



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Βέλτιστη Ανάπτυξη Συστημάτων Μεταφοράς
Ηλεκτρικής Ενέργειας με μεγάλη διείσδυση
Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Λαθιωτάκης Άρης

Επιβλέποντες : Καλαϊτζάκης Κωσταντίνος – Κανέλλος Φώτιος

Χανιά, Σεπτέμβριος 2014

Πρόλογος

Η παρούσα ερευνητική εργασία αποτελεί τη διπλωματική μου εργασία στα πλαίσια των σπουδών μου στο τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η εκπόνηση της ξεκίνησε το Σεπτέμβριο του 2013 και ολοκληρώθηκε τον Ιούνιο του 2014, υπό την επίβλεψη του Λέκτορα κ. Κανέλλου Φώτη και του Καθηγητή κ. Καλαϊτζάκη Κωνσταντίνου.

Αντικείμενο της εργασίας είναι η μελέτη της Βέλτιστης Ανάπτυξης Συστημάτων Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας με μεγάλη διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.

Με την ευκαιρία της ολοκλήρωσης της εργασίας μου, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου προς τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κανέλλο Φώτιο, για την ουσιαστική υποστήριξη, καθοδήγηση και εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα άλλα δυο μέλη της τριμελούς επιτροπής, τον Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Καλαϊτζάκη καθώς και τον κ. Γεώργιο Σταυρακάκη, για την βοήθεια, την υποστήριξη και την καθοδήγηση που μου παρέιχαν κατά την εκπόνηση της εργασίας μου αυτής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συναδέλφους και τους γονείς μου, που μου συμπαραστάθηκαν ηθικά αλλά και ψυχολογικά κατά τη διάρκεια της φοίτησης μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης.

Άρης Λαθιωτάκης

Περίληψη

Η παραγωγή ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Λόγο των προβλέψεων για εξάντληση των φυσικών πόρων ενέργειας και της ρύπανσης του περιβάλλοντος από τη βιομηχανική ανάπτυξη, εξετάζεται η εναλλακτική λύση χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός προγράμματος για την επέκταση συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με μεγάλη διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το πρόγραμμα αυτό εφαρμόστηκε στο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης.

Στην πορεία της εργασίας παρουσιάζονται συνοπτικά ιστορικά γεγονότα για την αγορά και το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στο πρόβλημα της επέκτασης του δικτύου και στους αλγορίθμους βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία. Τέλος γίνεται η παρουσίαση των δικτύων και η εφαρμογή του προγράμματος στα πειραματικά δίκτυα της εργασίας αυτής.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν, για την λύση του προβλήματος της επέκτασης των δικτύων μεταφοράς, είναι ο Γενετικός Αλγόριθμος και ο Αλγόριθμος Σμήνους Σωματιδίων. Για τη μοντελοποίηση της στοχαστικής παραγωγής των Α.Π.Ε. και της τυχαίας μελλοντικής αύξησης του φορτίου στα πειραματικά δίκτυα της εργασίας αυτής χρησιμοποιήθηκε πιθανοτική ροή φορτίου με προσομοίωση Monte Carlo. Αυτή εφαρμόζεται για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης υπό πιθανοτικούς περιορισμούς.

Το δίκτυο που εξετάστηκε και μοντελοποιήθηκε σε αυτή την εργασία είναι το υπάρχον σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης. Τα σενάρια που εξετάστηκαν ήταν σύμφωνα με αυτά που παρουσιάστηκαν στη μελέτη ανάπτυξης της Ρ.Α.Ε. και του Δ.Ε.Σ.Μ.Η.Ε. για διασύνδεση του δικτύου της Κρήτης με το ηπειρωτικό σύστημα της Ελλάδος.

Ο αναπτυχθείς αλγόριθμος υλοποιήθηκε σε περιβάλλον Matlab και χρησιμοποιήθηκε η ενσωματωμένη συνάρτηση του για το γενετικό αλγόριθμο. Ο αλγόριθμος του σμήνους σωματιδίων προήλθε από το πακέτο Psort Toolbox και για την επίλυση του προβλήματος ροής φορτίου χρησιμοποιήθηκε το πακέτο MatPower.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της εργασίας αυτής βοήθησε στην αξιολόγηση των μεθόδων καθώς και στη διατύπωση ορισμένων προτάσεων για την επέκταση του συστήματος μεταφοράς της Κρήτης.

Abstract

Energy production attracts worldwide a very high interest. Word of provisions for depletion of natural raw materials and environmental contamination from pollutants of industrial development, the solution considered the use of renewable sources for energy production.

The purpose of this thesis is to develop a program to expand power transmission systems with high penetration of renewable energy sources. The program was implemented in the experimental network fourteen bus of IEEE and transmission power network of Crete.

In the course of this thesis summarizes a few historical facts about the electricity market and the electricity system. Then refer to the problem of network expansion and optimization algorithms used in this thesis. Finally we present networks and program implementation in experimental networks.

The methods used for the solution of the problem of the expansion of power transmission networks are the Genetic Algorithm and Particle Swarm Algorithm. For the modeling of the stochastic production of RES and random future load increase in experimental networks of this thesis used probabilistic load flow with Monte Carlo simulation. This is used to solve optimization problems under probabilistic constraints.

The network were tested and modeled in this thesis is the existing electricity transmission network of Crete. The scenarios examined were consistent with those presented in the study development of RAE and DESMIE for interconnection network of Crete with the continental system of Greece.

The program was implemented in Matlab environment and used the built-in function for the genetic algorithm. The particle swarm algorithm derived from the pack Psopt Toolbox and for solving the load flow problem used the pack MatPower.

The comparison of the results of the program in two experimental networks of this work helped in the evaluation of methods and some proposals for extending the transmission system of Crete.

Λέξεις-Κλειδιά

Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας - Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας - Πιθανοτική Ροή Φορτίου - Monte Carlo – Προγραμματισμός Υπό Πιθανοτικούς Περιορισμούς – Γενετικός Αλγόριθμος – Αλγόριθμος Σμήνους Σωματιδίων - MatPower

Index Terms

Electric Power System - Renewable Energy Sources - Probabilistic Load Flow - Monte Carlo - Programming Under Probabilistic Constraints - Genetic Algorithm - Particle Swarm Algorithm - MatPower

Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ABSTRACT	4
Λ'ΕΞΕΙΣ-ΚΛΕΙΔ'ΙΑ	5
INDEX TERMS.....	5
ΠΕΡΙΕΧ'ΟΜΕΝΑ	6
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	7
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	8
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΞΙΣ'ΩΣΕΩΝ	8
ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓ'ΙΑ.....	11
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	12
1.1 ΑΠΕΛΕΥΘ'ΕΡΩΣΗ ΑΓΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝ'ΕΡΓΕΙΑΣ	12
1.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝ'ΕΡΓΕΙΑΣ.....	14
1.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ [Δ.Ε.Η., Α.Π.Ε., ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΕΙΣ]	16
1.4 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ.....	21
1.5 ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ, ΑΥΞΗΣΗ ΦΟΡΤΙΟΥ, ΕΙΣΑΓΩΓΗ Α.Π.Ε., ΑΝΑΓΚΕΣ ΔΙΚΤΥΟΥ, ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΕΙΣ	25
1.6 ΚΡ'ΗΤΗ.....	27
2 ΠΡ'ΟΒΛΗΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ'Υ ΕΠ'ΕΚΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ.....	32
2.1 Ρ'ΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ	32
2.2 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	
ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ 38	
2.3 ΠΙΘΑΝΟΤΙΚ'Η Ρ'ΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	40
2.4 ΑΝΑΝΕ'ΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝ'ΕΡΓΕΙΑΣ	41
3 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜ'ΟΣ.....	51
3.1 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠ'ΟΙΗΣΗ	51
3.2 ΓΕΝΕΤΙΚΟΣ ΑΛΓ'ΟΡΙΘΜΟΣ.....	54
3.3 ΑΛΓ'ΟΡΙΘΜΟΣ ΣΜ'ΗΝΟΥΣ ΣΩΜΑΤΙΔ'ΙΩΝ.....	59
3.4 MONTE CARLO	62
3.5 ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΠΟΙΝΗΣ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΟ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ	63
3.6 MATLAB.....	66
3.7 MATPOWER.....	66
4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ.....	73
4.1 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚ'Ο ΜΟΝΤΕΛΟ	73
4.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠ'ΟΙΗΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ.....	81
4.3 ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΑ ΣΕΝΑΡΙΑ.....	86
4.4 ΑΠΟΤΕΛ'ΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ.....	87
5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	102
6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	104

Κατάλογος Σχημάτων

Figure 1: Παραγωγή από Α.Π.Ε.	12
Figure 2: Συμβατικό Εργοστάσιο Παραγωγής Ενέργειας	16
Figure 3: Α.Π.Ε.	17
Figure 4: Ηλεκτρικές Διασυνδέσεις των νησιών του Αιγαίου (Σχεδιασμός)	20
Figure 5: Γραμμές Μεταφοράς	22
Figure 6: Χάρτης Περιοχών Α.Π.Ε. στη Κρήτη	27
Figure 7: Χάρτης υποψήφιων διασυνδέσεων Κρήτης με το Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα	30
Figure 8: Ισοδύναμο κύκλωμα π. Γ.Μ.	33
Figure 9: Φωτοβολταϊκό Πάρκο	42
Figure 10: Κατανομή Weibull ηλιακής ακτινοβολίας	44
Figure 11: Ισχύς εξόδου φωτοβολταϊκού	44
Figure 12: Αιολικό Πάρκο	45
Figure 13: Κατανομή Weibull ταχύτητας ανέμου	46
Figure 14: Ισχύς εξόδου ανεμογεννήτριας	47
Figure 15: Συσχέτιση μεταβλητών διασπορά	49
Figure 16: Συσχέτιση μεταβλητών σύγκριση	49
Figure 17: Κατανομές Gauss αύξησης φορτίου	50
Figure 18: Διάγραμμα ροής του Γενετικού Αλγορίθμου	55
Figure 19: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου του Σμήνους Σωματιδίων	60
Figure 20: Διάγραμμα ροής του κώδικα της εργασίας	80
Figure 21: Χάρτης Κρήτης με Α.Π.Ε.	81
Figure 22: Γ.Μ. Δικτύου Κρήτης	82
Figure 23: Δίκτυο Κρήτης από Matlab	85
Figure 24: Αποτελέσματα σύγκλισης GA στο δίκτυο της Κρήτης, σενάριο 1, χρόνος 6	89
Figure 25: Αποτελέσματα ροών στο δίκτυο της Κρήτης, σενάριο 1, χρόνος 6 GA	91
Figure 26: Αποτελέσματα ροών στο δίκτυο της Κρήτης, σενάριο 4, χρόνος 6 GA	92
Figure 27: Αποτελέσματα ροών στο δίκτυο της Κρήτης, σενάριο 1, χρόνος 6 PS	95
Figure 28: Αποτελέσματα ροών στο δίκτυο της Κρήτης, σενάριο 4, χρόνος 6 PS	96
Figure 29: Σύγκριση Αλγορίθμων και Σεναρίων βάσει του χρόνου	98
Figure 30: Σύγκριση Αλγορίθμων και Σεναρίων βάσει του κόστους	99
Figure 31: Αποτελέσματα σεναρίου 1 και 4 GA	100
Figure 32: Αποτελέσματα σεναρίου 1 και 4 PS	101

Κατάλογος Πινάκων

Table 1: Μήκη Εναέριων Γ.Μ.	22
Table 2: Διατομή Γ.Μ.	23
Table 3: Θερμικά Όρια Γ.Μ.	23
Table 4: Τεχνικά Ελάχιστα Συμβατικών Μονάδων Κρήτης 2004	28
Table 5: Σενάρια Ανάπτυξης Α.Π.Ε. Κρήτης [πηγή Ρ.Α.Ε.]	30
Table 6: Ζήτηση Ενέργειας - Μ.Ω. Αιχμή Κρήτης 2005-2040 [πηγή Δ.Ε.Η.]	31
Table 7: Πρόβλεψη Ζήτησης Μέγιστο-Ελάχιστο Κρήτης 2017-2040 [πηγή Δ.Ε.Η.]	31
Table 8: Υ/Σ δικτύου Κρήτης [πηγή Δ.Ε.Η., προβλέψεις για το έτος 2017]	82
Table 9: Μονάδες Παραγωγής δικτύου Κρήτης	83
Table 10: Στοιχεία Γ.Μ. πειράματος	84
Table 11: Υποψήφιες νέες Γ.Μ. δικτύου Κρήτης	84
Table 12: Γ.Μ. δικτύου Κρήτης	85
Table 13: Πειραματικά σενάρια φορτίου [πηγή Δ.Ε.Η.]	86
Table 14: Πειραματικά σενάρια Α.Π.Ε. [πηγή Ρ.Α.Ε.]	86
Table 15: Πειραματικά σενάρια διασυνδέσεων [πηγή Ρ.Α.Ε.]	86
Table 16: Μεταβλητές Προσομοίωσης Monte Carlo	87
Table 17: Αποτελέσματα Κρήτη G.A.I. M.C.	88
Table 18: Αποτελέσματα Κρήτη Ρ.Σ. M.C.	93

Κατάλογος Εξισώσεων

Equation 1: Αντίσταση Βάσης	34
Equation 2: Μετατροπή αντίστασης σε ανα μονάδα τιμή	34
Equation 3: Ισχύς ζυγού	34
Equation 4: Ενερός Ισχύς ζυγού	34
Equation 5: Άεργος Ισχύς ζυγού	35
Equation 6: Αντίσταση Γ.Μ.	35
Equation 7: Αγωγιμότητα Γ.Μ.	35
Equation 8: Ισοζύγιο ενεργού ισχύος	35
Equation 9: Ισοζύγιο άεργου ισχύος	35
Equation 10: Ενεργός ισχύς Γ.Μ.	35
Equation 11: Άεργος ισχύς Γ.Μ.	35
Equation 12: Ενεργός ισχύς Γ.Μ. AC μοντέλο	36
Equation 13: Άεργος ισχύς Γ.Μ. AC μοντέλο	36
Equation 14: Αγωγιμότητα Γ.Μ. AC μοντέλο	36
Equation 15: Ροή ισχύος Γ.Μ. DC μοντέλο	37
Equation 16: Αντίσταση Γ.Μ. DC μοντέλο	37
Equation 17: Αντικειμενική συνάρτηση TEP DC μοντέλο	38
Equation 18: Περιορισμός διατήρησης ισχύος σε κάθε ζυγό TEP DC μοντέλο (1)	38
Equation 19: Περιορισμός ροής ισχύος TEP DC μοντέλο (2)	38
Equation 20: Περιορισμός θερμικών ορίων Γ.Μ. TEP DC μοντέλο	38
Equation 21: Περιορισμός παραγωγής ενέργειας TEP DC μοντέλο	38
Equation 22: Περιορισμός κυκλωμάτων ανα Γ.Μ. TEP DC μοντέλο	38

Equation 23: Αντικειμενική συνάρτηση TEP μοντέλο μεταφοράς	39
Equation 24: Περιορισμός διατήρησης ισχύος σε κάθε ζυγό TEP μοντέλο μεταφοράς	39
Equation 25: Περιορισμός θερμικών ορίων Γ.Μ. TEP μοντέλο μεταφοράς	39
Equation 26: Περιορισμός παραγωγής ενέργειας TEP μοντέλο μεταφοράς	39
Equation 27: Περιορισμός κυκλωμάτων ανα Γ.Μ. TEP μοντέλο μεταφοράς	39
Equation 28: Αντικειμενική συνάρτηση C.C.P.	41
Equation 29: Περιορισμός αντικειμενικής συνάρτησης C.C.P.	41
Equation 30: Περιορισμός ανισότητας C.C.P.	41
Equation 31: Πικνότητα πυθανότητας ηλιακής ακτινοβολίας	43
Equation 32: Ισχύς εξόδου φωτοβολταϊκού	44
Equation 33: Πικνότητα πυθανότητας ταχύτητας ανέμου	46
Equation 34: Ισχύς εξόδου ανεμογεννήτριας	46
Equation 35: Συντελεστής γραμμικής συσχέτισης	47
Equation 36: Συνδιακύμανση μεταβλητών	47
Equation 37: Αποσύνθεση Cholesky	48
Equation 38: Συσχέτιση μεταβλητών	48
Equation 39: Στιγμιαία αύξηση φορτίου	50
Equation 40: Αύξηση φορτίου	50
Equation 41: Αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης	52
Equation 42: Ανισοτικοί περιορισμοί βελτιστοποίησης	52
Equation 43: Περιορισμοί ισότητας βελτιστοποίησης	52
Equation 44: Πρώτη και Δεύτερη παράγωγος	53
Equation 45: Χρομόσωμα Γ.Α.	56
Equation 46: Τιμή καταλληλότητας χρωμοσώματος Γ.Α.	56
Equation 47: Πιθανότητα επιλογής χρωμοσώματος Γ.Α.	57
Equation 48: Μετάλαξη γονιδίων χρωμοσώματος Γ.Α.	57
Equation 49: Αριθμός μεταλάξεων στον πληθυσμό	57
Equation 50: Ταχύτητα σωματιδίου Σ.Σ.	61
Equation 51: Θέση σωματιδίου Σ.Σ.	61
Equation 52: Αναμενόμενη τιμή M.C.	62
Equation 53: Προσέγγιση μεταβλητής σύμφωνα με την θεωρία μεγάλων αριθμών M.C.	62
Equation 54: Συνάρτηση ποινής - αθροιστική μορφή	64
Equation 55: Συνάρτηση ποινής – μορφή γινομένου	64
Equation 56: Γενική μορφή συνάρτησης εξωτερικής ποινής	64
Equation 57: Ανισοτικοί περιορισμοί συνάρτηση ποινής	65
Equation 58: Περιορισμοί ισότητας συνάρτηση ποινής	65
Equation 59: Πιθανοτικός περιορισμός συνάρτηση ποινής	65
Equation 60: Ισοζύγιο ενέργειας ζυγών MatPower	67
Equation 61: Ισοζύγιο ενεργού ισχύος MatPower	67
Equation 62: : Ισοζύγιο άεργου ισχύος MatPower	67
Equation 63: Ισοζύγιο ενέργειας ζυγών AC MatPower	67
Equation 64: Άγνωστο διάνυσμα AC MatPower	67
Equation 65: Αγωγιμότητα Γ.Μ. DC MatPower	68
Equation 66: Μέτρο τάσης ζυγού DC MatPower	68
Equation 67: Διαφορές των γωνιών των τάσεων Γ.Μ. DC MatPower	68
Equation 68: Άγνωστο διάνυσμα DC MatPower	68
Equation 69: Ισοζύγιο ροής ισχύος DC MatPower	69
Equation 70: Αντικειμενική συνάρτηση OPF AC MatPower	70
Equation 71: Περιορισμός διατήρησης ενέργειας ζυγών OPF AC MatPower ...	70

Equation 72: Περιορισμός θερμικών ορίων Γ.Μ. OPF AC MatPower.....	70
Equation 73: Ισχύς, Ρεύμα Γ.Μ. OPF AC MatPower	70
Equation 74: Περιορισμός γωνιών των τάσεων OPF AC MatPower	70
Equation 75: Περιορισμός των τάσεων των ζυγών OPF AC MatPower	70
Equation 76: Περιορισμός παραγωγής ενεργού ισχύος OPF AC MatPower....	71
Equation 77: Περιορισμός παραγωγής άεργου ισχύος OPF AC MatPower	71
Equation 78: Άγνωστο διάνυσμα OPF AC MatPower	71
Equation 79: Αντικειμενική συνάρτηση OPF DC MatPower	71
Equation 80: Περιορισμός διατήρησης ενέργειας ζυγών OPF DC MatPower ..	71
Equation 81: Περιορισμός θερμικών ορίων Γ.Μ. OPF DC MatPower	71
Equation 82: Περιορισμός γωνιών των τάσεων OPF DC MatPower	71
Equation 83: Περιορισμός παραγωγής ενεργού ισχύος OPF DC MatPower....	71
Equation 84: Άγνωστο διάνυσμα OPF DC MatPower	72
Equation 85: Αντικειμενική συνάρτηση TEP πειραμάτων	73
Equation 86: Πρώτη συνάρτηση ποινών πειραμάτων	74
Equation 87: Συνάρτηση ανισοτικών περιορισμών πειραμάτων	74
Equation 88: Πρώτη ποινή για την παραβίαση των ορίων	74
Equation 89: Πρώτη ποινή για την παραβίαση των ορίων κατά πολλαπλάσιο μέγεθος από αυτά	74
Equation 90: Συσχέτιση βαρύτητας όρων ποινής	75
Equation 91: Πρώτη ποινή για επιπλέον γραμμές	75
Equation 92: Δεύτερη συνάρτηση ποινών πειραμάτων	75
Equation 93: Δεύτερη ποινή για την παραβίαση των ορίων, ίση με $\frac{1}{4}$ του αρχικού κόστους	75
Equation 94: Δεύτερη ποινή για την παραβίαση των ορίων κατά πολλαπλάσιο μέγεθος από αυτά, ίση με $\frac{1}{4}$ του αρχικού κόστους	75
Equation 95: Δεύτερη ποινή για επιπλέον γραμμές, ίση με $\frac{1}{4}$ του αρχικού κόστους.....	75
Equation 96 : Πρώτη συνάρτηση ποινών πειραμάτων Monte Carlo	75
Equation 97: Ποινή για παραβίαση του πιθανοτικών περιορισμών	76
Equation 98: Δεύτερη συνάρτηση ποινών πειραμάτων Monte Carlo	76
Equation 99: Ηλιακή ακτινοβολία πειραμάτων.....	76
Equation 100: Έξοδος Φ/Β πειραμάτων	76
Equation 101: Ταχύτητα ανέμου πειραμάτων	76
Equation 102: Έξοδος Α/Γ πειραμάτων	77
Equation 103: Αύξηση φορτίου πειραμάτων.....	77

Ονοματολογία

Σ.Η.Ε.	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας
Α.Π.Ε.	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
Υ.Τ.	Υψηλή Τάση
Υ.Υ.Τ.	Υπερ Υψηλή Τάση
Μ.Τ.	Μέση Τάση
Χ.Τ.	Χαμηλή τάση
Γ.Μ.	Γραμμή Μεταφοράς
Κ.Υ.Τ.	Κέντρο Υπερυψηλής Τάσεως
Α/Γ	Ανεμογεννήτρια
Α/Π	Αιολικό Πάρκο
Φ/Β	Φωτοβολταϊκό
Σ.ΒΙΟ.	Συμπαγωγή από Βιομάζα – Βιοαέριο
Σ.Η.Θ.Υ.Α.	Συμπαγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης
Μ.ΥΗ.Σ.	Μικροί Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί
Δ.Π.	Διεσπαρμένη Παραγωγή
Μ.Δ.Π.	Μονάδα Διεσπαρμένης Παραγωγής
Ρ.Φ.	Ροή Φορτίου
Π.Ρ.Φ.	Πιθανοτική Ροή Φορτίου
Τ.Ε.	Τεχνικό Ελάχιστο
Σ.Φ.	Συντελεστής Φορτίου
Δ.Ε.Η.	Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού
Ρ.Α.Ε.	Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας
Δ.Ε.Σ.Μ.Η.Ε.	Διαχειριστής Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
Α.Δ.Μ.Η.Ε.	Ανεξάρτητο Διαχειριστή Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
Μ.Α.Σ.Μ.	Μελέτης Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς
Ε.Π.Ο.	Έγκριση Περιβαλλοντικών Όρων
Σ.Σ.	Σμήνους Σωματιδίων
Α.Σ.	Alternating Current
Δ.Σ.	Direct Current
Τ.Ε.Π.	Transmission Expansion Planning
Σ.Σ.Π.	Chance Constrained Programming
Μ.Σ.	Monte Carlo
Ρ.Σ.	Power Flow
Ο.Ρ.Σ.	Optimal Power Flow
Ρ.Ε.Σ.	Renewable Energy Sources
Ρ.Σ.	Particle Swarm
Γ.Α.	Genetic Algorithm

1 Εισαγωγή

1.1 Απελευθέρωση Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η παραγωγή ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του εξήντα βασιζόταν αποκλειστικά σε συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας, όπως οι λιγνιτικοί και πετρελαϊκοί, και σε λίγες περιοχές όπου αυτές είχαν τη δυνατότητα σε μεγάλους υδροηλεκτρικούς σταθμούς. Δυστυχώς όμως δεν είχε εκφραστεί ενδιαφέρον για μαζική παραγωγή ενέργειας και γενικά εύρεση εναλλακτικών μορφών ενέργειας εκτός της πυρηνικής.

Μετά την πρώτη παγκόσμια πετρελαϊκή κρίση του 1973 το ενδιαφέρον για τη χρήση Α.Π.Ε. αναθερμάνθηκε. Οι προβλέψεις για εξάντληση των φυσικών πρώτων υλών και οι δυσμενείς συνέπειες από τη ρύπανση του περιβάλλοντος οδήγησαν σε παγκόσμιες κινητοποιήσεις, όπως η Διάσκεψη του Ρίο Ντε Τζανέιρο 1992 και το Πρωτόκολλο του Κιότο 1997. Πλέον παγκόσμιο στόχο αποτελεί η προστασία του περιβάλλοντος και η αντιμετώπιση της ρύπανσης.

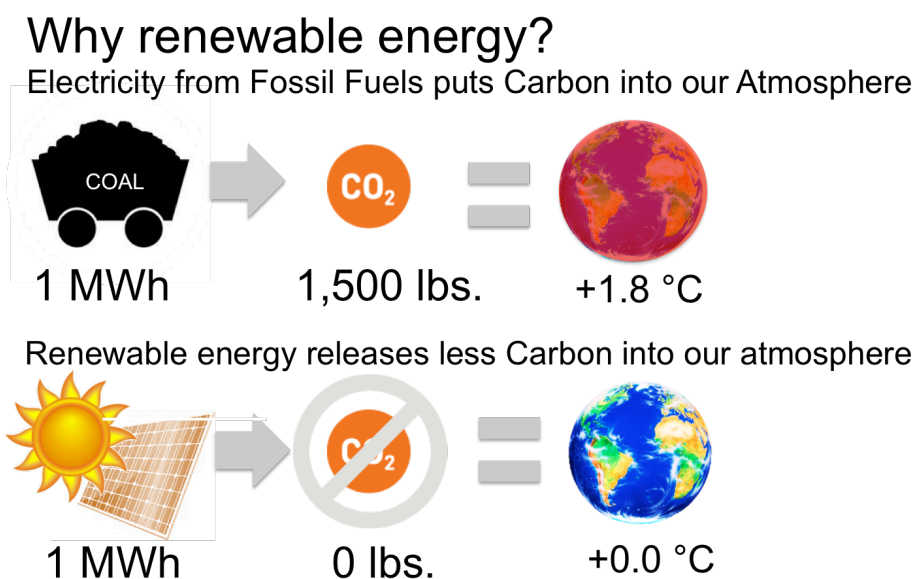


Figure 1: Παραγωγή από Α.Π.Ε.

Η Ελλάδα σαν χώρα είναι φτωχή σε φυσικούς πόρους (λιγνίτη και πετρέλαιο) σε σύγκριση με άλλες ευρωπαϊκές χώρες. Ο λιγνίτης που εξορύσσεται να είναι χαμηλής θερμογόνου δύναμης και παρόλα αυτά συνεισφέρει στο μεγαλύτερο ποσοστό των ενεργειακών αναγκών της χώρας. Ως εκ τούτου οι ενεργειακές ανάγκες της χώρας καλύπτονται από εισαγωγές πρώτων υλών (πετρέλαιο και φυσικό αέριο, από το 1998) και ενέργειας (μέσο διασυνδέσεων) από το εξωτερικό, με αποτέλεσμα την εξάρτηση της ενεργειακής πολιτικής της χώρας από την οικονομική πολιτική.

Από την άλλη πλευρά η Ελλάδα είναι πλούσια σε Α.Π.Ε. (αιολική, ηλιακή, γεωθερμική, ηλιοθερμική και υδροηλεκτρική) που θα μπορούσαν να καλύψουν πλήρως τις ενεργειακές ανάγκες. Το αιολικό δυναμικό σε περιοχές όπως Θράκη, Εύβοια, Λακωνία, Μαγνησία, τα νησιά του Αιγαίου και η Κρήτη παρουσιάζουν ενδιαφέρον για εκμετάλλευση με αιολικά πάρκα. Επίσης, η ηλιοφάνεια της χώρας προσφέρεται τις περισσότερες μέρες του έτους, για την παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά πάνελ.

Η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (Δ.Ε.Η.) με τον ιδρυτικό νόμο 1468/1950 πήρε το αποκλειστικό προνόμιο της παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στη χώρα, ενώ η διανομή παρέμεινε στις υφιστάμενες τότε δημοτικές, κοινοτικές ή ιδιωτικές εκμεταλλεύσεις. Το αποκλειστικό προνόμιο της διανομής το πήρε λίγο αργότερα με το νομοθετικό διάταγμα 3525/1956.

Η ρύθμιση για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και συμβατικά καύσιμα σε σταθμούς που ανήκουν σε φυσικά ή νομικά πρόσωπα θεσμοθετήθηκε από το νόμο 2244/1994. Όμως η απαρχή του ανοίγματος της αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας και η δημιουργία μιας ενιαίας αγοράς στην Ευρωπαϊκή Ένωση ήρθε το 1999 και ειδικά για την Ελλάδα το 2001 [1].

Το νομοθετικό πλαίσιο αυτό όριζε [1]:

- Απελευθέρωση του 30% της αγοράς των μεγάλων καταναλωτών ηλεκτρικής ενέργειας του διασυνδεδεμένου συστήματος. Στα νησιά η απελευθέρωση περιορίζεται μόνο στο άνοιγμα της παραγωγής στον ανταγωνισμό, δηλαδή η παραγωγή πωλείται αποκλειστικά στη Δ.Ε.Η..
- Δημιουργία ανεξάρτητης διοικητικής αρχής με αρμοδιότητες να ελέγχει τη λειτουργία της αγοράς και να γνωμοδοτεί τη χορήγηση αδειών, με την επωνυμία Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (Ρ.Α.Ε.).
- Δημιουργία ανώνυμης εταιρίας με αρμοδιότητες τη λειτουργία, εκμετάλλευση, συντήρηση και ανάπτυξη του συστήματος μεταφοράς και των διασυνδέσεων, με την επωνυμία Διαχειριστής Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (Δ.Ε.Σ.Μ.Η.Ε.).
- Η κυριότητα και η διαχείριση του δικτύου διανομής ανήκει στη Δ.Ε.Η..

Το 2004 αναγνωρίστηκε το δικαίωμα επιλογής προμηθευτή για όλους τους καταναλωτές πλην των οικιακών. Και η πλήρης απελευθέρωση της αγοράς ήρθε το 2007, με εξαίρεση τους καταναλωτές σε απομονωμένα μικρο-δίκτυα (μη διασυνδεδεμένο δίκτυο). Αυτοί θα μπορούσαν να χορηγηθούν με παρέκκλιση σύμφωνα με το κοινοτικό δίκαιο για την επιλογή άλλου προμηθευτή.

Συνήθως, ως και σήμερα, οι εγκαταστάσεις παραγωγής και μεταφοράς είναι οικονομικά εξαρτημένες μεταξύ τους και για αυτό το λόγο ο τεχνικός και οικονομικός σχεδιασμός των σταθμών παραγωγής, των γραμμών μεταφοράς και των κεντρικών υποσταθμών είναι ενιαίος. Εκτελούνταν από τον Δ.Ε.Σ.Μ.Η.Ε. και σε εξέλιξη σήμερα από τον Ανεξάρτητο Διαχειριστή Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (Α.Δ.Μ.Η.Ε.) Α.Ε.

Η διαδικασία μελέτης επέκτασης ενός δικτύου μεταφοράς συνήθως ακολουθούσε τις αποφάσεις επέκτασης του συστήματος παραγωγής, λαμβάνοντας υπόψιν την οικονομική επιβάρυνση του συστήματος μεταφοράς για την καλύτερη εξυπηρέτηση της νέας παραγωγής. Όμως μετά την απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας εντός και εκτός των συνόρων, το σύστημα μεταφοράς κατέχει πιο ξεχωριστό ρόλο.

Πλέον οι αποφάσεις που λαμβάνονται για την ανάπτυξη του συστήματος παραγωγής δε ταυτίζονται πάντα με την οικονομικότερα συμφέρουσα επέκταση του συστήματος μεταφοράς. Το σύστημα θα πρέπει να είναι σε θέση να μπορεί να συνδέσει όλες τις αδειοδοτημένες νέες μονάδες, χωρίς να απαιτείται επιπλέον ενίσχυση. Σε κάθε περίπτωση βέβαια, θα απαιτούνται οι γραμμές σύνδεσης από τον υποσταθμό ανύψωσης της κάθε μονάδας μέχρι το υφιστάμενο σύστημα.

Γενικά, η ικανότητα διακίνησης ενέργειας αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την ανάπτυξη εμπορικών συναλλαγών στον τομέα της ενέργειας. Σε επίπεδο χωρών, είναι το ίδιο σημαντικό, η ικανότητα μεταφοράς από και προς τα γειτονικά συστήματα και για αυτό στα πλαίσια της Μελέτης Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς (Μ.Α.Σ.Μ.) και διεθνών συνεργασιών (TEN - διασύνδεση με Τουρκία, ENTSO-E - ένωση νότιας Ευρώπης, κ.λ.π.) μελετώνται έργα ενίσχυσης και ανάπτυξης των διασυνδέσεων στην ευρύτερη περιοχή [2].

Μια σημαντική διασύνδεση που μελετάται είναι η διασύνδεση του ηλεκτρικού συστήματος της Κρήτης με το ηπειρωτικό σύστημα. Βασική παράμετρο αποτελεί το μέγεθος της παραγωγής από Α.Π.Ε. και ειδικότερα της αιολικής που θεωρείται ότι θα αναπτυχθεί στο νησί. Σε βάθος χρόνου το δυναμικό των Α.Π.Ε. υπολογίζεται ότι θα υπερκαλύψει τις ανάγκες του νησιού σε ηλεκτρική ενέργεια και ήδη υπάρχει επενδυτικό ενδιαφέρον από ιδιώτες. Παραμένει όμως το ερώτημα όσον αφορά στο ύψος και το ρυθμό ανάπτυξης των εγκαταστάσεων Α.Π.Ε. που θα καταστεί δυνατόν να πραγματοποιηθούν, λαμβάνοντας υπόψιν τις δυσκολίες στην απόκτηση των περιβαλλοντικών αδειών - εγκρίσεων (Έγκριση Περιβαλλοντικών Όρων, Ε.Π.Ο.) [3].

1.2 Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (Σ.Η.Ε.) ονομάζεται το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Κύριες προϋποθέσεις καλής λειτουργίας ενός Σ.Η.Ε. είναι να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τις ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, εξασφαλίζοντας σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδοσίας. Η τροφοδότηση των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια προϋποθέτει τρεις ξεχωριστές λειτουργίες του Σ.Η.Ε.:

- Την Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Τη Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας.
- Τη Διανομή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ηλεκτρική ενέργεια από το σημείο που θα παραχθεί μέχρι το σημείο που θα καταναλωθεί βρίσκεται σε μια συνεχή ροή και επειδή δεν μπορεί να αποθηκευτεί σε μεγάλες ποσότητες με οικονομικό τρόπο. Το αποτέλεσμα είναι ότι πρέπει να παράγεται τη στιγμή ακριβώς που χρειάζεται η κατανάλωσή της.

Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται στους σταθμούς παραγωγής. Κύριοι σταθμοί παραγωγής είναι θερμικοί και υδροηλεκτρικοί και τα τελευταία χρόνια αναπτύσσονται σταθμοί που βασίζονται σε Α.Π.Ε. όπως αιολικοί, ηλιακοί και γεωθερμικοί σταθμοί.

Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες ποσότητες από τους σταθμούς παραγωγής προς τις περιοχές κατανάλωσης γίνεται με τις γραμμές υψηλής και υπερυψηλής τάσης (Υ.Τ. και Υ.Υ.Τ.). Οι τάσεις αυτές μειώνουν τις απώλειες από την αντίσταση των γραμμών και προσφέρουν σταθερότητα στην τάση του δικτύου. Τροφοδοτούν κεντρικά σημεία του δικτύου, τους υποσταθμούς μεταφοράς, από όπου ξεκινούν τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης (Μ.Τ.) που διανέμουν την ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές δια μέσου των υποσταθμών διανομής και των γραμμών χαμηλής τάσης (Χ.Τ.).

