	Fixed	7.8
Dispatchable	0	Dispatchable	-0.0 of -0.0
Shunts	0	Shunt (inj)	-0.0
Branches	129	Losses (I ² * Z)	0.43
Transformers	0	Branch Charging (inj)	-
Inter-ties	0	Total Inter-tie Flow	0.0
Areas	1		
		Minimum	Maximum
Voltage Magnitude	0.920 p.u. @ bus 96	1.000 p.u. @ bus 1	
Voltage Angle	-1.35 deg @ bus 114	0.00 deg @ bus 1	
P Losses (I ² *R)	-	0.08 MW @ line 1-2	
Q Losses (I ² *X)	-	0.11 MVar @ line 1-2	

Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου για το δίκτυο με Δ.Π. για $P_L = 2,1 \times P_{max}$

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.8, η *πτώση τάσης των ζυγών* είναι σχεδόν οριακά εντός ορίων (<10%), αλλά οι *απώλειες ενεργού ισχύος (0,368 MW)* αντιστοιχούν στο **4,9%** της συνολικής ενεργού ισχύος. Η λειτουργία, λοιπόν, του δικτύου για αυτό το μέγεθος φορτίου δεν είναι ομαλή, κάτι που χρήζει αντιμετώπισης.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ροή φορτίου για το δίκτυο με τον *υπάρχοντα Υποσταθμό ΥΤ* για φορτίο 2,6 φορές μεγαλύτερο του *Μέγιστου Φορτίου* του αρχικού δικτύου, με συντελεστή ισχύος $\cos\phi=0.95$, για τιμές ενεργού και άεργου ισχύος : $P_L = 10,884MW (= 2,6 \times P_{max})$ και $Q_L = 7,147MVar$. Τα αποτελέσματα της ροής φορτίου για αυτήν την περίπτωση, φαίνονται στον *Πίνακα 5.9*.

System Summary			
How many?		How much?	
		P (MW)	Q (MVar)
Buses	129	Total Gen Capacity	100.0
Generators	1	On-line Capacity	100.0
Committed Gens	1	Generation (actual)	10.6
Loads	74	Load	9.9
Fixed	74	Fixed	9.9
Dispatchable	0	Dispatchable	-0.0 of -0.0
Shunts	0	Shunt (inj)	-0.0
Branches	128	Losses (I ² * Z)	0.71
Transformers	0	Branch Charging (inj)	-
Inter-ties	0	Total Inter-tie Flow	0.0
Areas	1		
		Minimum	Maximum
Voltage Magnitude	0.897 p.u. @ bus 96		1.000 p.u. @ bus 1
Voltage Angle	-1.81 deg @ bus 114		0.00 deg @ bus 1
P Losses (I ² *R)	-		0.13 MW @ line 1-2
Q Losses (I ² *X)	-		0.19 MVar @ line 1-2

Πίνακας 5.9: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου για το δίκτυο με Δ.Π. για $P_L = 2,6 \times P_{max}$

Όπως φαίνεται στον *Πίνακα 5.9*, η *πτώση τάσης των ζυγών* είναι εκτός ορίων ($>10\%$) και οι *απώλειες ενεργού ισχύος (0,711 MW)* αντιστοιχούν στο **6,5%** της συνολικής ενεργού ισχύος. Η λειτουργία, λοιπόν, του δικτύου για αυτό το μέγεθος φορτίου δεν είναι ομαλή κάτι που, επίσης, χρήζει αντιμετώπισης.

Σε αυτό το σημείο, αξίζει να σημειωθεί πως στην περίπτωση του δικτύου διανομής με Διεσπαρμένη Παραγωγή η τιμή ενεργού ισχύος για την οποία απαιτείται νέος Υποσταθμός ΥΤ για την σωστή κάλυψη του φορτίου, *είναι μεγαλύτερη* από την περίπτωση του ίδιου δικτύου χωρίς Διεσπαρμένη Παραγωγή.

5.4.4 Αντιμετώπιση αύξησης φορτίου του αρχικού δικτύου με Δ.Π.

Για την αντιμετώπιση της παραπάνω αύξησης του φορτίου που οδηγεί στην μη ομαλή λειτουργία του δικτύου, εγκαθίσταται Υποσταθμός ΥΤ στο σημείο που έχει υποδείξει ο Γενετικός Αλγόριθμος και ελέγχεται η αποτελεσματικότητά του, όπως και προηγουμένως. Το αρχικό δίκτυο διαιρείται σε δύο επιμέρους υπο-δίκτυα, το ένα με αρχή τον Υποσταθμό ΥΤ του αρχικού δικτύου και το άλλο με αρχή το σημείο όπου δημιουργείται ο νέος Υποσταθμός ΥΤ. Το άθροισμα των φορτίων των δύο δικτύων είναι **8,791 MW** (η μικρότερη τιμή ενεργού ισχύος για το αρχικό δίκτυο, για την οποία προκύπτει πρόβλημα).

