



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

**ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΜΕ ΣΗΘ,
ΑΥΞΗΜΕΝΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΠΕ ΚΑΙ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ, ΥΠΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥΣ
ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΕΤΕΥΡΙΣΤΙΚΩΝ
ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΠΟΥΛΟΣ ΣΤΑΥΡΟΣ

**Επιβλέπων : Χατζηαργυρίου Νικόλαος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

Αθήνα, Οκτώβριος 2015



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

**ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΜΕ ΣΗΘ,
ΑΥΞΗΜΕΝΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΠΕ ΚΑΙ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ, ΥΠΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥΣ
ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΕΤΕΥΡΙΣΤΙΚΩΝ
ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΠΟΥΛΟΣ ΣΤΑΥΡΟΣ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 20^η Οκτωβρίου 2015

.....
Ν. Χατζηαργυρίου

Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Σ. Παπαθανασίου

Αναπ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Π. Γεωργιάκης

Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

Επιβλέπων : Χατζηαργυρίου Νικόλαος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

.....

Σταύρος Κωνσταντινόπουλος

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

Copyright © Σταύρος Κωνσταντινόπουλος 2015

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε το ακαδημαϊκό έτος 2014-2015 στον Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ. Σκοπός της είναι, η στοχαστική μοντελοποίηση μικρής και μεγάλης κλίμακας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, με στόχο την βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους, σύμφωνα με τα κριτήρια οικονομικής λειτουργίας καθώς και περιβαλλοντικές πολιτικές. Τα δίκτυα αυτά ενσωματώνουν δυνατότητες ΣΗΘ καθώς και ΑΠΕ. Για την επίλυση χρησιμοποιούνται και συγκρίνονται οι μετεωριστικές μέθοδοι PSO και Harmony Search.

Υπεύθυνος κατά την εκπόνηση της διπλωματικής αυτής εργασίας ήταν ο Καθηγητής κ. Ν. Χατζηαργυρίου, τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά για την ανάθεση της. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Διδάκτορα κ. Α. Αναστασιάδη για τις πολύτιμες συμβουλές και την καθοδήγηση που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της εργασίας, καθώς και για την απρόσκοπτη πρόσβαση στο ερευνητικό του έργο. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω του γονείς μου, για την συνεχή τους υποστήριξη καθόλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Η εργασία αυτή είχε δύο στόχους. Αρχικά την στοχαστική, πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση ενός μεγάλου υβριδικού δικτύου, με ενσωμάτωση μονάδων συμπαραγωγής, αιολικών μονάδων παραγωγής καθώς και ενός σταθμού τεχνολογίας Vehicle-to-Grid, υπό περιβαλλοντικές πολιτικές καθώς και περιορισμούς δυναμικής ευστάθειας. Αναλύθηκαν εκτενώς όλες οι παράμετροι μεταβλητότητας των εμπλεκόμενων μονάδων και πώς αυτές επηρεάζουν την τελική διαδικασία βελτιστοποίησης. Ειδικότερα, εξετάστηκε η εισαγωγή μίας πιο ακριβούς έκφρασης για την μετατροπή της τυχαίας μεταβλητής του ανέμου σε αντίστοιχη τυχαία μεταβλητή ισχύος, και πώς αυτό επηρεάζει τις αναμενόμενες μέσες αποκλίσεις από τα επιθυμητά. Επίσης, στο κομμάτι που αφορούσε της μονάδες ΣΗΘ ενσωματώθηκαν τα μη κυρτά, πραγματικά, εφικτά σύνολα και διερευνήθηκε η επίδραση τους πάνω στο πρόβλημα. Αντίστοιχα, εφαρμόσαμε πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση ενός μικροδικτύου με δυνατότητες τόσο συμβατικής παραγωγής όσο και συμπαραγωγής. Επιπλέον διερευνήθηκαν οι επιπτώσεις της φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, στο εξεταζόμενο μικροδίκτυο και εισαγάγαμε έναν νέο αλγόριθμο κατανομής των ωρών φόρτισης με βάση την οριακή τιμή συστήματος. Οι παραπάνω βελτιστοποιήσεις πραγματοποιήθηκαν με δύο από τις πιο δημοφιλείς μεθόδους αναζήτησης βέλτιστου. Η πρώτη είναι η PSO (Particle Swarm Optimization) και δεύτερη η Αρμονική Αναζήτηση ή Αρμονικός Αλγόριθμος.

Αυτό μας οδήγησε στο δεύτερο στόχο της διπλωματικής, ο οποίος ήταν η σύγκριση της απόδοσης και επίδοσης των δύο μεθόδων καθώς και η σύγκριση αυτών με τη μέθοδο πολλαπλασιαστών Lagrange. Οι αλγόριθμοι εξετάστηκαν σε απλά μικρών διαστάσεων ντετερμινιστικά προβλήματα, μέχρι και σε τάξεις μεγαλύτερα (30 διαστάσεων) στοχαστικά, με εφικτά σύνολα μη κυρτά. Η βελτιστοποίηση πραγματοποιήθηκε ανά μέθοδο με διαφορετική προσέγγιση, λόγω των ιδιοτήτων της κάθε μιας. Η PSO προσέγγισε το πρόβλημα με κριτήρια αριστείας Pareto, ενώ ο Αρμονικός με σταθμισμένη άθροιση των αντικειμενικών συναρτήσεων. Στόχος ήταν να διαφανεί γιατί είναι πιο αποδοτικές και προτιμούνται τέτοιες μέθοδοι για την επίλυση σύνθετων πολυδιάστατων προβλημάτων, καθώς και να τονιστούν οι δυνατότητες και τα μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου. Τέλος, διερευνήθηκε η επίδραση των ηλεκτρικών οχημάτων στα δίκτυα ενέργειας καθώς και η επίδραση των νέων σταθμών τύπου V2G σε συνθήκες αιχμής.

ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ

Μικροδίκτυο, διεσπαρμένη παραγωγή, μετεωριστικοί, ανεμογεννήτριες, μικροτουρμπίνα, συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας, ΑΠΕ, Particle Swarm Optimization, ηλεκτρικά οχήματα, αρμονικός αλγόριθμος αναζήτησης, πολυκριτηριακή οικονομική βελτιστοποίηση, κόστος λειτουργίας, στοχαστικότητα, μεταβλητότητα αιολικής ισχύος, μη κυρτή βελτιστοποίηση, IEEE 30-bus, Vehicle to Grid

Abstract

The purpose of this diploma thesis is to model, implement and simulate a stochastic multiobjective approach to an Economic Dispatch problem, incorporating CHP units, wind power plants and electric vehicles, under environmental and dynamic stability constraints, using two popular metaheuristic algorithms, PSO and Harmony Search. The problem is approached, initially, on a larger scale and simulations take place on the modified IEEE 30-bus system with two CHP units, assuming a non-convex Feasible Region of Operation (FOR). Additionally, the 20 wind parks incorporated in the model use the actual data measured from the wind parks of Crete island. The expected power deviation is calculated for all the units, and especially for the wind parks and the V2G station, overestimation and underestimation penalties are formulated and applied. This is possible, through the transformation of the random wind variable following the Weibull distribution, to power output random variable. Concerning the approach of the wind turbine power curve, a modified cubic form is assumed.

The problem then is scaled down, where we assume a 17-bus micro grid with hybrid production capabilities along with a Wind Turbine and solar power installations. Additionally, 12 electric vehicles are present and their charging patterns are optimized following a "Marginal Price" algorithm and then incorporated into the model. The model is then simulated initially with a deterministic approach on operational cost, and then a stochastic multiobjective approach incorporating deviation and CO₂ emissions.

All the above, are simulated by a Pareto based PSO, and by Harmony Search using a weighted aggregation approach. Results and running times are compared, determining the strengths and weaknesses of each method, additionally to a comparison of how they handle non-convex CHPED problems.

Finally, the effects of EVs on power systems are explored, along with the capabilities and effects of the newly introduced Vehicle-to-Grid technologies with regard to peak load management.

KEY-WORDS

microgrid, distributed generation, metaheuristics, microturbine, Heat and Power Cogeneration, Renewable Energy Sources, Particle Swarm Optimization, Electric Vehicles, Harmony Search, multiobjective Economic Dispatch, stochastic model, wind power estimation, non-convex optimization, IEEE 30-bus, Vehicle to Grid, dynamic stability

Περιεχόμενα

1.Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ)	11
1.1 Περιγραφή ΣΗΕ.....	11
1.1.1 Εισαγωγή.....	11
1.1.2 Σκοπός και απαιτήσεις	11
1.1.3 Δομή ΣΗΕ	12
1.1.4 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	13
1.1.5 Μεταφορά Ηλεκτρικής Ενέργειας	14
1.1.6 Διανομή ηλεκτρικής ενέργειας.....	16
1.1.7 Φορτία	17
1.1.8 Ανάλυση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας	18
1.1.9 Οικονομική λειτουργία.....	18
1.1.10 Ανωμαλίες λειτουργίας του συστήματος.....	18
1.1.11 Σύστημα και μέσα προστασίας	18
1.2 Μικροδίκτυα.....	19
1.2.1 Η έννοια του μικροδικτύου	19
1.2.2 Επιδράσεις μικροδικτύου στη γενικότερη λειτουργία ενός ΣΗΕ	21
1.2.2.1 Πλεονεκτήματα μικροδικτύου.....	21
1.2.2.2 Λειτουργικά οφέλη για το δίκτυο.....	23
1.2.2.3 Μικροδίκτυο και περιβάλλον	24
1.3 Ηλεκτρικά Οχήματα και Δίκτυο	24
1.3.1 Συσσωρευτές	24
1.3.2 Vehicle to Grid Technologies	27
2.Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας	28
2.1 Εισαγωγή	28
2.2 Σύγχρονες τεχνικές συμπαραγωγής.....	30
2.3 Πλεονεκτήματα και επιπτώσεις της συμπαραγωγής.....	30
2.3.1 Επιπτώσεις στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.....	30
2.3.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις.....	31
2.3.3 Επιπτώσεις στα καύσιμα	31
2.4 Η συμπαραγωγή στην Ελλάδα.....	32
2.4.1 Συμπαραγωγή και φυσικό αέριο.....	32
2.4.2 Συμπαραγωγή και βιομάζα	33
2.5 Ενεργειακή συμπεριφορά συστημάτων συμπαραγωγής	35

2.5.1 Δείκτες ενεργειακής συμπεριφοράς	35
2.5.2 Τρόποι λειτουργίας συστημάτων συμπαραγωγής.....	36
2.6 Μοντέλα λειτουργίας μονάδων συμπαραγωγής	37
2.7 Μικροσυμπαραγωγή	40
2.7.1 Δυνατότητες για μικροσυμπαραγωγή.....	40
2.7.2 Ορισμός	41
2.7.3 Οικονομικοί και περιβαλλοντικοί παράγοντες	42
2.7.4 Εμπόδια στην αγορά.....	43
3.Οικονομική Κατανομή Φορτίου	44
3.1 Εισαγωγή	44
3.2 Η απλούστερη μορφή του προβλήματος οικονομικής κατανομής φορτίου	45
3.3 Οικονομική κατανομή φορτίου και λειτουργικά όρια μονάδων	46
3.4 Αλγόριθμος επαναλήψεων λάμδα.....	47
3.5 Οικονομική κατανομή φορτίου με απώλειες μεταφοράς	48
3.5.1 Εξίσωση απωλειών με τη μέθοδο των Β-συντελεστών.....	49
4.Αιολική Ισχύς και Περιορισμοί Διείσδυσης.....	51
4.1 Εισαγωγή	51
4.2 Προβλήματα από τη διείσδυση αιολικής ισχύος.....	52
4.2.1 Έλεγχος ενεργού ισχύος	53
4.2.2 Έλεγχος συχνότητας.....	53
4.2.3 Έλεγχος τάσης.....	53
4.2.4 Προστασία	54
4.2.5 Επάρκεια ισχύος και εφεδρεία συστήματος.....	54
4.3 Πιθανοτική ανάλυση παραγωγής αιολικής ισχύος.....	55
5.Μέθοδοι Βελτιστοποίησης.....	57
5.1 Εισαγωγή	57
5.2 Κατηγορίες προβλημάτων βελτιστοποίησης	57
5.2.1 Μη γραμμικός προγραμματισμός	59
5.2.2 Αλγόριθμοι ολικής βελτιστοποίησης.....	63
5.3 Ο Αρμονικός Αλγόριθμος (Harmony Search Algorithm).....	67
5.3.1 Εισαγωγή	67
5.3.2 Οι παράμετροι του αλγορίθμου	68
5.4 Particle Swarm Optimization	71
5.4.1 Εισαγωγή	71

5.4.2 Βασικά χαρακτηριστικά της μεθόδου	71
5.4.3 Πολυκριτηριακή Προσέγγιση	73
6. Μοντελοποίηση Προβλημάτων και Προσομοιώσεις.....	76
6.1 Οικονομική κατανομή φορτίου με περιβαλλοντικούς Περιορισμούς- Μεγάλο Δίκτυο. 76	
6.1.1 Εισαγωγή	76
6.1.2. Αντικειμενικές Συναρτήσεις Συστήματος.....	77
6.1.2.1 Αναμενόμενο ωριαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος με διεύθυνση αιολικής παραγωγής.....	77
6.1.2.2 Μαθηματικές Εκφράσεις Για Την Αναμενόμενη Απόκλιση Παραγωγής Ηλεκτρικής και Θερμικής Ισχύος (Ρίσκο Κάλυψης Ισχύος).....	86
6.1.2.3 Μαθηματική Έκφραση Των Αναμενόμενων Εκπομπών Αερίων Ρύπων CO ₂ , SO ₂ , NO _x	87
6.1.2.4 Μαθηματική Έκφραση Της Αναμενόμενης Ασφάλειας Του ΣΗΕ Λόγω Της Διεύθυνσης Μονάδων Αιολικής Παραγωγής Ισχύος.....	88
6.1.2.5 Μαθηματικές Εκφράσεις Για Τους Αναμενόμενους Περιορισμούς Του Προβλήματος	89
6.2 Δίκτυο Μελέτης Και Δεδομένα Του Προβλήματος	91
6.3 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Προσομοιώσεων.....	95
6.3.1. Σενάριο ύπαρξης μόνο θερμικών μονάδων	95
6.3.1.1 Κυρτή Μορφή Εφικτού Συνόλου CHP.....	95
6.3.1.2 Μη Κυρτή Μορφή Εφικτού Συνόλου CHP	99
6.3.2 Σενάριο ύπαρξης θερμικών μονάδων και αιολικών πάρκων.....	104
6.3.2.1 Ολική βελτιστοποίηση χωρίς περιορισμό ρύπων (J1-J2-J3-J5)	104
6.3.2.2 Ολική βελτιστοποίηση (J1-J2-J3-J5) υπό περιορισμό J4c (ρύπων CO ₂).....	106
6.3.2.3 Ολική βελτιστοποίηση (J1-J2-J3-J4-J5) υπό περιορισμό J4c (ρύπων CO ₂)	109
6.3.3. Σενάριο ύπαρξης θερμικών μονάδων, αιολικών πάρκων και V2G σταθμού	110
6.3.3.1 Ολική βελτιστοποίηση (J1-J2-J3-J5) υπό περιορισμό J4c (ρύπων CO ₂).....	110
6.3.3.2 Ολική βελτιστοποίηση (J1-J2-J3-J4-J5) υπό περιορισμό J4c (ρύπων CO ₂)	111
6.4 Βελτιστοποίηση Μικροδικτύου	113
6.4.1 Το δίκτυο Εφαρμογής.....	113
6.4.1.1 Στοιχεία του συστήματος	113
6.4.1.2 Μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής	114
6.4.1.3 Ενεργειακοί διανομείς.....	115
6.4.1.4 Φορτία	118
6.4.1.5 Τα Ηλεκτρικά Αυτοκίνητα.....	119