Η δομή του συστήματος επηρεάζεται σημαντικά από το μέγεθος της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, τη χρονική μεταβολή κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου και από τη χωροταξική του κατανομή. Τα κυκλώματα που χρησιμοποιούνται στην πλειοψηφία είναι τριφασικά εναλλασσόμενου ρεύματος, συχνότητας 50 ή 60 Hz, αλλά χρησιμοποιούνται και κυκλώματα συνεχούς ρεύματος για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας. Η τάση λειτουργίας τους πρέπει να παραμένει κατά το δυνατόν σταθερή στην ονομαστική τιμή και τα φορτία που τα διαρρέουν να παραμένουν κάτω από τα θερμικά τους όρια. Το δίκτυο μεταφοράς και το δίκτυο διανομής μέσης τάσης έχουν τρεις αγωγούς φάσεων, ενώ το δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης διαθέτει ακόμα έναν ουδέτερο αγωγό.

Οι πελάτες που είναι συνδεδεμένοι στα δίκτυα υψηλής και μέσης τάσης είναι στην πλειονότητα τους βιομηχανικοί καταναλωτές, ενώ στα δίκτυα χαμηλής τάσης συνδέονται πελάτες οικιακής χρήσης και ένα μεγάλο μέρος των πελατών εμπορικής χρήσης [5].

Έτσι, η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας καθορίζει την ποσότητα των καυσίμων που χρειάζονται για τη λειτουργία των σταθμών παραγωγής, ενώ τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα της ζήτησης διαμορφώνουν το κόστος μιας επιχείρησης ηλεκτρισμού. Αυτό αυξάνεται προοδευτικά από την παραγωγή προς τη διανομή, καθώς μεσολαβούν πρόσθετες εγκαταστάσεις και υπηρεσίες. Το κόστος καταβάλλεται από τους καταναλωτές σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της ζήτησης τους (οικιακό, εμπορικό, αγροτικό, βιομηχανικό φορτίο), αλλά και με την τάση, με την οποία συνδέονται (υψηλή: συνδέονται μεγάλοι βιομηχανικοί καταναλωτές, μέση: συνδέονται μεγάλοι και μεσαίου μεγέθους καταναλωτές, χαμηλή: συνδέονται οικιακοί και εμπορικοί καταναλωτές) [1].

1.3 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας [Δ.Ε.Η., Α.Π.Ε., Διασυνδέσεις]

Στα Σ.Η.Ε. η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται κατά κύριο λόγο σε μεγάλες συγκεντρωμένες μονάδες παραγωγής, που τροφοδοτούν με ηλεκτρική ενέργεια το δίκτυο μεταφοράς Υ.Τ. [3].



Figure 2: Συμβατικό Εργοστάσιο Παραγωγής Ενέργειας

Στην Ελλάδα το διασυνδεδεμένο σύστημα παραγωγής της ηπειρωτικής χώρας περιλαμβάνει κυρίως λιγνιτικούς σταθμούς, που αποτελούν τη βάση του συστήματος [1]. Επίσης γίνονται εισαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας κυρίως για οικονομικούς λόγους, αφού κοστίζουν φθηνότερα από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ακριβές μονάδες, παρά από αδυναμία κάλυψης της ζήτησης από το σύστημα παραγωγής [3].

Παρόλα αυτά, τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί ιδιαίτερο ενδιαφέρον στη διασύνδεση μικρών μονάδων παραγωγής στο δίκτυο διανομής Μ.Τ.. Ντηζελογεννήτριες, παραγωγή από καύσιμα διαφόρων τύπων (άνθρακας, φυσικό αέριο κ.ά.), ανεμογεννήτριες (Α/Γ), φωτοβολταϊκά (Φ/Β), παραγωγή από βιομάζα - βιοαέριο (Σ.ΒΙΟ.), μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας υψηλής απόδοσης (Σ.Η.Θ.Υ.Α.) καθώς και μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί (Μ.ΥΗ.Σ.) μπορούν να συνδεθούν διάσπαρτα στο δίκτυο διανομής, κάτι που είναι γνωστό ως διεσπαρμένη παραγωγή (Δ.Π.). Σε μερικές ιδιαίτερες περιοχές (απομακρυσμένες ή απομονωμένες) που δεν υφίσταται δίκτυο Μ.Τ. ή η απόσταση είναι απαγορευτική για σύνδεση μέσω νέου δικτύου Μ.Τ., απαιτείται κατασκευή έργων μεταφοράς στην Υ.Τ. (γραμμές μεταφοράς και υποσταθμός), ώστε να είναι δυνατή η σύνδεση των μονάδων αυτών [2, 3].

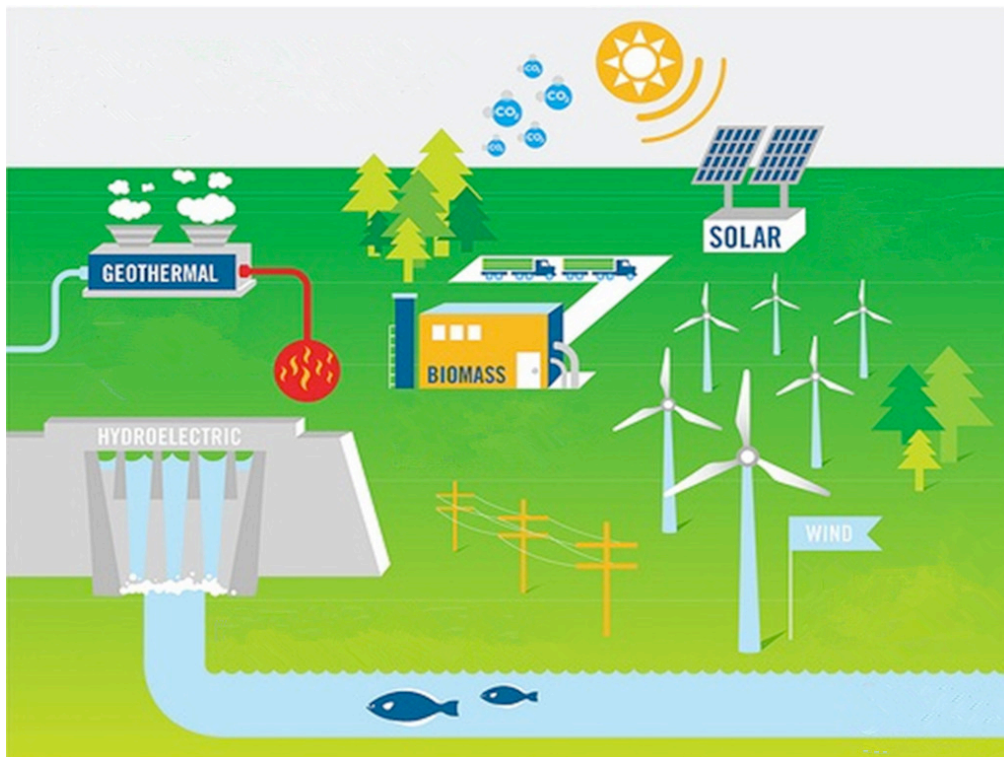


Figure 3: Α.Π.Ε.

Σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη της Δ.Π. παίζουν τόσο περιβαλλοντικοί, τεχνικοί και οικονομικοί παράγοντες όσο και η απελευθέρωση στο χώρο της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας στον τομέα των Α.Π.Ε., σε συνδυασμό με τον στόχο μείωσης της εκπομπής ρύπων και της εξοικονόμησης καυσίμων, έχει οδηγήσει στην αυξανόμενη διείσδυση αυτών στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας. Οι εκάστοτε κυβερνήσεις επιδοτούν την παραγωγή “πράσινης” ενέργειας, ώστε να επιτευχθούν οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί που προβλέπει η συνθήκη του Κιότο [3].

Έτσι τελευταία πολλές εταιρίες έχουν δραστηριοποιηθεί στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, κυρίως από Α.Π.Ε. και ιδιαίτερα στον τομέα της αιολικής ενέργειας [1].

Η διείσδυση των Α.Π.Ε. στο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας της χώρας αποτελεί υψηλής προτεραιότητας για το Δ.Ε.Σ.Μ.Η.Ε. ή Α.Δ.Μ.Η.Ε. σήμερα. Η προσπάθεια ενίσχυσης του συστήματος με στόχο τη μεταφορά της ισχύος των Α.Π.Ε. προς τα κέντρα κατανάλωσης ξεκίνησε το 2001. Αρκετά από τα μελετηθέντα έργα έχουν ήδη υλοποιηθεί μέσω των Μελετών Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς (Μ.Α.Σ.Μ.). Η προσπάθεια έχει ενταθεί την τελευταία περίοδο εν όψει των δεσμευτικών Εθνικών στόχων για αύξηση της συμμετοχής Α.Π.Ε. στο ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας.

Η ένταξη μεγάλης κλίμακας εναλλακτικών πηγών ενέργειας, ιδίως αιολικών πάρκων (Α/Π), στο Εθνικό σύστημα δημιουργεί βέβαια μια σειρά από τεχνικά προβλήματα που πρέπει να επιλυθούν, αλλά αναμένεται επίσης να έχει σημαντικές επιπτώσεις τόσο στη λειτουργία του ιδίου του συστήματος όσο και στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και ιδίως στην οικονομικότητα των νέων σταθμών παραγωγής συμβατικών καυσίμων (κυρίως στις μονάδες συνδυασμένου κύκλου με καύσιμο Φ.Α.) που θα ήθελαν να δραστηριοποιηθούν στην χώρα. Τα παραπάνω προβλήματα μελετώνται συστηματικά από τον Α.Δ.Μ.Η.Ε. σε συνεργασία με άλλους εμπλεκόμενους φορείς (Ρ.Α.Ε., ΥΠ.ΑΝ.).

Το κρίσιμο θέμα όμως που τίθεται είναι το όριο εγκατεστημένης ισχύος από μονάδες Α.Π.Ε., γιατί δεν είναι μόνο η μεταφορική ικανότητα του συστήματος, αλλά και η ασφαλής λειτουργία του συνδυασμένου συστήματος παραγωγής - μεταφοράς. Το όριο αυτό επιδρά στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και στη βιωσιμότητα των συμβατικών μονάδων και πρέπει να εξετασθεί γενικότερα σε συνδυασμό με τους Εθνικούς στόχους.

Τα προβλήματα που πρέπει να αναλυθούν σε βάθος αφορούν τη ρύθμιση φορτίου συχνότητας και προγράμματος διασυνδέσεων (LFC - AGC), τη δυνατότητα παρακολούθησης του φορτίου, την πρόβλεψη της παραγωγής των Α.Π.Ε., τη δυνατότητα έναρξης και σβέσης των συμβατικών μονάδων κ.λ.π., θέματα δηλαδή που εμφανίζονται λόγω της στοχαστικότητας της παραγωγής των Α.Π.Ε., ιδίως των Α/Π [2].

Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο που καθορίζει τη λειτουργία του Ελληνικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι η αύξηση της αιχμής του συστήματος ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες καθώς και η παράλληλη αύξηση της συνολικής ζήτησης σε ενέργεια (αν και τα τελευταία χρόνια αυτό δεν ισχύει λόγω της οικονομικής κρίσης). Επομένως χρειάζεται μια σωστή και λεπτομερής μελέτη επέκτασης του συστήματος μεταφοράς αλλά και ίσως ένα αποδοτικό πρόγραμμα διαχείρισης του φορτίου (DSM) ώστε η εγκατάσταση νέων μονάδων παραγωγής να γίνει όταν και όπου πραγματικά υπάρχει ανάγκη [3].

Στην περίπτωση των μη διασυνδεδεμένων νησιών το κόστος ηλεκτροδότησης τους με καύση πετρελαίου είναι υψηλό, συγκριτικά με το κόστος ηλεκτροδότησης των καταναλωτών στην ηπειρωτική χώρα (διασυνδεδεμένο δίκτυο), οπότε είναι αναγκαία η διερεύνηση της διασύνδεσης αυτών με την ηπειρωτική χώρα. Ένα ακόμα πλεονέκτημα που θα απέφερε η διασύνδεσή τους θα ήταν η δυνατότητα αξιοποίησης των ανανεώσιμων ενεργειακών πόρων των νησιών σε επίπεδα πέραν αυτών που επιβάλλουν οι λειτουργικοί περιορισμοί στα αυτόνομα συστήματα οι οποίοι περιορίζουν τη διείσδυση των πηγών αυτών σε περίπου 25-30% της μέγιστης ζήτησής τους. Επίσης, η νησιωτική χώρα παρουσιάζει, λόγω της θέσης της, πλούσιο δυναμικό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, και προκειμένου να συμβάλουν και αυτή στους στόχους της χώρας για μείωση των εκπεμπόμενων αέριων ρύπων, καθώς και για τη συμμετοχή των Α.Π.Ε. στο ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας (π.χ. κατ' ελάχιστον σε 29% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας έως το 2020) θα πρέπει να ενταχθεί και αυτή στο διασυνδεδεμένο δίκτυο [6].

Η Δ.Ε.Η. άρχισε να μελετά και να κατασκευάζει υποβρύχιες διασυνδέσεις των νησιών με το ηπειρωτικό σύστημα από την δεκαετία του '60, αρχικά με καλώδια 15kV, ακολούθως με καλώδια 66kV (Κέρκυρα), και στη συνέχεια με καλώδια 150kV (διασύνδεση υπολοίπων Ιονίων νήσων τη δεκαετία του '70). Οι αρχικές σκέψεις για την υποβρύχια ηλεκτρική διασύνδεση της Κρήτης με την ηπειρωτική Ελλάδα, οι οποίες ανάγονται στη δεκαετία του '70, προσέκρουσαν κυρίως στις τότε δυνατότητες της τεχνολογίας υποβρυχίων καλωδίων σε ότι αφορά το μήκος και το βάθος πόντισης. Η πρώτη μελέτη που έγινε το 1968 κατέληξε στο συμπέρασμα ότι, σύμφωνα με τα δεδομένα της εποχής, η διασύνδεση δεν ήταν οικονομικά συμφέρουσα για την επόμενη δεκαετία, ενώ το βάθος πόντισης των καλωδίων κρίθηκε τότε απαγορευτικό [3].



Figure 4: Ηλεκτρικές Διασυνδέσεις των νησιών του Αιγαίου (Σχεδιασμός)

Το ανεξάρτητο σύστημα παραγωγής της Κρήτης αποτελείται από τρεις αυτόνομους πετρελαϊκούς σταθμούς παραγωγής στα Λινοπεράματα, στα Χανιά και στον Αθερινόλακκο συνολικής ισχύος 730MW περίπου ενώ υπάρχουν 166MW εγκατεστημένης αιολικής ισχύος. (και ευδοκίμουν χιλιάδες άλλα για αξιοποίηση) [3].

1.4 Το Σύστημα Μεταφοράς

Το Σύστημα Μεταφοράς, αποτελείται από το διασυνδεδεμένο σύστημα του ηπειρωτικού τμήματος της χώρας και των διασυνδεδεμένων με αυτό νησιών στα επίπεδα υψηλής (150kV και 66kV) και υπερυψηλής τάσης (400kV) [2]. Πιο αναλυτικά περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υψηλής και υπερυψηλής τάσης, τους υποσταθμούς ζεύξεως των δικτύων αυτών και τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διάφορων επιπέδων τάσεων που μπορεί να χρησιμοποιούνται σε αυτό. Η διάταξη των δικτύων μεταφοράς είναι κατά κανόνα βροχοειδής, σε αντίθεση με την ακτινική δομή των δικτύων διανομής.

Το Σύστημα Μεταφοράς θα πρέπει να παρέχει κατά το δυνατόν σταθερή και συμμετρική τάση. Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται σε υψηλή τάση διότι αυτό συνεπάγεται μικρότερες απώλειες και συνεπώς οικονομικότερη λειτουργία. Αυτό συμβαίνει γιατί η ισχύς που μπορεί να μεταφέρει μία γραμμή είναι ανάλογη με το τετράγωνο της τάσης αυτής. Αλλά υπάρχει και μια μέγιστη τιμή της τάσης πάνω από την οποία γίνεται αντισυμβατική μια δεδομένη μεταφορά ισχύος και αντίστροφα, το κόστος μεταφοράς αυξάνεται όταν από μια γραμμή με μεγάλη ικανότητα μεταφοράς περνάει μικρή ποσότητα ισχύος.

1.4.1.1 Γραμμές Μεταφοράς (Γ.Μ.)

Για την επιλογή της γραμμής ένας παράγοντας είναι η διατομή του αγωγού γιατί αυτή καθορίζει το ρεύμα που μπορεί να τον διαρρεύσει, αφού η ωμική αντίσταση του είναι αντιστρόφως ανάλογη της διατομής του. Σε υψηλές θερμοκρασίες η μηχανική αντοχή του αγωγού μειώνεται και έτσι η αύξηση της θερμοκρασίας του, λόγω των ωμικών απωλειών, δε πρέπει να ξεπερνάει ένα όριο. Το αντίστοιχο ρεύμα, το οποίο προκαλεί αυτήν την αύξηση της θερμοκρασίας ονομάζεται ικανότητα μεταφοράς ρεύματος του αγωγού. Το όριο κάθε αγωγού όπως είναι φυσικό επηρεάζεται και από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, γιατί και αυτή μειώνει τη μηχανική αντοχή του. Έτσι σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος 40°C και πλήρους άπνοιας μειώνεται το ονομαστικό όριο του αγωγού κατά 20%.



Figure 5: Γραμμές Μεταφοράς

Ένας άλλος παράγοντας στις γραμμές μεταφοράς είναι τα κυκλώματα που περνάνε παράλληλα στην ίδια γραμμή. Μεγαλύτερη αξιοπιστία μεταφοράς παρουσιάζουν οι γραμμές απλού κυκλώματος, όταν δηλαδή οι ζώνες διέλευσης των γραμμών χωρίζονται μεταξύ τους με σημαντική απόσταση. Αλλά στην πράξη, συνήθως για οικονομικούς και χωροταξικούς λόγους, χρησιμοποιούνται γραμμές διπλού κυκλώματος, στις οποίες δυο ανεξάρτητα τριφασικά κυκλώματα περνάνε στον ίδιο πυλώνα. Επίσης είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν δυο ή και τρεις αγωγοί ανά φάση στην υψηλή και υπερυψηλή τάση για την μεταφορά ακόμα μεγαλύτερων ποσοτήτων ισχύος από την ίδια οδό διέλευσης [1].

Στο Ελληνικό σύστημα υπάρχουν γραμμές μεταφοράς (Γ.Μ.) υψηλής (150kV) και υπερυψηλής (400kV) τάσης διαφόρων ειδών και τύπων. Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται (προσεγγιστικά) τα συνολικά μήκη των εναέριων Γ.Μ. [2]:

ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΑΣΗΣ (kV)	ΚΥΚΛΩΜΑ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ Γ.Μ.	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ (km)
66	ΑΠΛΟ	E/66	40
150	ΑΠΛΟ	E/150	2590
150	ΑΠΛΟ	B/150	2020
150	ΔΙΠΛΟ	2B(E)/150	215
150	ΔΙΠΛΟ	2B/150	6065
400	ΑΠΛΟ	B' B'/400	210
400	ΔΙΠΛΟ	2B' B'/400	3414
400	ΑΠΛΟ	B' B' B'/400	285

Table 1: Μήκη Εναέριων Γ.Μ.

ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΑΣΗΣ (kV)	ΚΥΚΛΩΜΑ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ Γ.Μ.	ΑΡΙΘΜΟΣ Κ' ΔΙΑΤΟΜΗ ΑΓΩΓΩΝ ΑΝΑ ΦΑΣΗ (ΤΥΠΟΣ ACSR)	
			(MCM)	(mm ²)
66	ΑΠΛΟ	E/66	1x336.4	1x170
150	ΑΠΛΟ	E/150	1x336.4	1x170
150	ΑΠΛΟ	B/150	1x636.0	1x322
150	ΔΙΠΛΟ	2B/150	1x636.0	1x322
400	ΑΠΛΟ	B'B'/400	2x954.0	2x483
400	ΔΙΠΛΟ	2B'B'/400	2x954.0	2x483
400	ΑΠΛΟ	B'B'B'/400	3x954.0	3x483

Table 2: Διατομή Γ.Μ.

ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΑΣΗΣ (kV)	ΚΥΚΛΩΜΑ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ Γ.Μ.	ΘΕΡΜΙΚΟ ΟΡΙΟ ΥΠΟ ΟΝΟΜ. ΣΥΝΘΗΚΕΣ (MVA)	ΘΕΡΜΙΚΟ ΟΡΙΟ ΥΠΟ ΔΥΣΜΕΝΕΙΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ (MVA)
66	ΑΠΛΟ	E/66	60.5	36
150	ΑΠΛΟ	E/150	138	117
150	ΑΠΛΟ	B/150	202	169
150	ΔΙΠΛΟ	2B/150	2x202	2x169
400	ΑΠΛΟ	B'B'/400	1400	1100
400	ΔΙΠΛΟ	2B'B'/400	2x1400	2x1100
400	ΑΠΛΟ	B'B'B'/400	2000	1600

Table 3: Θερμικά Όρια Γ.Μ.

Το υπάρχον δίκτυο είναι εν μέρει πετपालιωμένο και χρειάζεται αρκετές επεκτάσεις καθώς και συντήρηση. Αυτές οι επεκτάσεις θα βοηθήσουν στην αύξηση της αξιοπιστίας του συνολικού συστήματος αλλά και στη σύνδεση στο Ελληνικό σύστημα νέων μονάδων παραγωγής από συμβατικές ή ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [1]. Επίσης, λόγω της αυξανόμενης διείσδυσης των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής (Μ.Δ.Π.) στα δίκτυα διανομής και μεταφοράς, πλέον τα δίκτυα αυτά δεν είναι παθητικά, για την τροφοδότηση μόνο φορτίων, αλλά ενεργά με ροές ισχύος και τάσεις που καθορίζονται τόσο από την παραγωγή όσο και από τα φορτία.

Παρόλα αυτά η σύνδεση των διαφόρων τύπων Μ.Δ.Π. στα δίκτυα πρέπει να γίνεται με τέτοιον τρόπο, ώστε να διασφαλίζεται η σωστή λειτουργία των Σ.Η.Ε.. Αυτό επιτυγχάνεται με την τήρηση των τεχνικών περιορισμών, που επιβάλλουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δικτύου, και με την οικονομικότερη λειτουργία του δικτύου, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως τα κόστη από την εγκατάσταση, τη συντήρηση και τη λειτουργία των Μ.Δ.Π., όπως και το κόστος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας [5].

1.4.1.2 Κριτήρια Σχεδιασμού Συστήματος - Ασφάλεια

Η ανάπτυξη του συστήματος μεταφοράς σχεδιάζεται με στόχο την ικανοποίηση των απαιτήσεων ασφάλειας που καθορίζονται στον Κ.Δ.Σ. & Σ.Η.Ε., καθώς και της αύξησης των δυνατοτήτων διακίνησης ενέργειας, προς και από τους κόμβους του συστήματος, αλλά και προς και από τα γειτονικά συστήματα.

Στα πλαίσια της εκτίμησης του βαθμού ικανοποίησης των κριτηρίων ασφαλούς λειτουργίας του συστήματος, ελέγχεται μια σειρά από παραμέτρους για την εκτίμηση των λειτουργικών καταστάσεων και την απόκριση του συστήματος σε συνθήκες διαταραχών. Για τον σκοπό αυτό, στα πλαίσια του προγράμματος ανάπτυξης του συστήματος εκπονούνται οι ακόλουθες μελέτες:

- **Μελέτη ανάλυσης στατικής ασφάλειας:** Αναλύεται η συμπεριφορά του συστήματος στη μόνιμη κατάσταση (μελέτες ροής φορτίου) σε συνθήκες μέγιστου και ελάχιστου φορτίου, σύμφωνα με τα κριτήρια N (κανονική λειτουργία με διαθέσιμα όλα τα στοιχεία του συστήματος) και N-1 (απώλεια ενός βασικού στοιχείου του συστήματος, όπως Γ.Μ. ή μονάδα παραγωγής). Τα κριτήρια καλής και ασφαλούς λειτουργίας που καλύπτουν τις απαιτήσεις του Κ.Δ.Σ. & Σ.Η.Ε., είναι τα εξής [2]:
 - Τα επίπεδα τάσεως στους ζυγούς Υ.Τ. και Υ.Υ.Τ. του συστήματος απαιτείται να διατηρούνται εντός των παρακάτω ορίων:
 - $\pm 5\%$ της ονομαστικής τιμής σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας (N).
 - $\pm 10\%$ της ονομαστικής τιμής σε έκτακτες συνθήκες λειτουργίας (N-1).
 - Οι φορτίσεις των Γ.Μ. να είναι κάτω από τα θερμικά τους όρια, τόσο σε κανονικές (N), όσο και σε έκτακτες (N-1) συνθήκες λειτουργίας. Επειδή το μέγιστο φορτίο του συστήματος εμφανίζεται κατά τη θερινή περίοδο, στις μελέτες ανάλυσης στατικής ασφάλειας λαμβάνονται υπόψη τα θερινά όρια λειτουργίας.
- **Μελέτες στατικής ευστάθειας:** Αναλύεται η συμπεριφορά του συστήματος σε περιπτώσεις μικρών μεταβολών καταστάσεων, όπως μεταβολές στο φορτίο και την τοπολογία για την ανίχνευση τυχόν ταλαντώσεων χαμηλής συχνότητας. Οι μελέτες αυτές, επειδή απαιτούν τη μοντελοποίηση του συνολικού Ευρωπαϊκού συστήματος, γίνονται σε συνεργασία με το Διαχειριστή Συστήματος των Ευρωπαϊκών Χωρών (ENTSO-E).
- **Μελέτες μεταβατικής ευστάθειας:** Ελέγχεται η ικανότητα του συστήματος να επανέλθει σε κανονική κατάσταση λειτουργίας μετά από μεγάλες και κρίσιμες διαταραχές, όπως:
 - Απώλεια μονάδας παραγωγής.
 - Σφάλματα σε Γ.Μ. ή ζυγούς Υ/Σ ή ΚΥΤ. Ελέγχεται επίσης, εάν μετά τη διαταραχή οι γεννήτριες παραμένουν σε συγχρονισμό ή αποσυγχρονίζονται.
- **Μελέτες βραχυκυκλωμάτων:** Υπολογίζονται οι μέγιστες τιμές ρευμάτων βραχυκυκλώσεως σε όλους τους ζυγούς του συστήματος, σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60909. Ελέγχεται αν η μέγιστη υπομεταβατική στάθμη βραχυκυκλώσεως υπερβαίνει το 90% εκείνης που προβλέπεται στις προδιαγραφές του εξοπλισμού. Το παραπάνω αποτελεί και ένα βασικό κριτήριο σχεδιασμού του εξοπλισμού Υ/Σ και ΚΥΤ σύμφωνα με τον Κ.Δ.Σ. & Σ.Η.Ε.

1.4.1.3 Αβεβαιότητες στα Σ.Η.Ε.

Ο βέλτιστος σχεδιασμός των Σ.Η.Ε. με μεγάλη διείσδυση Μ.Δ.Π. στα δίκτυα διανομής και μεταφοράς γίνεται ακόμα πιο περίπλοκος, αν ληφθούν υπόψη οι αβεβαιότητες που εισάγουν οι παράγοντες στοχαστικής φύσης, όπως η αύξηση του φορτίου των ζυγών του δικτύου, η ισχύς εξόδου των Α.Π.Ε. (ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών), η αύξηση του κόστους των καυσίμων και η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως, λόγω της στοχαστικής φύσης των παραγόντων, όπως η ταχύτητα του ανέμου, που επηρεάζει άμεσα την ισχύ εξόδου των Α/Γ και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, από την οποία εξαρτάται η ισχύς εξόδου των Φ/Β, ο βέλτιστος σχεδιασμός πρέπει να γίνει με κάποιο επίπεδο εμπιστοσύνης.

Για αυτό τον λόγο, χρησιμοποιούνται εργαλεία στατιστικής και πιθανοτήτων για την άρτια διατύπωση των μαθηματικών μοντέλων που περιγράφουν τη λειτουργία των Σ.Η.Ε.. Πλέον, δεν αρκεί μια απλή ροή φορτίου (Ρ.Φ.) για την ανάλυση ενός Σ.Η.Ε., αλλά χρειάζεται η επίλυση πολλών απλών Ρ.Φ. για διάφορους συνδυασμούς τιμών των στοχαστικών μεταβλητών, δηλαδή ανάλυση με πιθανοτική ροή φορτίου (Π.Ρ.Φ.) [5].

1.5 Επέκταση δικτύου, αύξηση φορτίου, εισαγωγή Α.Π.Ε., ανάγκες δικτύου, διασυνδέσεις

Ο.Δ.Μ.Η.Ε. σήμερα δημοσιεύει τη Μελέτη Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς (Μ.Α.Σ.Μ.). Αυτή σκοπεύει στη διαμόρφωση ενός εμπεριστατωμένου προγράμματος έργων ανάπτυξης του συστήματος που αφορά την επόμενη πενταετία, ώστε η λειτουργία του συστήματος να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις που καθορίζονται στον Κ.Δ.Σ. & Σ.Η.Ε.

Η Μ.Α.Σ.Μ. περιλαμβάνει την περιγραφή και το χρονικό προγραμματισμό των έργων ανάπτυξης του συστήματος που αφορούν:

- Τις αναγκαίες σε βάθος ενισχύσεις του συστήματος, όπως νέες γραμμές μεταφοράς (Γ.Μ.), αναβαθμίσεις Γ.Μ. και νέα κέντρα υπερυψηλής τάσεως (Κ.Υ.Τ.) ή επεκτάσεις υφιστάμενων Κ.Υ.Τ. που απαιτούνται για την ασφαλή διακίνηση της ισχύος που προβλέπεται για την υπόψη χρονική περίοδο.
- Τα αναγκαία έργα βελτίωσης της λειτουργίας και της οικονομικότητας του συστήματος, όπως ενισχύσεις των υφιστάμενων Κ.Υ.Τ. και κατασκευή νέων Γ.Μ. για τη βέλτιστη εξυπηρέτηση των αναγκών των χρηστών του συστήματος.
- Την ένταξη στο σύστημα ή και την αναβάθμιση νέων Γ.Μ. με γειτονικές χώρες.

- Τα έργα σύνδεσης στο σύστημα (Γ.Μ. και υποσταθμοί) που απαιτούνται για την ένταξη των νέων σταθμών παραγωγής (Δ.Ε.Η. ή ιδιωτών) και των νέων καταναλωτών Υ.Τ. (πελάτες Υ.Τ. και διαχειριστής δικτύου), για τα οποία έχουν ήδη εκπονηθεί σχετικές μελέτες σύνδεσης.

Όσον αφορά τα έργα επέκτασης του διασυνδεδεμένου συστήματος, που έχουν προγραμματισθεί για να εξυπηρετήσουν την ένταξη νέων μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε., δεν αφορούν μόνο την ενίσχυση των δικτύων μεταφοράς, αλλά απαιτούν και άλλες δράσεις (στο λειτουργικό κυρίως επίπεδο) ώστε να εξασφαλίζεται η ασφαλής και αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος. Ο σχεδιασμός των έργων έχει γίνει λαμβάνοντας υπόψη:

- Τις απαιτήσεις ασφαλείας του συστήματος.
- Το εφικτό της κατασκευής των έργων.
- Τις απαιτούμενες λειτουργικές συνθήκες των εγκαταστάσεων των ανεξάρτητων παραγωγών, ώστε να εξασφαλίζεται η απρόσκοπτη λειτουργία των μονάδων Α.Π.Ε..
- Την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών οχλήσεων από την κατασκευή των έργων.
- Την ελαχιστοποίηση των απωλειών μεταφοράς της ισχύος των μονάδων Α.Π.Ε. μέχρι τα όρια του συστήματος.

Όμως λόγω του μεγάλου μεγέθους των συνδεδεμένων Α/Π (συνήθως >20 MW έως 50 MW), αυτά δεν θεωρείται ότι αποτελούν διεσπαρμένη παραγωγή, αλλά συνδέονται συνήθως στο σύστημα μέσω υποσταθμών 20/150 kV. Σε πολλές περιπτώσεις επιλέγεται η κατασκευή των Υ/Σ σε γήπεδα που βρίσκονται στη ζώνη όδευσης των Γ.Μ. Υ.Τ. μέσω γραμμών μέσης τάσης (Μ.Τ.), για λόγους μείωσης του κόστους διασύνδεσης, αδυναμίας εκτέλεσης έργων Υ.Τ. στην περιοχή του Α/Π αλλά και κυρίως, για λόγους ταχύτερης υλοποίησης των έργων διασύνδεσης. Στη Μ.Τ. ο διαχειριστής δικτύου συνδέει μόνον Α/Π και άλλα Α.Π.Ε. μικρής ισχύος.

Ένα μέτρο που θα διευκόλυνε την ταχύτερη ένταξη μονάδων Α.Π.Ε. συνίσταται στην υιοθέτηση ενός υψηλότερου επιπέδου τάσεως στα δίκτυα Μ.Τ. (κατά το πρότυπο άλλων χωρών, π.χ. 33 kV), που θα επέτρεπε τη διασύνδεση μονάδων μεγάλης ισχύος μέσω δικτύων Μ.Τ. (με σημαντικά ευχερέστερη περιβαλλοντική αδειοδότηση), μειώνοντας τις ανάγκες κατασκευής νέων Γ.Μ. Υ.Τ. 150 kV [2].

1.6 Κρήτη

Τις τελευταίες δεκαετίες το ενεργειακό σύστημα της Κρήτης παρουσιάζει σημαντικά προβλήματα, που οφείλονται στην οριακή κάλυψη των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια του νησιού κατά τους θερινούς μήνες και στο ιδιαίτερα υψηλό κόστος παραγωγής των μονάδων του νησιού, οι οποίες χρησιμοποιούν ως καύσιμο πετρέλαιο, ενώ οι περισσότερες από αυτές είναι παλαιές μονάδες με χαμηλό βαθμό απόδοσης, μειωμένη διαθεσιμότητα και σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα. Επιπλέον, η μέχρι σήμερα διείσδυση των Α.Π.Ε. στο μείγμα ηλεκτροπαραγωγής του νησιού είναι μάλλον περιορισμένη, σε σχέση με το διαθέσιμο πλούσιο αιολικό και ηλιακό δυναμικό του, γεγονός που οφείλεται στα σημαντικά προβλήματα ευστάθειας που μπορεί να δημιουργήσει η υψηλή διείσδυση Α.Π.Ε. σε ένα απομονωμένο ηλεκτρικό σύστημα όπως αυτό της Κρήτης [3].

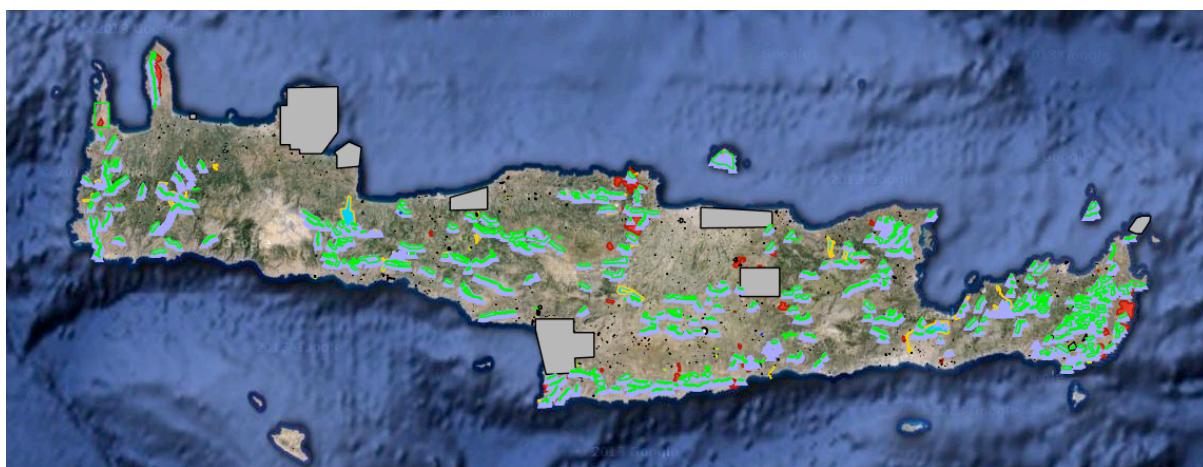


Figure 6: Χάρτης Περιοχών Α.Π.Ε. στη Κρήτη

Ένα κομμάτι του προβλήματος που παρουσιάζουν οι Α.Π.Ε. στο σύστημα της Κρήτης, οφείλεται στην φόρτιση των αιολικών πάρκων (Α/Π) και αυτό συνοψίζεται σε δυο παραμέτρους.