Για το **πρώτο υπο-δίκτυο** που δημιουργήθηκε με την εγκατάσταση του νέου Υποσταθμού ΥΤ και ξεκινά από τον προϋπάρχοντα Υποσταθμό ΥΤ, πραγματοποιήθηκε ροή φορτίου για το **πλήρες φορτίο** με συντελεστή ισχύος **cosφ=0.95.**, για τιμές ενεργού και άεργου ισχύος : **$P_L = 3,452 MW$** και **$Q_L = 2,266 MVar$** . Τα αποτελέσματα της ροής φορτίου για αυτήν την περίπτωση, φαίνονται στον Πίνακα 5.10.

System Summary				
How many?		How much?	P (MW)	Q (MVar)
Buses	54	Total Gen Capacity	100.0	-30.0 to 30.0
Generators	1	On-line Capacity	100.0	-30.0 to 30.0
Committed Gens	1	Generation (actual)	3.2	2.3
Loads	30	Load	3.2	2.3
Fixed	30	Fixed	3.2	2.3
Dispatchable	0	Dispatchable	-0.0 of -0.0	-0.0
Shunts	0	Shunt (inj)	-0.0	0.0
Branches	53	Losses (I ² * Z)	0.04	0.06
Transformers	0	Branch Charging (inj)	-	0.0
Inter-ties	0	Total Inter-tie Flow	0.0	0.0
Areas	1			
		Minimum		Maximum
Voltage Magnitude	0.979 p.u. @ bus 47		1.000 p.u. @ bus 1	
Voltage Angle	-0.37 deg @ bus 47		0.00 deg @ bus 1	
P Losses (I ² *R)	-		0.01 MW @ line 1-2	
Q Losses (I ² *X)	-		0.02 MVar @ line 1-2	

Πίνακας 5.10: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου για το πρώτο υπο-δίκτυο με Δ.Π.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.10, η **πτώση τάσης των ζυγών** είναι εντός ορίων (<10%) και οι **απώλειες ενεργού ισχύος (0,045 MW)** αντιστοιχούν στο **1,3%**

της συνολικής ενεργού ισχύος. Η εύρυθμη λειτουργία, λοιπόν, του δικτύου για αυτό το υπο-δίκτυο, αποκαταστάθηκε.

Για το *δεύτερο υπο-δίκτυο* που δημιουργήθηκε με την εγκατάσταση του νέου Υποσταθμού ΥΤ και ξεκινά από τον νέο Υποσταθμό ΥΤ, πραγματοποιήθηκε ροή φορτίου για το *πλήρες φορτίο* με συντελεστή ισχύος $\cos\phi=0.95$., για τιμές ενεργού και άεργου ισχύος : $P_L = 5,338 MW$ και $Q_L = 3,507 MVar$. Τα αποτελέσματα της ροής φορτίου για αυτήν την περίπτωση, φαίνονται στον *Πίνακας 5.11*.

System Summary				
How many?		How much?	P (MW)	Q (MVar)
Buses	76	Total Gen Capacity	100.0	-30.0 to 30.0
Generators	1	On-line Capacity	100.0	-30.0 to 30.0
Committed Gens	1	Generation (actual)	4.7	3.6
Loads	44	Load	4.6	3.5
Fixed	44	Fixed	4.6	3.5
Dispatchable	0	Dispatchable	-0.0 of -0.0	-0.0
Shunts	0	Shunt (inj)	-0.0	0.0
Branches	75	Losses (I ² * Z)	0.05	0.07
Transformers	0	Branch Charging (inj)	-	0.0
Inter-ties	0	Total Inter-tie Flow	0.0	0.0
Areas	1			
		Minimum		Maximum
Voltage Magnitude	0.981 p.u. @ bus 96		1.000 p.u. @ bus 130	
Voltage Angle	-0.31 deg @ bus 114		0.00 deg @ bus 130	
P Losses (I ² *R)	-		0.03 MW @ line 130-52	
Q Losses (I ² *X)	-		0.04 MVar @ line 130-52	

Πίνακας 5.11: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου για το δεύτερο υπο-δίκτυο με Δ.Π.

Όπως φαίνεται στον *Πίνακας 5.11* ,η *πτώση τάσης των ζυγών* είναι εντός ορίων (<10%) και οι *απώλειες ενεργού ισχύος (0,054 MW)* αντιστοιχούν στο **1%** της συνολικής ενεργού ισχύος. Η εύρυθμη λειτουργία, λοιπόν, του δικτύου και για αυτό το υπο-δίκτυο, αποκαταστάθηκε.