6.5 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Ντετερμινιστικής Βελτιστοποίησης	120
6.5.1. Μικροδίκτυο με ηλεκτρικά οχήματα-Πολιτική του καλού πολίτη	120
6.5.2. Μικροδίκτυο με ηλεκτρικά οχήματα-Σενάριο μετάθεσης φορτίου-Πολιτική του καλού πολίτη	127
6.5.3. Μικροδίκτυο με ηλεκτρικά οχήματα-Σενάριο μετάθεσης φορτίου-Πολιτική του ιδανικού πολίτη	130
6.5.4 Μικροδίκτυο με ηλεκτρικά οχήματα-Σενάριο μετάθεσης φορτίου-Πολιτική του ιδανικού πολίτη-Αυξημένη διείσδυση	133
6.5.5 Σχετικά με τις μεθόδους	135
6.5.6 Σύγκριση Αλγορίθμων φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων	136
6.6 Στοχαστική Βελτιστοποίηση Μικροδικτύου	139
6.6.1 Αντικειμενικές Συναρτήσεις	139
6.6.2 Αποτελέσματα προσωμοιώσεων	140
6.6.2.1 Βελτιστοποίηση Κόστους	140
6.6.2.2 Βελτιστοποίηση Ρύπων	142
6.6.2.2 Ολική Βελτιστοποίηση (J1-J2-J3-J4)	143
6.6.2.3 Παρατηρήσεις	145
7. Συμπεράσματα και Προοπτικές	146
7.1 Μετεωριστικοί Αλγόριθμοι	146
7.2 Πολυκριτηριακή προσέγγιση	147
7.3 Στοχαστική Προσέγγιση	147
7.4 Συμπαράγωγή	148
7.5 Αιολικά	148
7.6 Ηλεκτρικά Οχήματα	148
Βιβλιογραφία	149

1.Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ)

1.1 Περιγραφή ΣΗΕ

1.1.1 Εισαγωγή

Τα πρώτα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας εμφανίστηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1870, όταν χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε πελάτες για τον φωτισμό. Ο πρώτος σταθμός παραγωγής λειτούργησε στο Λονδίνο στις 12 Ιανουαρίου 1882 και ο δεύτερος στις 4 Σεπτεμβρίου το ίδιο έτος στη Νέα Υόρκη. Αρχικά, γινότανε χρήση συνεχούς ρεύματος, με τους πρώτους σταθμούς να εξυπηρετούν περιορισμένες περιοχές λόγω των περιορισμών στη μεταφορά. Τα κοινωνικά οφέλη από τη χρήση αυτού του νέου αγαθού έδωσαν την ώθηση για ταχεία ανάπτυξη των μεθόδων παραγωγής και μεταφοράς αυτού ώστε να γίνει προσβάσιμο από όλο και μεγαλύτερο κομμάτι του πληθυσμού.

Επαναστατική αλλαγή αποτέλεσε η εισαγωγή του εναλλασσομένου ρεύματος στις αρχές τις δεκαετίας του 1880. Τα πλεονεκτήματα του φάνηκαν αμέσως με κύριο αυτό της πιο αποδοτικής μεταφοράς (αποστάσεις 1200 μέτρων) με ανύψωση της τάσης. Έπειτα εισήχθησαν τα τριφασικά συστήματα καθώς και οι διφασικές μηχανές ΕΡ. Το 1893 λειτούργησε η πρώτη τριφασική γραμμή μήκους 21 km τάσεως 2300 V στην Καλιφόρνια.

Η συχνότητα αρχικά δεν είχε τυποποιηθεί και πολλές τιμές είχαν προταθεί αλλά για λόγους συνδεσιμότητας υιοθετήθηκαν οι τιμές 50 και 60 Hz για Ευρώπη και Αμερική αντίστοιχα.

Τέλος, οι ανάγκες για μεταφορά σε μεγαλύτερες αποστάσεις, (πχ από απομακρυσμένες υδροηλεκτρικές μονάδες στα αστικά κέντρα), οδήγησε στη χρήση υψηλότερων τάσεων και άρχισε να δίνει στα ΣΗΕ τη μορφή που έχουν μέχρι σήμερα.

1.1.2 Σκοπός και απαιτήσεις

Για την ομαλή λειτουργία του το ΣΗΕ πρέπει να ικανοποιεί τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- A) πρέπει να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση
- B) δεδομένης της συνεχούς χρονικής μεταβολής της ζήτησης ενεργού και αέργου ισχύος, το σύστημα πρέπει να μπορεί να ικανοποιεί συνεχώς αυτή τη μεταβαλλόμενη ζήτηση

Γ) η παρεχόμενη ενέργεια πρέπει να ικανοποιεί ορισμένους όρους ποιότητας, εξασφαλίζοντας σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης.

Δ) η ενέργεια πρέπει να παρέχεται με τα ελάχιστα οικονομικά και οικολογικά κόστη.

1.1.3 Δομή ΣΗΕ

Η τροφοδότηση των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια προϋποθέτει τρεις ξεχωριστές λειτουργίες: την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή. Επειδή, η αποθήκευση είναι δύσκολη σε ένα ΣΗΕ η ζήτηση πρέπει να παράγεται εκείνη τη στιγμή.

Η παραγωγή γίνεται στους σταθμούς παραγωγής. Η σύγχρονη βιομηχανία παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας έχει θεμελιωθεί σε εφευρέσεις οι οποίες βασίζονται είτε μετατροπή της θερμικής ενέργειας (προερχόμενη κυρίως από ορυκτά καύσιμα), είτε κινητικής (Υδροηλεκτρικά, Αιολικά). Η μεταφορά αυτής από την παραγωγή στην κατανάλωση γίνεται μέσω των δικτύων υψηλής και υπερύψηλης τάσης. Αυτές καταλήγουν στους υποσταθμούς οι οποίοι βρισκόμενοι σε κομβικά σημεία με τη σειρά τους μέσω του δικτύου διανομής, μοιράζουν την ενέργεια στους τελικούς καταναλωτές. Πριν την κατανάλωση μεσολαβούν οι υποσταθμοί διανομής και το δίκτυο χαμηλής τάσης.

Οι εγκαταστάσεις παραγωγής και μεταφοράς είναι συνήθως οικονομικά εξαρτημένες μεταξύ τους και γι' αυτό ο τεχνικός και οικονομικός σχεδιασμός των σταθμών παραγωγής, των κύριων γραμμών μεταφοράς και των κεντρικών υποσταθμών πρέπει να είναι ενιαίος, με στόχο την ικανοποίηση των ενεργειακών αναγκών της κατανάλωσης με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τη μεγαλύτερη δυνατή αξιοπιστία τροφοδότησης. Η διανομή είναι συνήθως μια διαφορετική λειτουργία που σχεδιάζεται και αναπτύσσεται χωριστά και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής και των καταναλωτών τους οποίους εξυπηρετεί.

Η δομή του συστήματος επηρεάζεται σημαντικά από το μέγεθος της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, τη χρονική της μεταβολή κατά τη διάρκεια του 24ώρου και από τη χωροταξική της κατανομή.

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

Η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας καθορίζει την ποσότητα των καυσίμων που χρησιμοποιούνται για τη λειτουργία των σταθμών παραγωγής, ενώ η μορφή της καμπύλης ζήτησης περιγράφει χρονικά την απασχόληση των εγκαταστάσεων παραγωγής, μεταφοράς και διανομής από τους καταναλωτές.

Τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα της ζήτησης διαμορφώνουν το κόστος λειτουργίας μιας επιχείρησης ηλεκτρισμού. Το κόστος προοδευτικά αυξάνει από την παραγωγή προς τη διανομή γιατί μεσολαβούν πρόσθετες εγκαταστάσεις. Το κόστος καταβάλλεται από τους καταναλωτές σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της ζήτησής τους και με τα τιμολόγια που έχουν θεσπιστεί.

1.1.4 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας

Για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας απαιτείται μετατροπή μιας μορφής πρωτογενούς ενέργειας σε ηλεκτρική. Σήμερα χρησιμοποιείται κυρίως η μετατροπή μιας μορφής ενέργειας πρώτα σε μηχανική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω των γεννητριών. Το σύνολο της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται στον καταναλωτή προέρχεται κυρίως από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς με την καύση ορυκτών καυσίμων (άνθρακας, λιγνίτης, πετρέλαια, φυσικό αέριο), από υδροηλεκτρικούς σταθμούς με τη ροή ή την πτώση των υδάτων, από πυρηνικούς σταθμούς με την πυρηνική σχάση και από σταθμούς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως είναι ο άνεμος, τα θαλάσσια κύματα, η ηλιακή ενέργεια, η γεωθερμία, η βιομάζα κ.α.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την καύση ορυκτών καυσίμων, τη γεωθερμία και τη βιομάζα πραγματοποιείται στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς με τη χρησιμοποίηση ατμοηλεκτρικών και νηξελοηλεκτρικών σταθμών (εμβολοφόρες νηξελογεννήτριες και αεριοστρόβιλοι). Οι ατμοηλεκτρικοί σταθμοί χρησιμοποιούν τον ατμό ως μέσον για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας μέσω ατμοστροβίλων, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω των γεννητριών. Οι πυρηνικοί σταθμοί είναι και αυτοί ατμοηλεκτρικοί σταθμοί που όμως ο λέβητας έχει αντικατασταθεί από τον πυρηνικό αντιδραστήρα. Αντίθετα, οι νηξελοηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής χρησιμοποιούν μηχανές εσωτερικής καύσης για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας. Επίσης θερμική παραγωγή πραγματοποιείται σε σταθμούς συνδυασμένου κύκλου όπου έχουμε συνδυασμό λειτουργίας αεριοστροβίλου και

ατμοστρόβιλου και τα θερμικά απόβλητα (καυσαέρια) του αεριοστρόβιλου χρησιμοποιούνται στο ατμοηλεκτρικό μέρος του σταθμού.

Όσον αφορά τις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας, οι πιο διαδεδομένες μορφές στα σημερινά ΣΗΕ είναι τα αιολικά πάρκα και οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί. Τα αιολικά πάρκα αποτελούνται από συστοιχίες ανεμογεννητριών που συνδέονται σε κάποιον ζυγό του δικτύου. Οι ανεμογεννήτριες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανικό έργο μέσω ενός ανεμοκινητήρα και στη συνέχεια σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω των γεννητριών. Τα αιολικά πάρκα εγκαθίστανται σε δίκτυα που περιλαμβάνουν σταθμούς με υψηλό λειτουργικό κόστος και σε θέσεις με υψηλό αιολικό δυναμικό.

Οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική με τη βοήθεια των ηλιακών κυψελών. Η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Στόχος της εξέλιξης της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών είναι η μείωση του κόστους κατασκευής των ηλιακών κυψελών, η αύξηση της διάρκειας ζωής και η αύξηση του βαθμού απόδοσης ο οποίος σήμερα φτάνει το 15%. Οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί εγκαθίστανται συνήθως για την τροφοδότηση απομονωμένων καταναλώσεων.

1.1.5 Μεταφορά Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από την έξοδο των σταθμών παραγωγής μέχρι τους υποσταθμούς που τροφοδοτούν τα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης απ' όπου ξεκινούν τα δίκτυα διανομής. Επίσης τροφοδοτούν τους μεγάλους καταναλωτές υψηλής τάσης (που κατασκευάζουν δικό τους υποσταθμό υποβιβασμού υψηλής σε μέση τάση και δικά τους εσωτερικά δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης) και είναι κυρίως μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις με εγκατεστημένη ισχύ πάνω από 10 MW.

Το σύστημα μεταφοράς περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υψηλής τάσης, τους υποσταθμούς ζεύξης των δικτύων αυτών και τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διαφόρων επιπέδων τάσεων που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο μεταφοράς. Το σύστημα μεταφοράς θα πρέπει να παρέχει σταθερή (ή σχεδόν

σταθερή) τάση και οι τάσεις των τριών φάσεων να βρίσκονται σε ισορροπία. Το κύμα της τάσης θα πρέπει να έχει ημιτονοειδή μορφή και η συχνότητα να είναι σταθερή. Η αποδοτικότητα θα πρέπει να πλησιάζει την τιμή η οποία συνεπάγεται ελάχιστο ετήσιο κόστος μεταφοράς. Η επίδραση του συστήματος μεταφοράς στις εγκαταστάσεις άλλων κοινωφελών επιχειρήσεων (πχ τηλεφωνικών ή ραδιοφωνικών) θα πρέπει να περιορίζεται μεταξύ παραδεκτών ορίων.

Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με υψηλή τάση, διότι αυτό συνεπάγεται μικρότερες ηλεκτρικές απώλειες και συνεπώς οικονομικότερη λειτουργία. Χρησιμοποιούνται διάφορες τάσεις μεταφοράς ανάλογα με την απόσταση και την ποσότητα της ισχύος που πρέπει να μεταφερθεί. Η μορφή των δικτύων μεταφοράς μπορεί να είναι διαμήκης ή κυκλική, ανάλογα με τη σχετική θέση των σταθμών παραγωγής ως προς τα κέντρα καταναλώσεως. Η διάταξη των δικτύων μεταφοράς είναι κατά κανόνα βροχοειδής σε αντίθεση με την ακτινική δομή των δικτύων διανομής.