Η πρώτη αφορά τη φόρτιση των Α/Π, στην περιοχή των ελάχιστων φορτίων του συστήματος, σε σχέση με το άθροισμα, των τεχνικών ελαχίστων φορτίων, των συμβατικών μονάδων βάσεως. Λόγω αυτού του περιορισμού τα τελευταία χρόνια, ιδίως τους χειμερινούς μήνες κατά τη διάρκεια του ελάχιστου φορτίου του εικοσιτετραώρου, περιορίζεται η αιολική διείσδυση στα επίπεδα του 10% του τρέχοντος φορτίου, με το δεδομένο ότι κάποια συμβατική μονάδα, συνήθως ο συνδυασμένος κύκλος, πρέπει να ευρίσκεται σε περιοχή φόρτισης περί το τεχνικό του ελάχιστο, για να μπορεί να ρυθμίζει τη συχνότητα του συστήματος. Δηλαδή να αντισταθμίζει τη στοχαστική φύση της παραγωγής των Α/Π αφ'ενός και τη ζήτηση φορτίου του συστήματος αφ'ετέρου.

Λύση σε αυτή την παράμετρο του προβλήματος θα έδινε η διασύνδεση του ηλεκτρικού συστήματος της Κρήτης με το ηπειρωτικό σύστημα της χώρας, ώστε να μπορούσε να απορροφηθεί όλη η αιολική ενέργεια, χωρίς να υπάρχουν τεχνητά όρια διείσδυσης λόγω του απομονωμένου συστήματός της.

ΜΗΝΑΣ (ΕΤΟΣ 2004)	ΕΛΑΧΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ	T.E. ΜΟΝΑΔΩΝ	ΔΙΑΦΟΡΑ (ΦΟΡΤΙΟ. - T.E.)	ΦΟΡΤΗΣΗ Α/Π (%)
ΙΑΝ	158.4	115	43.4	27.40
ΦΕΒ	140.4	115	25.4	18.09
ΜΑΡ	158.4	115	43.4	27.40
ΑΠΡ	147.7	115	32.7	22.14
ΜΑΙ	154.9	115	39.9	25.76
ΙΟΥΝ	176.3	115	61.3	34.77
ΙΟΥΛ	221.4	115	106.4	48.06
ΑΥΓ	235.3	115	120.3	51.13
ΣΕΠ	180.3	115	65.3	36.22
ΟΚΤ	166.2	115	51.2	30.81
ΝΟΕ	139.9	115	24.9	17.80
ΔΕΚ	160.6	115	45.6	28.39

Table 4: Τεχνικά Ελάχιστα Συμβατικών Μονάδων Κρήτης 2004

Η δεύτερη παράμετρος αφορά τη φόρτιση των Α/Π, σε περιόδους που το φορτίο τους μεταβάλλεται χρονικά πέραν ορισμένων ορίων ισχύος και χρόνου. Πιο αναλυτικά, έχουν παρατηρηθεί μεταβολές στο φορτίο τους, της τάξεως του 200-300% και σε χρόνο μικρότερο των 5 λεπτών. Κυρίως μήνες που οι άνεμοι έρχονται από κατεύθυνση αντίθετη από τον προσανατολισμό του Α/Π ή από κατεύθυνση που υπάρχει ανεμολογική σκίαση των ανεμογεννητριών (Α/Γ) ή και περιόδους που οι άνεμοι έρχονται σε “κύματα-έντασης”.

Η αντιμετώπιση τέτοιου είδους μεταβολών περιορίζεται ακόμα από την τεχνολογία των Α/Γ και των συμβατικών μονάδων παραγωγής. Οι μεταβολές, εκτός από αυτή του τρέχοντος φορτίου του συστήματος, του φορτίου των Α/Π από $\pm 20\text{MW}$ έως $\pm 40\text{MW}$ και σε χρονικά διαστήματα περίπου 5 λεπτών και επαναλαμβανόμενα, δεν γίνεται ανεκτή από τις συμβατικές μονάδες. Ιδίως σε μία μέτρια φόρτιση του συστήματος (400MW) και κάτω. Σε υψηλότερα φορτία το πλήθος των ενταγμένων μονάδων παραγωγής, λόγω της πρωτεύουσας ρύθμισής τους, εξομαλύνει κάπως την κατάσταση. Άρα η ένταξη Α/Π σε ένα μεγαλύτερο σύστημα, με μεγάλο φορτίο, θα εξομαλύνει τη λειτουργία των Α/Π.

Αντίστοιχα προβλήματα με τα Α/Π μπορεί να έχουμε στο μέλλον και από άλλα είδη ανανεώσιμων πηγών, όπως φωτοβολταϊκά πάρκα (Φ/Π),. Σήμερα στην πράξη, μόνο με μείωση του συντελεστή διείσδυσης μπορούμε να ανακουφιστεί το σύστημα, από την ταλάντωση φορτίου που μας επιβάλλει η στοχαστική παραγωγή των Α.Π.Ε. Αλλά δεν είναι μακριά το μέλλον που θα αθροίζονται τα τεχνικά ελάχιστα των συμβατικών μονάδων, που θα εντάσσονται για την εξασφάλιση στρεφόμενης εφεδρείας, οδηγώντας στην πλήρη διείσδυση από Α.Π.Ε. [4].

Η ηλεκτρική διασύνδεση της Κρήτης με το διασυνδεδεμένο σύστημα εξετάστηκε ως ενδεχόμενη λύση για τα παραπάνω προβλήματα, δεδομένου ότι θα έχει ως αποτέλεσμα:

- Τη σημαντική μείωση του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών προβλημάτων με την παύση λειτουργίας των παλαιών πετρελαϊκών μονάδων.
- Την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του νησιού:

- Κατά ένα μέρος από Α.Π.Ε., οι οποίες λόγω της διασύνδεσης θα μπορέσουν να αναπτυχθούν σε μέγιστο βαθμό, και
- Κατά το υπόλοιπο μέρος από μονάδες του διασυνδεδεμένου συστήματος μέσω της διασύνδεσης (κυρίως μονάδες φυσικού αερίου συνδυασμένου κύκλου, με χαμηλότερο κόστος και χαμηλότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση από τις πετρελαϊκές μονάδες).
- Τη διοχέτευση μέρους της παραγωγής από Α.Π.Ε. που δεν θα ήταν δυνατόν να απορροφηθεί από το σύστημα της Κρήτης κατά τις ώρες χαμηλού φορτίου, μέσω του καλωδίου για την κάλυψη των αναγκών του διασυνδεδεμένου συστήματος.

Στη μελέτη βασική παράμετρο αποτελεί το ύψος της εγκατεστημένης ισχύος των Α.Π.Ε. και ειδικότερα της αιολικής. Λόγω της ασάφειας για το ύψος της ισχύος και το ρυθμό ανάπτυξης των Α.Π.Ε. κρίθηκε σκόπιμο ότι θα πρέπει να εξεταστούν διάφορα σενάρια διείσδυσης Α.Π.Ε. και συγκεκριμένα:

- Ένα που αφορά κάλυψη περί το 50% των σημερινών αναγκών,
- ένα περί 75%
- και ένα το οποίο θα υπερκαλύπτει και το 100%, δηλαδή θα καθιστά την Κρήτη “πράσινο νησί”

1.6.1.1 Σενάρια Ανάπτυξης με Διασύνδεση

Στην παρούσα μελέτη λαμβάνονται υπόψη τρία κύρια σενάρια ανάπτυξης Α.Π.Ε. στο σύστημα της Κρήτης όταν αυτό διασυνδέεται στο ηπειρωτικό σύστημα, για την περίοδο 2017-2040 που εξετάζεται:

- **Σενάριο Α:** Ανάπτυξη Α.Π.Ε. ισχύος 1000MW.
- **Σενάριο Β:** Ανάπτυξη Α.Π.Ε. ισχύος 1535MW.
- **Σενάριο Γ:** Ανάπτυξη Α.Π.Ε. ισχύος 2135MW.



Figure 7: Χάρτης υποψήφιων διασυνδέσεων Κρήτης με το Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα

Με βάση τα παραπάνω διαμορφώνονται τα ακόλουθα σενάρια ανάπτυξης των Α.Π.Ε. στο νησί για δυο ακραία και ένα ενδιάμεσο έτος της περιόδου μελέτης (2017-2025-2040):

Σενάριο	Έτος 2017	Έτος 2025	Έτος 2040
A	560	1000	1000
B	390	1535	1535
Γ	450	2135	2135

Table 5: Σενάρια Ανάπτυξης Α.Π.Ε. Κρήτης [πηγή P.A.E.]

Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης λαμβάνεται υπόψη η εξέλιξη της ζήτησης του νησιού για την εξεταζόμενη περίοδο ως το 2040, βάσει εκτιμήσεων της Δ.Ε.Η. οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Έτος	Ζήτηση Ενέργειας (GWh)	Ετήσιος Ρυθμός Αύξησης (%)	Μέση Ωριαία Αιχμή (MW)	Σ.Φ.
2005	2654		560	54.1
2006	2832	6.7	605	53.4
2007	2961	4.5	650	52.0
2008	3047	2.9	633	54.9
2009	2989	-1.9	618	55.2
2010	3014	0.8	638	53.9
2020	4000	2.7	840	54.3
2030	4900	2.1	1000	55.9
2040	5700	1.5	1150	56.5

Table 6: Ζήτηση Ενέργειας - Μ.Ω. Αιχμή Κρήτης 2005-2040 [πηγή Δ.Ε.Η.]

Με βάση τις εκτιμήσεις αυτές προσδιορίστηκαν οι συνθήκες μέγιστου και ελάχιστου ωριαίου φορτίου για δυο ακραία και ένα ενδιάμεσο έτος της περιόδου μελέτης [3].

Πρόβλεψη Ζήτησης	Έτος 2017	Έτος 2020	Έτος 2025	Έτος 2030	Έτος 2035	Έτος 2040
Μέγιστο	780	840	930	1000	1080	1150
Ελάχιστο	190	200	220	240	260	275

Table 7: Πρόβλεψη Ζήτησης Μέγιστο-Ελάχιστο Κρήτης 2017-2040 [πηγή Δ.Ε.Η.]

2 Πρόβλημα Σχεδιασμού Επέκτασης του Συστήματος Μεταφοράς

Ως αποτέλεσμα της επιταχυνόμενης ανάπτυξης των Α.Π.Ε., υπάρχει η ανάγκη επαρκών εγκαταστάσεων μεταφοράς για να φτάσει αυτή η ενέργεια στα κέντρα κατανάλωσης. Το πρόβλημα του σχεδιασμού επέκτασης του δικτύου μεταφοράς εξετάζει την επέκταση ενός υπάρχοντος δικτύου μεταφοράς ώστε αυτό να εξυπηρετεί τα κέντρα κατανάλωσης και να τηρεί ένα σύνολο οικονομικών και τεχνικών περιορισμών.

Τα μοντέλα που περιγράφουν αυτό το πρόβλημα γενικά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε μοντέλα βελτιστοποίησης, σε ευρετικά μοντέλα και σε έναν συνδυασμό αυτών των δυο. Η μορφή του μοντέλου βελτιστοποίησης περιλαμβάνει μια αντικειμενική συνάρτηση, που είτε ελαχιστοποιείται είτε μεγιστοποιείται προσέχοντας να μην παραβιάζονται οι εξισώσεις των περιορισμών του. Στην περίπτωση του προβλήματος του σχεδιασμού επέκτασης του δικτύου μεταφοράς, η αντικειμενική συνάρτηση είναι η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των κοστών της κατασκευής νέων γραμμών, της ενίσχυσης των υφιστάμενων γραμμών και των λειτουργικών κοστών της παραγωγής σε έναν χρονικό ορίζοντα. Οι περιορισμοί του προβλήματος εξασφαλίζουν ότι το σύστημα διαμορφώνεται σύμφωνα με τις εξισώσεις ροής φορτίου και λειτουργεί αξιόπιστα [7].

2.1 Ροή Φορτίου

Η ροή ισχύος ή φορτίου στο δίκτυο για την τροφοδότηση της ζήτησης, αποτελεί τη χαρακτηριστική εκδήλωση της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας του Σ.Η.Ε.. Η συχνότητα και η τάση στους ζυγούς πρέπει να διατηρούνται σε προδιαγραφμένα όρια παρόλο που τα φορτία μεταβάλλονται μερικές φορές απρόβλεπτα.

Το πρόβλημα των ροών φορτίου συνίσταται τον προσδιορισμό των μεταβλητών του συστήματος (ισχύς, ρεύμα, τάση) σε μια δεδομένη κατάσταση λειτουργίας. Η μόνιμη κατάσταση λειτουργίας αντιστοιχεί σε μια ορισμένη εικόνα φορτίων, παραγόμενης ισχύος και ροών στο δίκτυο. Στην ανάλυση των ροών φορτίου έχουν βοηθήσει καθοριστικά οι υπολογιστές. Επιτρέπουν την ανάλυση δικτύων με πολλές εκατοντάδες κόμβους χωρίς ιδιαίτερη δυσκολία.

Τα βασικά στοιχεία ενός διασυνδεδεμένου δικτύου παραγωγής και μεταφοράς είναι οι ζυγοί και οι γραμμές. Η ισχύς διακινείται μεταξύ των διαφόρων ζυγών από τις θέσεις παραγωγής προς τα φορτία ανάλογα με τις διαθέσιμες γραμμές. Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας υπάρχει ισοζύγιο μεταξύ παραγόμενης ισχύος, απωλειών και φορτίων και η ισορροπία αυτή διέπεται από σταθερή συχνότητα λειτουργίας και σταθερές τάσεις ζυγών [12].

Η “συνηθισμένη” ανάλυση ροής φορτίου προϋποθέτει τη συμμετρική κατάσταση του συστήματος και για το σκοπό αυτό επαρκεί το μονοφασικό διάγραμμα του Σ.Η.Ε.. Αυτό σημαίνει ότι, εκτός από την απόκλιση 120ο στις γωνίες των τάσεων, οι τρεις φάσεις του συστήματος έχουν ίσες τάσεις κατά μέτρο, ίσα ρεύματα και ίσες ροές ισχύος. Η παραδοχή αυτή δεν είναι απολύτως ορθή και επιφέρει ένα συστηματικό σφάλμα στα αποτελέσματα της ροής φορτίου. Το σφάλμα αυτό είναι μικρό στο επίπεδο της υψηλής και υπερυψηλής τάσης, γίνεται όμως ιδιαίτερα μεγάλο στο επίπεδο της μέσης τάσης (δίκτυα διανομής) και χαμηλής τάσης.

Η τριφασική ανάλυση αποτελεί λύση σε αυτό το σφάλμα και βρίσκει εφαρμογή στα σύγχρονα συστήματα διαχείρισης δικτύων, τα οποία βασίζονται στην ακριβή εκτίμηση της κατάστασης του συστήματος. Ένα μειονέκτημα της τριφασικής ροής φορτίου είναι η απαίτηση περισσότερων δεδομένων, δηλαδή η αύξηση της πολυπλοκότητας υπολογισμού των εξισώσεων [8].

Για τις μελέτες των ροών φορτίου ορίζονται τρεις τύποι ζυγών:

- **Ζυγοί Φορτίου (PQ)**, στους οποίους είναι γνωστές η ενεργός και η άεργος ισχύς ζήτησης και άγνωστη η τάση.
- **Ζυγοί Παραγωγής (PV)**, όπου είναι γνωστά η παραγόμενη ενεργός ισχύς και το μέτρο της τάσεως και προσδιορίζονται η άεργος ισχύς και η γωνία τάσης.
- **Ζυγός Ταλαντώσεως ή Αναφοράς (slack bus)**, ο οποίος είναι ζυγός παραγωγής, χρησιμοποιούμενος για να αντισταθμίσει τις απώλειες του δικτύου, που δεν είναι γνωστές από την αρχή και την όποια ανισοροπία παραγώμενης και καταναλισκόμενης ισχύος. Στο ζυγό αυτό επιβάλλεται σταθερή τάση κατά μέτρο και γωνία και προσδιορίζεται η ισχύς παραγωγής. Στην περίπτωση διασυνδεδεμένων μικρών δικτύων με μεγαλύτερα δίκτυα ο ζυγός διασύνδεσης θεωρείται ζυγός ταλάντωσης για αυτά.

Η μαθηματική ανάλυση του προβλήματος καταλήγει στη διαμόρφωση ενός συστήματος 2N μη γραμμικών εξισώσεων, όπου N είναι ο αριθμός των κόμβων - ζυγών του δικτύου. Οι γραμμές μεταφοράς παριστάνονται με το ισοδύναμο π, με ανοιγμένες παραμέτρους και τα φορτία θεωρούνται συμμετρικά.

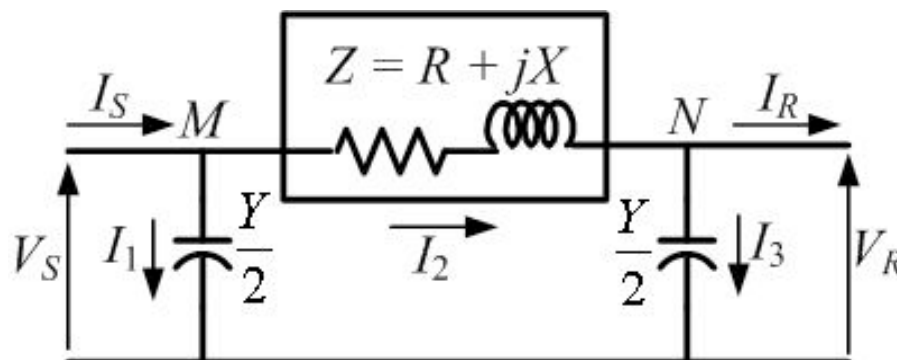


Figure 8: Ισοδύναμο κύκλωμα π Γ.Μ.

Οι μεταβλητές του προβλήματος είναι 6 ανά ζυγό:

- Η παραγόμενη ενεργός ισχύς (P_G).
- Η παραγόμενη άεργος ισχύς (Q_G).
- Η ενεργός ισχύς φορτίου (P_D).
- Η άεργος ισχύς φορτίου (Q_D).
- Η τάση του ζυγού (V).
- Η γωνία τάσης του ζυγού (δ).

Στο σύστημα των N ζυγών υπάρχουν συνολικά $6N$ μεταβλητές [12].

Οι μεταβλητές (P_G , Q_G) χαρακτηρίζονται ως μεταβλητές ελέγχου του συστήματος και αποτελούν τις ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος. Οι μεταβλητές (P_D , Q_D) χαρακτηρίζονται ως μεταβλητές ζήτησης ή μεταβλητές διαταραχής. Οι μεταβλητές (V , δ) χαρακτηρίζονται ως μεταβλητές κατάστασης του συστήματος και αποτελούν τις εξαρτημένες μεταβλητές του προβλήματος. Για την επίλυση της ροής φορτίου, τα ηλεκτρικά μεγέθη του δικτύου εκφράζονται στο ανά μονάδα σύστημα (p.u.) [8].

$$Z_{BASE} = \frac{V_{BASE}^2}{S_{BASE}} (Ohm)$$

Equation 1: Αντίσταση Βάσης

$$Z_{pu} = \frac{Z}{Z_{BASE}} (p.u.)$$

Equation 2: Μετατροπή αντίστασης σε ανα μονάδα τιμή

Σε κάθε ζυγό i μπορεί να προσδιοριστεί η συνισταμένη ισχύς του:

$$\vec{S}_i = \vec{S}_{Gi} - \vec{S}_{Di} = P_i + jQ_i$$

Equation 3: Ισχύς ζυγού

Για ένα Σ.Η.Ε. N ζυγών, οι $2N$ εξισώσεις ροών φορτίου έχουν τη μορφή:

$$P_i = V_i^2 G_{ii} + V_i \sum_{j=1}^N V_j [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)]$$

Equation 4: Ενεργός Ισχύς ζυγού

$$Q_i = -V_i^2 B_{ii} + V_i \sum_{j=1}^N V_j [G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)]$$

Equation 5: Άεργος Ισχύς ζυγού

$$Z_{ij} = R_{ij} + jX_{ij}$$

Equation 6: Αντίσταση Γ.Μ.

$$Y_{ij} = \frac{1}{Z_{ij}} = \frac{1}{R_{ij} + jX_{ij}} = \left(\frac{R_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2}\right) + j\left(\frac{-X_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2}\right)$$
$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$$

Equation 7: Αγωγιμότητα Γ.Μ.

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di}$$

Equation 8: Ισοζύγιο ενεργού ισχύος

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di}$$

Equation 9: Ισοζύγιο άεργου ισχύος

Γνωρίζοντας την παραγωγή ισχύος και τα φορτία των ζυγών του Σ.Η.Ε., μπορεί να υπολογιστεί η τάση (V_i) και τη γωνία (δ_i) σε κάθε ζυγό, λύνοντας τις παραπάνω μη γραμμικές εξισώσεις. Στη συνέχεια, με γνωστά τα (V_i , δ_i) σε κάθε ζυγό, υπολογίζεται η ροή ισχύος σε κάθε κλάδο-γραμμή $i-j$ (μεταξύ των ζυγών i και j) του δικτύου:

$$P_{ij} = V_i^2 G_{ij} + V_i V_j [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)]$$

Equation 10: Ενεργός ισχύς Γ.Μ.

$$Q_{ij} = -V_i^2 B_{ij} + V_i V_j [G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)]$$

Equation 11: Άεργος ισχύς Γ.Μ.

Οι εξισώσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω είναι αλγεβρικές και μη γραμμικές, γι'αυτό η αναλυτική επίλυση τους είναι δύσκολη. Συνήθως χρησιμοποιούνται αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης με τη βοήθεια υπολογιστή. Αυτές, μπορούν να λύσουν το σύστημα των μη γραμμικών εξισώσεων για αρκετά μεγάλα δίκτυα με ικανοποιητική ακρίβεια. Οι δυο βασικές μέθοδοι που εφαρμόζονται είναι:

- Η μέθοδος Newton-Raphson.
- Η μέθοδος Gauss-Seidel.

Και οι δυο μέθοδοι ξεκινούν από μια αρχική λύση και με επαναλήψεις προσπαθούν να προσεγγίσουν την τελική λύση. Η αρχική λύση χρησιμοποιείται στις εξισώσεις του προβλήματος για να βρεθεί μια καινούρια καλύτερη λύση και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι η λύση να είναι απολύτως ικανοποιητική και να επιτευχθεί σύγκλιση [12].

Οι κύριες μαθηματικές διατυπώσεις βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό του δικτύου μεταφοράς είναι:

- Το AC (εναλλασσόμενου ρεύματος) μοντέλο.
- Το DC (συνεχούς ρεύματος) μοντέλο.
- Το μοντέλο μεταφοράς (transportation model).
- Και υβριδικά μοντέλα από αυτά τα τρία.

Το AC μοντέλο είναι το πιο ακριβές, ως προς την αναπαράσταση του δικτύου, γιατί μοντελοποιεί την άεργο ισχύ και τις απώλειες του δικτύου κάτι που δεν το κάνουν τα άλλα δυο μοντέλα. Όμως για το πρόβλημα του σχεδιασμού του δικτύου μεταφοράς η AC διατύπωση είναι μη γραμμική και έχει μη κυρτούς περιορισμούς, άρα είναι η πιο πολύπλοκη υπολογιστικά διατύπωση. Επίσης τα μη γραμμικά χαρακτηριστικά της δεν μπορούν να εγγυηθούν ότι η λύση που θα προκύψει θα είναι γενικά βέλτιστη. Από την άλλη, το DC μοντέλο και το μοντέλο μεταφοράς είναι απλοποιημένες εκδόσεις από το AC μοντέλο, που μπορούν να αναπαρασταθούν με ένα γραμμικό σύστημα περιορισμών, και ως εκ τούτου είναι λιγότερο πολύπλοκες υπολογιστικά για να λύσουν και να εγγυηθούν μια γενικά βέλτιστη λύση στο πρόβλημα.

2.1.1.1 AC μοντέλο

Το AC μοντέλο για το πρόβλημα του σχεδιασμού της επέκτασης του δικτύου μεταφοράς είναι μια διατύπωση μη γραμμική, με ακέραιες και συνεχείς μεταβλητές (mixed integer formulation). Είναι η πιο ακριβής αναπαράσταση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Λαμβάνει υπόψιν του την ενεργό και την άεργο ισχύ στις εξισώσεις του, κάτι που διέπει τη λειτουργία ενός εναλλασσόμενου ηλεκτρικού συστήματος. Ωστόσο, λόγω της υπολογιστικής πολυπλοκότητας του, η πλήρης ανάπτυξή του γίνεται μόνο στα τελευταία στάδια της διαδικασίας σχεδιασμού. Οι εξισώσεις, για τη ροή ισχύος στις γραμμές του AC μοντέλου είναι όπως αναφέρθηκαν παραπάνω οι εξής:

$$P_{ij} = V_i^2 G_{ij} + V_i V_j [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)]$$

Equation 12: Ενεργός ισχύς Γ.Μ. AC μοντέλο

$$Q_{ij} = -V_i^2 B_{ij} + V_i V_j [G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)]$$

Equation 13: Άεργος ισχύς Γ.Μ. AC μοντέλο

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$$

Equation 14: Αγωγιμότητα Γ.Μ. AC μοντέλο

2.1.1.2 DC μοντέλο

Το DC μοντέλο για το πρόβλημα του σχεδιασμού της επέκτασης του δικτύου μεταφοράς μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένα γραμμικό μοντέλο βελτιστοποίησης με ακέραιες και συνεχείς μεταβλητές. Η DC διατύπωση είναι μια προσέγγιση του AC μοντέλου, που λαμβάνει υπόψη της μόνο την ενεργό ισχύ του συστήματος. Επίσης, υποθέτει ότι οι τάσεις στους ζυγούς του δικτύου είναι όλες ίδιες. Αν θεωρηθεί και ότι οι αντιστάσεις στις γραμμές μεταφοράς είναι μικρές σε σύγκριση με τις αντιδράσεις των γραμμών, οι αντιστάσεις μπορούν να αμεληθούν χάριν απλοποίησης. Για μικρές γωνίες ισχύει προσεγγιστικά $\sin(\delta) = \delta$, και η εξίσωση για τη ροή ισχύος (f_{ij}) στις γραμμές διαμορφώνεται ως εξής:

$$f_{ij} = \frac{(\delta_i - \delta_j)}{X_{ij}}$$

Equation 15: Ροή ισχύος Γ.Μ. DC μοντέλο

$$Z_{ij} = R_{ij} + jX_{ij}$$

Equation 16: Αντίσταση Γ.Μ. DC μοντέλο

Αν και το DC μοντέλο είναι λιγότερο ακριβής αναπαράσταση του συστήματος από το AC μοντέλο, είναι υπολογιστικά λιγότερο πολύπλοκο. Μπορεί να αντιπροσωπευθεί από ένα σύστημα γραμμικών περιορισμών και από μια γραμμική αντικειμενική συνάρτηση. Αν συγκριθεί με το AC μοντέλο αυτή η διατύπωση μπορεί να εγγυηθεί μία γενικά βέλτιστη λύση, σε σχέση με την τοπικά βέλτιστη που προσφέρει η AC.

2.1.1.3 Μοντέλο μεταφοράς (transportation model)

Το μοντέλο μεταφοράς για το πρόβλημα του σχεδιασμού της επέκτασης του δικτύου μεταφοράς μπορεί να επιτευχθεί χαλαρώνοντας τις εξισώσεις των ροών ισχύος των γραμμών του DC μοντέλου. Έτσι, οι εξισώσεις των ροών ισχύος που λαμβάνονται υπόψη στο AC και DC μοντέλο αγνοούνται στο μοντέλο μεταφοράς. Μόνο ο περιορισμός της ροής ισχύος στις γραμμές μεταφοράς λαμβάνεται υπόψη. Τα αποτελέσματα που αποφέρει αυτό το μοντέλο μπορεί να είναι ένα βέλτιστο σχέδιο επέκτασης, αλλά μπορεί να είναι ανέφικτο για το AC ή DC μοντέλο του συστήματος [7].

Η εκτέλεση μιας ροής φορτίου σε ένα πραγματικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με το χέρι είναι πρακτικά αδύνατη, οπότε είναι απαραίτητη η χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Υπάρχουν διάφορα λογισμικά που έχουν αναπτυχθεί και εστιάζουν στην επίλυση ροών φορτίου. Ένα από αυτά είναι το πακέτο MatPower, που έχει αναπτυχθεί σε περιβάλλον MatLab, με πολλές δυνατότητες και αριθμητικές μεθόδους που λύνουν τις εξισώσεις των ροών φορτίου.

2.2 Διατύπωση του προβλήματος του σχεδιασμού της επέκτασης του συστήματος μεταφοράς

Η επέκταση δικτύου, τόσο σε επίπεδο διανομής όσο και σε επίπεδο μεταφοράς, μπορεί να μελετηθεί με στατικά ή δυναμικά μοντέλα. Ένα στατικό μοντέλο προσπαθεί να ανακαλύψει μια βέλτιστη δομή δικτύου (δηλαδή που και τι καινούριο πρέπει να εγκατασταθεί με ένα βέλτιστο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας) για ένα δεδομένο σενάριο παραγωγής και κατανάλωσης, συνήθως σε ένα μακροχρόνιο πλαίσιο.

Όταν το DC μοντέλο χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση του ηλεκτρικού δικτύου, τότε το πρόβλημα του σχεδιασμού της επέκτασης του μπορεί να διαμορφωθεί ως εξής:

$$\min v = \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij}$$

Equation 17: Αντικειμενική συνάρτηση TEP DC μοντέλο

Υπό τους περιορισμούς:

$$Sf + P_G = P_D$$

Equation 18: Περιορισμός διατήρησης ισχύος σε κάθε ζυγό TEP DC μοντέλο (1)

$$f_{ij} - Y_{ij}(n_{ij}^0 + n_{ij})(\delta_i - \delta_j) = 0$$

Equation 19: Περιορισμός ροής ισχύος TEP DC μοντέλο (2)

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}) f_{ij}^{MAX}$$

Equation 20: Περιορισμός θερμικών ορίων Γ.Μ. TEP DC μοντέλο

$$0 \leq P_G \leq P_G^{MAX}$$

Equation 21: Περιορισμός παραγωγής ενέργειας TEP DC μοντέλο

$$0 \leq n_{ij} \leq n_{ij}^{MAX}$$

Equation 22: Περιορισμός κυκλωμάτων ανα Γ.Μ. TEP DC μοντέλο

$$(i, j) \in \Omega$$

$$n_{ij} \in \mathbb{Z}$$

Η μεταβλητή c_{ij} αντιπροσωπεύει το κόστος των γραμμών που μπορούν να προστεθούν μεταξύ των ζυγών $i - j$. Η μεταβλητή n_{ij} αντιπροσωπεύει τον αριθμό των γραμμών που έχουν συνδεθεί μεταξύ των ζυγών $i - j$ και n_{ij0} είναι η αρχική τοπολογία του δικτύου. Ο πίνακας S είναι ο ανάστροφος πίνακας προσπτώσεων γραμμών - κόμβων (branch-node transposed incidence matrix).

Ο πρώτος περιορισμός (1) αντιπροσωπεύει τη διατήρηση ισχύος σε κάθε ζυγό, και αντιστοιχεί στο νόμο ρευμάτων του Kirchhoff στο ισοδύναμο DC δίκτυο. Ο δεύτερος περιορισμός (2) αντιπροσωπεύει το νόμο των τάσεων του Kirchhoff και ο περιορισμός αυτός είναι μη γραμμικός. Το πρόβλημα όπως διατυπώθηκε παραπάνω αποτελεί ένα μη γραμμικό πρόβλημα με ακέραιες και συνεχείς μεταβλητές (non-linear mixed integer problem, NLMIP). Είναι ένα δύσκολο πρόβλημα, που οδηγεί σε μεγαλύτερη πολυπλοκότητα αν είναι πολλές οι εναλλακτικές λύσεις. Όμως, αν χαλαρώσει η μεταβλητή του αριθμού των γραμμών που έχουν συνδεθεί με $n_{ij} \geq 0$, τότε το DC μοντέλο γίνεται ένα μη γραμμικό πρόβλημα.

Αν τώρα από το DC μοντέλο αφαιρεθεί ο νόμος των τάσεων και από τη μαθηματική σκοπιά θεωρηθεί ένα χαλαρό DC μοντέλο, τότε αυτό ονομάζεται μοντέλο μεταφοράς [9].

$$\min v = \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij}$$

Equation 23: Αντικειμενική συνάρτηση TEP μοντέλο μεταφοράς

Υπό τους περιορισμούς:

$$Sf + P_G = P_D$$

Equation 24: Περιορισμός διατήρησης ισχύος σε κάθε ζυγό TEP μοντέλο μεταφοράς

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}) f_{ij}^{MAX}$$

Equation 25: Περιορισμός θερμικών ορίων Γ.Μ. TEP μοντέλο μεταφοράς

$$0 \leq P_G \leq P_G^{MAX}$$

Equation 26: Περιορισμός παραγωγής ενέργειας TEP μοντέλο μεταφοράς

$$0 \leq n_{ij} \leq n_{ij}^{MAX}$$

Equation 27: Περιορισμός κυκλωμάτων ανα Γ.Μ. TEP μοντέλο μεταφοράς

$$(i, j) \in \Omega$$

$$n_{ij} \in \mathbb{Z}$$

2.3 Πιθανοτική Ροή Φορτίου

Η μεγάλη διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας καθιστά αναγκαία την ενσωμάτωση της αβεβαιότητας της παραγωγής τους στο πρόβλημα της επέκτασης των συστημάτων μεταφοράς [10]. Επίσης η συνεχής ανάπτυξη της βιομηχανίας παραγωγής ενέργειας και η αυξομείωση των τιμών των καυσίμων αλλά και η απρόβλεπτη αυξομείωση της ζήτησης σε ενέργεια εισάγουν και αυτά αβεβαιότητες στη μελέτη ενός Σ.Η.Ε. [5].

Έτσι, στην προτεινόμενη πιθανοτική μέθοδο επέκτασης του συστήματος μεταφοράς, οι αβεβαιότητες του φορτίου, της παραγωγής των Α.Π.Ε. και των βλαβών των εγκαταστάσεων της μεταφοράς ενσωματώνονται με πιθανοτικό τρόπο στο πρόβλημα βελτιστοποίησης με σκοπό την εύρεση των επενδύσεων με το μικρότερο δυνατό κόστος οι οποίες να διατηρούν την ασφάλεια του συστήματος σε αποδεκτά επίπεδα [10].

Ως εκ τούτου, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται εργαλεία στατιστικής και πιθανοτήτων για την πρόβλεψη της κατάστασης του δικτύου Στην περίπτωση που οι τυχαίες μεταβλητές είναι πολλές στο σύστημα, η εκτέλεση ντετερμινιστικής ροής φορτίου για κάθε δυνατό συνδυασμό παραγωγής και φορτίου καθίσταται μη πρακτική.

Η πιθανοτική ροή φορτίου (Π.Ρ.Φ.) είναι το μαθηματικό εργαλείο που χρησιμοποιείται για να μελετηθεί η κατάσταση ενός Σ.Η.Ε. λαμβάνοντας υπόψη την τυχαία αύξηση του φορτίου και τη στοχαστική φύση των εγχύσεων ισχύος από τις, διάφορων τύπων, μονάδες παραγωγής. Πλέον, για να εκτιμηθεί η κατάσταση και οι ροές ισχύος του Σ.Η.Ε. απαιτούνται στατιστικά δεδομένα, όπως η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των τυχαίων μεταβλητών εισόδου του συστήματος.

Το πρόβλημα της Π.Ρ.Φ. μπορεί να λυθεί:

- Με αριθμητικές μεθόδους, όπως η τεχνική της προσομοίωσης Monte Carlo
- Με τον αλγόριθμο Metropolis
- Με αναλυτικές μεθόδους
- Με προσεγγιστικές μεθόδους

Οι αναλυτικές μέθοδοι είναι υπολογιστικά πιο αποτελεσματικές αλλά απαιτούν πολλές μαθηματικές υποθέσεις για να απλοποιηθεί το πρόβλημα. Οι προσεγγιστικές μέθοδοι δίνουν προσεγγιστική περιγραφή των στατιστικών χαρακτηριστικών των τυχαίων μεταβλητών εξόδου του προβλήματος.