Από τα παραπάνω, εξάγεται το συμπέρασμα ότι τα δύο υπο-δίκτυα που αποτελούν το αρχικό δίκτυο, *ανταποκρίνονται επιτυχώς* στην κάλυψη του φορτίου που αδυνατούσε να καλύψει επιτυχώς το αρχικό δίκτυο (*αφού οι απώλειες ενεργού ισχύος έφταναν το 4,9%*).

Συμπεράσματα

Η βελτιστοποίηση του προβλήματος τοποθέτησης ενός Υποσταθμού ΥΤ με χρήση του Γενετικού Αλγόριθμου αποδείχθηκε και στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής πάρα πολύ χρήσιμη, καθώς με αυτόν τον τρόπο προσεγγίστηκε η ολικά βέλτιστη λύση του προβλήματος, χωρίς τον έλεγχο όλων των πιθανών του λύσεων. Το να ελεγχθεί κάθε πιθανή θέση που θα μπορούσε να μπει ο νέος Υποσταθμός είναι αναμφίβολα κάτι πολύ χρονοβόρο, ιδιαίτερα σε προβλήματα πολύ μεγαλύτερου μεγέθους από το μέγεθος του προβλήματος της παρούσας εργασίας.

Επίσης, όπως φάνηκε στο 5^ο κεφάλαιο της εργασίας, όπου εξετάστηκαν πιθανά σενάρια αύξησης φορτίου για το ίδιο δίκτυο διανομής, με και χωρίς διεσπαρμένη παραγωγή, η ανάγκη εγκατάστασης νέου Υποσταθμού ΥΤ για την αποκατάσταση της ομαλής λειτουργίας του δικτύου σε μια πιθανή αύξηση φορτίου, προκύπτει για χαμηλότερες τιμές φορτίου για το δίκτυο χωρίς διεσπαρμένη παραγωγή απ' ότι για το ίδιο δίκτυο με την ύπαρξη διεσπαρμένης παραγωγής.

Βιβλιογραφία

- [1] Γ. Κ. Κ. Βουρνάς, Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Αθήνα, 2006.
- [2] Β. Παπαδιά, Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, τόμ. Ι, Αθήνα, 1985.
- [3] Μ. Παπαδόπουλου, Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, τόμ. Ι, Αθήνα, 1994.
- [4] «ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ Α.Ε.» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.deddie.gr/Default.aspx?id=30209&nt=18&lang=1>.
- [5] T. Goenen, Electrical Power Distribution System Engineering, New York, 1986.
- [6] L. Willis, Power Distribution Planning Reference Book, New York, 1997.
- [7] M. E. e. al., «Tutorial on Distribution Planning,» *IEEE Course Text EHO 361-6-PWR*, 1992.
- [8] H. W. a. J. Northcote-Green, «Comparison of Several Distribution Planning Techniques,» *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, p. 2310, April 1987.
- [9] R. Natarajan, Computer-Aided Power System Analysis, New York, 2002.
- [10] V. M. e. al., «Genetic Algorithms in Optimal Mutli-Stage Distribution Network Planning,» *IEEE Transactions on Power Systems*, p. 1927, November 1994.
- [11] J. K. Dillard, Transmission and Distribution Reference Book, Pittsburg, 1964.
- [12] J. Momah, Electric Power System Applications of Optimization, New York, 2001.
- [13] M. El-Kady, «Computer-Aided Planning of Distribution Substations and Primary Feeders,» *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, p. 1183, June 1984.
- [14] H. T. a. D. Wall, «Optimal Conductor Selection in Planning Radial Distribution Systems,» *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, p. 2310, April 1987.
- [15] J. E. D. N.-G. e. al., Research into Load Forecasting and Distribution Planning,

Palo Alto, 1979.

- [16] M. Mitchell, *An introduction to Genetic Algorithms*, 1998.
- [17] Σ. Λυκοθανάσης, *Γενετικοί Αλγόριθμοι και Εφαρμογές*, Πάτρα, 2001.
- [18] G. D.E., *GENETIC ALGORITHMS in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison Wesley Publishing Company, 1989.
- [19] T. M. I. N. M. U. S. *MATLAB and Optimization Toolbox Release 2011a*.
- [20] S. H. H. M. A. A. V. S. A. Sajad Najafi, «A Framework for Optimal Planning in Large Distribution Networks,» *IEEE Transactions on Power Systems*, May 2009.
- [21] C. E. M.-S. Ray D. Zimmerman, *Matpower 4.1 - User's Manual*, December 14, 2011.