Η ισχύς η οποία μπορεί να μεταφερθεί από μια γραμμή μεταφοράς είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσης γι' αυτό χρησιμοποιούνται υπερυψηλές τάσεις για την επίτευξη μεγάλων ισχύων μεταφοράς. Επιπλέον οι μειωμένες απώλειες τις οποίες απώλειες τις οποίες συνεπάγεται η μεταφορά με υπερυψηλές τάσεις καθιστούν οικονομικότερη τη λειτουργία με τις τάσεις αυτές.

Το κόστος μεταφοράς αποτελεί τη συνισταμένη του κόστους εγκατάστασης, του κόστους απωλειών και του κόστους συντήρησης της γραμμής. Κριτήριο για την επιλογή μιας τάσης μεταφοράς είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους. Αυτό σημαίνει ότι η εξοικονόμηση κόστους λειτουργίας από μια περαιτέρω αύξηση της τάσης που επιλέγεται αντισταθμίζεται από τις αναγκαίες επιπρόσθετες επενδύσεις στη γραμμή και στο λοιπό εξοπλισμό. Το κόστος του εξοπλισμού αυξάνει τόσο γρήγορα στις υψηλές τάσεις ώστε να υπάρχει κάποια μέγιστη τιμή τάσης πάνω από την οποία γίνεται αντιοικονομική η μεταφορά.

Τα υλικά που γενικά χρησιμοποιούνται στους αγωγούς των γραμμών μεταφοράς είναι ο χαλκός και το αλουμίνιο. Οι κύριες απαιτήσεις για τα αγωγά υλικά είναι η υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, η υψηλή μηχανική αντοχή, το μικρό ειδικό βάρος, η χαμηλή οξειδωση στον αέρα και η ευχέρεια σύνδεσης των αγωγών.

Η απαιτούμενη διατομή ενός αγωγού καθορίζεται από το ρεύμα που τον διαρρέει, αφού η ωμική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς είναι αντιστρόφως ανάλογη της διατομής του αγωγού. Ο αγωγός της γραμμής μεταφοράς θερμαίνεται

από τις ωμικές απώλειες και η θερμότητα αυτή ακτινοβολείται στον αέρα, αναπτύσσοντας μια θερμοκρασία ισορροπίας στον αγωγό. Σε υψηλές θερμοκρασίες η μηχανική αντοχή του αγωγού μειώνεται και έτσι η θερμοκρασία ισορροπίας του δεν πρέπει να υπερβαίνει ένα ορισμένο όριο, συνήθως τους 100 °C. Το αντίστοιχο ρεύμα αποτελεί το ανώτατο επιτρεπόμενο όριο φόρτισης του αγωγού και ονομάζεται *ικανότητα μεταφοράς ρεύματος του αγωγού*.

Οι αγωγοί υψηλής τάσης των εναέριων γραμμών μεταφοράς αναρτώνται από τους πυλώνες της γραμμής δια μέσου σειράς μονωτήρων. Η αύξηση της μόνωσης για υψηλότερες τάσεις μεταφοράς αντιμετωπίζεται με την προσθήκη περισσότερων δίσκων στους αλυσσοειδείς μονωτήρες. Η μόνωση μεταξύ αγωγών, όπως και μεταξύ αγωγών και γης, στις εναέριες γραμμές αποτελείται από τον αέρα που υπάρχει μεταξύ τους.

1.1.6 Διανομή ηλεκτρικής ενέργειας

Η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει όλες τις διαδικασίες λειτουργίας και ελέγχου που απαιτούνται ώστε η ηλεκτρική ενέργεια να διανεμηθεί στους καταναλωτές. Τα δίκτυα διανομής περιλαμβάνουν τις γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των οποίων αυτή φτάνει ως τους καταναλωτές και τους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσης, οι οποίοι τις συνδέουν με το σύστημα μεταφοράς. Τα δίκτυα διανομής φτάνουν μέχρι το μετρητή της παρεχόμενης στον καταναλωτή ενέργειας. Μετά το μετρητή αρχίζει η εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση, που περιλαμβάνει το εσωτερικό δίκτυο διανομής και τις συσκευές κατανάλωσης.

Η διάκριση μεταξύ των δικτύων μεταφοράς και διανομής διαφέρει από χώρα σε χώρα. Η συνεχής αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και η παράλληλη τεχνολογική εξέλιξη των υλικών οδήγησαν στη χρησιμοποίηση όλο και υψηλότερων τάσεων για τη διανομή, με αποτέλεσμα δίκτυα που παλαιότερα έπαιζαν το ρόλο μεταφοράς να χαρακτηρίζονται τώρα ως δίκτυα υπομεταφοράς και να αποτελούν μέρος της διανομής.

Στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας η αξία των εγκαταστάσεων διανομής κυμαίνεται γύρω στο 30% του συνόλου των εγκαταστάσεων, ενώ ακόμα μεγαλύτερη είναι η ποσοστιαία συμμετοχή στις δαπάνες εκμετάλλευσης. Ένα άλλο χαρακτηριστικό της διανομής είναι το πλήθος των στοιχείων που την αποτελούν.

Επιπλέον, οι απώλειες ενέργειας στο επίπεδο της διανομής είναι περίπου διπλάσιες απ' ότι στο επίπεδο της μεταφοράς [1].

Η κατασκευαστική διαμόρφωση των δικτύων διανομής συνδέεται άμεσα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά δόμησης των πόλεων και γενικότερα του τρόπου χωροταξικής διαμόρφωσης κάθε χώρας. Αυτό διαπιστώνεται και από το γεγονός ότι τα δίκτυα διανομής κάθε χώρας έχουν κατά γενικό κανόνα τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους, σε αντίθεση με τα δίκτυα μεταφοράς που είναι διεθνώς όμοια. Τα δίκτυα διανομής διακρίνονται σε δίκτυα υψηλής, μέσης και χαμηλής τάσης. Ανάλογα με την κατασκευαστική τους διαμόρφωση τα δίκτυα διανομής διακρίνονται σε εναέρια και υπόγεια. Τα εναέρια είναι λιγότερο δαπανηρά και σε αυτά η αποκατάσταση των βλαβών είναι ταχύτερη σε σχέση με τα υπόγεια. Ωστόσο στις πυκνοκατοικημένες περιοχές των πόλεων τα δίκτυα διανομής κατασκευάζονται συνήθως υπόγεια, διότι δεν υπάρχει ο απαιτούμενος χώρος, ώστε να τηρούνται οι αποστάσεις ασφαλείας από τα κτίρια, αλλά και για λόγους αισθητικής.

1.1.7 Φορτία

Ο όρος φορτίο αναφέρεται σε μια συσκευή που τροφοδοτείται με ηλεκτρική ενέργεια. Ένα ΣΗΕ κατάλληλα σχεδιασμένο μπορεί να παρέχει ενέργεια σε διάφορα φορτία. Οι κατηγορίες των φορτίων είναι οι ακόλουθες:

- Κινητήρες
- Συσκευές Θέρμανσης
- Ηλεκτρονικές Συσκευές
- Φωτιστικά σώματα

Από ηλεκτρική άποψη υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ των διαφόρων φορτίων σε ότι αφορά το μέγεθος, τη συμμετρία (μονοφασικό ή τριφασικό), τη σταθερότητα (ως προς το χρόνο, τη συχνότητα και την τάση) και την περίοδο λειτουργίας (συστηματική ή τυχαία). Για τις μελέτες του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητο να είναι γνωστή η μεταβολή των φορτίων συναρτήσει της τάσης και της συχνότητας. Τα φορτία στις μελέτες των ΣΗΕ συνήθως αναπαρίστανται με δύο τρόπους, ως φορτία σταθερής αντίστασης $Z=R+j\omega L$, ή ως φορτία σταθερής ισχύος $S=P+jQ$. Τα σύνθετα φορτία, όπως είναι τα περισσότερα φορτία στην πράξη, μεταβάλλονται με την τάση και τη συχνότητα. Σε πολλές περιπτώσεις ενδιαφέρουν οι μεταβολές $\Delta P, \Delta Q$ της ισχύος των φορτίων, που προκαλούνται από μικρές μεταβολές της συχνότητας και της τάσης. Σε πολλές μελέτες σύνθετων φορτίων προκύπτει ότι ένα μέσο φορτίο αποτελείται κατά 60% από επαγωγικούς κινητήρες, κατά 20% από σύγχρονους κινητήρες και κατά 20% από διάφορα άλλα φορτία.

1.1.8 Ανάλυση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας

Για την εξασφάλιση της σωστής σχεδίασης, καθώς και της καλής και αξιόπιστης λειτουργίας των ΣΗΕ, εκπονούνται εξειδικευμένες μελέτες. Οι μελέτες ανάλυσης των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας ταξινομούνται σε μελέτες μόνιμης κατάστασης και σε μελέτες μεταβατικής κατάστασης. Οι μελέτες μόνιμης κατάστασης περιλαμβάνουν ανάλυση ροών φορτίου και την οικονομική κατανομή φορτίου, ενώ οι μελέτες μεταβατικής κατάστασης περιλαμβάνουν την ανάλυση βραχυκυκλωμάτων, των ηλεκτρικών μεταβατικών φαινομένων και της ευστάθειας.

1.1.9 Οικονομική λειτουργία

Η οικονομία λειτουργίας του συστήματος έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς το σύστημα μπορεί να λειτουργεί, ικανοποιώντας τις απαιτήσεις τάσης και συχνότητας της ζήτησης με άπειρους τρόπους. Ωστόσο, μόνο μία διάταξη θα δώσει την πλέον οικονομική λειτουργία. Τότε το σύστημα λέγεται ότι λειτουργεί σε *οικονομική κατανομή φορτίου*, πρόβλημα που θα μελετηθεί στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

1.1.10 Ανωμαλίες λειτουργίας του συστήματος

Κατά τη λειτουργία ενός συστήματος δημιουργούνται πολλές φορές ανώμαλες συνθήκες, οφειλόμενες είτε σε βλάβες αυτού, είτε σε εξωτερικά τυχαία αίτια, ή σε ατμοσφαιρικές επιδράσεις. Οι ανώμαλες συνθήκες αποτελούν μεταβατικές καταστάσεις λειτουργίας του συστήματος – σε αντίθεση με την κανονική ή μόνιμη κατάσταση – κατά τις οποίες στο σύστημα εκδηλώνονται μεταβατικά φαινόμενα ταχείας ή βραδείας εξέλιξης, αναλόγως της περίπτωσης. Κατά τα μεταβατικά αυτά φαινόμενα δημιουργούνται ταλαντώσεις τάσεων και εντάσεων στο σύστημα, κατά τις οποίες τα μεγέθη αυτά είναι δυνατόν να αποκτήσουν τιμές επικίνδυνες για την ασφάλεια του συστήματος. Τα βραχυκυκλώματα αποτελούν τις συνηθέστερες ανωμαλίες ενός ηλεκτρικού δικτύου και οφείλονται είτε σε βλάβες των εγκαταστάσεων, ή του εξοπλισμού αυτού, ή σε επιδράσεις εξωτερικών αιτιών, κυρίως ατμοσφαιρικών. Όπως τα βραχυκυκλώματα αποτελούν ανώμαλες υπερεντάσεις οι οποίες καταπονούν θερμικά και δυναμικά τους αγωγούς των δικτύων, οι υπερτάσεις αποτελούν ανώμαλες τάσεις, πολλαπλάσιου μεγέθους των τάσεων λειτουργίας, οι οποίες αντίστοιχα καταπονούν διηλεκτρικά τις μονώσεις αυτών. Αυτές διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, αναλόγως προέλευσης, τις ατμοσφαιρικές ή εξωτερικές και τις λειτουργικές ή εσωτερικές υπερτάσεις.

1.1.11 Σύστημα και μέσα προστασίας

Το σύστημα προστασίας ενός ηλεκτρικού δικτύου είναι το βασικότερο από τα βοηθητικά συστήματα, με τα οποία είναι εφοδιασμένο το δίκτυο και αποσκοπεί στην προστασία του από τις ανώμαλες καταστάσεις, οι οποίες παρουσιάζονται κατά τη λειτουργία του και κυρίως από τα βραχυκυκλώματα. Κατηγορίες και είδη προστασιών έναντι βραχυκυκλωμάτων υπάρχουν πολλά, από τα οποία αναφέρονται τα βασικότερα:

- Προστασία απόστασης (γραμμές μεταφοράς)

- Προστασία υπερέντασης (γεννήτριες, μετασχηματιστές, γραμμές διανομής ΜΤ, κ.α.)
- Διαφορική προστασία (μετασχηματιστές, καλώδια, γεννήτριες, ζυγοί)
- Προστασία σύγκρισης φάσεων (γραμμές μεταφοράς)
- Προστασία Buch – holtz (μετασχηματιστές, κ.α.)
- Προστασία υπερθέρμανσης (μετασχηματιστές, κ.α.)

Τα κύρια όργανα προστασίας είναι οι ηλεκτρονόμοι ή ρελαί, οι διακόπτες ισχύος ή αυτόματοι διακόπτες και οι ασφάλειες. Βασικοί τύποι διακοπών ισχύος υψηλής τάσεως είναι οι διακόπτες: ελαίου, πεπιεσμένου αέρος και εξαφθοριούχου θείου. Επίσης, ένα μέσο προστασίας του δικτύου από τις υπερτάσεις είναι το αλεξικέραυνο.

1.2 Μικροδίκτυα

1.2.1 Η έννοια του μικροδικτύου

Ένα μικροδίκτυο (Microgrid) προσδιορίζεται ως ένα εν δυνάμει ηλεκτρικά απομονωμένο σύνολο γεννητριών που τροφοδοτούν κατ' αποκλειστικότητα όλη τη ζήτηση ενός συνόλου καταναλωτών. Συμπεριλαμβάνουν πηγές κατανεμημένης παραγωγής ισχύος από λίγα kW μέχρι 1- 2MW, συσκευές αποθήκευσης –όπως πυκνωτές, μπαταρίες, σφονδύλους- και ελέγξιμα φορτία. Τα μικροδίκτυα αποτελούν ένα είδος συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που στο μέλλον αναμένεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο.