Η τεχνική της προσομοίωσης Monte Carlo αποτελεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο στατικής δειγματοληψίας, λόγω της αποτελεσματικότητας της και τις γενικές εφαρμογές της, είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στη μελέτη πολύπλοκων συστημάτων με μεγάλο βαθμό ελευθερίας, δηλαδή που να έχουν περισσότερες από μια στοχαστικές μεταβλητές, και είναι ικανή να δώσει ακριβή αποτελέσματα.

Ωστόσο, για το πρόβλημα της βελτιστοποίησης κάτω από αβεβαιότητες πρέπει να χρησιμοποιηθεί κάποιο μαθηματικό μοντέλο στοχαστικού προγραμματισμού. Ένα τέτοιο μαθηματικό μοντέλο είναι και ο προγραμματισμός υπό πιθανοτικούς περιορισμούς (chance constrained programming, C.C.P.). Το μοντέλο αυτό μπορεί να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις πολύπλοκων προβλημάτων που περιέχουν στοχαστικές μεταβλητές στους περιορισμούς, ακόμα και στην αντικειμενική συνάρτηση, και επίσης μπορεί να χειριστεί τους πιθανοτικούς περιορισμούς κάτω από κάποιο επίπεδο εμπιστοσύνης. Εφόσον οι περιορισμοί εξαρτώνται άμεσα από στοχαστικές παραμέτρους και δεν περιγράφονται από ένα ντετερμινιστικό σύνολο, είναι επόμενο οι περιορισμοί να ικανοποιούνται με μια πιθανότητα α , όπου α είναι το καθορισμένο επίπεδο εμπιστοσύνης. Επομένως, οι περιορισμοί αυτοί μετατρέπονται σε πιθανοτικούς περιορισμούς. Αν είναι επιθυμητή η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης ώστε αυτή να παίρνει τιμή μικρότερη από μια μέγιστη τιμή της με πιθανότητα β τότε το πρόβλημα διαμορφώνεται ως εξής [5]:

$$\min_n \min_f f'$$

Equation 28: Αντικειμενική συνάρτηση C.C.P.

υπό τους περιορισμούς:

$$\Pr\{f(n, \xi) \leq f'\} \geq \beta$$

Equation 29: Περιορισμός αντικειμενικής συνάρτησης C.C.P.

$$\Pr\{g(n, \xi) \leq 0\} \geq \alpha$$

Equation 30: Περιορισμός ανισότητας C.C.P.

Στα προηγούμενα σύμβολα το i, j αναφέρεται στο ζυγό αναχώρησης και στο ζυγό άφιξης, το Z αναφέρεται στην σύνθετη αντίσταση της γραμμής, το R στην ωμική συνηστύσα της και το X στην επαγωγική συνηστύσα της. Το f αναφέρεται στη ροή ισχύος και το f^{MAX} στο μέγιστο θερμικό όριο της γραμμής. Αντίστοιχα το $f(n, \xi)$ είναι η ροή ισχύος στην πιθανοτική περίπτωση, λαμβάνοντας υπόψη τις πιθανοτικές μεταβλητές ξ .

2.4 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Η αυξανόμενη διείσδυση των Α.Π.Ε. σε συνδυασμό με τη διαρκή ανάπτυξη της βιομηχανίας και την αύξηση της ζήτησης για ενέργεια, καθιστούν αναγκαία τη μοντελοποίηση των αβεβαιοτήτων που εισάγουν.

Αβεβαιότητες όπως:

- Η μη εύκολα προβλεπόμενη ισχύς εξόδου ενός αιολικού πάρκου, λόγω της τυχαιότητας στην ταχύτητα του ανέμου.
- Η μη εύκολα προβλεπόμενη ισχύς εξόδου μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, λόγω της μεταβλητότητας της ηλιακής ακτινοβολίας.
- Η μη εύκολα προβλεπόμενη αυξομείωση του φορτίου του συστήματος.

- Η μη εύκολα προβλεπόμενη μεταβολή των τιμών των καυσίμων.

Οι παραπάνω αβεβαιότητες οδηγούν σε ρίσκο [5].

2.4.1.1 Φωτοβολταϊκά

Το φωτοβολταϊκό πάνελ είναι μια συσκευή που μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική τάση και ρεύμα. Η λειτουργία του φωτοβολταϊκού πάνελ βασίζεται στους ημιαγωγούς, οι οποίοι κάνουν την παραπάνω μετατροπή. Παράγουν συνεχή τάση και η μετατροπή σε εναλλασσόμενη γίνεται με τη βοήθεια ενός αντιστροφέα.

Η απόδοση τους κυμαίνεται μεταξύ 8-15% και εξαρτάται κυρίως από την τεχνολογία τους, από τη θέση του ήλιου, από το αν ο ουρανός είναι καθαρός, από την καθαριότητα του ίδιου του φωτοβολταϊκού και από τη θερμοκρασία [11].



Figure 9: Φωτοβολταϊκό Πάρκο

Από στατιστική ανάλυση της ηλιακής ακτινοβολίας, χρησιμοποιώντας μετεωρολογικά δεδομένα, παρατηρήθηκε πως η πυκνότητα της ηλιακής ακτινοβολίας ακολουθεί είτε την κατανομή Beta είτε την κατανομή Weibull, με τη δεύτερη να την προσεγγίζει καλύτερα. Θεωρώντας λοιπόν, ότι s είναι η ηλιακή ακτινοβολία, που ακολουθεί την κατανομή Weibull $W(k,c)$, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας είναι:

$$f(s) = \frac{k}{c^k} s^{(k-1)} e^{-\left(\frac{s}{c}\right)^k} \quad 0 \leq s < \infty$$

Equation 31: Πικνότητα πυθανότητας ηλιακής ακτινοβολίας

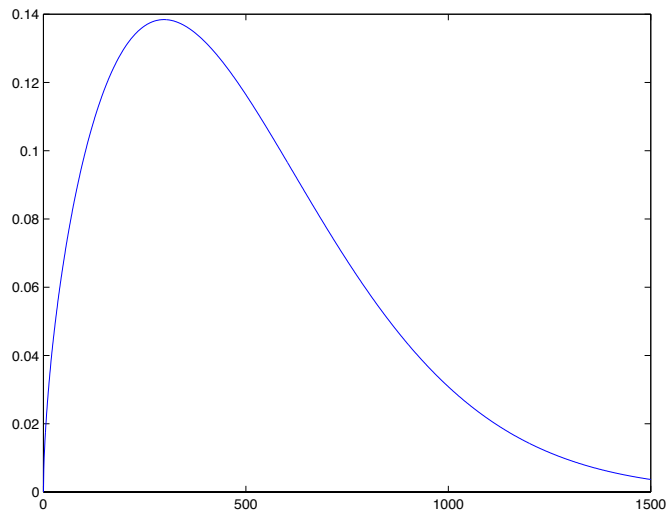


Figure 10: Κατανομή Weibull ηλιακής ακτινοβολίας

Ποιες παράμετρους k , c χρησιμοποιήσες?

Η ισχύς εξόδου του φωτοβολταϊκού εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία, την θερμοκρασία της περιοχής και τα χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού. Χάριν απλοποιήσεως και καθώς λαμβάνονται τιμές ανά ώρα για την ηλιακή ακτινοβολία από την κατανομή Weibull, η ισχύς εξόδου του φωτοβολταϊκού θα υπολογίζεται γραμμικά από τη σχέση [5]:

$$P_S = \begin{cases} P_S^{Rated} \frac{s}{s_{Rated}} & 0 \leq s < s_{Rated} \\ P_S^{Rated} & s_{Rated} \leq s \end{cases}$$

Equation 32: Ισχύς εξόδου φωτοβολταϊκού

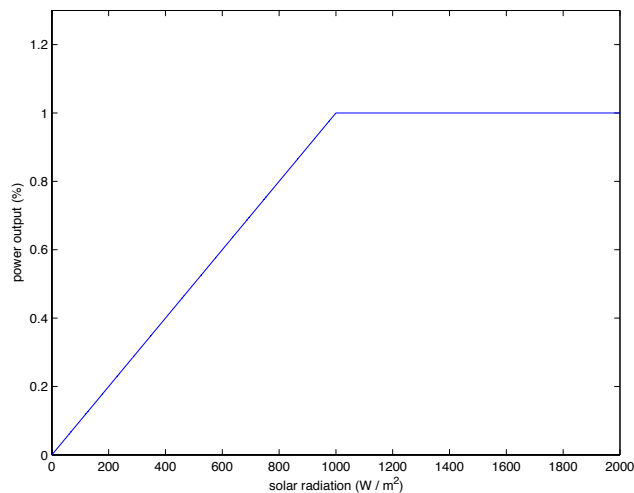


Figure 11: Ισχύς εξόδου φωτοβολταϊκού

2.4.1.2 Ανεμογεννήτριες

Οι ανεμογεννήτριες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική. Η απόδοσή τους εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως την τεχνολογία τους, την πυκνότητα του αέρα, το ύψος του πύργου και βέβαια από την ταχύτητα του ανέμου. Έχουν εξελιχθεί αρκετά τα τελευταία χρόνια, ωστόσο το αρχικό κόστος που απαιτείται για την εγκατάσταση τους σε σχέση με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής είναι υψηλό.



Figure 12: Αιολικό Πάρκο

Η ταχύτητα του ανέμου δεν μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια. Μεταβάλλεται συνεχώς, κατά τη διάρκεια του έτους και από περιοχή σε περιοχή. Ωστόσο αν μετράται κάθε μια ώρα για τρία έως πέντε έτη μπορεί να γίνει μια καλή πρόβλεψη για το μέλλον. Μετά από πολλές μετρήσεις σε πολλές περιοχές του κόσμου, διαπιστώθηκε ότι η ταχύτητα του ανέμου ακολουθεί με ικανοποιητική προσέγγιση την κατανομή Weibull.

Οι ανεμογεννήτριες ξεκινούν να δίνουν ισχύ από μια ταχύτητα έναρξης (V_{in}). Από αυτή μέχρι την ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας (V_{op}) η ισχύς αυξάνεται. Από την ταχύτητα (V_{op}) μέχρι την ταχύτητα παύσης (V_{out}) η ανεμογεννήτρια δίνει την ονομαστική της ισχύ που είναι και η μέγιστη. Πέρα από την ταχύτητα παύσης η ανεμογεννήτρια δεν δίνει καθόλου ισχύ. Η ανεμογεννήτρια σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου δεν λειτουργεί για να μην πάθει βλάβη εξαιτίας του μεγάλου φορτίου που δημιουργείται. Μια τυπική καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας είναι [$V_{in}=3\text{m/s}$, $V_{rated}=13\text{m/s}$, $V_{out}=25\text{m/s}$] [11].

Θεωρώντας ότι, v είναι η ταχύτητα του ανέμου, η οποία ακολουθεί την κατανομή Weibull $W(k,c)$, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας είναι:

$$f(v) = \frac{k}{c^k} v^{(k-1)} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad 0 \leq v < \infty$$

Equation 33: Πικνότητα πυθανότητας ταχύτητας ανέμου

όπου k είναι ο δείκτης σχήματος και c είναι ο δείκτης κλίμακας της κατανομής Weibull.

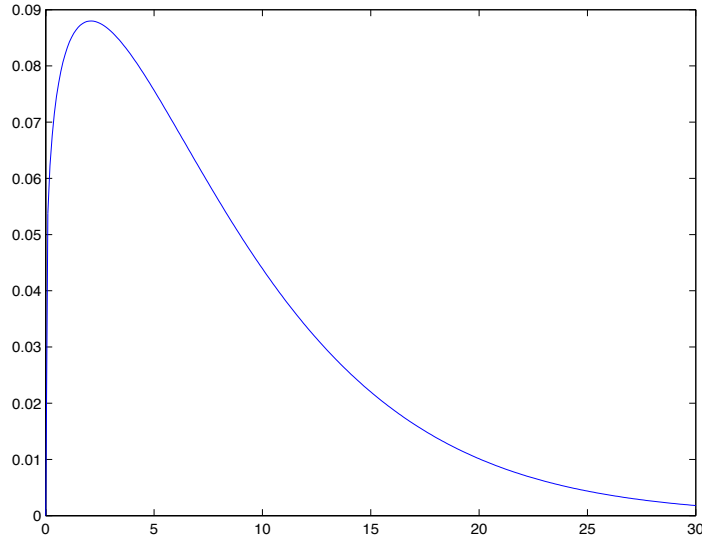


Figure 13: Κατανομή Weibull ταχύτητας ανέμου

Οι τιμές των παραμέτρων k και c και συνεπώς και της μέσης τιμής ποικίλουν από περιοχή σε περιοχή. Η παράμετρος k της Weibull παίρνει συνήθως τιμές από 1.2 έως 2.1. Σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιείται η τιμή $k=2$ με την κατανομή να ονομάζεται Rayleigh. Οι χαμηλότερες τιμές της παραμέτρου k παρουσιάζονται στη νότια Ευρώπη, ενώ τιμές κοντά στο 2 είναι αντιπροσωπευτικές για τη βορειοδυτική Ευρώπη.

Για την καλύτερη απόδοση και προστασία της ανεμογεννήτριας χρησιμοποιούνται συστήματα αυτόματου ελέγχου (έλεγχος του βήματος της έλικας και της αεροδυναμικής ανυψώσεως) για την εκκίνηση και για την παύση λειτουργίας της. Έτσι, γνωρίζοντας την ταχύτητα του ανέμου και δεδομένου ότι υπάρχουνε συστήματα έναρξης και παύσης, η ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας μπορεί να μοντελοποιηθεί προσεγγιστικά ως εξής [5]:

$$P_W = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_{in} \\ P_W^{Rated} \frac{(v - v_{in})}{(v_{rated} - v_{in})} & v_{in} \leq v \leq v_{rated} \\ P_W^{Rated} & v_{rated} \leq v \leq v_{out} \end{cases}$$

Equation 34: Ισχύς εξόδου ανεμογεννήτριας

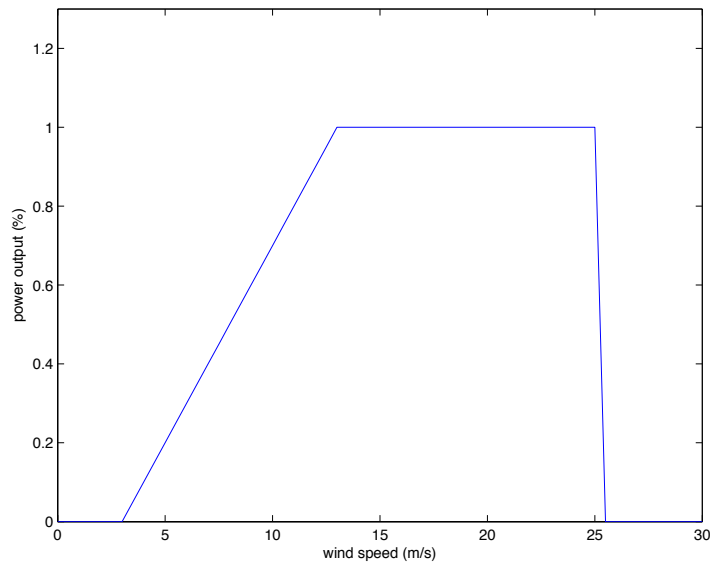


Figure 14: Ισχύς εξόδου ανεμογεννήτριας

2.4.1.3 Συσχέτιση Αιολικών Πάρκων

Στην περίπτωση της πιθανοτικής μεθόδου επέκτασης του συστήματος μεταφορά, για να υπάρχει ένα νόημα στη δημιουργία τυχαίων αριθμών για τις ταχύτητες του ανέμου των αιολικών πάρκων, θα πρέπει να εισαχθεί η έννοια της συσχέτισης των ταχυτήτων ανέμου. Αυτό σημαίνει ότι η ισχύς εξόδου από δυο αιολικά πάρκα που δεν είναι συσχετισμένα ως προς την θέση τους, δεν θα είναι συσχετισμένες και οι ταχύτητες ανέμου τους και το αντίστροφο. Το επίπεδο συσχέτισης δυο αιολικών πάρκων εξαρτάται από την απόσταση τους ή ακριβέστερα από το αν βρίσκονται μέσα στο ίδιο μετεωρολογικό πρότυπο.

Ο συντελεστής της γραμμικής συσχέτισης ορίζεται ως το κλάσμα της συνδιακύμανσης και του προϊόντος της τετραγωνικής ρίζας των διακυμάνσεων των τυχαίων μεταβλητών. Ο συντελεστής αυτός είναι επίσης γνωστός και ως συντελεστής συσχέτισης Pearson.

$$Corr_{X,Y} = \rho_{X,Y} = \frac{\sigma_{X,Y}}{\sigma_X \sigma_Y}$$

Equation 35: Συντελεστής γραμμικής συσχέτισης

όπου σ_X είναι η τυπική απόκλιση της μεταβλητής X και

$$\sigma_{X,Y} = Cov_{X,Y} = E[(X - E[X])(Y - E[Y])]$$

Equation 36: Συνδιακύμανση μεταβλητών

είναι η συνδιακύμανση των μεταβλητών X και Y , με το E να δηλώνει τη μέση τιμή της αντίστοιχης μεταβλητής.

Αν η συσχέτιση είναι μηδέν, τότε οι τυχαίες μεταβλητές ασυσχέτιστες αλλά δεν είναι απαραίτητο να είναι και ανεξάρτητες [7].

Έτσι για να δημιουργήσουμε δυο συσχετισμένες μεταβλητές αρκεί να τις πολλαπλασιάσουμε με το συντελεστή συσχέτισης τους. Και στην περίπτωση που οι μεταβλητές αυτές είναι πολλές (πίνακας μεταβλητών) και στη διάθεσή μας έχουμε τον πίνακα συσχέτισης τους, τότε η γενικευμένη διαδικασία για την δημιουργία ενός πίνακα συσχετισμένων μεταβλητών είναι η εξής.

1. Πρώτα, με την βοήθεια της αποσύνθεσης Cholesky μετασχηματίζουμε τον πίνακα συσχέτισης τους, που πρέπει να είναι συμμετρικός και θετικά ορισμένος, σε δυο τριγωνικούς πίνακες που εκφράζονται από τη σχέση:

$$Corr = LL^T$$

Equation 37: Αποσύνθεση Cholesky

Όπου ο πίνακας L είναι ένας κάτω τριγωνικός πίνακας.

2. Μετά για να προκύψει ο πίνακας συσχετισμένων μεταβλητών, βάσει του πίνακα συσχέτισης, αρκεί να πολλαπλασιάσουμε τον αρχικό πίνακα μεταβλητών με τον πίνακα L που βρήκαμε παραπάνω [13,14].

$$R_{Corr} = LR$$

Equation 38: Συσχέτιση μεταβλητών

Ακολουθεί ένα παράδειγμα δυο τυχαίων μεταβλητών από τη κατανομή Weibull, για εκατό δείγματα και συντελεστή συσχέτισης 85%. Αριστερά είναι οι τυχαίες μεταβλητές πριν τη διαδικασία της συσχέτισης και δεξιά μετά από αυτή.

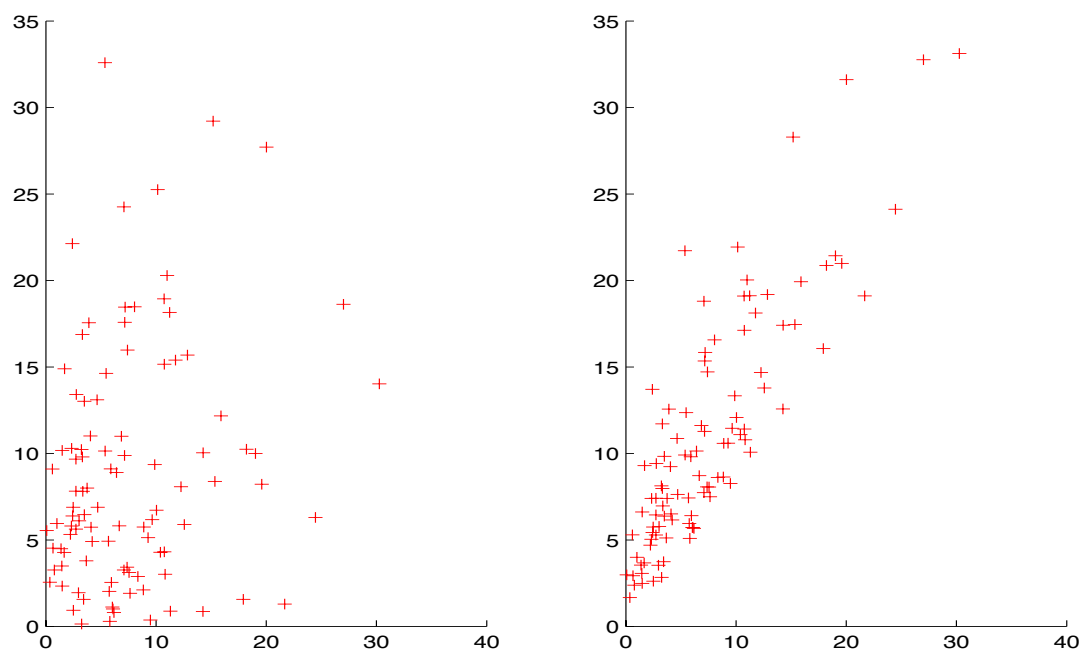


Figure 15: Συσχέτιση μεταβλητών διασπορά

Αντίστοιχα, στο επόμενο σχήμα πάνω φαίνονται οι μεταβλητές πριν τη συσχέτιση και κάτω μετά από αυτήν.

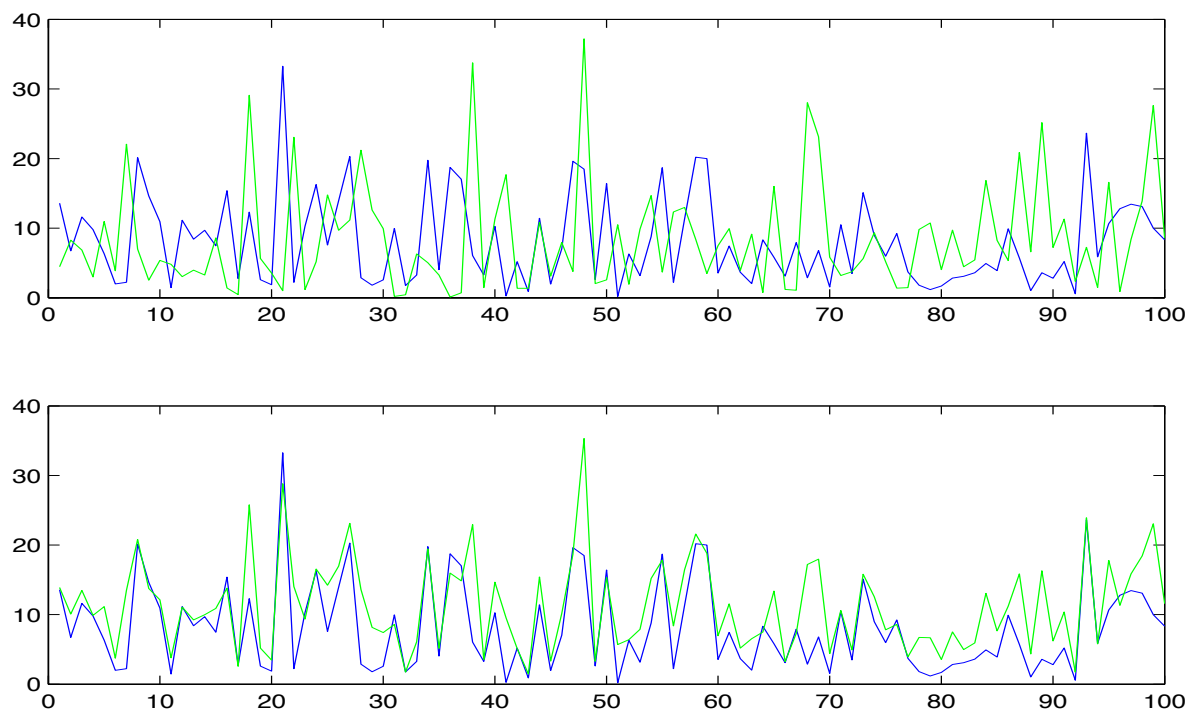


Figure 16: Συσχέτιση μεταβλητών σύγκριση

2.4.1.4 Αύξηση φορτίου

Έχει παρατηρηθεί ότι η ανάπτυξη τόσο της τεχνολογίας όσο και της βιομηχανίας απαιτεί όλο και περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια. Αντίστοιχα και ο τομέας του τουρισμού, ανάλογα με την εποχή, απαιτεί και αυτός αυξημένες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς θα υπάρχει μια περιοδική ή τυχαία αύξηση του φορτίου των ζυγών του δικτύου, που θα πρέπει να συνυπολογιστεί στη μελέτη επέκτασης του. Επίσης, η αύξηση του σε συνδυασμό με λανθασμένη πρόβλεψη, θα είχε ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη πτώση τάσης στους ζυγούς, μεγαλύτερες απώλειες στις γραμμές του δικτύου και ίσως και υπερφόρτωση αυτών. Έτσι, καθίσταται επιτακτική η ανάγκη για αξιόπιστη πρόβλεψη της ζήτησης τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα. Στη συνέχεια γίνεται η θεώρηση ότι η αύξηση του φορτίου σε ένα ζυγό, για ένα χρονικό διάστημα ακολουθεί κανονική κατανομή Gauss με μια μέση τιμή και διασπορά, δηλαδή το φορτίο ακολουθεί [5]:

$$\Delta P_{Di}(t) \sim N(\mu_{Di}(t), \sigma_{Di}(t))$$

Equation 39: Στιγμιαία αύξηση φορτίου

$$P_{Di}(t+1) = P_{Di}(t) + \Delta P_{Di}(t)$$

Equation 40: Αύξηση φορτίου

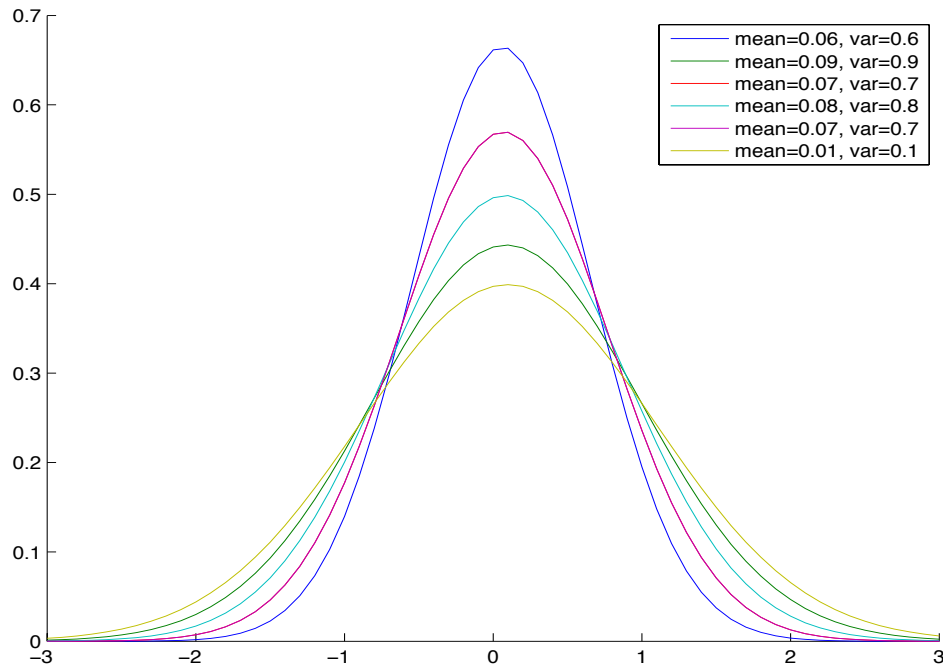


Figure 17: Κατανομές Gauss αύξησης φορτίου

3 Προγραμματισμός

3.1 Βελτιστοποίηση

Βελτιστοποίηση ορίζεται η διαδικασία εύρεσης της καλύτερης δυνατής λύσης ενός προβλήματος υπό συγκεκριμένες συνθήκες και περιορισμούς. Στόχος αυτής της διαδικασίας είναι είτε η ελαχιστοποίηση του κόστους ή της προσπάθειας, είτε η μεγιστοποίηση των απολαβών από τη λύση του προβλήματος. Η απαιτούμενη προσπάθεια ή το επιθυμητό όφελος ενός προβλήματος μπορεί να περιγραφεί από την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος. Έτσι, το πρόβλημα της βελτιστοποίησης μπορεί να οριστεί ως η εύρεση της μέγιστης ή της ελάχιστης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, που περιγράφει το πρόβλημα με κάποιες συγκεκριμένες μεταβλητές απόφασης.

Για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι μαθηματικού προγραμματισμού, καθώς η εύρεση του ελάχιστου ή του μέγιστου μίας συνάρτησης πολλών μεταβλητών υπό κάποιους περιορισμούς απαιτεί περίπλοκους μαθηματικούς υπολογισμούς. Για προβλήματα με στοχαστικό χαρακτήρα χρησιμοποιούνται στοχαστικές ανελίξεις, όπως για παράδειγμα οι αλυσίδες Markov, ενώ οι στοχαστικές μέθοδοι βοηθούν στην εύρεση εμπειρικών μοντέλων για πειραματικά και στατιστικά δεδομένα.

Τα προβλήματα βελτιστοποίησης μπορούν να διακριθούν με βάση διάφορα κριτήρια σε διάφορες κατηγορίες, με κυριότερες:

- Προβλήματα με περιορισμούς ή χωρίς. Ανάλογα αν υπάρχουν ή όχι περιορισμοί στις μεταβλητές απόφασης.
- Προβλήματα στατικής ή δυναμικής βελτιστοποίησης. Τα πρώτα αρκούνται στην εύρεση τιμών για τις μεταβλητές απόφασης, ενώ τα δεύτερα προσπαθούν να εκφράσουν τις μεταβλητές απόφασης συναρτήσει μιας τρίτης παραμέτρου ως προς την οποία γίνεται η βελτιστοποίηση.
- Προβλήματα βέλτιστου ελέγχου ή μη βέλτιστου ελέγχου. Στα πρώτα το πρόβλημα αποτελείται από στάδια τα οποία προκύπτουν το ένα από το άλλο με καθορισμένο τρόπο. Οι μεταβλητές απόφασης διαχωρίζονται σε μεταβλητές ελέγχου, που καθορίζουν τη ροή από το ένα στάδιο στο άλλο και σε μεταβλητές κατάσταση που περιγράφουν την κατάσταση σε οποιαδήποτε στάδιο.

Επίσης, τα προβλήματα βελτιστοποίησης μπορούν να διαχωριστούν βάσει των εξισώσεων που τα περιγράφουν ως:

- Γραμμικού προγραμματισμού, είναι αυτά που η αντικειμενική συνάρτηση ή οι περιορισμοί που τα περιγράφουν είναι γραμμικές συναρτήσεις.

- Μη γραμμικού προγραμματισμού, είναι αυτά που η αντικειμενική συνάρτηση ή οι περιορισμοί που τα περιγράφουν είναι μη γραμμικές συναρτήσεις.
- Γεωμετρικού προγραμματισμού, είναι αυτά που η αντικειμενική συνάρτηση ή οι περιορισμοί που τα περιγράφουν είναι αθροίσματα γινομένων των μεταβλητών απόφασης.
- Τετραγωνικού προγραμματισμού, είναι και αυτά μη γραμμικά προβλήματα, με τους περιορισμούς να είναι γραμμικές συναρτήσεις και η αντικειμενική συνάρτηση να είναι τετραγωνική. Τέτοια προβλήματα συναντούνται συνήθως σε προβλήματα σύνδεσης μονάδων παραγωγής στο σύστημα.

Κάποιες ακόμα κατηγορίες στις οποίες διαχωρίζονται τα προβλήματα βελτιστοποίησης είναι ανάλογα με τη φύση των μεταβλητών απόφασης:

- Σε προβλήματα ακέραιων ή συνεχών τιμών.
- Σε προβλήματα ντετερμινιστικά ή στοχαστικά.
- Σε προβλήματα διαχωρίσιμα ή μη, δηλαδή αν η αντικειμενική συνάρτηση ή οι περιορισμοί περιλαμβάνουν άλλες συναρτήσεις.

Έτσι, ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης θεμελιώνεται ως η εύρεση ενός διανύσματος που θα ελαχιστοποιεί ή θα μεγιστοποιεί αντίστοιχα την αντικειμενική συνάρτηση $F(x)$ του προβλήματος. Και αν είναι πρόβλημα με περιορισμούς, να ικανοποιεί και τους περιορισμούς του προβλήματος.

$$\min_{\vec{x}} F(\vec{x}) \quad \text{ή} \quad \max_{\vec{x}} F(\vec{x}), \quad \text{με} \quad \vec{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$$

Equation 41: Αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης

Υπό τους περιορισμούς:

$$g_i(\vec{x}) \leq 0 \quad \text{με} \quad i = 1, 2, 3, \dots, m$$

Equation 42: Ανισοτικοί περιορισμοί βελτιστοποίησης

$$l_j(\vec{x}) = 0 \quad \text{με} \quad j = 1, 2, 3, \dots, p$$

Equation 43: Περιορισμοί ισότητας βελτιστοποίησης

Το διάνυσμα X αποτελεί τις μεταβλητές απόφασης, η συνάρτηση $F(X)$ την αντικειμενική συνάρτηση, οι συναρτήσεις $g(X)$ τους περιορισμούς ανισότητας και οι συναρτήσεις $l(X)$ τους περιορισμούς ισότητας.

Είναι γνωστό από την ανάλυση συναρτήσεων, ότι τα ακρότατα μιας συνάρτησης προκύπτουν από την μελέτη των μερικών παραγώγων της συνάρτησης και επίσης ότι στα σημεία μηδενισμού της πρώτης παραγώγου και ανάλογα το πρόσημο της δεύτερης παραγώγου προκύπτουν τα ελάχιστα ή τα μέγιστα της συνάρτησης.

$$\frac{\partial F}{\partial x_i} \quad \text{και} \quad \frac{\partial^2 F}{\partial x_i \partial x_j} \quad \text{με} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad j = 1, 2, 3, \dots, n$$

Equation 44: Πρώτη και Δεύτερη παράγωγος

Στην περίπτωση της βελτιστοποίησης με περιορισμούς έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι για την επίλυση της όπως:

- Η απευθείας αντικατάσταση.
- Η περιορισμένη διακύμανση.
- Η μέθοδος των πολλαπλασιαστών Lagrange.

Η μέθοδος της απευθείας αντικατάστασης εφαρμόζεται συνήθως σε απλά προβλήματα και στοχεύει στην έκφραση των περιορισμένων μεταβλητών μέσα από τις υπόλοιπες μεταβλητές απόφασης. Έτσι μετατρέπεται σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς. Η μέθοδος της διακύμανσης των περιορισμών στοχεύει στην εύρεση μιας κλειστής μορφής για την πρώτη παράγωγο της συνάρτησης $F(dX)$ σε όλα τα σημεία στα οποία ικανοποιούνται και οι εξισώσεις των περιορισμών. Τα βέλτιστα σημεία λαμβάνονται αν τεθεί το df ίσο με το μηδέν. Η δυσκολία της μεθόδου προκύπτει στον υπολογισμό των μερικών παραγώγων δεύτερης τάξης στα σημεία μεταβολής των περιορισμών. Η μέθοδος των πολλαπλασιαστών Lagrange μετατρέπει ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης n μεταβλητών και m περιορισμών σε πρόβλημα βελτιστοποίησης $n+m$ μεταβλητών χωρίς περιορισμούς [1].

Μια ακόμα σημαντική έννοια στα προβλήματα βελτιστοποίησης είναι η κυρτότητα των συναρτήσεων. Μια συνάρτηση ονομάζεται κυρτή, όταν το ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει δυο οποιαδήποτε σημεία της γραφικής της παράστασης δε βρίσκεται ποτέ κάτω από την καμπύλη και αντίστοιχα κοίλη όταν το ευθύγραμμο τμήμα δε βρίσκεται ποτέ πάνω από την καμπύλη.