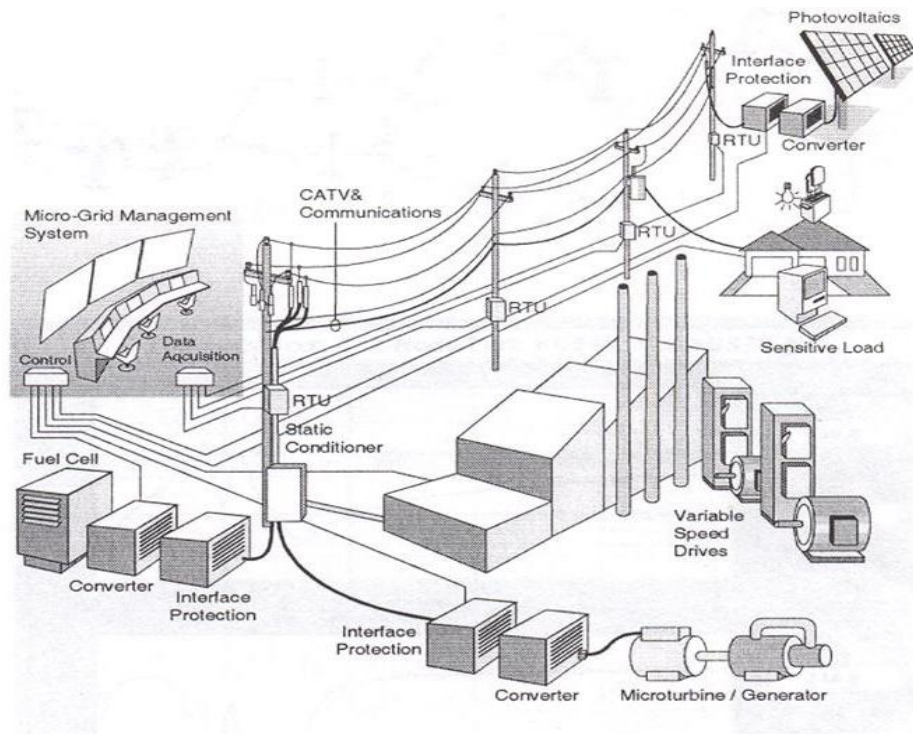
Ο σχεδιασμός του μικροδικτύου είναι ανεξάρτητος από το κεντρικό δίκτυο, ωστόσο μπορεί να υπάρχει διασύνδεση με αυτό, για ανταλλαγή ενέργειας. Τυπικές πηγές ενός μικροδικτύου είναι οι γεννήτριες ντήζελ ή φυσικού αερίου, συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ζεστού νερού (γεννήτριες, μικροστρόβιλοι), οι ανεμογεννήτριες, τα φωτοβολταϊκά, οι κυψέλες καυσίμου, οι γεωθερμικοί και οι ηλιοθερμικοί σταθμοί, τα μικρά υδροηλεκτρικά, οι μονάδες που χρησιμοποιούν ως πρώτη ύλη βιομάζα, βιοντήζελ ή οποιαδήποτε άλλη πηγή ενέργειας. Ένα μικροδίκτυο μπορεί να εγκατασταθεί εκεί όπου υπάρχει διαθέσιμη μια από τις παραπάνω φυσικές πηγές ενέργειας και να καλύπτει τις καταναλώσεις της περιοχής που εγκαθίσταται. Η κλίμακα του μικροδικτύου ποικίλει, από μια οικία που χρησιμοποιεί ένα υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκών και γεννήτριας ντήζελ ή βιοκαυσίμων, ένα νοσοκομείο που χρησιμοποιεί κυψέλες καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ζεστού νερού, μέχρι και μια πόλη που τροφοδοτείται από σταθμούς βιομάζας, γεννήτριες ντίζελ και αιολικά πάρκα. Μια συνδυασμένη μάλιστα χρήση των νέων τεχνολογιών συμπαραγωγής και ανανεώσιμων πηγών, θα μπορούσε ίσως να κάνει την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας στο μικροδίκτυο ανταγωνιστική αυτής των κεντρικών δικτύων.

Δεδομένης της μικρής ισχύος των περισσότερων μονάδων ενός μικροδικτύου, η παραγωγή και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται στη χαμηλή τάση, όπου ούτως ή άλλως δεν απαιτείται η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Το μέγεθος δηλαδή των μονάδων παραγωγής είναι ουσιαστικά αυτό που σε τελική ανάλυση καθορίζει την στάθμη λειτουργίας. Το μέγεθος συνολικότερα των μονάδων παραγωγής και των φορτίων, καθορίζει εξάλλου και τον τρόπο διασύνδεσής του με άλλα μικροδίκτυα ή με το κεντρικό δίκτυο, στην μέση ή στην χαμηλή τάση. Είναι προφανές ότι η διασύνδεση στη μέση τάση απαιτεί μεγαλύτερη ισχύ.

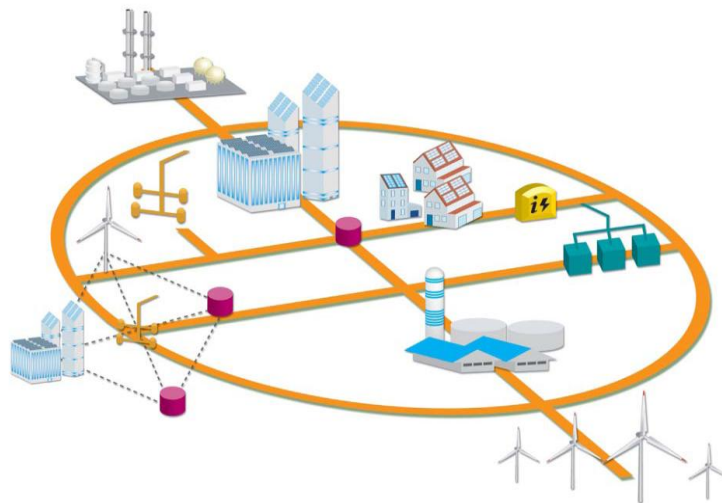
Βασικό γνώρισμα των μικροδικτύων είναι ο συντονισμένος έλεγχος τους, ώστε τελικά να εμφανίζονται στο ανάντη δίκτυο ως μία ενιαία οντότητα με το δικό της αποκεντρωμένο σύστημα ελέγχου το οποίο δεν επιβαρύνει τα συστήματα ελέγχου

του ανάντη ευρισκόμενου δικτύου με τον έλεγχο κάθε μιας μονάδας ξεχωριστά. Ένα άλλο εξίσου βασικό, όσο και πρωτοποριακό, γνώρισμα των μικροδικτύων είναι η δυνατότητα τους να λειτουργούν όχι μόνο διασυνδεδεμένα με το ανάντη δίκτυο μέσης τάσης, που είναι και η συνήθης λειτουργία τους, αλλά και απομονωμένα (ή νησιδοποιημένα) όταν διακοπεί η διασύνδεση με το κύριο δίκτυο, με οργανωμένο και ελεγχόμενο τρόπο παρέχοντας στους καταναλωτές αυξημένη αξιοπιστία και βελτιωμένα επίπεδα ποιότητα ισχύος. Αυτή η δυνατότητα βεβαίως απαιτεί εξελιγμένες υποδομές προστασίας, ελέγχου και τηλεπικοινωνιών, προκειμένου να είναι σε θέση να απομονώσουν το μικροδίκτυο και να παράσχουν σταθερή, αυτόνομη λειτουργία. Η διαρκής όμως πρόοδος στον τομέα των τηλεπικοινωνιών και ελεγκτών των πηγών διεσπαρμένης παραγωγής συμβάλλει ώστε τέτοια λειτουργία να γίνεται ολοένα και περισσότερο εύκολο να επιτευχθεί τόσο τεχνικά όσο και οικονομικά.

Από την πλευρά του δικτύου, ένα μικροδίκτυο μπορεί να θεωρηθεί σαν μια ελεγχόμενη οντότητα μέσα στο σύστημα ενέργειας που μπορεί να λειτουργεί όπως ένα συγκεντρωμένο φορτίο, μια μικρή πηγή ενέργειας ή σαν μια βοηθητική υπηρεσία που υποστηρίζει το δίκτυο. Από την πλευρά του καταναλωτή, τα μικροδίκτυα εκπληρώνουν τις ανάγκες τους σε θερμότητα και ηλεκτρισμό, όμοια με τα παραδοσιακά δίκτυα διανομής Μέσης Τάσης, αλλά επιπροσθέτως ενισχύουν και την τοπική αξιοπιστία, μειώνουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και βελτιώνουν την ποιότητα ενέργειας υποστηρίζοντας την τάση και μειώνοντας τις βυθίσεις της. Επίσης, δυνητικά, «ρίχνουν» τις τιμές του αποθέματος ενέργειας. Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό του μικροδικτύου είναι ότι, ενώ υπό ομαλές λειτουργεί διασυνδεδεμένο με το δίκτυο, μπορεί αυτόματα να τεθεί σε απομονωμένη λειτουργία σε περιπτώσεις σφαλμάτων του ανάντη δικτύου. Συνεπώς ένα μικροδίκτυο για το ανάντη ευρισκόμενο δίκτυό του αντιμετωπίζεται τόσο από άποψης αγοράς όσο και από τεχνική άποψη σαν ένα ενιαίο φορτίο ή σαν μία ενιαία παραγωγή η οποία με τα κατάλληλα οικονομικά κίνητρα μπορεί να προσφέρει και κάποιες βοηθητικές υπηρεσίες στο δίκτυο διανομής ιδιαίτερα σε περιόδους αιχμής ακόμη και τοπικού επιπέδου. Οι καταναλωτές που βρίσκονται συνδεδεμένοι στο μικροδίκτυο, όχι μόνο μπορούν όπως και πριν να ικανοποιήσουν τις ηλεκτρικές και θερμικές τους ανάγκες, αλλά μπορούν να απολαύσουν υψηλότερα επίπεδα αξιοπιστίας, καλύτερη ποιότητα ισχύος με εξομαλυσμένη καμπύλη τάσης και να επιτύχουν ακόμη και ευνοϊκότερους οικονομικά όρους για την ικανοποίηση των αναγκών τους.



(α)



(β)

Σχήμα 1.1.α-β Ένα τυπικό μικροδίκτυο

1.2.2 Επιδράσεις μικροδικτύου στη γενικότερη λειτουργία ενός ΣΗΕ

1.2.2.1 Πλεονεκτήματα μικροδικτύου

Τα συνολικά πλεονεκτήματα που μπορεί να παρέχει στη λειτουργία του συστήματος ένα μικροδίκτυο συμπεριλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα περιοχών, όπως [18]:

- Τη συνέχιση της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας εντός του μικροδικτύου σε περιπτώσεις κατάρρευσης του κεντρικού δικτύου παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Η δυνατότητα απομονωμένης λειτουργίας μπορεί να εξασφαλίσει στον

καταναλωτή που ανήκει στο εκάστοτε μικροδίκτυο την αδιάλειπτη λειτουργία την ίδια ώρα όπου το ανάντη δίκτυο διανομής μπορεί να είναι σε ασταθή κατάσταση ή να έχει καταρρεύσει προσωρινά (black out).

- Την αποδοτικότερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, την ελαχιστοποίηση των απωλειών και τη βελτίωση της ποιότητας ισχύος με την ενσωμάτωση μονάδων συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας (CHP), καθώς και με την εγκατάσταση αυτών κοντά στους καταναλωτές. Η τοπική κάλυψη του φορτίου συνεπάγεται ότι δεν παρεμβάλλονται ούτε μεγάλα μήκη γραμμών ούτε πολλοί ενδιάμεσοι καταναλωτές που αλλοιώνουν με τη χωρητική (ή επαγωγική αν πρόκειται για φορτία) συμπεριφορά τους τον συντελεστή ισχύος.
- Την πιο αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές εντός αυτού, το οποίο είναι ύψιστης σημασίας ζήτημα ιδιαίτερα για τους καταναλωτές, όπως νοσοκομεία κτλ., για τους οποίους είναι σημαντική η αδιάλειπτη παροχή ενέργειας.
- Τη μειωμένη περιβαλλοντική επιβάρυνση χρησιμοποιώντας σε μεγάλο βαθμό – εκτός της συμπαραγωγής CHP – ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και γενικότερα νέες τεχνολογίες, φιλικότερες προς το περιβάλλον. Η ενσωμάτωση τοπικά παραγόμενης ανανεώσιμης ενέργειας διαμορφώνει ευνοϊκότερους όρους για το περιβάλλον και την αειφόρο ανάπτυξη.
- Τη βελτίωση της αξιοπιστίας και της προσαρμοστικότητας του συστήματος, αφού τα μικροδίκτυα ακολουθούν την αρχή της διεσπαρμένης παραγωγής, με αποτέλεσμα η ηλεκτρική ενέργεια να μην παράγεται αποκλειστικά από λίγες μεγάλες μονάδες.
- Τη μείωση του κόστους κάλυψης των ενεργειακών αναγκών των καταναλωτών, όταν το μικροδίκτυο συμμετέχει σε πλήρως απελευθερωμένη αγορά ενέργειας.
- Την ενεργό διαχείριση των φορτίων (απόρριψη φορτίων), διαδικασία η οποία είναι σε θέση να βοηθά σημαντικά στην ευστάθεια του δικτύου αλλά και στην οικονομική λειτουργία του συστήματος.
- Από την πλευρά του χειριστή του Δικτύου Διανομής Μέσης Τάσης ή της Επιχείρησης Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, η δυνατότητα τοπικής κάλυψης του φορτίου από το Μικροδίκτυο προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα. Η δυνατότητα αναβολής επενδύσεων προς ενίσχυση του δικτύου και των κεντρικών σταθμών παραγωγής καθώς επίσης και η μεγαλύτερη ευελιξία στον έλεγχο του δικτύου, ιδιαίτερα κατά τον χειρισμό των συμφορήσεων και την επαναφορά του συστήματος μετά από σβέση, είναι μερικά από αυτά.

Κάποιες από τις μεταβλητές που επηρεάζουν τις δυνατότητες ενός μικροδικτύου, από οικονομικής και τεχνικής απόψεως, αποτελούν:

- Ο τύπος του φορτίου (οικιακό, βιομηχανικό, εμπορικό ή συνδυασμός τους).
- Ο αριθμός των καταναλωτών.
- Ο τύπος των πηγών διανεμημένης παραγωγής (φωτοβολταϊκές πηγές, αιολική ενέργεια, κυψέλη καυσίμου/fuel cell κτλ.).
- Το μέγεθος και ο αριθμός των μονάδων παραγωγής.

- Το επίπεδο της αξιοπιστίας του συστήματος. Ένας τρόπος μέτρησης του συγκεκριμένου μεγέθους μπορεί να είναι το ποσοστό ανεπάρκειας τροφοδοσίας των προβλεπόμενων φορτίων.

Το μικροδίκτυο είναι σχεδιασμένο για λειτουργία τόσο σε διασύνδεση με το δίκτυο όσο και σε απομονωμένη κατάσταση, σε έκτακτες περιπτώσεις (interconnected or emergency mode). Η δυνατότητα διασύνδεσης με το κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας σε παραλληλισμένη λειτουργία καθιστά δυνατή την ανταλλαγή ενέργειας. Δηλαδή, την παροχή πλεονάζουσας ενέργειας σ' αυτό ή την απορρόφηση ενέργειας όταν οι μονάδες του μικροδικτύου δεν επαρκούν να καλύψουν τη ζήτηση. Ακόμα, σε περίπτωση μόνιμα διασυνδεδεμένης λειτουργίας είναι δυνατή η αξιόπιστη τροφοδότηση του μικροδικτύου από τις δικές του μονάδες σε περίπτωση κατάρρευσης του κεντρικού δικτύου, βάσει της δυνατότητας λειτουργίας σε απομονωμένη κατάσταση. Σε περιπτώσεις παραλληλισμένης λειτουργίας με το κεντρικό δίκτυο, αυτό που πρωτίστως επιδιώκεται είναι να μην προκαλεί το μικροδίκτυο προβλήματα. Αυτό σημαίνει ότι η ποιότητα της τάσης πρέπει να ανταποκρίνεται στις προδιαγραφές του δικτύου και η απορροφόμενη ενέργεια να μην ξεπερνά τις απαιτήσεις ενός τυπικού καταναλωτή. Ακόμα περισσότερο, σε ένα δεύτερο επίπεδο, το μικροδίκτυο μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να παίζει υποστηρικτικό ρόλο ως προς το δίκτυο. Λειτουργία η οποία μπορεί για παράδειγμα να σημαίνει ότι το μικροδίκτυο θα απορροφά ή θα παρέχει ενεργό ή άεργο ισχύ όταν χρειάζεται για το κεντρικό δίκτυο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση απαιτείται η συντονισμένη λειτουργία και επικοινωνία μεταξύ των μονάδων ελέγχου του μικροδικτύου και του κεντρικού συστήματος.

1.2.2.2 Λειτουργικά οφέλη για το δίκτυο

Η παραγωγή μικροπηγών σε ένα μικροδίκτυο μπορεί να αλλάξει τις ροές ισχύος στο δίκτυο και κατ' επέκταση τις απώλειες του δικτύου. Αν μια μικρή μικροδικτυακή παραγωγή εγκατασταθεί κοντά σε ένα μεγάλο φορτίο τότε οι απώλειες δικτύου μπορούν να μειωθούν, τόσο η πραγματική όσο και η άεργος ισχύς μπορεί να παρασχεθεί στο φορτίο από τις παρακείμενες γεννήτριες του μικροδικτύου. Αντίθετα, αν μια μεγάλη μικροδικτυακή παραγωγή εγκατασταθεί μακριά από τα φορτία του δικτύου τότε είναι πιθανό να αυξηθούν οι απώλειες στο σύστημα διανομής. Γενικά, υπάρχει σχέση μεταξύ της μεγάλης ζήτησης σε ένα δίκτυο διανομής και τη χρήση αντίστοιχων εγκαταστάσεων παραγωγής. Υπάρχουν, εκτός των άλλων, και απώλειες ενεργού ισχύος στο δίκτυο μεταφοράς. Αυτές οι απώλειες εξαρτώνται από τα ρεύματα στους κλάδους του δικτύου που με τη σειρά τους εξαρτώνται από την τάση ενώ ο υπολογισμός αυτών των τάσεων είναι το αντικείμενο της ροής ισχύος.

Η μικροδικτυακή παραγωγή επιλέγει να λειτουργεί με ένα παράγοντα ισχύος για κάθε μονάδα για να ελαχιστοποιήσει τις ηλεκτρικές απώλειες και να αποφευχθούν οι όποιες δαπάνες για κατανάλωση άεργου ισχύος, ανεξάρτητα από τις ανάγκες του δικτύου διανομής. Αν το μικροδίκτυο παράγει ορισμένη ισχύ σύμφωνα με τον παράγοντα ισχύος της μονάδας, τα προφίλ τάσης είναι πολύ πιο ικανοποιητικά. Η

συνολική εγχεόμενη μιγαδική ισχύς στο ζυγό i , που συμβολίζεται με S_i δίνεται από τον τύπο: $S_i = P_i + j \cdot Q_i = V_i \cdot I_i^*$

Το άθροισμα της ισχύος όλων των κλάδων δίνει τις συνολικές απώλειες του συστήματος. Ο παρακάτω τύπος, όπου P_L, Q_L είναι οι ενεργές και άεργες απώλειες του δικτύου V_i, I_i οι τάσεις και τα ρεύματα στους κόμβους και n ο αριθμός των κλάδων, είναι αντιπροσωπευτικός:

$$P_L + j \cdot Q_L = \sum_1^n V_i \cdot I_i^* = V_{bus}^T \cdot I_{bus}^*$$

1.2.2.3 Μικροδίκτυο και περιβάλλον

Γενικά η λειτουργία των μικροδικτύων συμβάλει στη μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων. Αυτό γιατί οι περισσότερες από τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται, όπως είναι οι τεχνολογίες συμπαραγωγής και η ΑΠΕ, είναι από τη φύση τους λιγότερο ρυπογόνες. Παράλληλα με τα μικροδίκτυα, όπως έχει αναφερθεί μειώνονται οι απώλειες μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας αφού η παραγωγή γίνεται κοντά στο σημείο κατανάλωσης. Έτσι για την κάλυψη του ίδιου φορτίου απαιτείται η παραγωγή μικρότερης ποσότητας ενέργειας και κατά συνέπεια έχουμε μειωμένες εκπομπές ρύπων.

Βέβαια η δημιουργία μικροδικτύων πρέπει να αναφέρουμε ότι δημιουργεί τοπικά ένα είδος ρύπανσης, ειδικά αν δεν έχει γίνει σωστός σχεδιασμός των εγκαταστάσεων παραγωγής. Αυτό γιατί οι γεννήτριες μπορούν να προκαλούν ηχορύπανση αν δεν βρίσκονται σε χώρο με καλή μόνωση καθώς επίσης αν δεν είναι τοποθετημένες σε μη εμφανή μέρη το αισθητικό αποτέλεσμα δεν θα είναι ευχάριστο. Παράλληλα η παραγωγή δίπλα στο φορτίο, για τα αστικά κέντρα συνεπάγεται επιπλέον ρύπανση σε σχέση με τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής που βρίσκονται συνήθως σε απομακρυσμένες περιοχές παρόλο που είναι περισσότερο ρυπογόνοι. Συνολικά όμως, αν γίνει σωστός σχεδιασμός, τα οφέλη από ένα μικροδίκτυο είναι πολλοί σημαντικά και στον περιβαλλοντικό τομέα.

1.3 Ηλεκτρικά Οχήματα και Δίκτυο

1.3.1 Συσσωρευτές

Αυτονομία και προβλήματα

Το μεγαλύτερο πρόβλημα που αντιμετωπίζει η αγορά ηλεκτρικών αυτοκινήτων την παρούσα εποχή είναι οι περιορισμοί που δίνονται από τους συσσωρευτές, δηλαδή τις μπαταρίες. Η απουσία μιας τεχνολογίας μπαταρίας που θα καθιστά το ηλεκτρικό αυτοκίνητο μπαταρίας συναγωνιστή του συμβατικού,

δημιουργεί προβλήματα και αποτρέπει την εμπορευματοποίηση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου.

Πρώτο και κυριότερο πρόβλημα είναι η αυτονομία που μπορεί να παρέχει μία μπαταρία σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα. Λόγω της κατά πολύ μεγαλύτερης πυκνότητας ενέργειας στα συμβατικά καύσιμα όπως βενζίνη και πετρέλαιο, η μπαταρία προσφέρει πολύ μικρότερη αυτονομία σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα με αποτέλεσμα η επιλογή των ηλεκτρικών αυτοκινήτων να μην είναι ελκυστική από τους καταναλωτές. Για παράδειγμα μία τυπική τιμή πυκνότητας ενέργειας για την βενζίνη είναι περίπου 11500-12000 Wh/kg την στιγμή που οι πιο εξελιγμένες μπαταρίες όπως οι μπαταρίες νατρίου-θείου (NaS) έχουν πυκνότητα ενέργειας ίση με 80Wh/kg περίπου και οι πιο εμπορικές αυτή την στιγμή οι μολύβδου-οξέος, έχουν πυκνότητα ενέργειας περίπου 30Wh/kg. Εδώ να σημειωθεί πως οι μολύβδου οξέος λόγω της επικινδυνότητας του στοιχείου του μολύβδου και των διαφόρων αερίων που εκλύει αναμένεται να εκλείψουν στο προσεχές μέλλον αν και σε αρκετά χαρακτηριστικά υπερτερούν σε σχέση με τους περισσότερους τύπους μπαταριών [13]. Καταλαβαίνουμε λοιπόν πως μόνο από την πυκνότητα ενέργειας δημιουργείται χαοτικό πρόβλημα αυτονομίας σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα, καθώς τα συμβατικά καύσιμα έχουν πυκνότητα ενέργειας μεγαλύτερη ως και 150 φορές από μία τεχνολογικά εξελιγμένη μπαταρία.

Τα προβλήματα των συσσωρευτών σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα δεν σταματούν εδώ καθώς για την τροφοδότηση ενός ρεζερβουάρ αυτοκινήτου χρειάζονται λίγα λεπτά ενώ για την φόρτιση μιας μπαταρίας σημαντικού μεγέθους, για παράδειγμα 10kW που είναι ένα τυπικό μέγεθος μπαταρίας ηλεκτρικού αυτοκινήτου, χρειάζονται περισσότερα από 1000A ρεύμα σε παροχή τάσης 220V, για να φορτίσει σε περίπου 2,5 λεπτά, κάτι που όπως είναι κατανοητό δεν είναι εφικτό καθώς 1000A σε τάση 220V δεν γίνεται να δώσει ο οποιοσδήποτε ρευματοδότης σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου. Επιπροσθέτως τα όρια φόρτισης-εκφόρτισης της μπαταρίας που αφορούν την πλήρη φόρτιση ή την πλήρη εκφόρτιση δημιουργούν επιπροσθέτως χρονικές καθυστερήσεις στην φόρτιση (ή μειωμένη αυτονομία στην περίπτωση της εκφόρτισης). Για λόγους αύξησης του προσδοκώμενου ορίου ζωής της μπαταρίας, το στάδιο κατά το οποίο η μπαταρία προσεγγίζει το 100% της πλήρους φόρτισης γίνεται αργά με διακριτά βήματα μέσω κατάλληλου φορτιστή, ενώ αντιστοίχως εκφόρτιση πέρα από ένα ελάχιστο όριο της μπαταρίας μειώνει τον χρόνο ζωής της. Αυτό σημαίνει όμως πως η αυτονομία μειώνεται περαιτέρω καθώς αν λάβουμε αυστηρά υπόψη τον περιορισμό του κάτω ορίου εκφόρτισης, πέραν του οποίου αποφεύγουμε εκφόρτιση της μπαταρίας, τότε η υπολογιζόμενη αυτονομία που μπορεί να παρέχει η μπαταρία μειώνεται σημαντικά αναλόγως τον τύπο της μπαταρίας. Τέλος πρέπει να αναφερθεί πως κατά την διάρκεια ζωής του αυτοκινήτου θα χρειαστεί να γίνει τουλάχιστον μία αλλαγή μπαταριών με ότι κόστος αυτό συνεπάγεται.

Ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά μπαταριών προοριζόμενων για κίνηση

Στην συνέχεια γίνεται μία αναλυτικότερη αναφορά των χαρακτηριστικών των μπαταριών που ενδιαφέρουν στην περίπτωση που οι μπαταρίες προορίζονται για κίνηση οχημάτων. Πριν αναφερθούν όμως τα χαρακτηριστικά θα ορίσουμε τι είναι ο ρυθμός εκφόρτισης και ο βαθμός εκφόρτισης για καλύτερη κατανόηση των χαρακτηριστικών που θα αναφερθούν :

- Ρυθμός εκφόρτισης (C/x): το ρεύμα με το οποίο θα εκφορτίζονταν τελείως ένας πλήρως φορτισμένος συσσωρευτής σε x ώρες. Για παράδειγμα, ένας συσσωρευτής χωρητικότητας 1000Ah έχει ρυθμό C/4 τιμής 250 A.
- Βαθμός εκφόρτισης (DOD): το ποσοστό (επί των αμπερωρίων πλήρους φόρτισης) που έχει ήδη καταναλωθεί.

Παρακάτω ακολουθούν τα χαρακτηριστικά των μπαταριών που μας ενδιαφέρουν για την κίνηση.

1. Πυκνότητα ενέργειας: η ενέργεια (σε Wh) που ο συσσωρευτής μπορεί να αποθηκεύσει ανά κιλό μάζας του, για καθορισμένο ρυθμό εκφόρτισης. Στην πραγματικότητα βέβαια, λόγω απαραίτητων κατασκευαστικών υλικών και εξαρτημάτων που υπάρχουν στους συσσωρευτές, αλλά δεν λαμβάνουν μέρος στην αντίδραση παραγωγής ενέργειας, (όπως για παράδειγμα ακροδέκτες, μονώσεις, καλώδια και άλλα) και τα οποία όμως αυξάνουν το βάρος του συσσωρευτή, η πραγματική πυκνότητα ενέργειας γίνεται πολύ μικρότερη από την ιδανική. Για παράδειγμα, στους συσσωρευτές μολύβδου - οξέος η ιδανική τιμή είναι 171Wh/kg κι όμως η πραγματική είναι περίπου 30Wh/kg .
2. Πυκνότητα Ισχύος: ο μέγιστος αριθμός watts ανά κιλό μάζας του συσσωρευτή, που μπορεί αυτός να αποδώσει σε καθορισμένη κατάσταση φόρτισης, συνήθως με 80% βάθος εκφόρτισης.
3. Κύκλος λειτουργίας: ο αριθμός των δυνατών επαναφορτίσεων του συσσωρευτή. Λόγω μεγάλης διάρκειας ζωής του ηλεκτρικού οχήματος, ιδανικά θα θέλαμε να έχει και ο συσσωρευτής την ίδια διάρκεια ζωής κάτι εξαιρετικά δύσκολο όμως. Θεωρούμε, σα σημείο εκκίνησης, ότι το ηλεκτρικό αυτοκίνητο μπορεί να “ζήσει” για 250000km. Θεωρώντας επίσης αυτονομία 100km (δηλαδή τόση απόσταση μπορεί να διανύσει το όχημα με μια πλήρη φόρτιση), τότε οι συσσωρευτές πρέπει να έχουν 2500 κύκλους λειτουργίας. Αν είναι να κάνει 20000km το χρόνο το όχημα, τότε η ζωή του συσσωρευτή είναι περίπου 6-7 χρόνια σε περίπτωση που είναι τύπου μολύβδου - οξέος και 10 - 12 χρόνια σε περίπτωση που είναι τύπου καλίου - καδμίου. Συνήθως, όμως ένας συσσωρευτής θα εκφορτιστεί πλήρως μεταξύ δύο φορτίσεων. Οπότε το ερώτημα που δημιουργείται είναι αν ένας συσσωρευτής 1000 κύκλων πλήρους φόρτισης - εκφόρτισης μπορεί να αντέξει 2000 κύκλους με 50% φόρτιση - εκφόρτιση. Η απάντηση προφανώς δεν είναι απλή καθώς εξαρτάται από την τεχνολογία της μπαταρίας αλλά και από το αν η εκφόρτιση θα είναι 50% ή παραπάνω κάθε φορά. Δηλαδή αν θα είναι κυμαινόμενη εκφόρτιση από περίπτωση σε περίπτωση. Όπως και να έχει το θέμα των κύκλων λειτουργίας της μπαταρίας είναι σημαντικό καθώς από αυτό εξαρτάται και η εμπορική ελκυστικότητα που θα έχει ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο. Για εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία εφαρμόζονται

τεχνολογίες μπαταριών όπως η λιθίου-νικελίου-κοβαλτίου-αλουμινίου (NCA), λιθίου-νικελίου-μαγγανίου-κοβαλτίου (NMC), λιθίου-μαγγανίου σπινελίου (ZTO), τιτανικού λιθίου (LTO), και λιθίου-φωσφορικού σιδήρου (LFP) [10][11][12].