Με αυτή την έννοια μπορούμε να ορίσουμε και το πρόβλημα κυρτού προγραμματισμού, να είναι ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης κυρτής συνάρτησης (ή μεγιστοποίησης κοίλης συνάρτησης) σε ένα κυρτό σύνολο περιορισμών. Βασικό θεώρημα του κυρτού προγραμματισμού είναι ότι κάθε τοπικό ελάχιστο ενός προβλήματος κυρτού προγραμματισμού είναι και ολικό ελάχιστο. Έτσι, είναι δυνατόν το ολικό ελάχιστο του προβλήματος να εμφανίζεται σε περισσότερα του ενός σημεία (δηλαδή το πρόβλημα έχει πολλές λύσεις), ωστόσο το σύνολο αυτών των σημείων είναι κυρτό. Δηλαδή δεν υπάρχουν τοπικά ελάχιστα. Η ιδιότητα αυτή των κυρτών προβλημάτων βελτιστοποίησης είναι πολύ σημαντική γιατί εγγυάται ότι το τοπικό ελάχιστο που θα υπολογιστεί από οποιαδήποτε επαναληπτική μέθοδο βελτιστοποίησης θα είναι και το ολικό ελάχιστο του προβλήματος. Επίσης, η τομή οποιοδήποτε κυρτών συνόλων είναι και αυτό κυρτό σύνολο [12].

3.2 Γενετικός Αλγόριθμος

Ο γενετικός αλγόριθμος είναι μια τεχνική βελτιστοποίησης που βασίζεται στη θεωρία της εξέλιξης των ειδών και της φυσικής επιλογής, όπως αυτή διατυπώθηκε από το Δαρβίνο στα μέσα του 19 αιώνα. Ο γενετικός αλγόριθμος αποτελεί μια μέθοδο αναζήτησης βέλτιστων λύσεων σε προβλήματα που μπορούν να περιγραφούν από ένα μαθηματικό μοντέλο. Χρησιμοποιείται συνήθως σε προβλήματα πολλών παραμέτρων ή μεταβλητών απόφασης που δεν έχει βρεθεί κάποια αναλυτική μέθοδος επίλυσης, που να μπορεί να βρει το βέλτιστο συνδυασμό τιμών των μεταβλητών αυτών.

Η λειτουργία του έγκειται στη διατήρηση ενός πληθυσμού από πολλά ανεξάρτητα άτομα - δείγματα και η εξέλιξη τους κάτω από συγκεκριμένους κανόνες, με σκοπό την ελαχιστοποίηση (ή την μεγιστοποίηση) μιας αντικειμενικής συνάρτησης. Η μέθοδος αυτή έγινε γνωστή από τον John Holland το 1975 και παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα γενικότητας όπως:

- Μπορεί να βελτιστοποιήσει συνεχείς και διακριτές μεταβλητές.
- Δεν απαιτεί η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος να είναι παραγωγίσιμη.
- Μπορεί να βελτιστοποιήσει προβλήματα με αρκετά περίπλοκη αντικειμενική συνάρτηση.
- Διατηρεί μια λίστα (πληθυσμό) από βέλτιστες λύσεις και όχι μόνο μια βέλτιστη λύση.
- Μπορεί να επιλύσει το πρόβλημα και με κωδικοποιημένες τις μεταβλητές του.
- Μπορεί να ανταποκριθεί εξίσου καλά και με πειραματικά δεδομένα αλλά και με πραγματικά δεδομένα.

Ο γενετικός αλγόριθμος εντάσσεται στην κατηγορία των αλγορίθμων αναζήτησης, δηλαδή αλγορίθμων εύρεσης της βέλτιστης λύσης μέσα από ένα πλήθος πιθανών λύσεων. Έτσι, πολλές φορές αδυνατεί να βρει τη βέλτιστη λύση, αλλά την προσεγγίζει βρίσκοντας άλλες καλές λύσεις.

Ο αλγόριθμος ξεκινάει με τον καθορισμό των μεταβλητών απόφασης, της αντικειμενικής συνάρτησης και της συνάρτησης καταλληλότητα και τελειώνει με μια καλή ή βέλτιστη λύση. Στα ενδιάμεσα εφαρμόζει μία σειρά από γενετικούς τελεστές και τεχνικές αναζήτησης της βέλτιστης λύσης. Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου παρουσιάζεται παρακάτω:

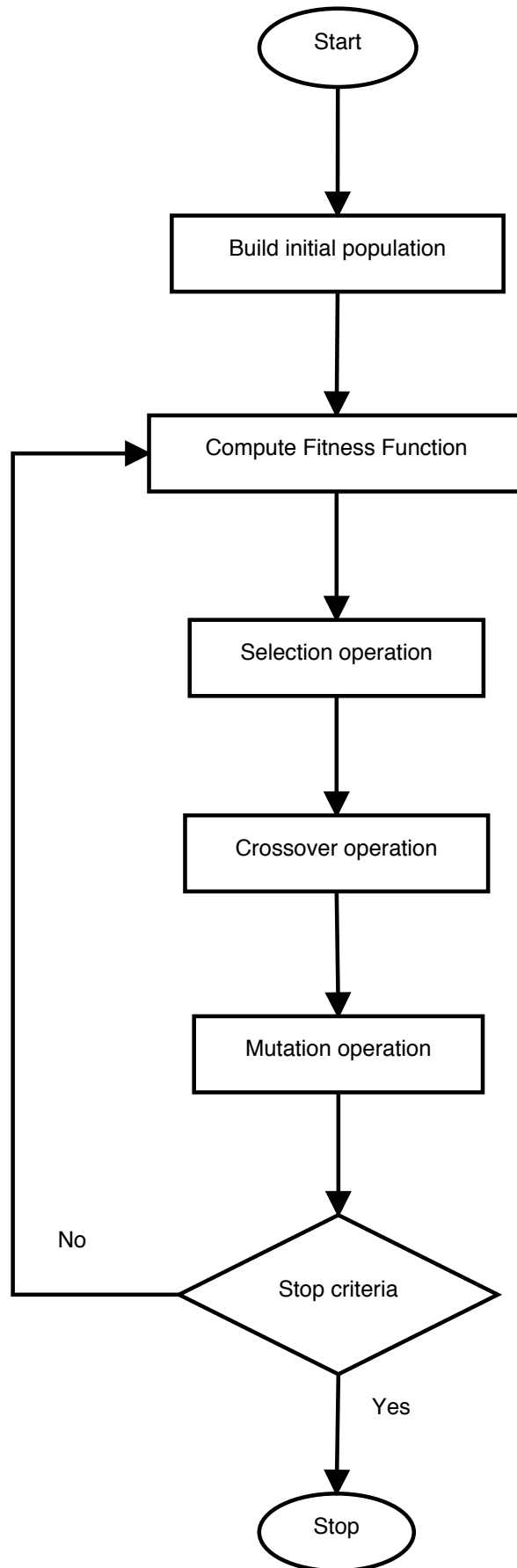


Figure 18: Διάγραμμα ροής του Γενετικού Αλγορίθμου

Η είσοδος του αλγορίθμου είναι το χρωμόσωμα, που αποτελείται από ένα διάνυσμα με τις μεταβλητές απόφασης του προβλήματος. Η μορφή του χρωμοσώματος εξαρτάται από το τι αντιπροσωπεύουν οι μεταβλητές αυτές και από τι μορφή έχει ο γενετικός αλγόριθμος που τρέχουμε. Αν παραδείγματος χάριν, ο γενετικός αλγόριθμος είναι δυαδικός τότε πριν να αντιστοιχηθούν οι μεταβλητές απόφασης στα γονίδια του χρωμοσώματος πρέπει να κωδικοποιηθούν καταλλήλως.

$$\text{ΧΡΩΜΟΣΩΜΑ} = [p_1, p_2, \dots, p_{N_{\text{var}}}]$$

Equation 45: Χρωμόσωμα Γ.Α.

Κάθε χρωμόσωμα έχει και μια τιμή καταλληλότητας, που το αξιολογεί μέσα στη διαδικασία του γενετικού αλγορίθμου. Συνήθως η συνάρτηση καταλληλότητας σε μια τυπική διαδικασία παίρνει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος, αλλά σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να συμπεριλαμβάνει προσθετικά ποινές για παραβίαση κάποιου περιορισμού σε προβλήματα βελτιστοποίησης υπό περιορισμούς.

$$\text{ΤΙΜΗ - ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑΣ} = F(\text{ΧΡΩΜΟΣΩΜΑ}) = F([p_1, p_2, \dots, p_{N_{\text{var}}}])$$

Equation 46: Τιμή καταλληλότητας χρωμοσώματος Γ.Α.

Στην αρχή του γενετικού αλγορίθμου δημιουργείται ένας αρχικός πληθυσμός χρωμοσωμάτων και αρχικοποιείται σε τιμές κατάλληλες για το πρόβλημα που είναι να λυθεί. Στην περίπτωση που υπάρχουν περιορισμοί οι τιμές αρχικοποίησης είναι τέτοιες ώστε να μην παραβιάζονται οι περιορισμοί. Ο πληθυσμός αναπαρίσταται με ένα πίνακα που η κάθε γραμμή του είναι ένα διάνυσμα όσο το χρωμόσωμα. Ο πίνακας που προκύπτει τελικά είναι ένας πίνακας διαστάσεων (Αριθμός Μεταβλητών Απόφασης x Μέγεθος Πληθυσμού). Τα χρωμοσώματα επομένως του αρχικού πληθυσμού δημιουργούνται ή τυχαία από την ομοιόμορφη κατανομή ή ψευδοτυχαία ώστε να ικανοποιούν τους περιορισμούς του προβλήματος και καθένα από αυτά αξιολογείται με μια τιμή καταλληλότητας.

Η επιλογή γονέων για τις επόμενες γενιές γίνεται με διάφορες μεθόδους. Μπορεί να γίνει ομοιόμορφα, στοχαστικά ομοιόμορφα, με τη μέθοδο του τροχού της τύχης και με τυχαία επιλογή από ένα σύνολο γονέων. Η μέθοδος του τροχού της τύχης είναι μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους για την επιλογή γονέων στο γενετικό αλγόριθμο και παρουσιάζεται παρακάτω. Η μέθοδος αυτή ταξινομεί τα χρωμοσώματα βάσει της τιμής καταλληλότητας από τη μικρότερη στη μεγαλύτερη και επιλέγει να κρατήσει ένα ποσοστό του πληθυσμού. Στη συνέχεια δίνει βαρύτητα σε κάθε χρωμόσωμα που είναι αντιστρόφως ανάλογη της τιμής καταλληλότητας του, δηλαδή ένα χρωμόσωμα που έχει μικρή τιμή καταλληλότητας (πρόβλημα ελαχιστοποίησης) έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να επιλεγεί για την επόμενη γενιά.

Έτσι η πιθανότητα για να επιλεγεί το i -στο ταξινομημένο χρωμόσωμα δίνεται από τον τύπο:

$$P_i = \frac{N_{keep} - i + 1}{\sum_{n=1}^{N_{keep}} i} \quad \text{με} \quad N_{keep} = \text{round}(\text{Pr}_{keep} * N_{pop})$$

Equation 47: Πιθανότητα επιλογής χρωμοσώματος Γ.Α.

Η επιλογή του χρωμοσώματος γίνεται με τη βοήθεια των αθροιστικών πιθανοτήτων. Για κάθε χρωμόσωμα που θα επιλεγεί παράγεται ένας τυχαίος αριθμός στο διάστημα $[0,1]$. Με βάση αυτόν τον αριθμό επιλέγεται το πρώτο χρωμόσωμα που η αθροιστική του πιθανότητα είναι μεγαλύτερη από τον αριθμό αυτόν και η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να διαλεχτούν N_{keep} γονείς.

Η επόμενη γενετική διαδικασία που ακολουθεί είναι η διασταύρωση. Και σε αυτή τη διαδικασία υπάρχουν πολύ τρόποι για να εφαρμοστεί όπως ενός σημείου διασταύρωσης, δυο σημείων, τυχαία επιλογή γονιδίων, ευρετικά βάσει ενός ποσοστού μεταξύ των γονέων, ή με τον αριθμητικό μέσο των δυο γονέων. Στην πιο απλή μέθοδο, την επιλογή ενός σημείου για διασταύρωση, επιλέγεται τυχαία ένα σημείο - γονίδιο μέσα στο χρωμόσωμα και το παιδί που προκύπτει έχει τα γονίδια από τον ένα γονιό έως το σημείο διασταύρωσης και από τον άλλο τα υπόλοιπα.

$$P1 = [a,b,c,d,e,f,g,h] \quad \text{και} \quad P2 = [1,2,3,4,5,6,7,8]$$

$$\text{Child1} = [a,b,c,4,5,6,7,8] \quad \text{με σημείο διασταύρωσης το 3}$$

Ο πληθυσμός με τις ως τώρα γενετικές διαδικασίες έχει επιλέξει και διασταυρώσει τις καλύτερες γενετικές πληροφορίες από τα ανεξάρτητα άτομα του πληθυσμού, αλλά οι πληροφορίες αυτές παραμένουν οι ίδιες. Για να εξερευνηθεί παραπέρα ο χώρος των πιθανών λύσεων θα πρέπει να εισαχθούν καινούρια γονίδια στα χρωμοσώματα. Οι τυχαίες μεταλλάξεις που επιβάλλονται στον πληθυσμό αλλάζουν ένα συγκεκριμένο ποσοστό των γονιδίων - μεταβλητών των χρωμοσωμάτων. Με αυτή τη διαδικασία εισάγεται καινούρια πληροφορία και χαρακτηριστικά που δεν υπήρχαν πριν στο πληθυσμό. Η μετάλλαξη ενός γονιδίου αλλάζει την τιμή του μεταξύ μιας μέγιστης τιμής και μιας ελάχιστης ή ομοιόμορφα ή ακολουθώντας την κατανομή Gauss.

$$p_i = (p_{\max} - p_{\min}) * \text{rand} + p_{\min}$$

Equation 48: Μετάλλαξη γονιδίων χρωμοσώματος Γ.Α.

Έτσι ο αριθμός των μεταλλάξεων στον πληθυσμό, θεωρώντας ένα ποσοστό μετάλλαξης είναι:

$$N_{mut} = \text{round}(\text{Pr}_{mut} * (N_{pop} - 1) * N_{var})$$

Equation 49: Αριθμός μεταλλάξεων στον πληθυσμό

Μια ακόμα γενετική διαδικασία που υπάρχει στον αλγόριθμο είναι η διαδικασία του ελιτισμού. Δηλαδή την επιλογή του καλύτερου ή των καλύτερων χρωμοσωμάτων για διατηρηθούν αναλλοίωτα από τη διαδικασία της μετάλλαξης, ώστε να μη χάνονται τα καλύτερα χαρακτηριστικά του πληθυσμού. Με άλλα λόγια να βρεθεί μια καλή λύση να διατηρηθεί και στις επόμενες γενιές.

Μετά από όλες αυτές τις διαδικασίες υπολογίζεται η τιμή καταλληλότητας για κάθε χρωμόσωμα του πληθυσμού, της καινούριας γενιάς, και ο πληθυσμός ταξινομείται βάσει αυτής της τιμής.

Ο αλγόριθμος σε αυτό το σημείο ξαναρχίζει από τη διαδικασία της επιλογής και επαναλαμβάνεται μέχρι να επέλθουν οι προκαθορισμένες γενιές ή να υπάρξει σύγκληση σε μια λύση πριν από αυτές.

Ο γενετικός αλγόριθμος για το πρόβλημα του σχεδιασμού επέκτασης του δικτύου μεταφοράς χρειάζεται μερικές τροποποιήσεις για τη σωστή λύση του προβλήματος. Μια πρώτη τροποποίηση είναι ότι οι μεταβλητές απόφασης του προβλήματος πρέπει να παίρνουν μόνο ακέραιες τιμές, για να υπάρχει αντιστοιχία με πραγματικά στοιχεία του συστήματος όπως οι γραμμές μεταφοράς, υποσταθμοί κτλ. Επίσης δεν χρειάζεται, στην πιο γενική μορφή του, να κωδικοποιηθούν τα γονίδια του. Η κάθε μεταβλητή - γονίδιο αναφέρεται στο πόσες πανομοιότυπες γραμμές θα μπουν ανάμεσα σε δυο ζυγούς. Μια ακόμα τροποποίηση αφορά την αβεβαιότητα στην παραγωγή και στην κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας. Για αυτό το λόγο έχει συμπεριληφθεί, στον κώδικα που ασχολείται με τον έλεγχο των περιορισμών, η τεχνική της προσομοίωσης Monte Carlo για να εκτιμηθούν πιθανοτικά οι ροές ισχύος του δικτύου [5].

Σημαντικό ρόλο έχουν και οι ρυθμίσεις των μεταβλητών ελέγχου του αλγορίθμου για την λύση του προβλήματος. Πολλές από αυτές εξαρτώνται από την περίπτωση του δικτύου, δηλαδή ανάλογα το μέγεθός του, την αρχική τοπολογία του, το αν είναι απομονωμένο και σε άλλους παράγοντες που μπορεί να χαρακτηρίζουν το δίκτυο. Μια γενική θεώρηση, των μεταβλητών αυτών, για το μέγεθος του πληθυσμού είναι μεταξύ 30-200 και για προκαθορισμένες γενιές, για τον τερματισμό, μεταξύ 50-150. Για το ποσοστό διασταύρωσης του πληθυσμού να είναι μεταξύ 50-100% και για τη μετάλλαξη μεταξύ 0.1-5%. Τέλος η διαδικασία του ελιτισμού δεν ενεργοποιείται για μικρά δίκτυα αλλά για μεγάλα και αφορά ένα ποσοστό 2-3% του πληθυσμού [15].

3.3 Αλγόριθμος Σμήνους Σωματιδίων

Ο αλγόριθμος σμήνους σωματιδίων αναπτύχθηκε από τους Kennedy και Eberhard το 1995. Χρησιμοποιήθηκε, για βελτιστοποίηση ως μια εναλλακτική λύση αντί για το γενετικό αλγόριθμο και στο πεδίο της τεχνητής νοημοσύνης. Η τεχνική αυτή είναι εμπνευσμένη από την κοινωνική συμπεριφορά των σμηνών πουλιών ή ψαριών. Συγκρίνεται με τον γενετικό αλγόριθμο, με τη σημασία, ότι ξεκινάνε και οι δυο αλγόριθμοι από αρχικά τυχαίες λύσεις και αναζητούν τη βέλτιστη λύση. Όμως ο αλγόριθμος του σμήνους σωματιδίων δεν περιέχει διαδικασίες όπως η διασταύρωση ή η μετάλλαξη. Επίσης ένα ακόμα κοινό χαρακτηριστικό είναι η αντικειμενική συνάρτηση, η οποία χρησιμοποιεί τη θέση του σωματιδίου για να υπολογίσει μια λύση. Σε αναλογία με τον γενετικό αλγόριθμο, το σμήνος αντιστοιχεί στον πληθυσμό και το σωματίδιο στο χρωμόσωμα.

Το σμήνος αποτελείται από σωματίδια τα οποία κινούνται στο χώρο λύσεων του προβλήματος και το κάθε σωματίδιο αντιπροσωπεύει μια λύση. Κάθε σωματίδιο i περιγράφεται από δυο διανύσματα, το διάνυσμα της θέσης X_i και το διάνυσμα της ταχύτητας V_i . Το διάνυσμα της θέσης του αντιστοιχεί σε παραμέτρους του εξεταζόμενου προβλήματος.

Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου φαίνεται παρακάτω.

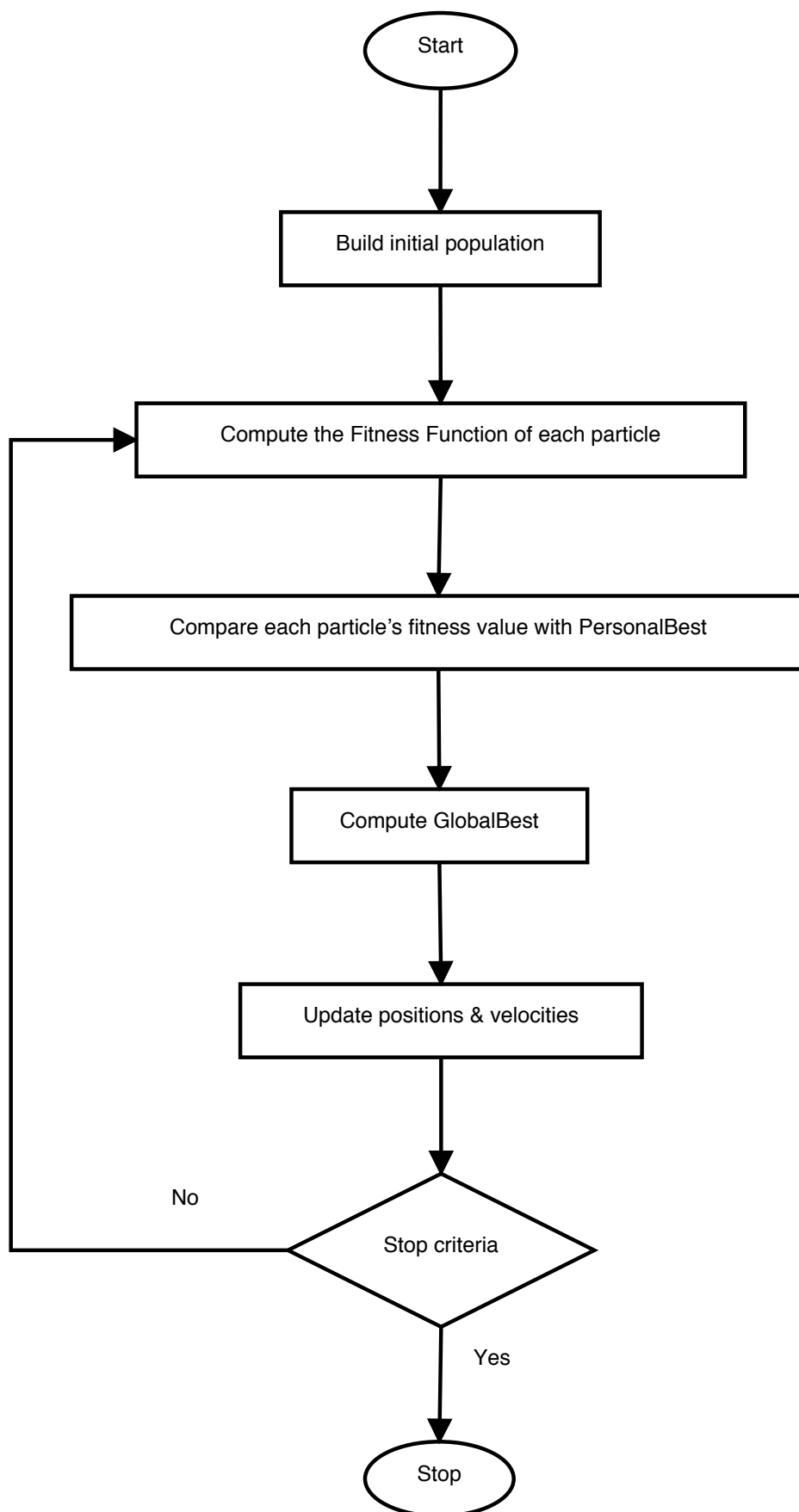


Figure 19: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου του Σμήνους Σωματιδίων

Σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου κάθε σωματίδιο τροποποιεί την ταχύτητα του λαμβάνοντας υπόψη τα εξής:

- Την προηγούμενη του ταχύτητα.
- Την καλύτερη θέση του.
- Την καλύτερη θέση του καλύτερου σωματιδίου.

Από την προηγούμενη ταχύτητα του σωματιδίου υπολογίζεται η συνιστώσα της αδράνειας, από την καλύτερη θέση του ίδιου του σωματιδίου η γνωσιακή συνιστώσα και από την καλύτερη θέση του καλύτερου σωματιδίου η κοινωνική συνιστώσα. Η ταχύτητα κάθε σωματιδίου ενημερώνεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$V_i(t) = C_{inertia} + C_{cognitive} + C_{social}$$

$$V_i(t) = W_{iner} V_i(t-1) + W_{cog} R_1(t)(P_i - X_i(t)) + W_{soc} R_2(t)(P_g - X_i(t))$$

Equation 50: Ταχύτητα σωματιδίου Σ.Σ.

Οι παράμετροι W_{iner} , W_{cog} και W_{soc} έχουν σταθερές τιμές και εκφράζουν το συντελεστή βαρύτητας της κάθε συνιστώσας. Οι παράμετροι R_1 και R_2 είναι τυχαίες τιμές ομοιόμορφα κατανομημένες στο διάστημα $[0,1]$ και παράγονται σε κάθε επανάληψη.

Η συνεισφορά της γνωσιακής συνιστώσας στο σωματίδιο αφορά την προσωπική μνήμη του για την καλύτερη θέση στην οποία έχει βρεθεί και επηρεάζει την τάση του σωματιδίου να επιστρέφει σε θέσεις που το ικανοποιούσαν περισσότερο στο παρελθόν. Η κοινωνική συνιστώσα από την άλλη αναφέρεται στην επίδραση που ασκεί το κοινωνικό σύνολο, δηλαδή το σμήνος, στο σωματίδιο το οποίο καλείται να υιοθετήσει μια κοινή πορεία με αυτό. Όσο μεγαλύτερη επίδραση έχει αυτή η συνιστώσα στο σωματίδιο τόσο αυτό έχει την τάση να κινηθεί προς τη βέλτιστη θέση που ικανοποιεί το σύνολο.

Η θέση του κάθε σωματιδίου ενημερώνεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$X_i(t) = X_i(t-1) + V_i(t)$$

Equation 51: Θέση σωματιδίου Σ.Σ.

Η καλύτερη θέση που μπορεί να πάρει το κάθε σωματίδιο, συμβολίζεται με P_i στην εξίσωση της ταχύτητας, και ουσιαστικά είναι η καλύτερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για αυτό. Η γενικά καλύτερη θέση σε όλο το σμήνος σωματιδίων, συμβολίζεται με P_g στην εξίσωση της ταχύτητας, και είναι η καλύτερη από τις ατομικά καλύτερες θέσεις. Με τις επαναλήψεις του αλγορίθμου τα σωματίδια έλκονται προς τη βέλτιστη θέση - λύση, βασιζόμενα στην προσωπική τους αναζήτηση και στην αναζήτηση του σμήνους. Ο τερματισμός του αλγορίθμου έρχεται, όπως και στον γενετικό αλγόριθμο, αν επέλθουν οι προκαθορισμένες επαναλήψεις ή αν υπάρξει σύγκλιση σε μια λύση πριν από αυτές [16].

3.4 Monte Carlo

Στην επιστήμη της στατιστικής χρησιμοποιούσαν την μέθοδο της προσομοίωσης για την εκτίμηση της συμπεριφοράς των στοχαστικών μεταβλητών που η ακριβής κατανομή δεν μπορούσε να εκτιμηθεί θεωρητικά.

Πριν την ανακάλυψη της μεθόδου, στα τεστ προσομοίωσης με ντετερμινιστικά προβλήματα, οι αβεβαιότητες στις προσομοιώσεις εκτιμούνταν από τη στατιστική δειγματοληψία. Παραδείγματος χάριν, από μια ψευδοτυχαία μεταβλητή στο διάστημα $(0,1]$ τραβιέται ένας αριθμός και παίρνεται η απόφαση που ανήκει, ανάλογα με την αθροιστική κατανομή των ενδεχομένων (μοιρασμένα στο διάστημα $(0,1]$, από 0-0.3 το A, από 0.4-0.7 το B και 0.8-1 το Γ). Η προσομοίωση Monte Carlo αντέστρεψε αυτή τη διαδικασία, λύνοντας τα ντετερμινιστικά προβλήματα με χρήση αναλογικών πιθανοτήτων. Καταναλογία με πριν, τραβιέται ένας μεγάλος αριθμός από ψευδοτυχαίες μεταβλητές στο διάστημα $(0,1]$, παίρνεται η απόφαση που ανήκουν και εκτιμάται (αναλογικά) η συμπεριφορά του επαναλαμβανόμενου πειράματος.

Η μέθοδος αυτή είχε πρωτοεμφανισθεί στην επιστημονική κοινότητα το 1908 από τον W. S. Gossett και πήρε το όνομά της από τον Von Neumann, ως κωδικό όνομα για τη δουλειά που έκανε με τον Stanislaw Ulam στα εργαστήρια της Los Alamos Scientific. Το όνομα αναφέρεται στο καζίνο του Μονακό που εκεί έπαιζε ο θεός του Ulam.

Η προσομοίωση Monte Carlo αποτελεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο στατιστικής δειγματοληψίας και είναι ικανή να δώσει ακριβή αποτελέσματα. Έστω X είναι η στοχαστική μεταβλητή, που θέλουμε να προσομοιώσουμε, και $A = E[X]$ η αναμενόμενη τιμή της. Δημιουργώντας ένα σύνολο τυχαίων τιμών $\{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}$ από την κατανομή πιθανότητας της μεταβλητής X μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά η αναμενόμενη τιμή της.

$$\bar{A}_n = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_k$$

Equation 52: Αναμενόμενη τιμή M.C.

Αν ο αριθμός των τυχαίων τιμών αυξηθεί σχεδόν στο άπειρο, τότε σύμφωνα με τη θεωρία μεγάλων αριθμών η μεταβλητή \bar{A}_n προσεγγίζει την A .

$$A = \lim_{n \rightarrow \infty} \bar{A}_n$$

Equation 53: Προσέγγιση μεταβλητής σύμφωνα με την θεωρία μεγάλων αριθμών M.C.

Οι τιμές των X_k είναι τυχαίες και σε κάθε επανάληψη της μεθόδου είναι διαφορετικές. Η τιμή της μεταβλητής A όμως δεν είναι τυχαία. Είναι η αναμενόμενη τιμή της στοχαστικής μεταβλητής X και όσο μεγαλώνει ο αριθμός των τυχαίων τιμών που δημιουργούμε, για να την προσομοιώσουμε, με τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια μπορούμε να την προσεγγίσουμε. Το μειονέκτημά της μεθόδου είναι ο χρόνος υπολογισμού της, που μεγαλώνει όσο μεγαλώνει ο αριθμός των τυχαίων τιμών που δημιουργούνται [5].

Η προσέγγιση της προσομοίωσης μπορεί να γίνει με δυο τρόπους και εξαρτάται αν οι τυχαίες τιμές που δημιουργούνται συνδέονται με τις προηγούμενες δημιουργημένες τιμές ή όχι. Έτσι η μέθοδος μπορεί να χαρακτηριστεί ως ακολουθιακή ή ως μη ακολουθιακή.

Πιο αναλυτικά, για την περίπτωση του προβλήματος της επέκτασης του δικτύου μεταφοράς, η μέθοδος Monte Carlo δημιουργεί ένα σύνολο από δυνατές καταστάσεις του συστήματος που μπορεί να είναι είτε ακολουθιακές είτε μη ακολουθιακές.

Στην ακολουθιακή περίπτωση, κάθε κατάσταση του συστήματος υποτίθεται ότι έχει μια συγκεκριμένη διάρκεια. Έστω ότι η διάρκεια είναι 1 h, αυτό σημαίνει ότι το σύστημα θα αλλάξει ελάχιστα μέσα σε αυτή την ώρα. Με δειγματοληψία από τις πιθανοτικές κατανομές που περιγράφουν τα στοχαστικά κομμάτια του συστήματος, οι αλλαγές στο σύστημα από την τωρινή κατάσταση στην επόμενη μπορούν να υπολογιστούν. Προαπαιτούμενο, σε αυτήν την περίπτωση, είναι η γνώση των προηγούμενων καταστάσεων του συστήματος κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Όμως αυτό απαιτεί μεγάλη αποθήκευση δεδομένων και καταλήγει να κάνει την μέθοδο να συγκλίνει αργά σε σχέση με τη μη ακολουθιακή.

Στην περίπτωση της μη ακολουθιακής προσομοίωσης, γίνεται δειγματοληψία από τις πιθανοτικές κατανομές που περιγράφουν τα στοχαστικά κομμάτια του συστήματος και στη συνέχεια της κατάστασης του συστήματος από αυτές. Έτσι κάθε κατάσταση του συστήματος είναι ανεξάρτητη από τις υπόλοιπες. Αυτό εξασφαλίζει ότι χρειάζονται λιγότερα δεδομένα να αποθηκευτούν, με αποτέλεσμα να συγκλίνει πιο γρήγορα η μη ακολουθιακή περίπτωση. Αν όμως κάποια λειτουργία του συστήματος εξαρτάται από την προηγούμενη κατάστασή του τότε αυτή δε μπορεί να υπολογιστεί στη μη ακολουθιακή περίπτωση [17].

3.5 Συνάρτηση ποινής για βελτιστοποίηση υπό περιορισμούς

Ο γενετικός αλγόριθμος και ο αλγόριθμος σμήνους σωματιδίων είναι μέθοδοι στοχαστικής βελτιστοποίησης βασισμένες σε φυσικές διαδικασίες. Λειτουργούν διατηρώντας έναν πληθυσμό από ανεξάρτητα άτομα, που το καθένα αντιπροσωπεύει μια πιθανή λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης και επαναληπτικά δημιουργούν και αξιολογούν τα άτομα αυτά χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση αξιολόγησης.

Τυπικά αυτοί οι αλγόριθμοι εφαρμόζονται σε προβλήματα χωρίς περιορισμούς, γι' αυτό είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί κάποια επιπλέον μέθοδος για να κρατηθούν οι λύσεις στην εφικτή περιοχή λύσεων. Η πιο δημοφιλής μέθοδος, για να χειρίζεται τους περιορισμούς, είναι να χρησιμοποιηθεί μια συνάρτηση ποινής. Αυτή θα επιβάλει ποινές σε ανέφικτες λύσεις αυξάνοντας την αντικειμενική συνάρτησή τους ανάλογα με βαθμό παραβίασης του κάθε περιορισμού.

Μια μέθοδος ποινής μπορεί να μετατρέψει ένα πρόβλημα με περιορισμούς σε ένα χωρίς περιορισμούς με δυο τρόπους.

Ο πρώτος τρόπος χρησιμοποιεί την αθροιστική μορφή:

$$eval(\vec{x}) = \begin{cases} f(\vec{x}) & \vec{x} \in F \\ f(\vec{x}) + p(\vec{x}) & otherwise \end{cases}$$

Equation 54: Συνάρτηση ποινής - αθροιστική μορφή

όπου το $p(x)$ συμβολίζει τη συνάρτηση της ποινής και F την περιοχή εφικτών λύσεων. Αν δεν υπάρχουν παραβιάσεις το $p(x)$ θα είναι μηδέν, αλλιώς θα είναι θετικό. Πλέον η συνάρτηση $eval(x)$ θα είναι η κυρίως αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος.

Ο δεύτερος τρόπος χρησιμοποιεί την μορφή γινομένου:

$$eval(\vec{x}) = \begin{cases} f(\vec{x}) & \vec{x} \in F \\ f(\vec{x})p(\vec{x}) & otherwise \end{cases}$$

Equation 55: Συνάρτηση ποινής – μορφή γινομένου

Αν δεν υπάρχουν παραβιάσεις το $p(x)$ θα είναι ένα, αλλιώς θα είναι μεγαλύτερο από ένα.

Στην βελτιστοποίηση δυο είναι οι βασικοί τύποι συνάρτησης ποινής που χρησιμοποιούνται. Οι εσωτερικές και οι εξωτερικές συναρτήσεις.

Οι εξωτερικές συναρτήσεις ποινής χρησιμοποιούνται περισσότερο από τις εσωτερικές, γιατί δεν είναι αναγκαίο να ξεκινήσουν με μια εφικτή λύση. Αυτό είναι μεγάλο προσόν για τα προβλήματα βελτιστοποίησης κάτω από περιορισμούς, γιατί πολλές φορές είναι πολύ δύσκολο (NP-hard) να βρεθεί μια εφικτή λύση.

Η γενική μορφή μιας συνάρτησης εξωτερικής ποινής είναι:

$$eval(\vec{x}) = f(\vec{x}) + \sum_{i=1}^q r_i G_i + \sum_{j=1}^m z_j L_j$$

Equation 56: Γενική μορφή συνάρτησης εξωτερικής ποινής

με

$$G_i = \max[0, g_i(\vec{x})]^\beta$$

Equation 57: Ανισοτικοί περιορισμοί συνάρτηση ποινής

$$L_j = |h_j(\vec{x})|^\gamma$$

Equation 58: Περιορισμοί ισότητας συνάρτηση ποινής

συνήθως το (β) και το (γ) είναι 1 ή 2.

Αν οι περιορισμοί ανισότητας τηρούνται, τότε $g_i(x) \leq 0$ και κατά συνέπεια το $\max[0, g_i(x)] = 0$. Αντίστοιχα και για τους περιορισμούς ισότητας, αν τηρούνται είναι μηδέν, επομένως η συνάρτηση $eval(x)$ δεν επηρεάζεται.