1.3.2 Vehicle to Grid Technologies

Η βασική ιδέα του V2G είναι, πως εφόσον τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα περιέχουν μπαταρίες που χρειάζονται ενέργεια για να φορτίσουν, αντιστοίχως θα μπορούσαν κάτω υπό κάποιες προϋποθέσεις να προσφέρουν και ενέργεια στο δίκτυο εξυπηρετώντας έτσι συγκεκριμένες ανάγκες του. Εδώ να διευκρινίσουμε πως θα μιλήσουμε κυρίως για ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας, καθώς μόνον αυτά έχουν ικανοποιητική χωρητικότητα ώστε να είναι σε θέση να προσφέρουν ενέργεια στο δίκτυο. Εν αντιθέσει τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα, που όπως προαναφέραμε έχουν συνήθως μικρές μπαταρίες με μικρή χωρητικότητα, δεν είναι σε θέση να προσφέρουν ένα ικανοποιητικό ποσό ενέργειας στο δίκτυο. Επομένως όπως λέει και το όνομα του concept το προς εξέταση ζήτημα είναι έγχυση ισχύος από το όχημα στο δίκτυο. Αυτή η λειτουργία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο για την αγορά ενέργειας, αλλά θα μπορούσε επίσης να επιτρέψει στα οχήματα να λειτουργούν ως μονάδες εκκίνησης μετά από καθολική συσκότιση (black-out), σε αποκοπή υψηλής ισχύος (peak power) κ.ο.κ. (Kempton & Tomic, 2005 - Larsen, Chandrashekhara, & Östergård, 2008) [10].

Για να πραγματοποιηθεί μία εγκατάσταση που θα εκμεταλλεύεται τα πλεονεκτήματα του V2G χρειάζονται κάποιες ειδικές διατάξεις που θα εξασφαλίζουν ότι η ανταλλαγή ισχύος μεταξύ ηλεκτρικών οχημάτων και δικτύου θα είναι ορισμένη από προϋποθέσεις και ελεγχόμενη κάθε στιγμή. Έτσι παρουσιάζεται η αναγκαιότητα επικοινωνίας του διαχειριστή του δικτύου με τα ηλεκτρικά οχήματα όταν αυτά θα είναι συνδεδεμένα με το δίκτυο. Σε αυτό το σημείο έρχεται ο ρόλος του Aggregator. Το πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί με την λειτουργία των EVs ως πάροχοι ενέργειας είναι όπως προαναφέραμε πως η χωρητικότητα των μπαταριών τους είναι μικρή και επομένως ικανοποιητική ισχύς μπορεί να προκύψει μόνο από συνδυασμό ενός ικανοποιητικού αριθμού οχημάτων. Το πρόβλημα της οργάνωσης αυτών των οχημάτων μπορεί να επιλυθεί μέσω του Aggregator και την αντίστοιχη οργάνωση του προγράμματος V2G. Ο ρόλος του είναι στο να αποτελεί το μέσο σύνδεσης μεταξύ του TSO και των κάτοχων οχημάτων. Ιδανικά η επικοινωνία μεταξύ των χρηστών των ηλεκτρικών αυτοκινήτων και του δικτύου (μέσω του Aggregator) θα μπορούσε να γίνει μέσω μιας εξατομικευμένης ιστοσελίδας, όπου οι ιδιοκτήτες θα καταγράφουν την χρονική στιγμή που εισέρχονται στο δίκτυο, σε ποια σημεία και για πόσο χρονικό διάστημα το αυτοκίνητό τους θα είναι συνδεδεμένο και σε τι κατάσταση (State Of Charge - SOC) θα θέλουν την μπαταρία μόλις εξέλθουν από αυτό. Οι πραγματικοί χρόνοι που το αυτοκίνητο είναι στην πρίζα θα είναι επίσης καταχωρημένοι για κάθε όχημα, το οποίο σε συνδυασμό με την προβλεπόμενο προφίλ μπορεί να κάνει την πρόβλεψη της διαθέσιμης χωρητικότητας πιο ακριβή.

2.Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας

2.1 Εισαγωγή

Ο συμβατικός τρόπος κάλυψης των ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων ενός καταναλωτή (ή μιας ομάδας καταναλωτών) είναι η αγορά ηλεκτρισμού από το εθνικό δίκτυο και η καύση κάποιου καυσίμου (σε λέβητα, κλίβανο, κ.λπ.) για την παραγωγή θερμότητας. Όμως, η ολική κατανάλωση καυσίμων μειώνεται σημαντικά εάν εφαρμοσθεί η Συμπαραγωγή (Cogeneration ή Combined Heat and Power, CHP).

Ορισμός: Συμπαραγωγή είναι η συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρικής (ή μηχανικής) και θερμικής ενέργειας από την ίδια αρχική πηγή ενέργειας. Η θερμική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για θέρμανση όσο και για ψύξη ή κλιματισμό. Η ψύξη ή ο κλιματισμός επιτυγχάνονται με μηχανές απορρόφησης, που λειτουργούν με ατμό ή θερμό νερό. Κατά τη λειτουργία ενός συμβατικού θερμοηλεκτρικού σταθμού, μεγάλα ποσά θερμότητας αποβάλλονται στο περιβάλλον είτε μέσω των ψυκτικών κυκλωμάτων (συμπυκνωμάτων ατμού, πύργων ψύξης, ψυγείων νερού κινητήρων Diesel, κ.λπ.) είτε μέσω των καυσαερίων (αεριοστροβίλων, κινητήρων Diesel, κινητήρων Otto, κ.λπ.). Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της θερμότητας μπορεί να ανακτηθεί και να χρησιμοποιηθεί ωφέλιμα. Έτσι, ενώ οι συμβατικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής έχουν βαθμό απόδοσης 30-45%, ο βαθμός απόδοσης των συστημάτων συμπαραγωγής φθάνει το 80-85. Η εφαρμογή της συμπαραγωγής διακρίνεται κυρίως σε τέσσερις βασικούς τομείς:

- Στο σύστημα ηλεκτρισμού της χώρας.
- Στο βιομηχανικό τομέα.
- Στον εμπορικό-τριτογενή τομέα.
- Στον αγροτικό τομέα.

Οι συμβατικές πηγές ενέργειας, όπως στο Σχήμα 2.1, που χρησιμοποιούν ως πηγή ενέργειας τη χημική ενέργεια των υδρογονανθράκων ή την ενέργεια σχάσης κάποιου πυρηνικού καυσίμου εμφανίζουν σημαντικές απώλειες δεδομένου ότι περίπου τα 2/3 της ενέργειας του χρησιμοποιούμενου καυσίμου χάνονται υπό τη μορφή χλιαρού ύδατος σε πύργους ψύξης, ποταμούς ή θάλασσες. Συνεπώς, μόνο το 1/3 της ενέργειας του καυσίμου μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια.



Σχήμα 2.1 Τυπικό συμβατικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

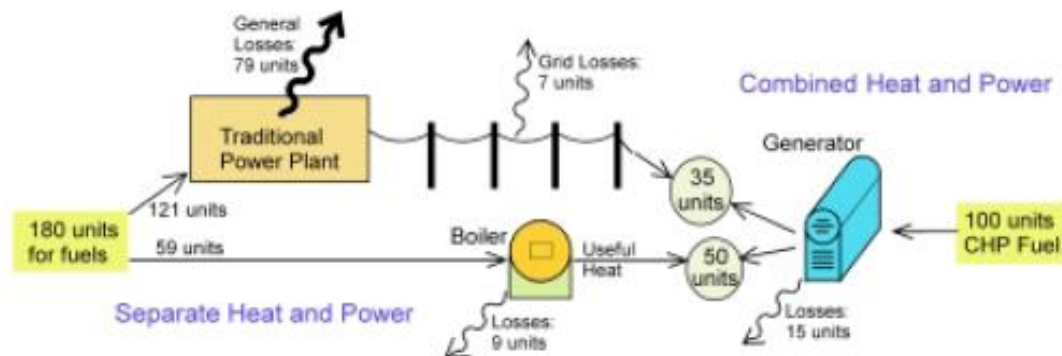
Με την αξιοποίηση της θερμικής ενέργειας, η απόδοση μιας εγκατάστασης συμπαραγωγής μπορεί να φθάσει ή και να ξεπεράσει το 90%, Σχήμα 2.2. Ως εκ τούτου η συμπαραγωγή προσφέρει εξοικονόμηση ενέργειας που κυμαίνεται μεταξύ 15 έως 40%, σε σύγκριση με τη διάθεση ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας από συμβατικούς ηλεκτροπαραγωγικούς σταθμούς και λέβητες, αντίστοιχα. Επομένως, η μετατροπή του σχεδιασμού και της λειτουργίας ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής σε σταθμό συμπαραγωγής βελτιώνει τη χρήση της εκλυόμενης ενέργειας του καυσίμου.

Ως πηγή ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε καύσιμο - ορυκτό ή βιομάζα. Το καύσιμο όμως που σήμερα κυριαρχεί, για οικονομικούς αλλά και περιβαλλοντικούς λόγους, είναι το φυσικό αέριο.



Σχήμα 2.2 Τυπικό σύστημα Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας

Το Σχήμα 2.3 συγκρίνει την απόδοση ενός συστήματος συμπαραγωγής με την παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας, από ξεχωριστές μονάδες. Είναι χαρακτηριστικό ότι για να παραχθεί η ίδια «ποσότητα» ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, χρειάζονται 100 μονάδες καυσίμου για την συμπαραγωγή, ενώ η παραγωγή από τις ανεξάρτητες μονάδες απαιτεί 180 μονάδες καυσίμου.



Σχήμα 2.3 Σύγκριση συστήματος CHP και ξεχωριστών μονάδων παραγωγής

2.2 Σύγχρονες τεχνικές συμπαραγωγής

Τα περισσότερα συστήματα συμπαραγωγής μπορούν να χαρακτηριστούν ως συστήματα «κορυφής» ή ως συστήματα «βάσης». Στα συστήματα κορυφής, ρευστό υψηλής θερμοκρασίας χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρισμού, ενώ στις θερμικές διεργασίες χρησιμοποιείται η αποβαλλόμενη θερμότητα. Στα συστήματα βάσης, παράγεται η θερμική ενέργεια υψηλής θερμοκρασίας και στη συνέχεια τα θερμά αέρια διοχετεύονται σε λέβητα ανακομιδής θερμότητας σε αμοστρόβιλους για την κίνηση της στροβιλογεννήτριας ή σε αεριοστρόβιλο που κινεί τη γεννήτρια χωρίς να παρεμβάλεται λέβητας [5].

Ενδεικτικά αναφέρουμε τα συστήματα συμπαραγωγής:

- Συστήματα αμοστρόβιλου
 - Συστήματα συμπαραγωγής με αμοστρόβιλο αντίθλιψης
 - Συστήματα συμπαραγωγής με αμοστρόβιλο απομάστευσης
 - Συστήματα συμπαραγωγής με αμοστρόβιλο σε κύκλο βάσης
- Συστήματα αεριοστρόβιλου
 - Συστήματα αεριοστρόβιλου ανοικτού κύκλου
 - Συστήματα αεριοστρόβιλου κλειστού κύκλου.
- Συστήματα με παλινδρομική μηχανή εσωτερικής καύσης (κινητήρες Diesel ή βενζινοκινητήρες με κατάλληλη μετατροπή)
- Συστήματα συνδυασμένου κύκλου
- Κύκλοι βάσης Rankine με οργανικά ρευστά
- Τυποποιημένες μονάδες συμπαραγωγής (ηλ. ισχύς 10-1000kW)
- Κυψέλες καυσίμου (fuel cells)
- Μηχανές Stirling

2.3 Πλεονεκτήματα και επιπτώσεις της συμπαραγωγής

2.3.1 Επιπτώσεις στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

Οι μονάδες συμπαραγωγής έχουν μικρότερο μέγεθος και βραχύτερο χρόνο εγκατάστασης από τους μεγάλους κεντρικούς σταθμούς, προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία και προσαρμοστικότητα σε απρόβλεπτες μελλοντικές μεταβολές της ζήτησης ηλεκτρισμού. Ο μικρός χρόνος εγκατάστασης των συστημάτων συμπαραγωγής συντελεί επίσης σε περιορισμό του χρηματοοικονομικού κόστους που συμβάλλει με τη σειρά του στη μείωση του μοναδιαίου κόστους παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας. Γι' αυτό και βρίσκουν εφαρμογή με χρήση της διεσπαρμένης παραγωγής και λειτουργούν παράλληλα με τους κεντρικούς σταθμούς, αυξάνοντας έτσι την αξιοπιστία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα ευστάθειας στο δίκτυο, εάν δεν πληρούν ορισμένες προϋποθέσεις. Από την άλλη πλευρά, η εξάπλωση της συμπαραγωγής θα μπορούσε να έχει αρνητικές οικονομικές επιπτώσεις στο εθνικό σύστημα ηλεκτρισμού, εάν αυτό έχει ικανότητα παραγωγής μεγαλύτερη από τη ζήτηση, ή εάν ο ρυθμός αύξησης της ικανότητας με κατασκευή νέων σταθμών είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό αύξησης της ζήτησης και για διάφορους λόγους δεν μπορεί να επιβραδυνθεί. Τότε, το κόστος κεφαλαίου μοιράζεται σε μικρότερη ποσότητα παραγόμενου ηλεκτρισμού, με αποτέλεσμα την αύξηση του μοναδιαίου κόστους.