Αν όμως οι περιορισμοί παραβιάζονται, τότε ένας μεγάλος όρος θα προστεθεί στη συνάρτηση $eval(x)$, ώστε η λύση που παραβίασε τους περιορισμούς να ωθηθεί προς την περιοχή εφικτών λύσεων. Η αυστηρότητα της ποινής εξαρτάται από τις παραμέτρους r_i και z_j . Μια μεγάλη ποινή θα βοηθήσει τον αλγόριθμο να μην ψάχνει σε ανέφικτες περιοχές λύσεων εξασφαλίζοντας σύγκλιση σε μια εφικτή λύση, ακόμη κι αν είναι μακριά από μια βέλτιστη. Αντίθετα, μια μικρή ποινή θα ωθήσει τον αλγόριθμο να ψάχνει πολύ ώρα περιοχές με ανέφικτες λύσεις και τελικά να συγκλίνει σε μια λύση που μπορεί να είναι ανέφικτη [18].

Για την εκτίμηση των πιθανοτικών περιορισμών, με προσομοίωση Monte Carlo, ακολουθείται η εξής διαδικασία.

$$\Pr\{g(n, \xi) \leq 0\} \geq \alpha$$

Equation 59: Πιθανοτικός περιορισμός συνάρτηση ποινής

Για ένα συγκεκριμένο πλάνο επέκτασης του δικτύου δημιουργούνται τα M τυχαία διανύσματα των στοχαστικών μεταβλητών του προβλήματος. Για κάθε ένα από αυτά τα διανύσματα υπολογίζεται η ροή φορτίου και ελέγχονται οι περιορισμοί. Έστω ότι M_1 από τα τυχαία διανύσματα ικανοποιούν τους περιορισμούς, τότε η εκτίμηση του πιθανοτικού περιορισμού γίνεται από τη διαίρεση M_1/M . Το κλάσμα αυτό αντιπροσωπεύει το ποσοστό εφικτών λύσεων του προβλήματος για το δοθέν πλάνο και συγκρίνεται με την πιθανότητα ικανοποίησης των περιορισμών (α) [19].

3.6 Matlab

Η Matlab είναι μια γλώσσα προγραμματισμού τέταρτης γενιάς, το περιβάλλον της είναι διαδραστικό και επιτρέπει την παραμετροποίηση σε όλα τα στάδια ενός προγράμματος. Χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για την επίλυση μαθηματικών προβλημάτων, ωστόσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για προγραμματισμό καθώς παρέχει τις περισσότερες βασικές εντολές προγραμματισμού. Η αποθήκευση εντολών και συναρτήσεων γίνεται με ένα τύπο αρχείου που ονομάζεται m-file. Συνοπτικά η γλώσσα Matlab παρέχει τις ακόλουθες δυνατότητες:

- Μαθηματικούς και αριθμητικούς υπολογισμούς.
- Ανάπτυξη αλγορίθμων.
- Μοντελοποίηση και αναπαράσταση δεδομένων.
- Ανάλυση και γραφική αναπαράσταση αποτελεσμάτων.

3.7 MatPower

Το MatPower είναι ένα πακέτο, από m-files, της Matlab για την επίλυση προβλημάτων ροής φορτίου και βέλτιστης ροής φορτίου. Έχει σχεδιαστεί ως εργαλείο προσομοίωσης για εκπαιδευτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, και γι' αυτό ο κώδικας του είναι απλός και τροποποιήσιμος.

Το πρόγραμμα αυτό αναπτύχθηκε από τους Ray D. Zimmerman, Carlos E. Murillo Sanchez και Deqiang Gan στο πανεπιστήμιο Cornell υπό την καθοδήγηση του Robert Thomas. Η δημιουργία του έγινε για να καλυφθεί η ανάγκη της εκτέλεσης ροής φορτίου σε περιβάλλον Matlab, για το PowerWeb Project.

Το πακέτο του MatPower περιλαμβάνει ένα σύνολο από αρχεία (m-files) με έτοιμα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας με ποικίλους αριθμούς ζυγών και ένα σύνολο από εντολές για την προσομοίωση της ροής φορτίου με διάφορες μεθόδους. Είναι δυνατή η δημιουργία και η επεξεργασία των δικτύων και η προσθήκη επιπρόσθετων περιορισμών στην εκτέλεση των ροών. Οι διάφορες μέθοδοι ροής φορτίου παρέχουν ευρεία εφαρμογή και υπάρχει η δυνατότητα άμεσης παρατήρησης των αποτελεσμάτων. Οι πιο βασικές εντολές του MatPower είναι η "runpf", για την εκτέλεση μιας απλής ροής φορτίου σε ένα δίκτυο ζυγών και η "runopf", για την εκτέλεση βέλτιστης ροής φορτίου.

Τα αρχεία δικτύων που χρησιμοποιούνται από το MatPower είναι αρχεία της Matlab m-files ή mat-files (αρχεία με αποθηκευμένες τιμές μεταβλητών του Matlab) και σε αυτά μέσα υπάρχουν αποθηκευμένα τα δεδομένα των δικτύων. Τα δεδομένα είναι υπό τη μορφή πινάκων και η κάθε γραμμή του αντιστοιχεί σε ένα ζυγό ή σε ένα κλάδο ή σε μια γεννήτρια.

Η μοντελοποίηση των δικτύων στο πρόγραμμα του MatPower γίνεται είτε με AC, είτε με DC ροή φορτίου. Το πρόβλημα της ροής φορτίου ενός δικτύου λύνεται για ένα συγκεκριμένο σενάριο παραγωγής και κατανάλωσης και το αποτέλεσμα είναι οι ροές και οι τάσεις των ζυγών. Το μαθηματικό μοντέλο που λύνεται είναι ένα σύνολο από εξισώσεις που εκφράζουν το ισοζύγιο ενέργειας στους ζυγούς του δικτύου συναρτήσει των τάσεων τους.

$$g(x) = 0$$

Equation 60: Ισοζύγιο ενέργειας ζυγών MatPower

Μια αρχική σύμβαση που γίνεται στο MatPower είναι ότι ένας απλός ζυγός παραγωγής διαλέγεται ως ζυγός αναφοράς για τη γωνία τάσης και για την εξισορρόπηση της πραγματικής ισχύος. Η γωνία της τάσης του ζυγού είναι γνωστή, και συνήθως είναι 0, και η πραγματική ισχύς του ζυγού θεωρείται άγνωστη για να μπορεί να διατηρηθεί το ισοζύγιο ενέργειας στο δίκτυο. Οι υπόλοιποι ζυγοί παραγωγής κατηγοριοποιούνται ως PV, με γνωστή την τάση και την ισχύ. Οι ζυγοί χωρίς παραγωγή κατηγοριοποιούνται ως ζυγοί φορτίου PQ, με γνωστή την ενεργό και άεργο ισχύ.

Στην AC ροή φορτίου η εξίσωση που λύνεται χωρίζεται σε δυο μέρη, στο πραγματικό μέρος και στο φανταστικό μέρος. Η παράμετροι της εξίσωσης είναι τα μέτρα των τάσεων, οι γωνίες τους και οι εκχύσεις ενέργειας από τις γεννήτριες (P_g , Q_g). Τα φορτία των ζυγών θεωρούνται σταθερά σε κάθε επίλυση.

$$g_P(\Theta, V_m, P_g) = P_{bus}(\Theta, V_m) + P_d - C_g P_g = B_{bus} \Theta + P_{bus, shift} + P_d - C_g P_g = 0$$

Equation 61: Ισοζύγιο ενεργού ισχύος MatPower

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

Equation 62: : Ισοζύγιο άεργου ισχύος MatPower

Έτσι η εξίσωση $g(x)$ παίρνει τη μορφή:

$$g(x) = \begin{bmatrix} g^{\{i\}}_P(\Theta, V_m, P_g) \\ g^{\{j\}}_Q(\Theta, V_m, Q_g) \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \forall i \in I_{PV} \cup I_{PQ} \\ \forall j \in I_{PQ} \end{array} \quad \text{με}$$

Equation 63: Ισοζύγιο ενέργειας ζυγών AC MatPower

Και το άγνωστο διάνυσμα που περιέχει τις γωνίες των τάσεων και τα μέτρα τους φαίνεται παρακάτω:

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

Equation 64: Άγνωστο διάνυσμα AC MatPower

Το σύνολο των εξισώσεων που προκύπτουν είναι $N_{pv}+2N_{pq}$ και τα N_{pv} , N_{pq} αντιστοιχούν στον αριθμό των ζυγών παραγωγής και κατανάλωσης. Όταν λυθεί το σύστημα και βρεθούν οι γωνίες και τα μέτρα των τάσεων, τότε μπορεί να υπολογιστεί και η πραγματική ισχύς του ζυγού αναφοράς.

Το MatPower διαθέτει τέσσερις διαφορετικές μεθόδους για την επίλυση της ACς ροής φορτίου.

- Τη μέθοδο Newton.
- Τη μέθοδο γρήγορης αποσύνθεσης
- Τη μέθοδο Gauss-Seidel

Για τη DC ροή φορτίου το μαθηματικό μοντέλο της εναλλασσόμενης ροής χαλαρώνει και λαμβάνεται υπόψη μόνο η πραγματική ροή ισχύος. Μερικές ακόμα απλοποιήσεις που λαμβάνονται υπόψη είναι ότι:

- Οι γραμμές του δικτύου δεν έχουν απώλειες, δηλαδή η αντίστασή τους θεωρείται αμελητέα.

$$y = \frac{1}{r + jx} = \frac{1}{jx}$$

Equation 65: Αγωγιμότητα Γ.Μ. DC MatPower

- Όλα τα μέτρα των ζυγών είναι περίπου κοντά στο 1 p.u..

$$v_i = e^{j\theta_i}$$

Equation 66: Μέτρο τάσης ζυγού DC MatPower

- Οι διαφορές των γωνιών των τάσεων μεταξύ διαφορετικών γραμμών θεωρούνται μικρές.

$$\sin(\theta_f - \theta_t - \theta_{shift}) = \theta_f - \theta_t - \theta_{shift}$$

Equation 67: Διαφορές των γωνιών των τάσεων Γ.Μ. DC MatPower

Έτσι το διάνυσμα που περιέχει τις άγνωστες μεταβλητές, σε αυτή την περίπτωση περιέχει μόνο τις γωνίες των τάσεων.

$$x = \begin{bmatrix} \theta_{\{i\}} \end{bmatrix} \quad \text{με} \quad \forall i \notin I_{ref}$$

Equation 68: Άγνωστο διάνυσμα DC MatPower

Η εξίσωση προς επίλυση έχει την ακόλουθη μορφή:

$$B_{dc}x - P_{dc} = 0$$

Equation 69: Ισοζύγιο ροής ισχύος DC MatPower

Η συνάρτηση που καλείται για την εκτέλεση της ροής φορτίου ονομάζεται “runpf” και η σύνταξή της είναι ως εξής:

```
results = runpf(casedata);  
results = runpf(casedata, mpropt, fname, solvecase);
```

Το “results” είναι μια δομή που περιέχει τη λύση του προβλήματος της ροής ισχύος και τα επιμέρους πεδία που επιστρέφει είναι:

- Την επιτυχία της επίλυσης (0 ή 1).
- Το χρόνο επίλυσης.
- Τα μέτρα των τάσεων.
- Τις γωνίες των τάσεων.
- Την ισχύ παραγωγής των γεννητριών.
- Την ισχύ από και προς τις γραμμές.

Τα ορίσματα εισόδου που δέχεται η συνάρτηση είναι:

- Το αρχείο με τα στοιχεία του δικτύου (casedata).
- Μια δομή με τις παραμέτρους ρύθμισης (mpropt).
- Το όνομα για το αρχείο αποθήκευσης της εκτυπωμένης λύσης.
- Το όνομα για το αρχείο αποθήκευσης της δομής με τη λύση του προβλήματος.

Οι παράμετροι ρύθμισης του προγράμματος MatPower περιέχονται σε μια δομή που εισάγεται ως όρισμα στη συνάρτηση που εκτελεί τη ροή ισχύος. Τα επιμέρους πεδία αυτής της δομής αναφέρονται αναλυτικά στο εγχειρίδιο χρήσης που παρέχεται μαζί με το πακέτο με τα αρχεία του προγράμματος. Παρακάτω αναφέρονται τα πιο σημαντικά πεδία αυτής της δομής.

PF_ALG αναφέρεται στην επιλογή αλγορίθμου για την εκτέλεση της AC ροής.

- 1 για τη μέθοδο Newton
- 2 για τη μέθοδο γρήγορης αποσύνθεσης (XB)
- 2 για τη μέθοδο γρήγορης αποσύνθεσης (BX)
- 4 για τη μέθοδο Gauss-Seidel

PF_DC αν είναι ενεργοποιημένο τότε εκτελείται η DC ροή (0 ή 1).

VERBOSE αναφέρεται στις πληροφορίες προόδου που εκτυπώνονται κατά την εκτέλεση της ροής ισχύος.

- 0 δεν εκτυπώνει τίποτα
- 1 εκτυπώνει λίγες πληροφορίες
- 2 εκτυπώνει αρκετές πληροφορίες
- 3 εκτυπώνει όλες τις πληροφορίες

OUT_ALL αναφέρεται στην εκτύπωση των αποτελεσμάτων.

-1 εκτυπώνει τα προκαθορισμένα

0 δεν εκτυπώνει τίποτα

1 εκτυπώνει τα πάντα

Για τη βέλτιστη ροή ισχύος η συνάρτηση που καλείται είναι η “runopf” και το μαθηματικό μοντέλο που εκτελείται σε αυτή τη συνάρτηση είναι ένα πιο ενισχυμένο μοντέλο από το μοντέλο για την απλή ροή ισχύος. Σε αυτή την περίπτωση λαμβάνεται υπόψη το κόστος παραγωγής για κάθε γεννήτρια. Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος της AC βέλτιστης ροής είναι η εξής:

$$\min_{\Theta, V_m, P_g, Q_g} \sum_{i=1}^{n_g} f_P^i(p_g^i) + f_Q^i(q_g^i)$$

Equation 70: Αντικειμενική συνάρτηση OPF AC MatPower

υπό τους περιορισμούς:

$$g(x) = 0$$

Equation 71: Περιορισμός διατήρησης ενέργειας ζυγών OPF AC MatPower

$$h_f(\Theta, V_m) = |F_f(\Theta, V_m)| - F_{\max} \leq 0$$

$$h_t(\Theta, V_m) = |F_t(\Theta, V_m)| - F_{\max} \leq 0$$

Equation 72: Περιορισμός θερμικών ορίων Γ.Μ. OPF AC MatPower

με

$$F_{\{f,t\}}(\Theta, V_m) = \begin{cases} S_{\{f,t\}}(\Theta, V_m) & \text{apparent - power} \\ P_{\{f,t\}}(\Theta, V_m) & \text{real - power} \\ I_{\{f,t\}}(\Theta, V_m) & \text{current} \end{cases}$$

Equation 73: Ισχύς, Ρεύμα Γ.Μ. OPF AC MatPower

$$\Theta_i^{ref} \leq \Theta_i \leq \Theta_i^{ref}, i \in I_{ref}$$

Equation 74: Περιορισμός γωνιών των τάσεων OPF AC MatPower

$$v_m^{i,\min} \leq v_m^i \leq v_m^{i,\max}, i = 1 \dots n_b$$

Equation 75: Περιορισμός των τάσεων των ζυγών OPF AC MatPower

$$p_g^{i,\min} \leq p_g^i \leq p_g^{i,\max} \quad , i = 1 \dots n_g$$

Equation 76: Περιορισμός παραγωγής ενεργού ισχύος OPF AC MatPower

$$q_g^{i,\min} \leq q_g^i \leq q_g^{i,\max} \quad , i = 1 \dots n_g$$

Equation 77: Περιορισμός παραγωγής άεργου ισχύος OPF AC MatPower

Το διάνυσμα με τις άγνωστες τιμές πλέον περιέχει εκτός από τα μέτρα και τις γωνίες των τάσεων και τις ισχύς παραγωγής από τις γεννήτριες

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

Equation 78: Άγνωστο διάνυσμα OPF AC MatPower

Αντίστοιχα, η DC βέλτιστη ροή φορτίου είναι μια απλοποιημένη μορφή της AC βέλτιστης ροής με αντικειμενική συνάρτηση [18]:

$$\min_{\Theta, V_m, P_g} \sum_{i=1}^{n_g} f_P^i(p_g^i)$$

Equation 79: Αντικειμενική συνάρτηση OPF DC MatPower

υπό τους περιορισμούς:

$$g_P(\Theta, P_g) = B_{bus} \Theta + P_{bus, shift} + P_d - C_g P_g = 0$$

Equation 80: Περιορισμός διατήρησης ενέργειας ζυγών OPF DC MatPower

$$h_f(\Theta, V_m) = B_f \Theta + P_{f, shift} - F_{\max} \leq 0$$

$$h_t(\Theta, V_m) = B_t \Theta + P_{t, shift} - F_{\max} \leq 0$$

Equation 81: Περιορισμός θερμικών ορίων Γ.Μ. OPF DC MatPower

$$\Theta_i^{ref} \leq \Theta_i \leq \Theta_i^{ref} \quad , i \in I_{ref}$$

Equation 82: Περιορισμός γωνιών των τάσεων OPF DC MatPower

$$p_g^{i,\min} \leq p_g^i \leq p_g^{i,\max} \quad , i = 1 \dots n_g$$

Equation 83: Περιορισμός παραγωγής ενεργού ισχύος OPF DC MatPower

Το διάνυσμα με τις άγνωστες τιμές είναι το εξής:

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

Equation 84: Άγνωστο διάνυσμα OPF DC MatPower

4 Περιγραφή της Προτεινόμενης Μεθόδου

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι αφενός η πρακτική εφαρμογή των αλγορίθμων και των μεθόδων βελτιστοποίησης για την επίλυση του προβλήματος της ανάπτυξης του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και αφετέρου, η εξακρίβωση της ανάγκης για διασύνδεση του αυτόνομου δικτύου της Κρήτης με το διασυνδεδεμένο δίκτυο της ηπειρωτικής Ελλάδος.

Για να ελεγχθεί η ορθότητα των αλγορίθμων και των μεθόδων, έγινε εφαρμογή στο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης και δοκιμάστηκε ένα σύνολο από σενάρια ανάπτυξης του δικτύου με βασική προϋπόθεση τη διασύνδεση του δικτύου της Κρήτης με το ηπειρωτικό δίκτυο.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε. βοηθάει στην προστασία του περιβάλλοντος αλλά δημιουργεί προβλήματα αξιοπιστίας στο ηλεκτρικό δίκτυο. Η λύση σε αυτό το θέμα είναι η συμμετοχή των Α.Π.Ε. σε δίκτυα μεγάλης κλίμακας ώστε να υπάρχει η αναγκαία εφεδρεία σε έκτακτες περιπτώσεις. Γι' αυτό επιλέχθηκε η μελέτη του δικτύου της Κρήτης, λόγω των δυνατοτήτων ανάπτυξης των Α.Π.Ε. σε βαθμό που να υπερκαλύπτει τις ανάγκες του νησιού σε ενέργεια, αλλά και για την ανάδειξη της σημασίας της διασύνδεσης ενός απομονωμένου δικτύου πλούσιου σε Α.Π.Ε. με ένα μεγαλύτερο δίκτυο.

4.1 Μαθηματικό μοντέλο

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται αποκλειστικά με την επέκταση του δικτύου μεταφοράς. Για τις υπόλοιπες λειτουργίες του δικτύου, παραγωγή και διανομή, θεωρείται ότι αφορούν άλλα ανεξάρτητα κομμάτια έρευνας. Επίσης, έχουν γίνει απλοποιήσεις για να αναδειχτεί η λειτουργία των αλγορίθμων και όχι η λεπτομερής ανάλυση σε επίπεδο προγραμματισμού εργασιών και επενδύσεων, που θα ξέφευγε από τους σκοπούς αυτής της διπλωματικής. Το δίκτυο σε αυτή την εργασία θα αναπαρασταθεί με τη βοήθεια του DC μοντέλου.

4.1.1.1 Αντικειμενική συνάρτηση

Στόχος του προβλήματος της βέλτιστης ανάπτυξης του συστήματος μεταφοράς είναι η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης του συνολικού κόστους σε γραμμές μεταφοράς και των ποινών από ανέφικτες λύσεις που προσεγγίζει ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης, για ένα συγκεκριμένο σενάριο παραγωγής και κατανάλωσης.

$$\min v = \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij} + \text{penalty}$$

Equation 85: Αντικειμενική συνάρτηση TEP πειραμάτων

Ο όρος c_{ij} δηλώνει το κόστος μιας νέας γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών i και j και ο n_{ij} των αριθμό των νέων γραμμών που θα τοποθετηθούν ανάμεσα από τους ζυγούς i και j .

4.1.1.2 Συνάρτηση ποινών

Ο όρος που προκύπτει από τις ποινές των ανέφικτων λύσεων περιγράφεται από μια συνάρτηση που η παραμετροποίηση της γίνεται από τους όρους r και εξασφαλίζει τη σύγκλιση σε μια εφικτή και βέλτιστη λύση. Οι όροι r θα πρέπει να είναι ανάλογοι του δικτύου που μελετάται.

$$penalty1(g, limit, r^F, r^E, \beta^F, \beta^E) = \sum_{i=1}^q r_i^F G_i^F + \sum_{i=1}^q r_i^{BF} G_i^{BF} - \sum_{i=1}^q r_i^E G_i^E$$

Equation 86: Πρώτη συνάρτηση ποινών πειραμάτων

Η συνάρτηση g εκφράζει, όπως και στα προηγούμενα Κεφάλαια, τους ανισοτικούς περιορισμούς του προβλήματος και κατά κύριο λόγο αναφέρεται στα θερμικά όρια των γραμμών του δικτύου.

$$g = |f_{ij}| - (n_{ij}^0 + n_{ij}) f_{ij}^{MAX} \leq 0$$

Equation 87: Συνάρτηση ανισοτικών περιορισμών πειραμάτων

Η ποινή για την παραβίαση των ορίων φόρτισης των γραμμών περιγράφεται από τον όρο G^F και μπορεί να υψωθεί σε δύναμη ίση με β^F :

$$G_i^F = \max[0, g_i(\vec{x})]^{\beta^F}$$

Equation 88: Πρώτη ποινή για την παραβίαση των ορίων

Για την περίπτωση που οι παραβιάσεις στις γραμμές είναι πολλαπλάσιες από το όριο της γραμμής, τότε ένας ακόμα όρος προστίθεται στην ποινή που θα επιβληθεί ο G^{BF} και μπορεί να υψωθεί σε δύναμη ίση με β^{BF} :

$$G_i^{BF} = \max[0, g_i(\vec{x}) - \frac{\text{limit}}{2}]^{\beta^{BF}}$$

Equation 89: Πρώτη ποινή για την παραβίαση των ορίων κατά πολλαπλάσιο μέγεθος από αυτά

Επίσης ο όρος r που δίνει βαρύτητα στην ποινή για τη μεγάλη απόκλιση από τα όρια έχει αναλογία με αυτόν που είναι γενικά για τις παραβιάσεις των ορίων ένα προς τέσσερα.

$$r_i^{BF} = 2r_i^F$$

Equation 90: Συσχέτιση βαρύτητας όρων ποινής

Ένα ακόμα σφάλμα που προσπαθεί η συνάρτηση ποινής να εντοπίσει είναι οι επιπλέον γραμμές που μπορεί να βάλει ο αλγόριθμος στην προσπάθεια να ελαχιστοποιήσει τις ποινές από τα όρια φόρτισης των γραμμών. Ο όρος αυτός είναι ο G^E και μπορεί να υψωθεί σε δύναμη ίση με β^E :

$$G_i^E = \min[0, g_i(\vec{x}) + \text{limit}]^{\beta^E}$$

Equation 91: Πρώτη ποινή για επιπλέον γραμμές

Μια άλλη μορφή συνάρτησης ποινής που δοκιμάστηκε ήταν με ποσοστά από το αρχικό κόστος των γραμμών. Οι ανισότητες στους όρους παρακάτω είναι λογικές πράξεις.

$$\text{penalty2}(g, \text{limit}, r^F, r^E) = \sum_{i=1}^q r_i^F G_i^F + \sum_{i=1}^q r_i^{BF} G_i^{BF} - \sum_{i=1}^q r_i^E G_i^E$$

Equation 92: Δεύτερη συνάρτηση ποινών πειραμάτων

$$G_i^F = (g_i(\vec{x}) > 0) * 0.25$$

Equation 93: Δεύτερη ποινή για την παραβίαση των ορίων, ίση με ¼ του αρχικού κόστους

$$G_i^{BF} = (g_i(\vec{x}) - \frac{\text{limit}}{4} > 0) * 0.25$$

Equation 94: Δεύτερη ποινή για την παραβίαση των ορίων κατά πολλαπλάσιο μέγεθος από αυτά, ίση με ¼ του αρχικού κόστους

$$G_i^E = (g_i(\vec{x}) + \text{limit} < 0) * 0.25$$

Equation 95: Δεύτερη ποινή για επιπλέον γραμμές, ίση με ¼ του αρχικού κόστους

Για την πιθανοτική εκτίμηση, στην προσομοίωση Monte Carlo, στις παραπάνω συναρτήσεις ποινής προστέθηκε ένας ακόμη όρος.

$$\text{penaltyMC1}(g, \text{Pr}^F, a, \text{limit}, r^F, r^E, r^{\text{Pr}}, \beta^F, \beta^E) = \sum_{i=1}^q r_i^F G_i^F + \sum_{i=1}^q r_i^{BF} G_i^{BF} - \sum_{i=1}^q r_i^E G_i^E + VPC \sum_{i=1}^q r^{\text{Pr}}$$

Equation 96 : Πρώτη συνάρτηση ποινών πειραμάτων Monte Carlo

Η πιθανότητα Pr^F είναι υπολογισμένη από τις εφικτές λύσεις που προκύπτουν κατά την προσομοίωση διαιρεμένη με τον αριθμό των προσομοιώσεων, M_1/M . Ο όρος a εκφράζει το επίπεδο εμπιστοσύνης.

$$VPC = (\Pr^F < a)[(1 - \Pr^F) * 100]$$

Equation 97: Ποινή για παραβίαση του πιθανοτικών περιορισμών

Αντίστοιχη εκδοχή υπάρχει και με τη δεύτερη συνάρτηση ποινών για την προσομοίωση MC.

$$penaltyMC2(g, \Pr^F, a, limit, r^F, r^E, r^{Pr}) = \sum_{i=1}^q r_i^F G_i^F + \sum_{i=1}^q r_i^{BF} G_i^{BF} - \sum_{i=1}^q r_i^E G_i^E + VPC \sum_{i=1}^q r^{Pr}$$

Equation 98: Δεύτερη συνάρτηση ποινών πειραμάτων Monte Carlo

4.1.1.3 Προσομοίωση Monte Carlo

Στην προσομοίωση MC δημιουργούνται οι στοχαστικές μεταβλητές του συστήματος, που περιγράφουν την παραγωγή ενέργειας από Α.Π.Ε. και την κατανάλωση ενέργειας.

Για αυτό το σκοπό δημιουργούνται οι τυχαίες μεταβλητές και μετά υπολογίζεται η αντιστοιχία σε ενέργεια βάσει του τύπου που περιγράφει την παραγωγή από την συγκεκριμένη πηγή ή την εξέλιξη της κατανάλωσης.

Για την ηλιακή ακτινοβολία και την έξοδο του φωτοβολταϊκού:

$$s \simeq W(k_s, c_s)$$

Equation 99: Ηλιακή ακτινοβολία πειραμάτων

$$P_s = \begin{cases} P_s^{Rated} \frac{s}{s_{Rated}} & 0 \leq s < s_{Rated} \\ P_s^{Rated} & s_{Rated} \leq s \end{cases}$$

Equation 100: Έξοδος Φ/B πειραμάτων

Ο όρος s_{rated} είναι η ονομαστική ηλιακή ακτινοβολία του Φ/B και αυτό αποδίδει τη μέγιστη ισχύ του για ηλιακές ακτινοβολίες μεγαλύτερες από αυτή.

Για την ταχύτητα του ανέμου και την έξοδο της ανεμογεννήτριας ισχύει:

$$v \simeq W(k_w, c_w)$$

Equation 101: Ταχύτητα ανέμου πειραμάτων

$$P_W = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_{in} \\ P_S^{Rated} \frac{(v - v_{in})}{(v_{rated} - v_{in})} & v_{in} \leq v \leq v_{rated} \\ P_S^{Rated} & v_{rated} \leq v \leq v_{out} \end{cases} \quad || v > v_{out}$$

Equation 102: Έξοδος A/Γ πειραμάτων

Ο όρος v_{in} είναι η ταχύτητα ένταξης της A/Γ, ο v_{rated} είναι η ονομαστική ταχύτητα της και v_{out} είναι η ταχύτητα αποσύνδεσης της.

Για την αύξηση του φορτίου:

$$\Delta P_{Di}(t) \sim N(\mu_{Di}(t), \sigma_{Di}(t))$$

Equation 103: Αύξηση φορτίου πειραμάτων

4.1.1.4 Ροή Φορτίου

Για τον υπολογισμό της ροής φορτίου, στην εργασία αυτή, έχει χρησιμοποιηθεί το πακέτο συναρτήσεων MatPower που είναι ικανό να υπολογίζει τη DC ροή φορτίου. Οι εντολές που το υλοποιούν αυτό είναι οι εξής:

```
opt = mproption('PF_DC', 1);
results = runpf(mpc, opt);
```

Η δομή results που επιστρέφει το MatPower περιέχει τη λύση του υποπροβλήματος της ροής φορτίου, όπως είχε αναφερθεί στο κεφάλαιο του προγραμματισμού. Η ροή φορτίου μεταξύ των ζυγών i και j είναι:

```
fij = results.branch(:,14);
```

4.1.1.5 Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης

Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ο γενετικός αλγόριθμος και ο αλγόριθμος σμήνους σωματιδίων. Και οι δυο έχουν παρόμοια σύνταξη κατά την κλήση τους.

```
[N,Fval] = ga(ObjFun, nl, [], [], [], [], LB, UB, ConFun, IntCon, options);
[N, Fval] = pso(ObjFun, nl, [], [], [], [], LB, UB, ConFun, options);
```

Βασικά ορίσματα και για τους δυο είναι:

- Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος (ObjFun).
- Ο αριθμός των μεταβλητών απόφασης (nl).
- Τα όρια των μεταβλητών απόφασης (LB, UB).
- Η συνάρτηση περιορισμών, που δεν χρησιμοποιήθηκε (ConFun).
- Η θέση των ακέραιων μεταβλητών, αν υποστηρίζεται από τον αλγόριθμο (IntCon).
- Οι παράμετροι του αλγορίθμου (options).

Ο έλεγχος για τον αριθμό των γραμμών μεταξύ δυο ζυγών γίνεται με την εσωτερική συνάρτηση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης, περιορίζοντας τις μεταβλητές απόφασης του προβλήματος. Το κάτω όριο ορίζεται από τον όρο LB και το πάνω από τον UB.

4.1.1.6 Οργάνωση των συναρτήσεων

Ο κώδικας της εργασίας αυτής οργανώνεται σε ένα σύνολο συναρτήσεων που υλοποιούν την παραμετροποίηση του προβλήματος, την εκτύπωση των αποτελεσμάτων, την επιλογή της μεθόδου επίλυσης και την επιλογή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης.

Οι βασικές συναρτήσεις συνοψίζονται παρακάτω:

- **Επιλογή δικτύου και σεναρίου προς μελέτη - LoadCase(Case, Time, Load, Senario).** Το πρώτο όρισμα αφορά την επιλογή του δικτύου είναι η επιλογή του σεναρίου κατανάλωσης βάσει του χρονικού ορίζοντα, το τρίτο όρισμα είναι η επιλογή του φορτίου του συστήματος αν θα είναι μέγιστο ή ελάχιστο και το τελευταίο του σεναρίου παραγωγής.
- **Τρέξιμο μίας ροής φορτίου - RunPF(mpc,res,display).** Το πρώτο όρισμα είναι το αρχείο που περιέχει τα δεδομένα του δικτύου, το δεύτερο περιέχει την παραγόμενη ισχύ από τις Α.Π.Ε. και το τελευταίο αφορά την εκτύπωση πληροφοριών από το τρέξιμο της ροής ισχύος.
- **Εκτύπωση αποτελεσμάτων από τις ροές φορτίου στο δίκτυο - PlotResults(PF,limit,BrStatus,P_l,P_g).** Το πρώτο όρισμα είναι η ροή ισχύος, το δεύτερο είναι το όριο, το τρίτο είναι η κατάσταση των γραμμών και τα δυο τελευταία η κατανάλωση και η παραγωγή ενέργειας στους ζυγούς.
- **Επιλογή μεθόδου επίλυσης-LoadTEP(method, mpc, res, lcost, UB, optionsMC).** Το πρώτο όρισμα αφορά την επιλογή μεταξύ της απλής εκτέλεσης ή της εκτέλεσης με τη μέθοδο Monte Carlo, το όρισμα lcost αφορά το κόστος των γραμμών και το τελευταίο τις παραμέτρους της μεθόδου Monte Carlo. Η συνάρτηση αυτή είναι υπεύθυνη για την σύνταξη της αντικειμενικής συνάρτησης.

- **Επιλογή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης – *RunSolver (solver, initPop, gen, pSize, stallGen, display, ObjFun, ConFun, LB, UB, mpc, res)***. Το πρώτο όρισμα αφορά την επιλογή μεταξύ γενετικού αλγορίθμου ή του αλγορίθμου σμήνους σωματιδίων, το δεύτερο το μέγεθος του πληθυσμού, το τρίτο το μέγιστο αριθμό επαναλήψεων, το τέταρτο το μέγεθος του πληθυσμού, το πέμπτο τον αριθμό των επαναλήψεων χωρίς εξέλιξη, το έκτο την εκτύπωση πληροφοριών από το τρέξιμο του αλγορίθμου και τα υπόλοιπα όπως περιγράφηκαν πιο πάνω στο υποκεφάλαιο Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης.

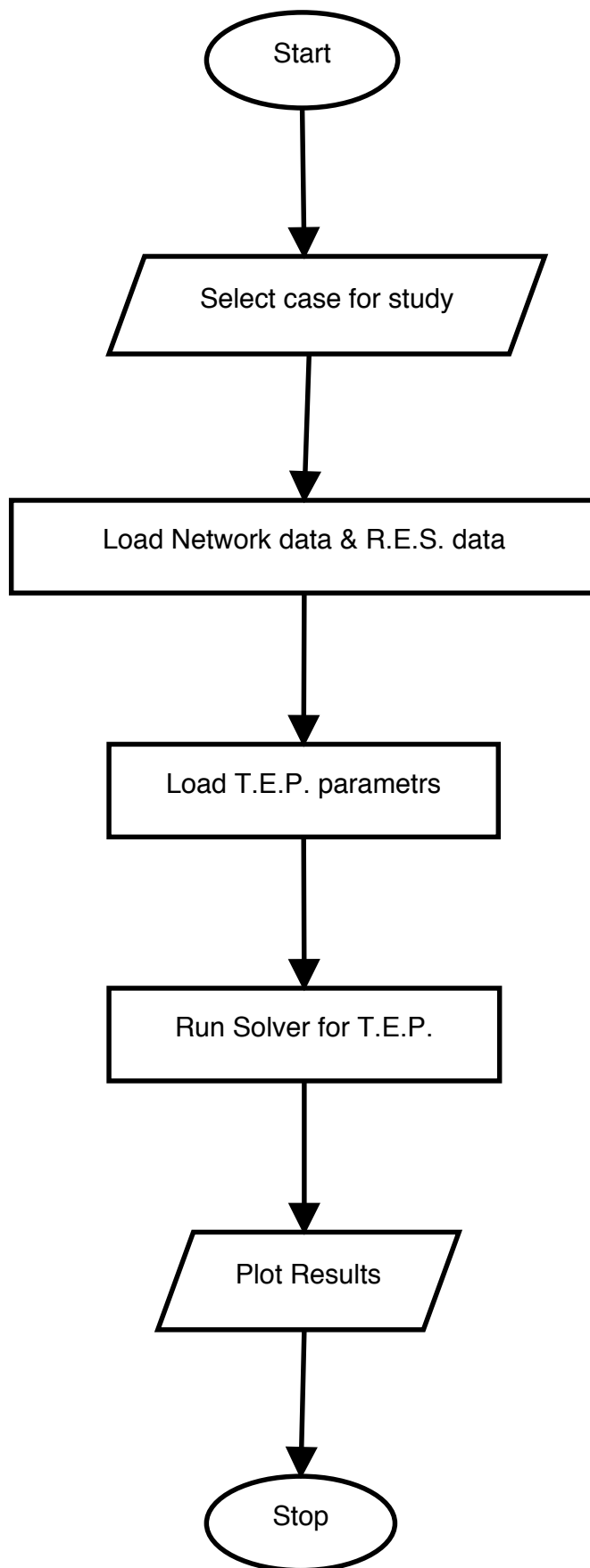


Figure 20: Διάγραμμα ροής του κώδικα της εργασίας

4.2 Μοντελοποίηση Δικτύου

Η μοντελοποίηση του δικτύου σε αυτή την εργασία γίνεται με τη βοήθεια των αρχείων του πακέτου MatPower. Το αρχείο που έχει αποθηκευμένα τα στοιχεία του δικτύου είναι ή ένα αρχείο m-file ή ένα mat-file και περιέχει ένα σύνολο από πίνακες με αυτά.

Στην αρχή περιέχει τη βάση της ισχύος του συστήματος. Μετά ακολουθεί ένας πίνακας με τα στοιχεία των ζυγών (κατανάλωση, τάση, γωνία τάσης, όρια και άλλα δεδομένα των ζυγών). Μετά ακολουθούν τα στοιχεία των γεννητριών του δικτύου (παραγωγή, όρια και άλλα δεδομένα των γεννητριών). Μετά τα στοιχεία των γραμμών (αντίσταση, αντίδραση, θερμικά όρια και άλλα δεδομένα των γραμμών). Και τέλος, ένας πίνακας με τα κόστη λειτουργίας των γεννητριών για την εκτέλεση βέλτιστης ροής φορτίου.

Το δίκτυο της Κρήτης όπως μοντελοποιείται σε αυτή την εργασία, αποτελείται από 18 ζυγούς και 21 γραμμές μεταφοράς των 150 kV. Η συμβατική παραγωγή ενέργειας γίνεται σε 3 ζυγούς του δικτύου και σε 9 ακόμα ζυγούς γίνεται παραγωγή ενέργειας από Α.Π.Ε.. Το φορτίο των ζυγών όσο και η παραγωγή ενέργειας στο δίκτυο θεωρείται ότι ακολουθεί τα σενάρια που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 1.6. Παρακάτω παρατίθενται αναλυτικά τα στοιχεία του δικτύου.

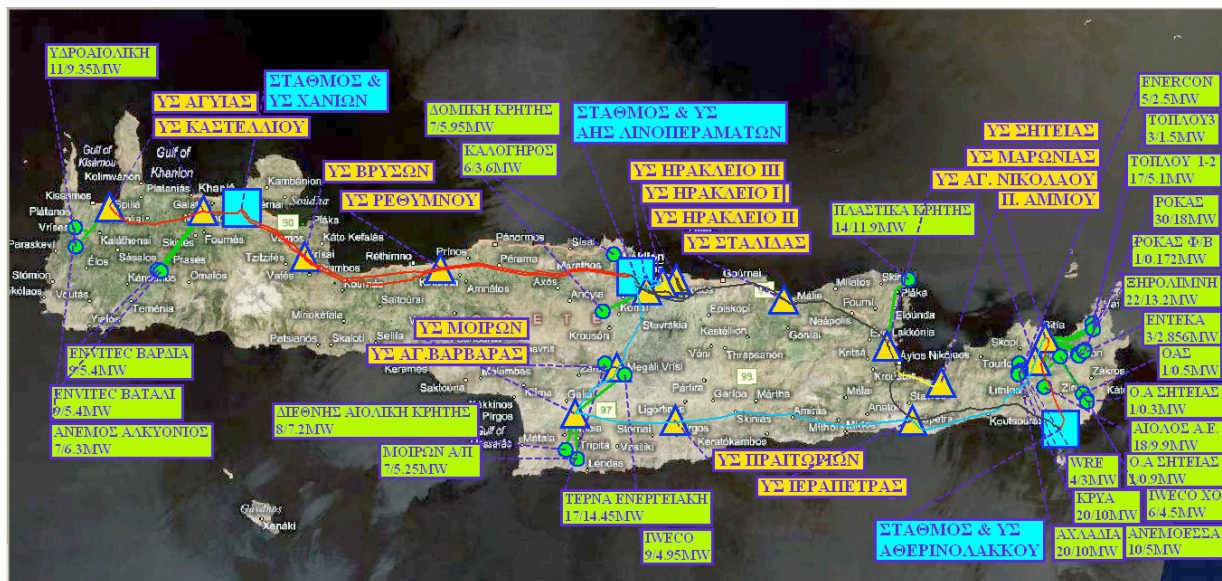


Figure 21: Χάρτης Κρήτης με Α.Π.Ε.

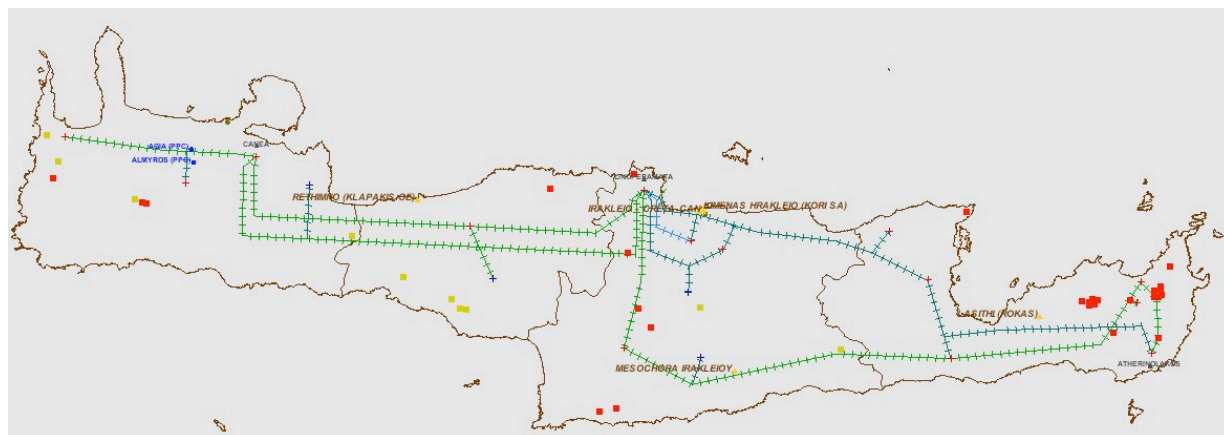


Figure 22: Γ.Μ. Δικτύου Κρήτης

Αριθμός Υ/Σ	Όνομα Υ/Σ	Φορτίο (MW)
1	KASTELLIΟΥ	24.76
2	AGYIAS	26.53
3	XANIWN	119.38
4	BRYSWN	26.53
5	RETHYMNOU	101.70
6	KORAKIA	17.68
7	IRAKLEIO-1	39.79
8	IRAKLEIO-2	110.54
9	IRAKLEIO-3	39.79
10	AG.BARBARAS	19.45
11	MOIRWN	38.02
12	PRAITWRIWN	17.68
13	STALIDAS	84.01
14	AG.NIKOLAOU	30.95
15	IERAPETRAS	28.29
16	ATHERINOLAKOS	13.26
17	MARWNIAΣ	19.45
18	SITEIAS	22.10

Table 8: Υ/Σ δικτύου Κρήτης [πηγή Δ.Ε.Η., προβλέψεις για το έτος 2017]

Αριθμός	Όνομα	Τύπος	Αριθμός Ζυγού	Ονομαστική Ισχύς (MW)
1	YDROAIOLIKH	1	1	9.35
2	ANEMOS-ALKYONIOS	1	1	6.30
3	ENVITEC-BARDIA	1	2	5.40
4	ANVITEC-BATALI	1	2	5.40
5	DOMIKI-KRITIS	1	9	5.95
6	KALOGIROS	1	6	3.60
7	TERNA-ENERGEIAKH	1	10	14.44
8	IWECO	1	11	4.95
9	DIETHNIS-AIOLIKH-KRITIS	1	11	7.20
10	MOIRWN-AP	1	11	5.25
11	PLASTIKA-KRITIS	1	14	11.90
12	ANEMOESSA	1	17	5.00
13	WRE	1	17	3.00
14	AXLADIA	1	17	10.00
15	ENERCON	1	17	2.50
16	KRYA	1	17	10.00
17	AIOLOS	1	18	9.90
18	TOPLOU-3	1	18	1.50
19	TOPLOU-1-2	1	18	5.10
20	ROKAS	1	18	18.00
21	ROKAS-FB	2	18	0.17
22	KSIROLIMNI	1	18	13.19
23	ENTEKA	1	18	2.80
24	OAS	1	18	0.50
25	IWECO-XO	1	18	4.50
26	O.A.SITEIAS	1	18	0.90
27	A.H.S. XANIWN	3	3	347
28	A.H.S. LINOPERAMATOS	3	6	270
29	A.H.S. ATHERINOLAKOU	3	16	100

Table 9: Μονάδες Παραγωγής δικτύου Κρήτης

Οι τύποι των μονάδων παραγωγής παραπάνω αντιστοιχούν σε:

1. Αιολικά πάρκα.
2. Φωτοβολταϊκά πάρκα.
3. Συμβατικές μονάδες

Οι τιμές των αντιστάσεων και των αντιδράσεων των γραμμών είναι εκφρασμένα σε ανά μονάδα και η βάση της αντίστασης του δικτύου υπολογίζεται ως εξής:

$$Z_{BASE} = \frac{V_{BASE}^2}{S_{BASE}} = \frac{(150kV)^2}{100MW} = 225(Ohm)$$

Για τον υπολογισμό της αντίστασης και της αντίδρασης των γραμμών χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία της γραμμής B/150 που φαίνονται στον επόμενο πίνακα [1].

Τύπος Γραμμής	Αριθμός & Διατομή Αγωγών (mm ²)	Αντίσταση R (Ω/km)	Αντίδραση X (Ω/km)	Κόστος (κ€/km)	Θερμικό Όριο (MW)
B/150	1x322	0.09739	0.4219	73	200

Table 10: Στοιχεία Γ.Μ. πειράματος

Οι νέες γραμμές που είναι υποψήφιες για κατασκευή είναι οι παρακάτω και έχει θεωρηθεί ότι κοστίζουν λίγο παραπάνω από την τιμή που κοστολογεί η Ρ.Α.Ε για την εξακρίβωση της αναγκαιότητας τους.

Αριθμός	Ζυγός Αναχώρησης	Ζυγός Αφίξης	Μήκος (km)	Αντίσταση R (p.u.)	Αντίδραση X (p.u.)	Κόστος (κ€)
22	10	8	25.80	0.01146	0.04586	2051.1
23	10	5	56.50	0.02511	0.10044	4491.7
24	11	5	62.50	0.02777	0.111111	4968.7

Table 11: Υποψήφιες νέες Γ.Μ. δικτύου Κρήτης

Οι γραμμές αυτές φαίνονται στο σχήμα 12 και αναπαρίστανται με κόκκινο χρώμα. Επίσης στο ίδιο σχήμα οι ζυγοί με πράσινο χρώμα είναι παραγωγής, οι ζυγοί με γκρι χρώμα είναι κατανάλωσης και ο κόκκινος ζυγός είναι ο ζυγός διασύνδεσης.

Αριθμός Γραμμής	Ζυγός Αναχώρησης	Ζυγός Αφίξης	Μήκος (km)	Αντίσταση R (p.u.)	Αντίδραση X (p.u.)	Κόστος (κ€)
1	2	1	23.69	0.00102	0.04444	1256.1
2	3	2	9.80	0.00424	0.01837	519.4
3	5	3	52.60	0.02276	0.09863	2787.8
4	3	4	19.00	0.00822	0.03562	1007.0
5	6	5	46.60	0.02017	0.08738	2469.8
6	4	6	80.70	0.03493	0.15132	4277.1
7	6	7	9.69	0.00419	0.01818	514.1
8	7	8	16.10	0.00696	0.03018	853.3
9	9	8	14.50	0.00627	0.02718	768.5
10	6	9	4.80	0.00207	0.00900	254.4
11	6	10	22.39	0.00969	0.04200	1187.2
12	10	11	15.10	0.00653	0.02831	800.3
13	11	12	24.10	0.01043	0.04519	1277.3
14	8	13	34.20	0.01480	0.06412	1812.6
15	13	14	28.89	0.01250	0.05419	1531.7
16	12	15	57.00	0.02467	0.10688	3021.0
17	14	15	21.00	0.00908	0.03937	1113.0
18	16	15	37.60	0.01627	0.07050	1992.8
19	15	17	36.50	0.01579	0.06844	1934.5
20	16	18	23.10	0.00999	0.04331	1224.3
21	17	18	6.10	0.00264	0.01143	323.3
22	10	8	25.80	0.01116	0.04837	2051.1
23	10	5	56.50	0.02445	0.10594	4491.7
24	11	5	62.50	0.02705	0.11719	4968.7

Table 12: Γ.Μ. δικτύου Κρήτης

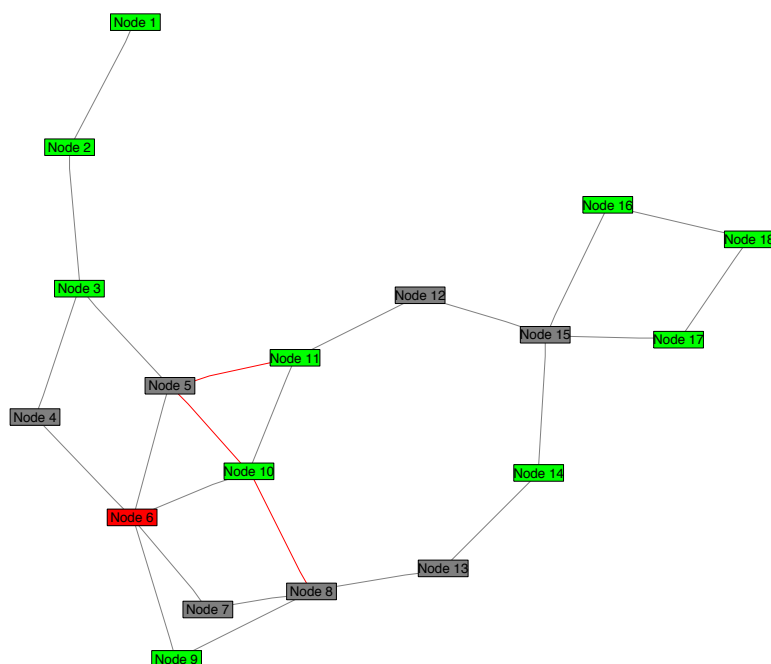


Figure 23: Δίκτυο Κρήτης από Matlab

4.3 Εξεταζόμενα Σενάρια

Τα σενάρια που δοκιμάστικαν φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Πρόβλεψη Ζήτησης	Έτος 2017	Έτος 2020	Έτος 2025	Έτος 2030	Έτος 2035	Έτος 2040
Μέγιστο	780	840	930	1000	1080	1150
Ελάχιστο	190	200	220	240	260	275

Table 13: Πειραματικά σενάρια φορτίου [πηγή Δ.Ε.Η.]

Σενάριο	Έτος 2017	Έτος 2025	Έτος 2040
A	560	2135	2135
B	390	1535	1535
Γ	450	2135	2135

Table 14: Πειραματικά σενάρια Α.Π.Ε. [πηγή Ρ.Α.Ε.]

Διασυνδέσεις	Σενάριο Α.Π.Ε.	Έτος 2017	Έτος 2020	Έτος 2025	Έτος 2030	Έτος 2035	Έτος 2040
Κορακιά	A	700	700	700	700	700	700
	B1	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Σπάθα	B2	1000	1000	1000	1000	1000	1000
	Γ	1000	1000	1000	1000	1000	1000

Table 15: Πειραματικά σενάρια διασυνδέσεων [πηγή Ρ.Α.Ε.]

4.4 Αποτελέσματα Πειραμάτων

Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται τα αποτελέσματα από τα περισσότερα πειράματα που έγιναν στα σενάρια που προτάθηκαν. Ο υπολογιστής που έτρεχε τα πειράματα ήταν ένας τετραπύρηνος Intel και χρησιμοποιήθηκε η Matlab 2013. Οι μεταβλητές ελέγχου της προσομοίωσης Monte Carlo φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Αριθμός Προσομοιώσεων	1000
Ταχύτητα Ανέμου Εκκίνησης A/Γ	3 m/s
Ονομαστική Ταχύτητα Ανέμου A/Γ	13 m/s
Ταχύτητα Ανέμου Παύσης A/Γ	25 m/s
Ονομαστική Ηλιακή Ακτινοβολία Φ/B	1000 W/m ²
Weibull Ταχύτητας Ανέμου	k=1.22, c=8.5
Weibull Ηλιακήν Ακτινοβολία	k=1.6, c=5.5
Επίπεδο Εμπιστοσύνης Περιορισμών	90 %

Table 16: Μεταβλητές Προσομοίωσης Monte Carlo

Φορτίο 780 MW				
Σενάρια	$Pr\{PF < limitPF\}$	Χρόνος (s)	Κόστος (k€)	Γραμμές
A	100 %	11583	0	-
B1	100 %	10783	0	-
B2	92.4 %	7969	9126	$n1=n2=n3=2$
Γ	100 %	8101	6338	$n3=1$ $n1=n2=2$
Φορτίο 1000 MW				
Σενάρια	$Pr\{PF < limitPF\}$	Χρόνος (s)	Κόστος (k€)	Γραμμές
A	100 %	21604	48844	$n1=n2=n3=n5=n6=n7=n8=n16=n18=n20=n23=n24=1$ $n10=n11=n12=n13=n14=n15=n17=n19=n21=2$
B1	100 %	22115	32080	$n1=n2=n3=n5=n7=n8=n9=n10=n11=n12=n13=n14=n15=n17=n18=n19=n20=n21=n23=n24=1$
B2	92.2 %	7948	43136	$n1=n4=n5=n6=n7=n8=n9=n11=n13=n14=n15=n16=n18=n19=n20=n22=1$ $n2=n10=n12=n17=n21=n24=2$
Γ	65.8 %	8067	58837	$n4=n6=n7=n8=n10=n11=n12=n13=n16=n18=n21=n22=n23=1$ $n1=n2=n3=n5=n14=n15=n17=n19=n24=2$
Φορτίο 1150 MW				
Σενάρια	$Pr\{PF < limitPF\}$	Χρόνος (s)	Κόστος (k€)	Γραμμές
A	100 %	21603	47522	$n1=n2=n6=n7=n8=n9=n13=n14=n18=n23=1$ $n11=n12=n15=n16=n17=n19=n21=n24=2$
B1	100 %	21680	35101	$n1=n2=n3=n5=n7=n8=n9=n10=n11=n12=n13=n14=n15=n16=n17=n18=n19=n20=n21=n23=n24=1$
B2	91.1 %	8052	40256	$n3=n4=n5=n6=n7=n9=n10=n11=n13=n15=n16=n17=n18=n19=n21=n22=n24=1$ $n1=n2=n12=n14=2$
Γ	78.6 %	8062	58798	$n1=n2=n3=n4=n5=n6=n7=n9=n10=n11=n12=n13=n14=n18=n20=n22=n23=1$ $n15=n16=n17=n19=2$ $n24=3$

Table 17: Αποτελέσματα Κρήτη G.A.I. M.C.

Στα πρώτα πειράματα του δικτύου της Κρήτης, ο χρόνος της εκτέλεσης του αλγορίθμου είναι σημαντικά πιο μεγάλος από τα υπόλοιπα πειράματα και αυτό οφείλεται σε προβλήματα της Matlab με το υλικό του υπολογιστή.

Η αναφορά σε γραμμές στα αποτελέσματα γίνεται με τη μορφή διανύσματος και ο κάθε όρος n_i αναφέρεται στον αριθμό της γραμμής, όπως στον πίνακα 12 με τις γραμμές του δικτύου και αντίστοιχα η τιμή του κάθε όρου σε πόσες καινούριες γραμμές εισάγει ο αλγόριθμος στον κλάδο αυτό.

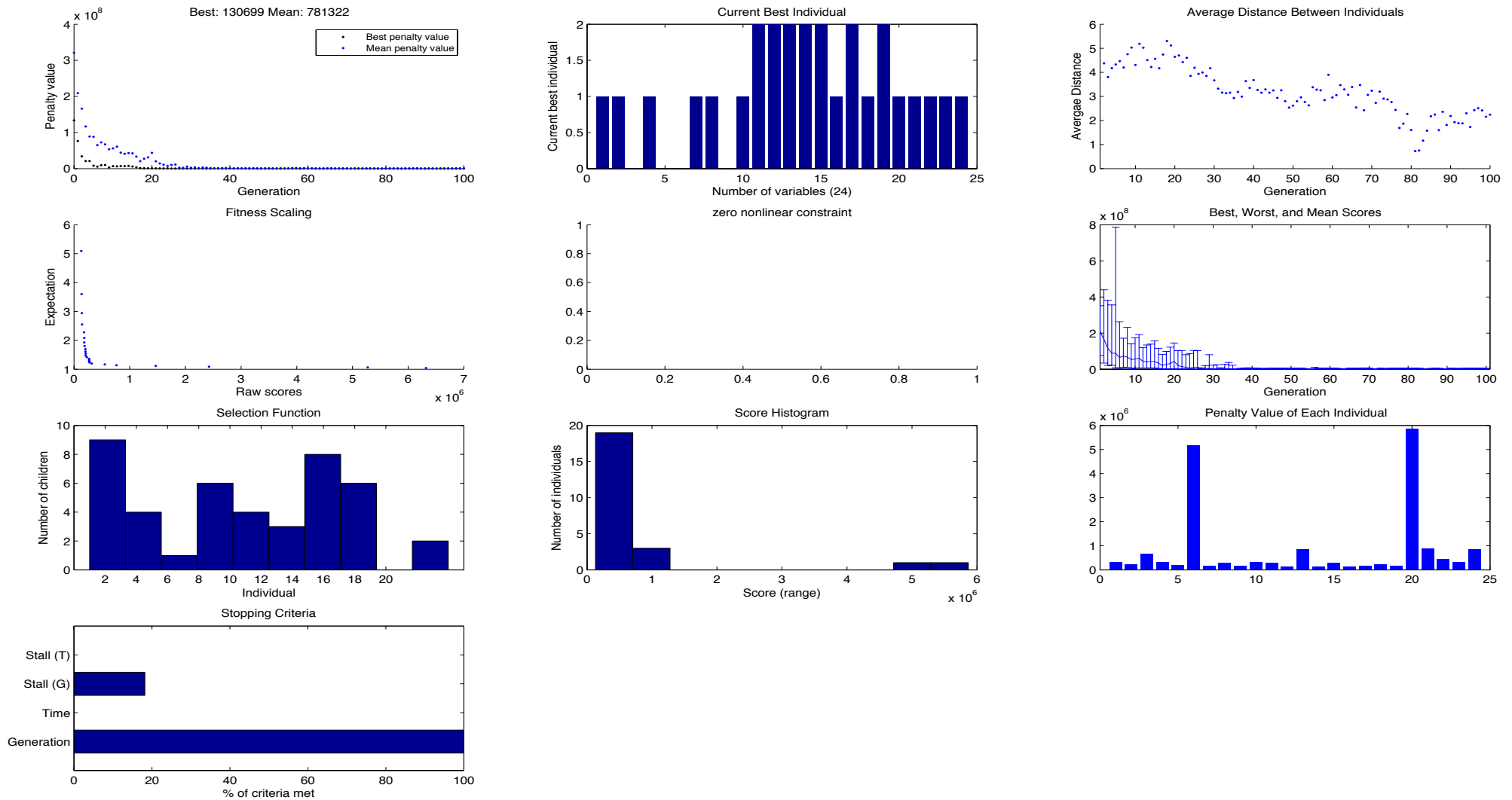


Figure 24: Αποτελέσματα σύγκλισης GA στο δίκτυο της Κρήτης, σενάριο 1, χρόνος 6

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα των πειραμάτων της προσομοίωσης Monte Carlo με χρήση ακέραιου γενετικού αλγορίθμου, μπορούμε να προσέξουμε μια μείωση στην ισχύ των Α.Π.Ε., πράγμα που είναι απολύτως φυσιολογικό γιατί στην πραγματικότητα δεν παράγουν όλο το χρόνο λειτουργίας τους την ονομαστική τους ισχύ. Επίσης, μια ακόμα σημαντική επισήμανση αφορά το ζυγό διασύνδεσης, ο οποίος παρουσιάζει αρνητικές τιμές διοχέτευσης στα τελευταία σενάρια εξέλιξης της παραγωγής και της ζήτησης. Αυτό ερμηνεύεται λόγω της περίσσειας ισχύος από ΑΠΕ και συνεπώς ο ζυγός αυτός θα αποτελέσει μια πιθανή “μονάδα παραγωγής” για το υπόλοιπο διασυνδεδεμένο δίκτυο.

Ένα πρόβλημα που παρουσιάστηκε κατά την εκτέλεση των πειραμάτων ήταν η επιπλέον τοποθέτηση γραμμών που η ροή φορτίου τελικά δεν έχει τόσο υψηλές τιμές. Για την λύση του, προστέθηκε ο όρος των περίσσειων γραμμών στην συνάρτηση ποινών του αλγορίθμου, αλλά σε πολλά πειράματα λόγω της στοχαστικότητας των Α.Π.Ε. η περίσσεια των γραμμών μπορεί να δηλώνει το πέρασμα ροών από αυτές τις γραμμές σε χρονικές στιγμές που η παραγωγή είναι χαμηλή και υπάρχει η ανάγκη για τροφοδότηση του δικτύου από το ζυγό της διασύνδεσης.

Τέλος, μπορούμε να πούμε ότι το σχήμα του αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκε λειτούργησε σωστά και τα αποτελέσματα τηρούσαν τους περιορισμούς του προβλήματος, σε μεγάλο ποσοστό.

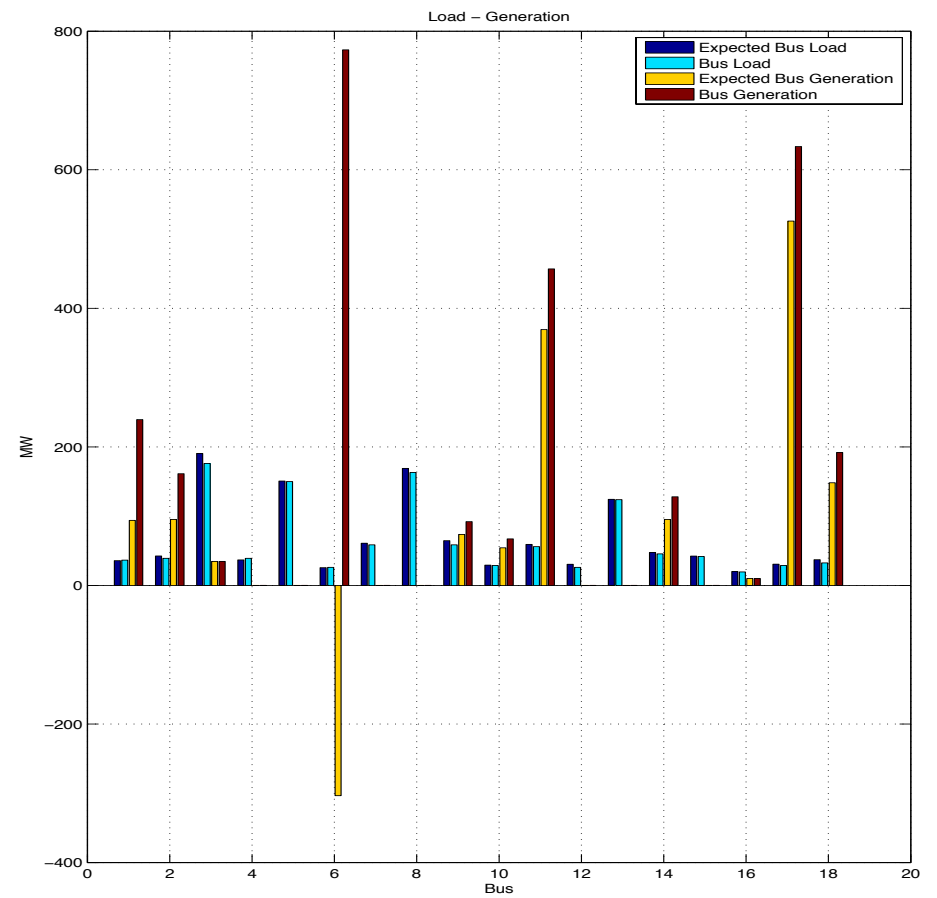
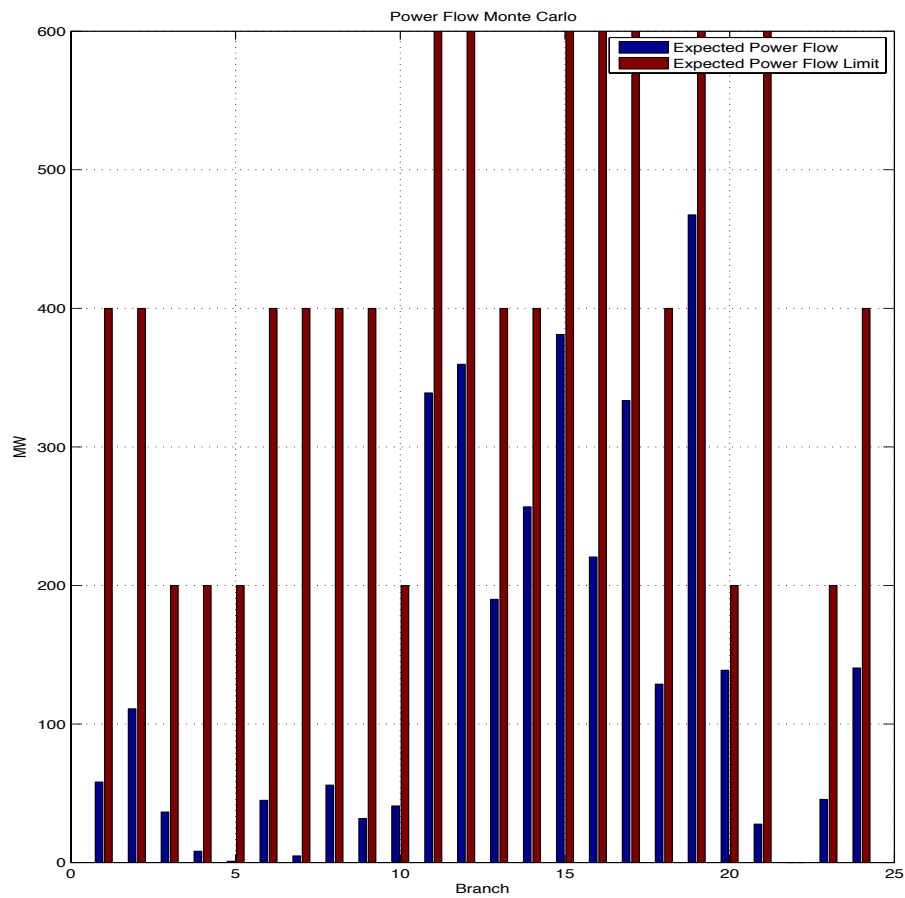


Figure 25: Αποτελέσματα ροών στο δίκτυο της Κρήτης, σενاريو 1, χρόνος 6 GA

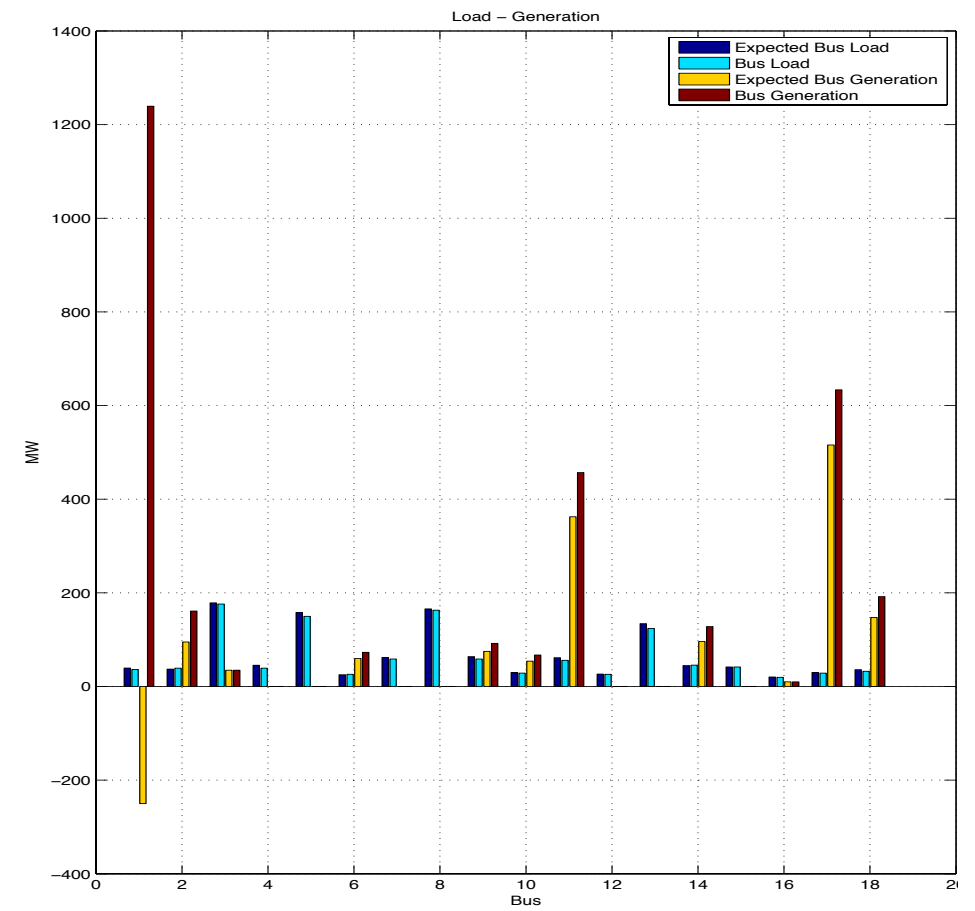
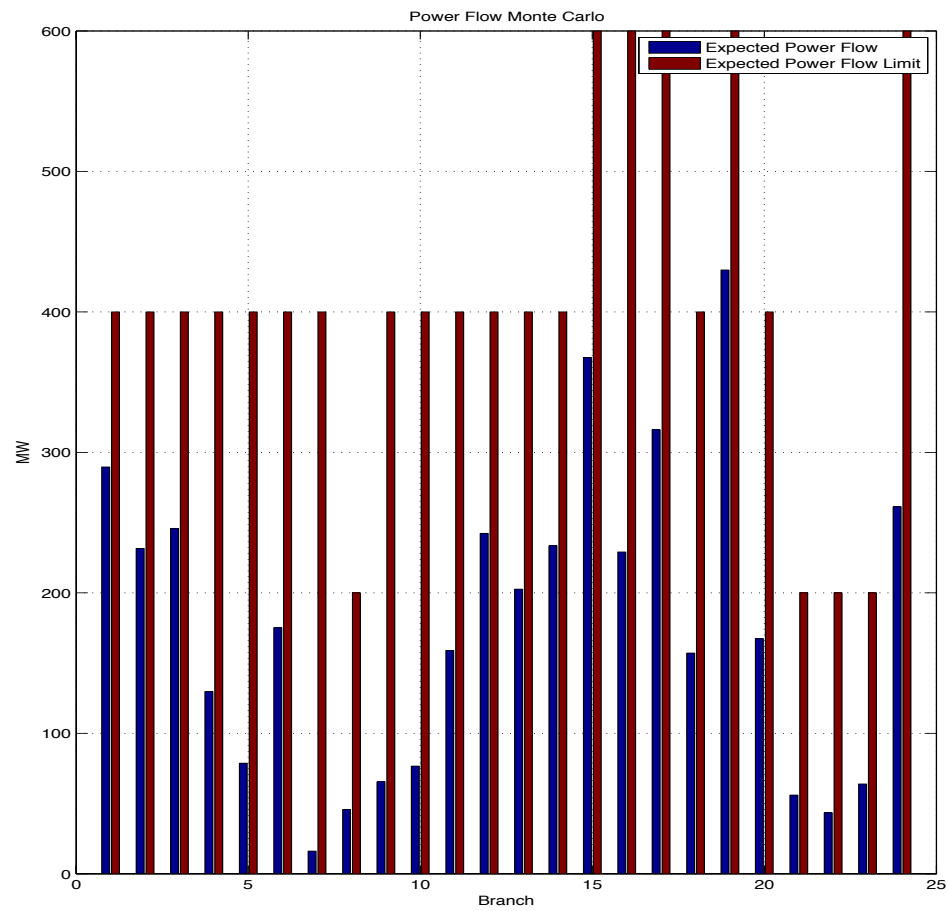


Figure 26: Αποτελέσματα ροών στο δίκτυο της Κρήτης, σενاريو 4, χρόνος 6 GA

Φορτίο 780 MW				
Σενάρια	$Pr\{PF < limitPF\}$	Χρόνος (s)	Κόστος (κ€)	Γραμμές
A	100 %	4021	22228	$n5=n7=n8=n11=n12=n14=n15=n20=n21=n22=n23=n24=1$
B1	100 %	3922	23108	$n2=n4=n8=n9=n10=n11=n15=n18=n19=n20=n21=n22=n23=n24=1$
B2	97.3 %	2464	30533	$n3=n9=n12=n13=n15=n17=n19=n21=n23=n24=1$ $n1=n2=n10=n11=n22=2$
Γ	97.8 %	2533	25659	$n3=n4=n7=n8=n10=n11=n12=n13=n14=n17=n19=n20=n21=n22=n24=1$ $n1=n2=2$
Φορτίο 1000 MW				
Σενάρια	$Pr\{PF < limitPF\}$	Χρόνος (s)	Κόστος (κ€)	Γραμμές
A	100 %	2855	50691	$n1=n2=n3=n4=n9=n10=n13=n16=n20=n21=n22=n23=1$ $n7=n11=n12=n14=n15=n17=n18=n19=n24=2$
B1	99.2 %	5197	27204	$n2=n7=n10=n11=n12=n13=n15=n16=n17=n18=n19=n20=n21=n22=n23=n24=1$
B2	92 %	2926	25850	$n1=n3=n4=n7=n9=n10=n11=n12=n13=n14=n15=n17=n19=n20=n21=n22=n24=1$ $n2=2$
Γ	33.5 %	2765	51110	$n3=n4=n5=n6=n8=n10=n13=n14=n15=n16=n17=n18=n19=n21=n22=n23=1$ $n1=n2=n11=n12=n20=n24=2$
Φορτίο 1150 MW				
Σενάρια	$Pr\{PF < limitPF\}$	Χρόνος (s)	Κόστος (κ€)	Γραμμές
A	99.9 %	5205	42386	$n1=n2=n4=n9=n10=n11=n13=n14=n16=n18=n23=1$ $n12=n15=n17=n19=n22=n24=2$
B1	95.8 %	2303	31815	$n2=n4=n6=n7=n9=n12=n13=n15=n16=n17=n18=n19=n20=n21=n22=n23=n24=1$
B2	82.5 %	2931	40704	$n1=n2=n3=n6=n7=n8=n10=n11=n13=n15=n16=n17=n18=n19=1$ $n4=n9=n12=n20=n21=n24=2$
Γ	77.6 %	1903	60152	$n3=n4=n6=n8=n10=n13=n14=n16=n21=n22=n23=1$ $n1=n2=n5=n11=n12=n15=n17=n18=n19=n20=n24=2$

Table 18: Αποτελέσματα Κρήτη P.S. M.C.