2.3.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Λόγω της μείωσης κατανάλωσης καυσίμου, η συμπαραγωγή συντελεί και στη μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων, που συνεπάγεται και έμμεση μείωση ρύπων από τον υπόλοιπο κύκλο καυσίμου: εξόρυξη, επεξεργασία, μεταφορά, αποθήκευση. Η ποσοτικοποίηση του κόστους αυτού είναι δύσκολη και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες: τεχνολογία, καύσιμο, τοπικές συνθήκες, κλπ η διαφορά των εκπομπών για τα συστήματα συμπαραγωγής και τις συμβατικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής. Η επίδραση της συμπαραγωγής από πλευράς ρύπων εκφράζεται με τη διαφορά εκπομπών, που ορίζεται με τη σχέση:

$$\Delta MX = MX_{\Sigma\Sigma} - MX_H - MX_{\Theta}$$

Όπου, ΔMX η διαφορά εκπομπών του ρύπου X,
 $MX_{\Sigma\Sigma}$ η εκπομπή ρύπου X του συστήματος συμπαραγωγής,
 MX_H η εκπομπή ρύπου X του συστήματος παραγωγής ηλεκτρισμού, το οποίο αντικαθίσταται από το σύστημα συμπαραγωγής,
 MX_{Θ} η εκπομπή ρύπου X του συστήματος παραγωγής θερμότητας, το οποίο αντικαθίσταται από το σύστημα συμπαραγωγής (π.χ. ατμολέβητας).

Επίσης, όταν καύσιμο σε συστήματα συμπαραγωγής είναι το φυσικό αέριο, οι εκπομπές οξειδίων του θείου και στερεών σωματιδίων, που παρουσιάζονται από την καύση άνθρακα ή υγρών καυσίμων σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, σχεδόν εξαφανίζονται. Αξιοσημείωτη είναι επίσης η μεγάλη μείωση εκπομπών NOX που επιτυγχάνεται με κυψέλες καυσίμου[8].

2.3.3 Επιπτώσεις στα καύσιμα

Όλα τα συστήματα συμπαραγωγής εξοικονομούν καύσιμο διότι έχουν υψηλότερο βαθμό απόδοσης από τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας. Ένα σύστημα συμπαραγωγής ατμοστροβίλου μειώνει την κατανάλωση καυσίμου κατά 15% περίπου (σε σύγκριση με τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρισμού με μονάδα ατμοστροβίλου και θερμότητας με λέβητα), ένα σύστημα συμπαραγωγής με κινητήρα Diesel τη μειώνει κατά 25% (σε σύγκριση με τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρισμού με ντιζελοκίνητη ηλεκτρογεννήτρια και θερμότητας με λέβητα), κ.λπ. Όμως, το εάν ένα σύστημα συμπαραγωγής εξοικονομεί ακριβό, εισαγόμενο και μη ανανεώσιμο καύσιμο, π.χ. πετρέλαιο, εξαρτάται από το καύσιμο που το ίδιο το σύστημα συμπαραγωγής χρησιμοποιεί, και τα καύσιμα που χρησιμοποιούν τα συστήματα χωριστής παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, τα οποία θα αντικατασταθούν από το σύστημα συμπαραγωγής. Μια πρόσθετη βελτίωση του βαθμού εκμετάλλευσης των καυσίμων οφείλεται στο ότι τα συστήματα συμπαραγωγής βρίσκονται συνήθως πιο κοντά στους καταναλωτές απ' ότι οι κεντρικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής. Έτσι, περιορίζονται οι απώλειες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, που είναι της τάξεως του 8-10%.

Η επιλογή των συστημάτων συμπαραγωγής και των καυσίμων, που αυτά χρησιμοποιούν, είναι σκόπιμο να εναρμονίζεται με μια γενικότερη εθνική ενεργειακή

πολιτική (π.χ., μείωση του εισαγόμενου πετρελαίου, αύξηση της συμβολής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ορθολογική χρήση του φυσικού αερίου, κ.λπ.).

2.4 Η συμπαραγωγή στην Ελλάδα

Υπάρχουν τέσσερις κύριοι τομείς εφαρμογής της παραγωγής:

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

β. Βιομηχανικός τομέας. Σημαντικό δυναμικό παρουσιάζουν οι κλάδοι τροφίμων και πο- τών, οι κλωστοϋφαντουργίες, οι βιομηχανίες χάρτου, οι χημικές βιομηχανίες, τα διυλιστή- ρια, τα εργοστάσια τσιμέντου, οι βασικές μεταλλουργικές βιομηχανίες.

γ. Εμπορικός - κτιριακός τομέας. Διακρίνεται σε τρεις κύριους υποτομείς: ξενοδοχεία - νο- σοκομεία, μεγάλα συγκροτήματα κατοικιών και κτίρια γραφείων. Ο καθένας τους χαρα- κτηρίζεται από ιδιαίτερη μορφή της καμπύλης φορτίου. Άλλου είδους κτίρια (πανεπιστή- μια, εμπορικά κέντρα κ.λπ.) έχουν καμπύλες φορτίου, που προκύπτουν με συνδυασμό των τριών αυτών υποτομέων.

δ. Αγροτικός τομέας. Τα υπολείμματα αγροτικών διεργασιών χρησιμοποιούνται ως καύσι- μο και η ανακτώμενη θερμότητα μπορεί να διοχετευτεί σε μία σειρά από γεωργικές διαδι- κασίες, όπως ξήρανση γεωργικών προϊόντων, θέρμανση αγροτικών οικημάτων, θερμο- κηπίων, κ.λπ.

Τα πεδία στα οποία έχουν ήδη εγκατασταθεί και λειτουργούν με επιτυχία συστήματα συμπαραγωγής διεθνώς είναι κυρίως νοσοκομεία, αθλητικά συγκροτήματα, ξενοδοχεία, εκ- παιδευτικά συγκροτήματα, μεγάλα εμπορικά κέντρα, και βιομηχανίες χάρτου, ξύλου, υφα- ντουργίας, τροφίμων, πλαστικών, πετροχημικών. Στην Ελλάδα έχει αρχίσει ήδη σήμερα να κάνει την εμφάνιση του μικρός αριθμός μονάδων βιομηχανικής συμπαραγωγής ο οποίος αναμένεται να παρουσιάσει αύξηση με ταχύ ρυθμό

2.4.1 Συμπαραγωγή και φυσικό αέριο

Το φυσικό αέριο είναι η νέα πηγή ενέργειας, που έφτασε πρόσφατα στην Ελλάδα, μέσω αγωγών από τη Ρωσία αλλά και σε υγροποιημένη μορφή από την Αλγερία. Αποτελεί μια μοναδική ευκαιρία για διάφορους τομείς της οικονομίας, να μειώσουν το ενεργειακό τους κόστος, αλλά και να βελτιώσουν τις εκπομπές αερίων ρύπων προς το περιβάλλον.

Η άφιξη του φυσικού αερίου στην Ελλάδα και οι δυνατότητες που προσφέρει η τεχνολογία της συμπαραγωγής οδήγησαν στη δραστηριοποίηση ενός σημαντικού αριθμού εταιρειών ή οργανισμών, με στόχους την ενημέρωση του επιχειρηματικού κόσμου, την παροχή συμβουλευτικών υπηρεσιών για τη μελέτη και κατασκευή

εγκαταστάσεων συμπαραγωγής, τη συντήρηση, λειτουργία και εκμετάλλευση εγκαταστάσεων συμπαραγωγής, κλπ.

Η αγορά της συμπαραγωγής μέχρι και σήμερα, παραμένει δύσπιστη και σε κατάσταση αναμονής, για τους εξής λόγους:

- Δυσκολία στον προσδιορισμό των βασικών μεγεθών για οικονομικοτεχνικές αναλύσεις στον ενεργειακό τομέα.
- Παντελής έλλειψη τιμολογιακής πολιτικής για συμπαραγωγή στον τριτογενή τομέα.
- Έλλειψη ανταγωνιστικής τιμολογιακής πολιτικής για συμπαραγωγή στον βιομηχανικό τομέα. Η υπάρχουσα τιμολόγηση Φ.Α. για CHP και του τρόπου υπολογισμού της τιμής του, καλύφθηκε από τη ΔΕΠΑ τον Οκτώβριο του 1999, αλλά λόγω της αβεβαιότητας και της καθυστέρησης οδήγησε σημαντικά ενεργειακά έργα ΣΗΘ, που επιλέχθηκαν για επιδότηση από το ΕΠΕ του Β' ΚΠΣ, στην απένταξη.
- Δυσκολίες για την περαιτέρω ανάπτυξη του δικτύου διανομής φυσικού αερίου.
- Αδυναμία της ΔΕΠΑ για την τήρηση του προβλεπόμενου χρονοδιαγράμματος για τη σύνδεση μεγάλων βιομηχανιών.
- Έλλειψη εμπειρίας στην ενεργειακή διαχείριση και αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων.

2.4.2 Συμπαραγωγή και βιομάζα

Μία σημαντική πηγή ενέργειας, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας είναι η βιομάζα, που μπορεί να προέλθει από:

- Αστικά λύματα και απόβλητα
- Υπολείμματα γεωργικής και δασικής προέλευσης και
- Ενεργειακές καλλιέργειες

Η συγκέντρωση του πληθυσμού, τις τελευταίες δεκαετίες, στα μεγάλα αστικά κέντρα και η διάθεση των αστικών λυμάτων αλλά και των απορριμμάτων σε ολόκληρη σχεδόν τη χώρα, έγινε χωρίς προγραμματισμό και με ανεπαρκή υποδομή. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα τη συνεχή μόλυνση τόσο του αέριου όσο και του υδάτινου περιβάλλοντος. Τέτοιου είδους προβλήματα αντιμετωπίζονται στις σύγχρονες κοινωνίες πλέον, με την υγειονομική ταφή των απορριμμάτων και την παραγωγή ενέργειας από το βιοαέριο που εκλύουν.

Τα απογεγραμμένα δασικά και γεωργικά υπολείμματα της χώρας ανέρχονται σε 10.000.000 τόνους το χρόνο περίπου. Εάν το 25% εξ αυτών μπορεί να αξιοποιηθεί σε συστήματα συμπαραγωγής, τότε δημιουργείται ένα σημαντικό δυναμικό συμπαραγωγής άνω των 400 MWe. Επειδή τα γεωργικά και δασικά υπολείμματα της χώρας είναι αποκεντρωμένα και διάσπαρτα σε όλη την χώρα, η εγκατάσταση μονάδων CHP μικρής ισχύος, αποτελεί τον ιδανικό τρόπο αντιμετώπισης των αναγκών τηλεθέρμανσης και τηλεψύξης σε όλη τη χώρα, προωθώντας ένα τοπικό πλαίσιο ανάπτυξης, αλλά και την περιφερειακότητα.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η βιομάζα, από την ενεργειακή γεωργία ή των δασικών υπολειμμάτων, μπορεί να αξιοποιηθεί όχι μόνο σε αυτόνομους σταθμούς συμπαραγωγής, αλλά και στους υφιστάμενους λιγνιτικούς σταθμούς της ΔΕΗ.

Δυστυχώς, μέχρι σήμερα ασήμαντο ή ελάχιστο από αυτό το δυναμικό χρησιμοποιείται σε συστήματα Συμπαραγωγής με Βιομάζα και οι βασικές αιτίες είναι οι εξής:

- Οι φορείς της Τοπικής Αυτοδιοίκησης που είναι αποκεντρωμένοι, αγνοούν τις δυνατότητες και τα πλεονεκτήματα αξιοποίησης της βιομάζας, την οποία διαθέτουν ή μπορεί να παράγουν σε αφθονία.
- Δεν υπήρξε, μέχρι πρόσφατα, το βασικό νομικό πλαίσιο.
- Δεν υπήρξαν κίνητρα σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο.
- Δεν υπήρξε η απαραίτητη και σε βάθος ενημέρωση, από πλευράς του Δημοσίου, όλων των ενδιαφερομένων.
- Δεν κατασκευάστηκαν επιδεικτικά έργα στη χώρα, τα οποία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για εκπαίδευση τεχνικών και ενημέρωση των ΟΤΑ, των στελεχών της Βιομηχανίας, των Γεωργικών Συνεταιρισμών, κτλ.
- Δεν υπάρχει η αναγκαία κατάρτιση του τεχνικού κόσμου σε θέματα συμπαραγωγής με βιομάζα.

Η επιλογή μίας μονάδας συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, συμπεριλαμβανόμενης της θερμοδυναμικής και οικονομικής ανάλυσης, είναι ένα δύσκολο και περίπλοκο πρόβλημα. Γενικά, η τεχνολογία που υπεισέρχεται στην κατασκευή και λειτουργία μιας εγκατάστασης έχει μελετηθεί εκτενώς. Μελέτες έχουν δείξει ότι δε φαίνεται να υπάρχουν τεχνικές δυσκολίες στην κατασκευή δικτύων διανομής θέρμανσης ή στην ανάπτυξη κατάλληλης εγκατάστασης συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας. Αυτό ισχύει και για το βιομηχανικό τομέα.

Επιπρόσθετα, δεν υπάρχει γενικά καμία αμφιβολία ότι, η αντικατάσταση μιας υπάρχουσας εγκατάστασης (για την ξεχωριστή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας) από μία μονάδα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας οδηγεί σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Η εκτίμηση μιας τέτοιας εξοικονόμησης είναι ένα σχετικά σαφές θέμα και ακολουθεί συγκεκριμένη ανάλυση θερμοδυναμικών κύκλων.

Η επιλογή της κατάλληλης εγκατάστασης από την άποψη της θερμοδυναμικής μπορεί να βελτιώσει την οικονομική κατάσταση για μία μονάδα συμπαραγωγής, αλλά ακόμη και με την καλύτερη δυνατή επιλογή η συνολική οικονομική κατάσταση δύναται να μην είναι αρκετά ελκυστική για να επιτρέψει τη διάταξη να προχωρήσει.