Τα αποτελέσματα από τα πειραμάτα της προσομοίωσης Monte Carlo με χρήση του αλγορίθμου σμήνους σωματιδίων είναι συγκρίσιμα με αυτά του γενετικού αλγόριθμου, με τη διαφορά στον χρόνο σύγκλισης του αλγορίθμου σε όλα τα σενάρια.

Αυτή η διαφορά προκύπτει λόγω του τρόπου λειτουργίας του αλγορίθμου σμήνους σωματιδίων και της σύγκλισης του σε μια βέλτιστη λύση από τις πρώτες μώλις “επαναλήψεις-εποχές”.

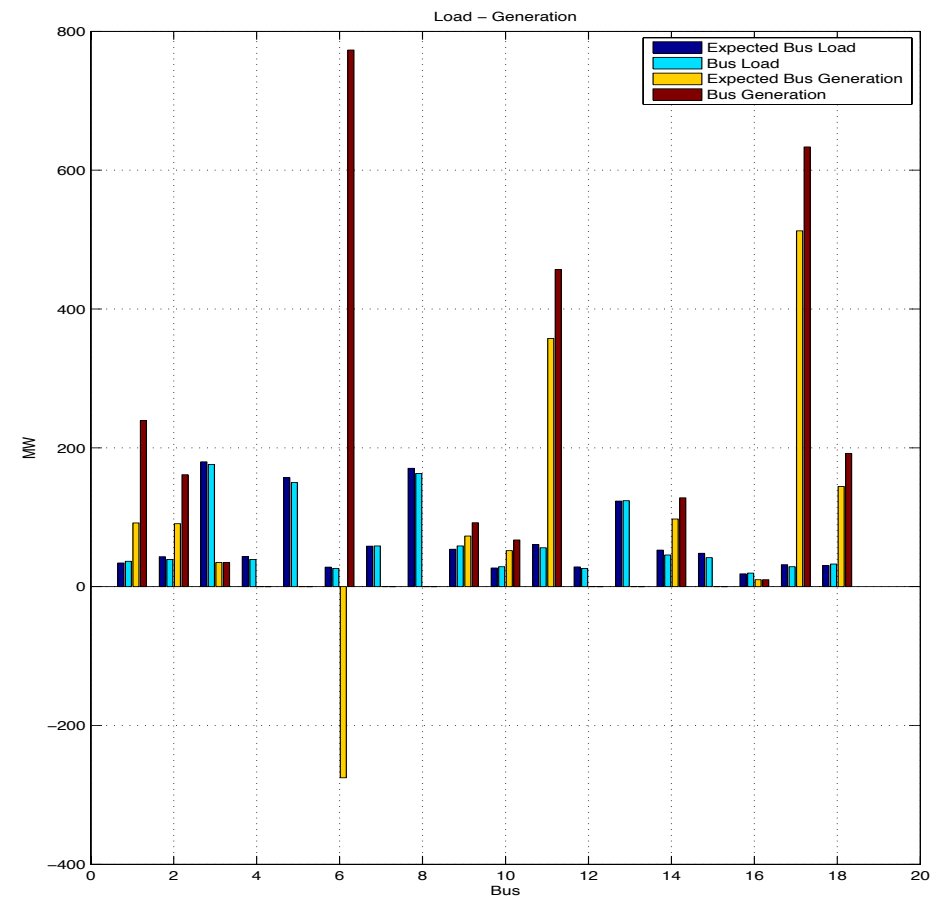
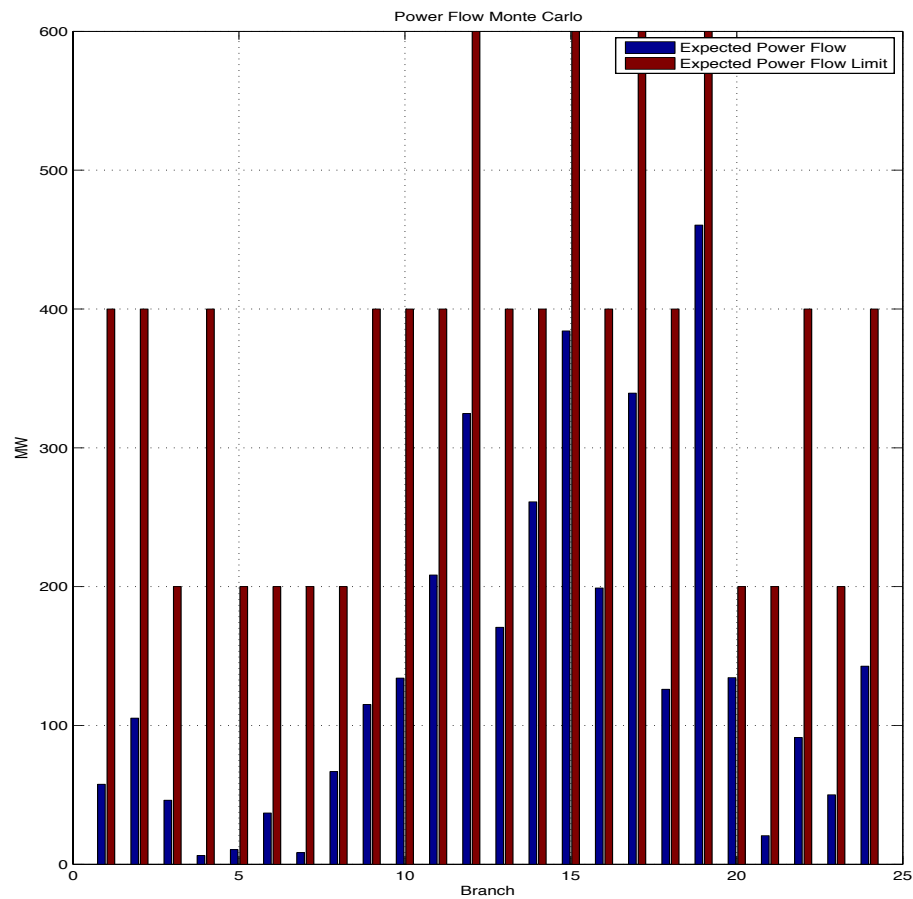


Figure 27: Αποτελέσματα ροών στο δίκτυο της Κρήτης, σενاريو 1, χρόνος 6 PS

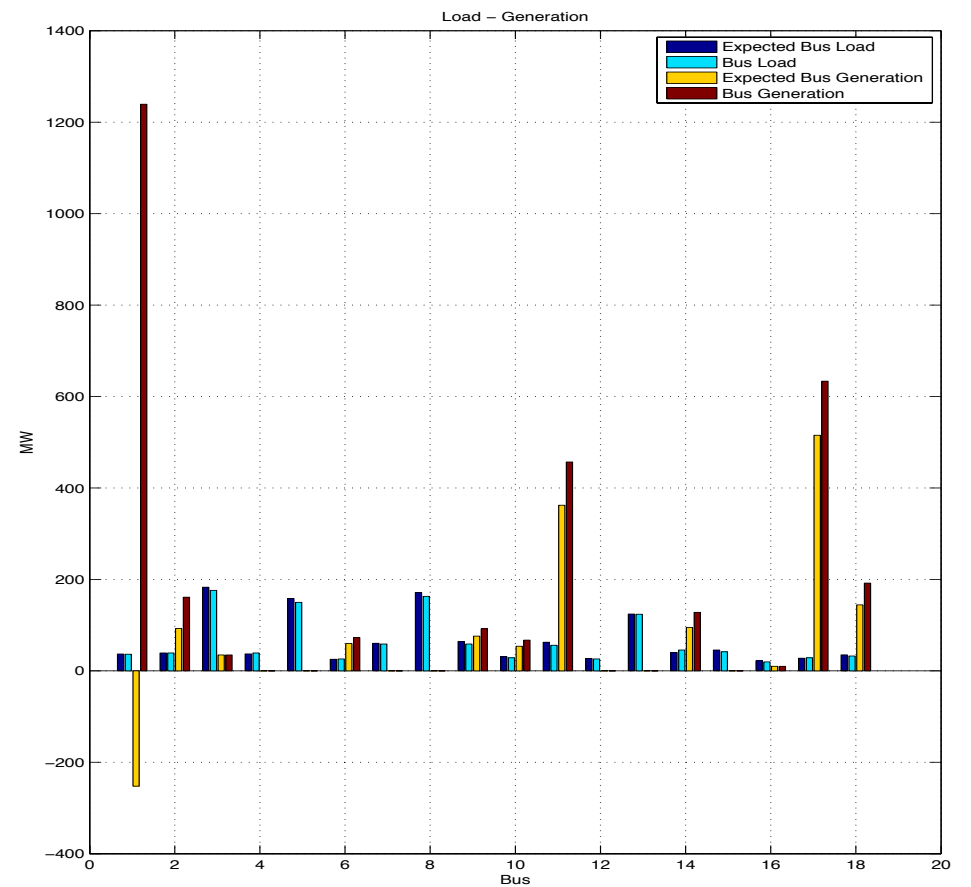
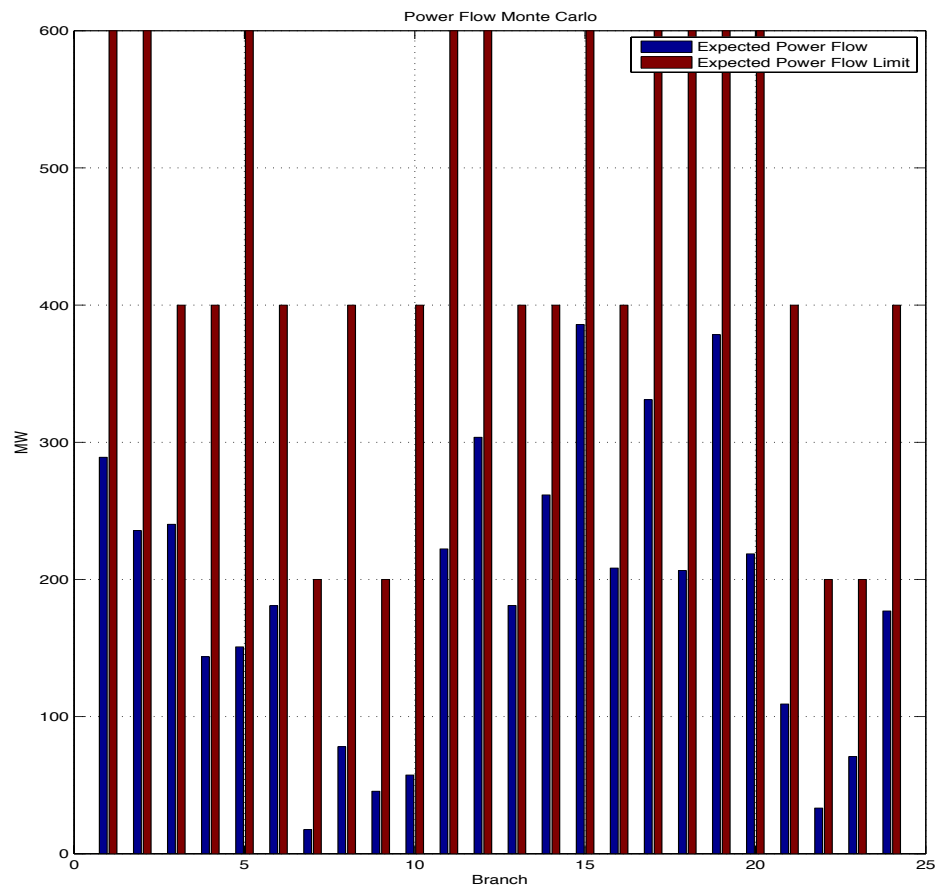


Figure 28: Αποτελέσματα ροών στο δίκτυο της Κρήτης, σενاريو 4, χρόνος 6 PS

Στα επόμενα διαγράμματα διακρίνονται οι διαφορές στην απόδοση των αλγορίθμων που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης ανάπτυξης του δικτύου μεταφοράς της Κρήτης με μεγάλη διείσδυση Α.Π.Ε..

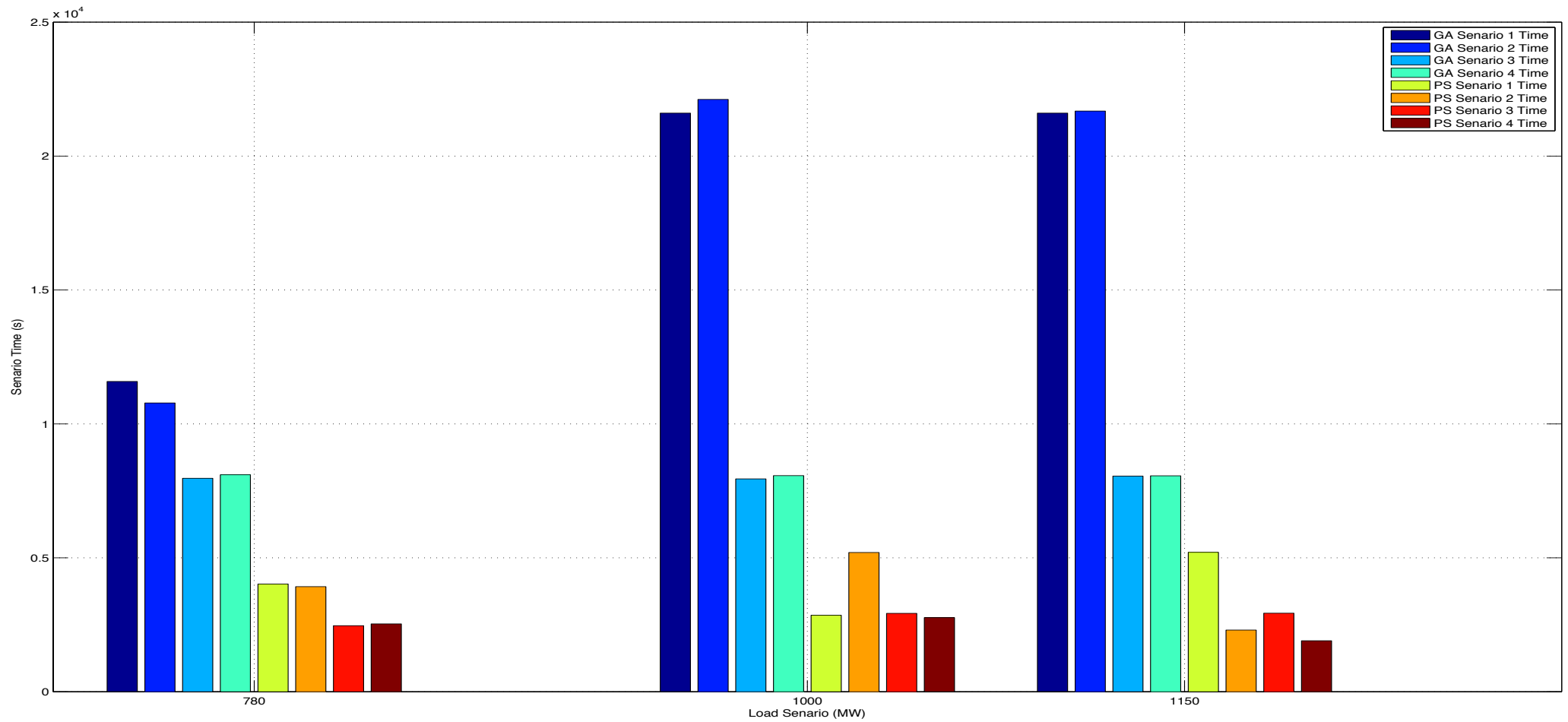


Figure 29: Σύγκριση Αλγορίθμων και Σεναρίων βάσει του χρόνου

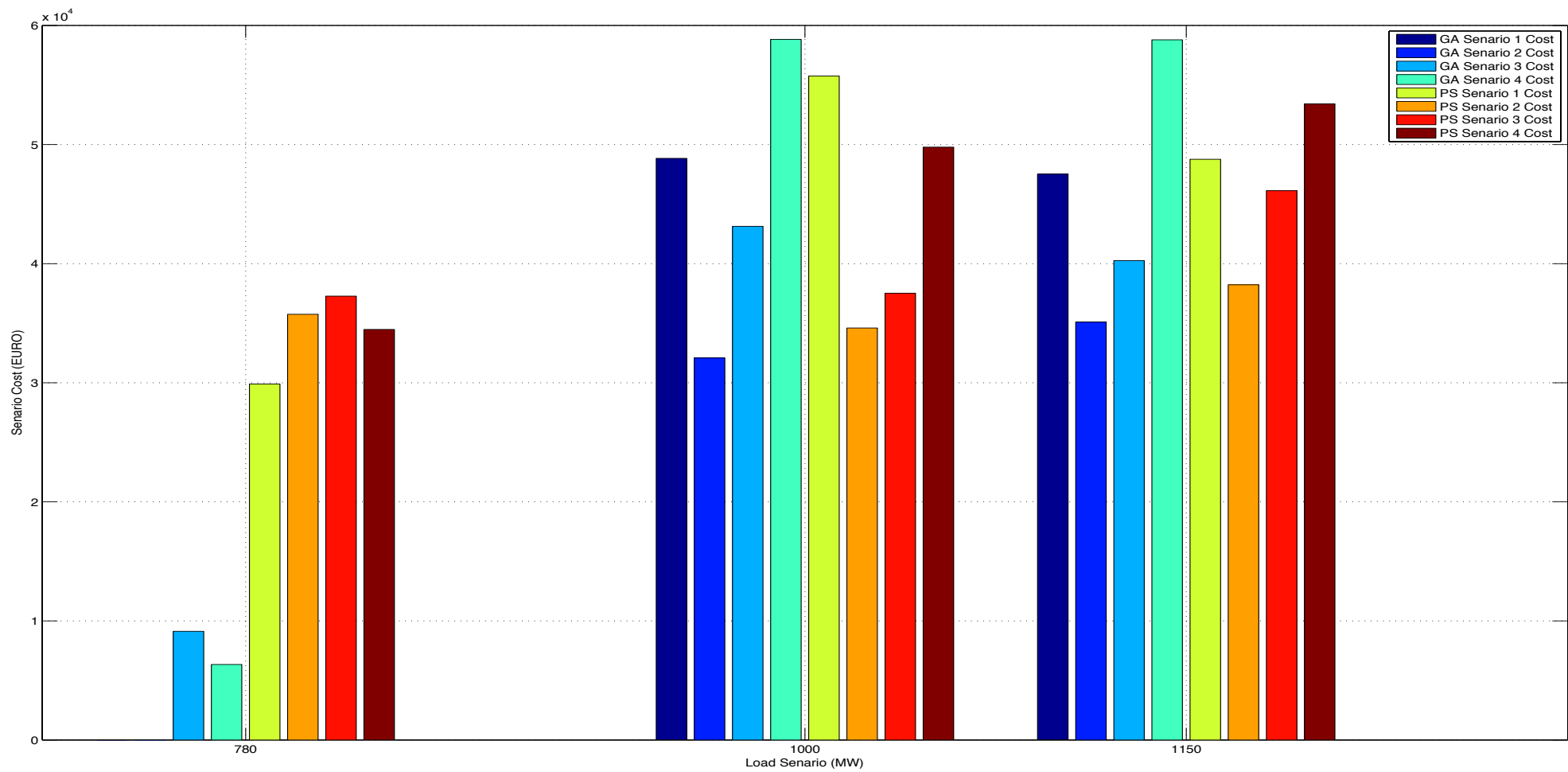


Figure 30: Σύγκριση Αλγορίθμων και Σεναρίων βάσει του κόστους

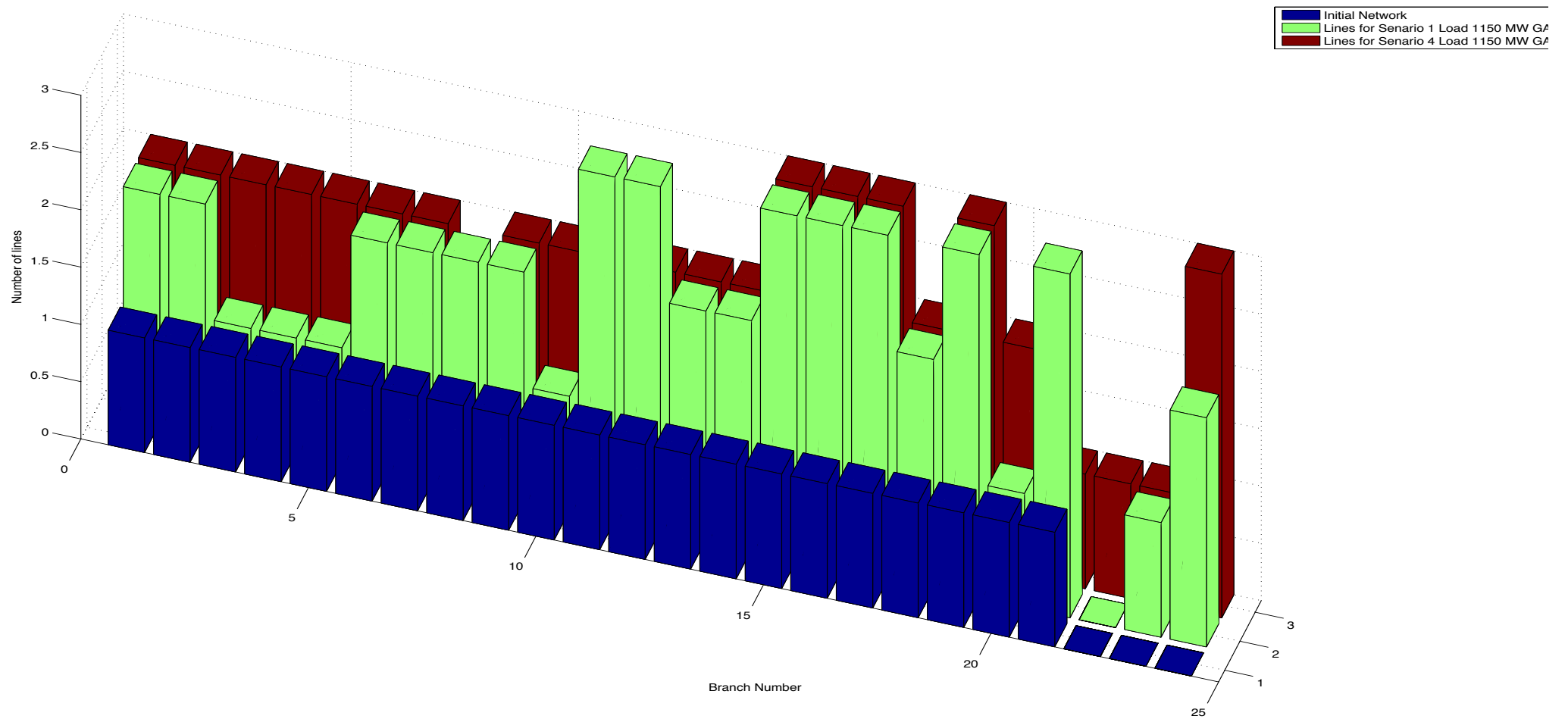


Figure 31: Αποτελέσματα σεναρίου 1 και 4 GA

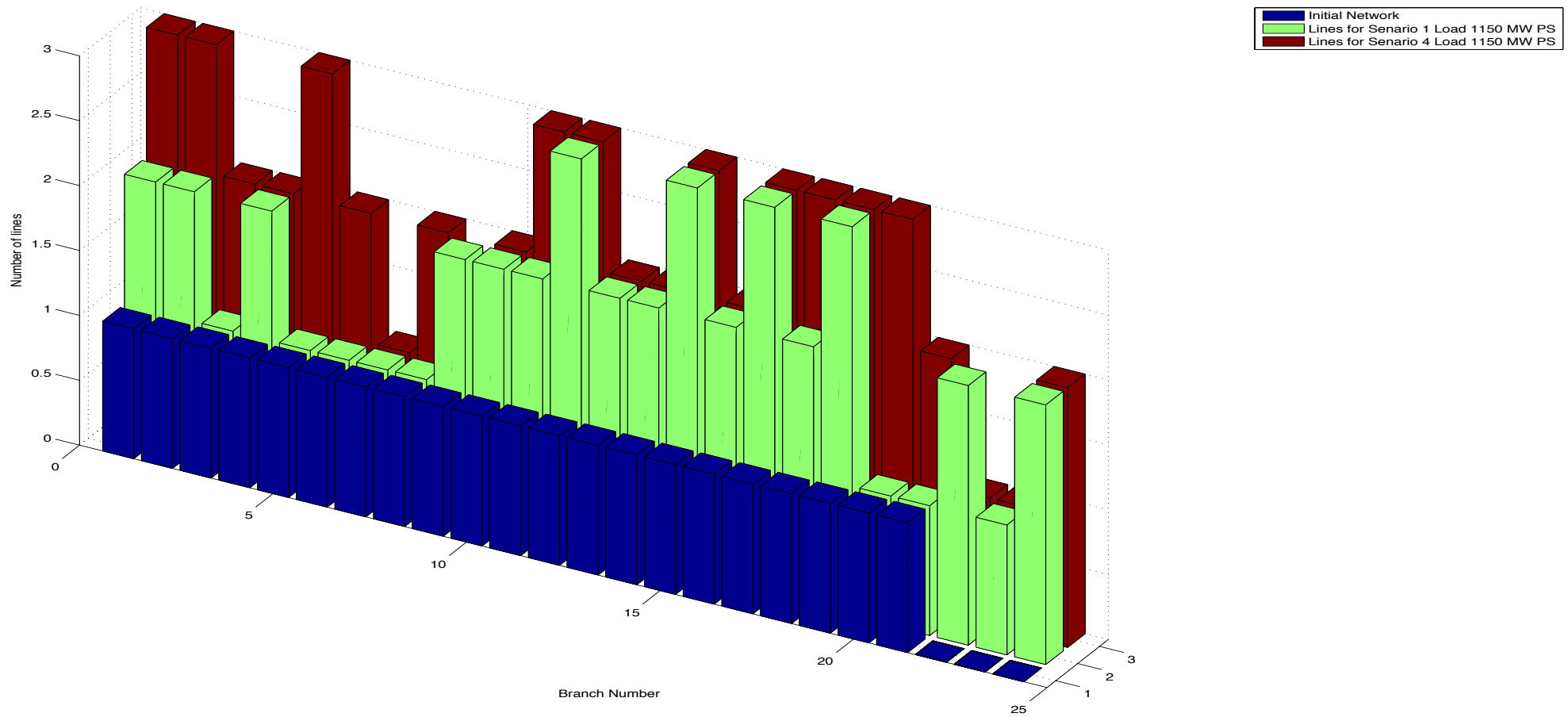


Figure 32: Αποτελέσματα σεναρίου 1 και 4 PS

5 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν δύο αλγόριθμοι βελτιστοποίησης, ο γενετικός και ο αλγόριθμος σμήνους σωματιδίων, για την επίλυση του προβλήματος της επέκτασης του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, η προσομοίωση των Α.Π.Ε. έγινε με τη βοήθεια της μεθόδου Monte Carlo ώστε να ληφθεί υπόψη η στοχαστική τους φύση.

Τα σενάρια που εξετάστηκαν για το δίκτυο της Κρήτης ήταν για διαφορετικούς τρόπους διασύνδεσης, εξυπηρετούμενων φορτίων, παραγωγής ΑΠΕ. Συνεπώς οι συγκρίσεις που μπορούν να γίνουν είναι μεταξύ των αλγορίθμων και των σεναρίων σε όλα τα φορτία. Επίσης, υπάρχει δυνατότητα βελτιστοποίησης σε προγραμματιστικό επίπεδο, ώστε το πρόγραμμα να εκτελεί παράλληλα τις προσομοιώσεις των Α.Π.Ε. και με αυτό τον τρόπο να μειωθεί ο χρόνος εκτέλεσης του.

Ο σημαντικότερος παράγοντας για την καλή λειτουργία του προγράμματος, που παρατηρήθηκε μετά το πέρας των πειραμάτων, είναι η ανάγκη εισαγωγής σωστών και συγκεκριμένων στοιχείων δικτύου εξαιτίας της υψηλής ευαισθησίας του προγράμματος.

Με τη χρήση της πιθανοτικής ροής φορτίου, τα αποτελέσματα του προγράμματος ήταν πιο κοντά στα πραγματικά αποτελέσματα που μπορεί να προκύψουν από μετρήσεις, παρά της απλής εκτέλεσης του προβλήματος που θεωρεί την παραγωγή και την κατανάλωση να έχουν σταθερές τιμές.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη σύγκριση των εξετασθέντων σεναρίων είναι ότι τα Σενάρια Α και Β1 δεν οδηγούν σε παραβίαση των περιορισμών ενώ τα Σενάρια Β2 και Γ οδηγούν με ποσοστό περίπου 10% σε παραβιάσεις περιορισμών για 1000 προσομοιώσεις.

Από τα αποτελέσματα των ρών φορτίου (Σχήματα 25, 26, 27, 28) είναι φανερό ότι η αναμενόμενη τιμή των ρών δεν παραβιάζει τους περιορισμούς ακόμα και στα σενάρια που αναφέρθηκαν παραπάνω τα οποία παρουσιάζουν παραβιάσεις με ποσοστό 10%.

Μια ακόμα παρατήρηση για κάποια σενάρια είναι η αρνητική παραγωγή ενέργειας στο ζυγό διασύνδεσης με το ηπειρωτικό σύστημα. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει ότι η Κρήτη μπορεί να αποτελέσει μια πιθανή πηγή ενέργειας για την τροφοδοσία του υπόλοιπου διασυνδεδεμένου δικτύου.

Για την παραγωγή ενέργειας από τις Α.Π.Ε. αυτό που μπορεί να παρατηρηθεί είναι ότι κατά την αναμενόμενη τιμή η παραγωγή είναι μικρότερη από την ονομαστική παραγωγή και αντίστοιχα τα φορτία των ζυγών να είναι μεγαλύτερα από τα αρχικά φορτία του σεναρίου.

Συγκρίνοντας τους χρόνους εκτέλεσης των δυο αλγορίθμων σε όλα τα σενάρια, προκύπτει μια υπεροχή του αλγορίθμου του σμήνους σωματιδίων σε σχέση με τον γενετικό αλγόριθμο. Ενώ μεταξύ σεναρίων, τα Σενάρια B2 και Γ εκτελούνται ταχύτερα σε σχέση με τα A και B1 .

Για τη σύγκριση σε επίπεδο κόστους, η οικονομικότερη επίλυση των σεναρίων προκύπτει από το γενετικό αλγόριθμο με τις διαφορές όμως να είναι μικρές. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το πρόγραμμα της εργασίας είναι ευαίσθητο στις αλλαγές των στοιχείων του δικτύου, συμπεραίνεται ότι η οικονομικότερη επέκταση του δικτύου μεταφοράς της Κρήτης εξαρτάται κυρίως από τα στοιχεία εισαγωγής του δικτύου και λιγότερο από τις ρυθμίσεις του εκάστοτε ευρετικού αλγόριθμου.

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ορφανός Δ.Ε. “Επέκταση δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με τη μέθοδο αποσύνθεσης Benders” 2006
- [2] Μελέτη Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς Δ.Ε.Σ.Μ.Η.Ε. 2010-2014
- [3] Μελέτη Ανάπτυξης Του Ηλεκτρικού Συστήματος Της Κρήτης - Διασύνδεση Με Το Ηπειρωτικό Σύστημα Δ.Ε.Σ.Μ.Η.Ε. Ρ.Α.Ε. 2011
- [4] Σπανουδάκης Π.Ε. “Αποτύπωση Του Σηστήματος Παραγωγής Και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας Στην Κρήτη” 2005
- [5] Ευαγγελόπουλος Δ.Ε. “Βέλτιστος Σχεδιασμός Διεσπαρμένης Παραγωγής Στα Δίκτυα Διανομής Λαμβάνοντας Υπόψη Αβεβαιότητες” 2013
- [6] Ηλεκτρικές Διασυνδέσεις Νησιών Με Το Διασυνδεδεμένο Σύστημα Της Ηπειρωτικής Χώρας 2007
- [7] Hug, Yang - Power Flow Control and Probabilistic Load Flow 2012
- [8] Κορρές - Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΤΡΙΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΤΑ ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ 2004
- [9] Wiley IEEE 2008 Modern Heuristic Optimization Techniques, Theory and Applications to Power Systems
- [10] Ορφανός Δ.Δ. - Συμβολή Στο Σχεδιασμό Επέκτασης Και Στην Κατανομή Του Κόστους Συστημάτων Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας 2013
- [11] Πλυμάκης Δ.Ε. - Μοντελοποίηση Μικροδικτύου 2008
- [12] Φαμπίου Δ.Ε. - Βέλτιστη Ροή Ισχύος Σε Δίκτυα Ηλεκτρικής Ενέργειας Και Σε Υβριδικούς Ενεργειακούς Διανομείς 2008
- [13] Cai, Shi, Chen - Probabilistic load flow computation with polynomial normal transformation and latin hypercube sampling
- [14] Yu, Rosehart - Probabilistic power flow considering wind speed correlation of wind farms
- [15] Gallego, Monticelli, Romero “Transmission system expansion planning by an extended genetic algorithm” 1998

- [16] Ταπόγλου Μ.Δ. “Χρήση αλγορίθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων για την εκπαίδευση τεχνητού νευρωνικού δικτύου. Εφαρμογή σε Υπόγεια Ύδατα.” 2011
- [17] Λουκαράκης Μ.Δ. “Isolated electrical power systems optimal interconnections planning” 2012
- [18] Ozgur Yeniay “Penalty function methods for constrained optimization with Genetic Algorithms” 2005
- [19] Fan, Cheng, Ying, Jiang, Shi “Transmission System Expansion Planning Based on Stochastic Chance Constrained Programming with Security Constraints” 2008