2.5 Ενεργειακή συμπεριφορά συστημάτων συμπαραγωγής

2.5.1 Δείκτες ενεργειακής συμπεριφοράς

Η ενεργειακή συμπεριφορά συστημάτων συμπαραγωγής περιγράφεται με ορισμένους χαρακτηριστικούς δείκτες. Στους ορισμούς που περιγράφουμε παρακάτω, χρησιμοποιούνται τα εξής σύμβολα:

W : ηλεκτρική ή μηχανική ισχύς,

Q : θερμική ισχύς,

$Hf\Sigma$: ισχύς καυσίμου που καταναλώνεται στο σύστημα συμπαραγωγής,

mf : παροχή καυσίμου,

Hu : κατώτερη θερμογόνος ικανότητα καυσίμου,

HfW : ισχύς καυσίμου για τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρικής ή μηχανικής ισχύος W ,

HfQ : ισχύς καυσίμου για τη χωριστή παραγωγή θερμότητας Q ,

HfX : ολική ισχύς καυσίμου για τη χωριστή παραγωγή των W και Q ,

E_Q : ροή θερμικής εξέργειας που αντιστοιχεί στη θερμική ισχύ Q ,

E_f : ροή εξέργειας καυσίμου,

ef : ειδική εξέργεια καυσίμου.

Για τα παραπάνω ισχύουν:

$$Hf\Sigma = mfHu \quad (2.1)$$

$$HfX = HfW + HfQ = (mfHu)W + (mfHu)Q \quad (2.2)$$

$$E_f = mf ef \quad (2.3)$$

Στη συνέχεια ορίζουμε τους κυριότερους δείκτες.

Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης, (ή μηχανικός, εάν πρόκειται για παραγωγή μηχανικού έργου):

$$ne = W/Hf\Sigma \quad (2.4)$$

Θερμικός βαθμός απόδοσης:

$$nh = Q/Hf\Sigma \quad (2.5)$$

Ολικός ενεργειακός βαθμός απόδοσης:

$$n = ne + nh = (W + Q)/Hf\Sigma \quad (2.6)$$

Ολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης:

$$\zeta = (W + E_Q)/E_f \quad (2.7)$$

Λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα (Power to Heat ratio):

$$PHR = W/Q \quad (2.8)$$

Λόγος εξοικονόμησης ενέργειας καυσίμου (fuel energy saving ratio):

$$FESR = (HfX - Hf\Sigma)/HfX \quad (2.9)$$

Από τα παραπάνω προκύπτει για τα μεγέθη ne και PHR ότι:

$$n = ne(1 + 1/PHR) \quad (2.10)$$

που γράφεται και ως

$$PHR = ne/(n - ne) = ne/nh \quad (2.11)$$

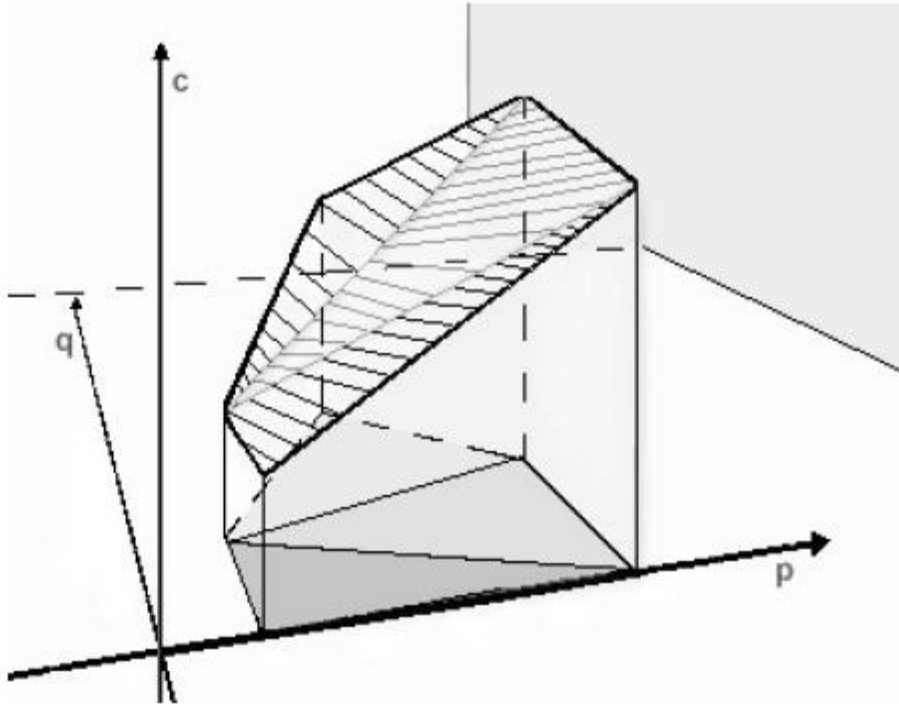
Οι παραπάνω σχέσεις βοηθούν στον προσδιορισμό αποδεκτών τιμών του λόγου ηλεκτρισμού προς θερμότητα PHR , όταν η τιμή του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης ne είναι γνωστή, δεδομένου ότι ο ολικός βαθμός απόδοσης δεν ξεπερνά το 85-88%.

2.5.2 Τρόποι λειτουργίας συστημάτων συμπαραγωγής

Οι κυριότεροι τρόποι λειτουργίας των συστημάτων συμπαραγωγής, η ρύθμιση δηλαδή της ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος κάθε χρονική στιγμή, είναι οι παρακάτω:

- Παραγωγή θερμότητας ίσης με το θερμικό φορτίο (*heat match*). Εάν παράγεται περισσότερη ηλεκτρική ισχύς από το φορτίο, τότε πωλείται η διαφορά στο εθνικό δίκτυο. Εάν παράγεται λιγότερη, τότε το έλλειμμα συμπληρώνεται από το δίκτυο.
- Παραγωγή ηλεκτρισμού ίσου με το ηλεκτρικό φορτίο (*electricity match*). Χρησιμοποιείται βοηθητικός λέβητας για να καλυφθούν οι ανάγκες σε θερμότητα όποτε χρειάζεται, ή ειδικά ψυγεία για την αποβολή περίσσιας θερμότητας.
- *Μεικτός τρόπος*, δηλαδή συνδυασμός των παραπάνω με παρακολούθηση του θερμικού και ηλεκτρικού φορτίου αντίστοιχα.
- *Πλήρης κάλυψη θερμικού και ηλεκτρικού φορτίου* κάθε στιγμή χωρίς σύνδεση στο εθνικό δίκτυο. Σε αυτή την περίπτωση χρειάζεται επαρκής εφεδρεία ισχύος, άρα πιο πολύπλοκο σύστημα συμπαραγωγής που αυξάνει το αρχικό κόστος εγκατάστασης.

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



Σχήμα 2.5.1: Εφικτή περιοχή λειτουργίας μονάδας συμπαραγωγής. (p =ηλ. ισχύς, q =θερμότητα, c =κόστος παραγωγής)

2.6 Μοντέλα λειτουργίας μονάδων συμπαραγωγής

Για την οικονομική λειτουργία των μονάδων συμπαραγωγής απαιτείται η μοντελοποίηση της παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού, και στη συνέχεια ο σχεδιασμός της λειτουργίας τους με βάση τα αποτελέσματα μίας διαδικασίας βελτιστοποίησης. Ο μακροπρόθεσμος σχεδιασμός γίνεται κατακερματίζοντας τον χρονικό ορίζοντα σε χιλιάδες ωριαία μοντέλα, όταν πρόκειται για απελευθερωμένη αγορά, και στη συνέχεια υπολογίζεται με ένα νέο μοντέλο η λειτουργία των μονάδων για να καλυπτούν το φορτίο (θερμότητας και ηλεκτρισμού) με οικονομική ένταξη και κατανομή. Η λειτουργία των μονάδων συμπαραγωγής σε επίπεδο κόστους-ισχύος μοντελοποιείται με βάση τη συνάρτηση κόστους λειτουργίας, οπότε προκύπτει η εφικτή περιοχή που συμπεριλαμβάνει όλες τις δυνατές καταστάσεις λειτουργίας της κάθε μονάδας με τα λειτουργικά όρια, όρια ασφάλειας και κόστος. Αντίστοιχα με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, των οποίων η εφικτή περιοχή είναι δύο διαστάσεων (κόστος-παραγόμενη ηλ. ισχύς), για τις μονάδες συμπαραγωγής προκύπτει εφικτή περιοχή τριών διαστάσεων: κόστος-παραγόμενη ηλ. ισχύς- παραγόμενη θερμότητα. Χαρακτηριστικά στο Σχήμα 2.6.1 παρουσιάζεται η εφικτή περιοχή λειτουργίας (κυρτή σε αυτή την περίπτωση) μίας μονάδας συμπαραγωγής. Η πιο συνήθης αναπαράσταση της περιοχής λειτουργίας γίνεται με χρήση κυρτού τετράπλευρου είτε με ένα τμήμα είτε με δύο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.5.2. Αναφέρεται ότι η αναπαράσταση της εφικτής περιοχής με τετράπλευρο είναι κατάλληλη για μοντελοποίηση λειτουργίας του οποιουδήποτε συστήματος συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, και ιδιαίτερα συστημάτων

αεριοστρόβιλων. Επίσης, τα δύο τμήματα δεν θεωρούνται πιο κατάλληλα, συγκρινόμενα με τη χρήση μόνο ενός. Το πιο κοινό μαθηματικό μοντέλο για κάθε γραμμικό περιορισμό που περιγράφει την εφικτή περιοχή είναι :

$$a \times P + b \times Q \geq c$$

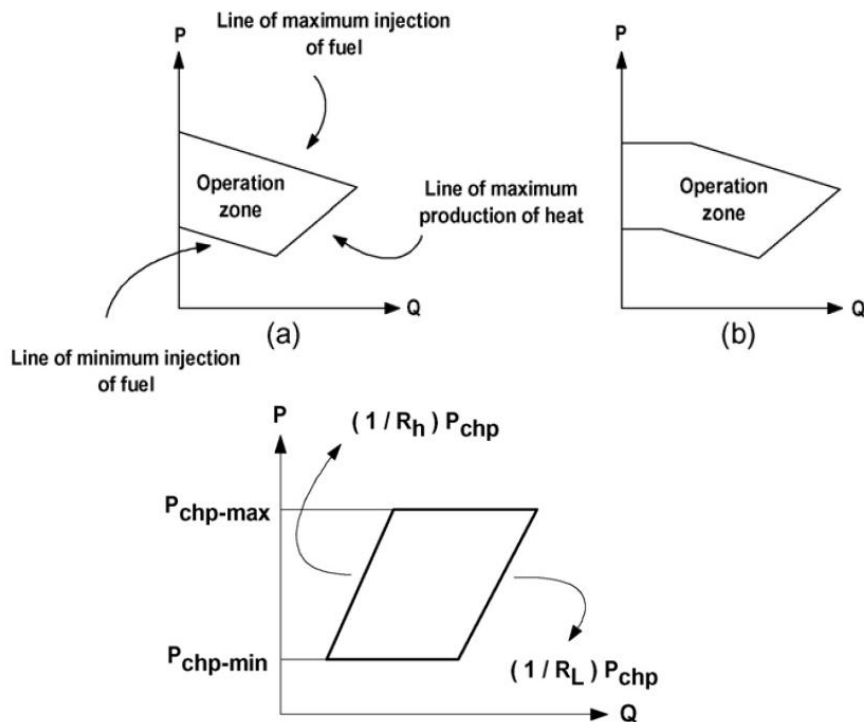
Αυτές οι ανισότητες εισάγονται στο πρόβλημα βελτιστοποίησης ως περιορισμοί. Μία άλλη μέθοδος μοντελοποίησης της κυρτής εφικτής περιοχής είναι με χρήση του λόγου ηλεκτρισμού-προς-θερμότητα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7.2. Σε αυτή την περίπτωση η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος περιορίζεται από ελάχιστη και μέγιστη χωρητικότητα:

$$P_{chp_{min}} \leq P_{chp} \leq P_{chp_{max}}$$

Αντίστοιχα, η παραγωγή θερμότητας περιορίζεται από το μέγιστο και ελάχιστο λόγο ηλεκτρισμού-προς-θερμότητας:

$$Q_{chp} \geq (1/R_H) \times P_{chp}$$

$$Q_{chp} \leq (1/R_L) \times P_{chp}$$



Σχήμα 2.6.1: Μοντέλο εφικτής περιοχής λειτουργίας συστημάτων συμπαραγωγής: με α: ένα ή δύο τμήματα και β: με λόγο ηλεκτρισμού-θερμότητας

Ο κυριότερος παράγοντας κατά την βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη και βελτιστοποίηση λειτουργίας των μονάδων είναι η συνάρτηση κόστους που περιγράφει τη μονάδα. Συνήθως αρκεί η παράσταση του κόστους με χρήση πολυωνυμικής συνάρτησης (δευτέρου ή τρίτου βαθμού):

$$C_{chp}(P_{chp}, Q_{chp}) = a_{chp} + b_{chp}P_{chp} + c_{chp}P_{chp}^2 + d_{chp}Q_{chp} + f_{chp}Q_{chp}^2 + g_{chp}P_{chp}Q_{chp} \quad (2.12)$$

Πιο ειδικά, ανά περίπτωση μονάδας παραγωγής διακρίνουμε:

- Η είσοδος/έξοδος (MBTU/h καυσίμου - T/h ατμού) της ενθαλπίας του λέβητα σε ατμοστρόβιλο μοντελοποιείται με πολυωνυμική συνάρτηση τρίτου βαθμού:

$$Hb(Mb) = a_b + B_b M_b + c_b M_b^2 + d_b M_b^3 \quad (2.13)$$

- Πολυωνυμική συνάρτηση δευτέρου βαθμού χρησιμοποιείται για τον ατμοστρόβιλο αντίθλιψης (T/h ατμός-MW ηλ.ισχύος). Η καταναλισκόμενη ενθαλπία είναι όμοια με το μοντέλο του λέβητα.

$$P_{tg}(M_{tg}) = a_{tg} + b_{tg}M_{tg} + c_{tg}M_{tg}^2 \quad (2.14)$$

και

$$H_{tg}(P_{tg}) = a_g + b_g P_{tg} + c_g P_{tg}^2 + d_g P_{tg}^3$$

- Η συνάρτηση κόστους ατμοστρόβιλου απομάστευσης (T/h μέση πίεση ατμού, T/h εξερχόμενη πίεση ατμού -MW ηλ.ισχύος) περιγράφεται ως εξής:

$$P_{tg}(M_m, M_{ex}) = a_{tg} + b_{tg}M_m + c_{tg}M_{ex} \quad (2.15)$$

- Για την περίπτωση κατανάλωσης διαφορετικών ειδών καυσίμου η μοντελοποίηση γίνεται στη βάση του συντελεστή απόδοσης (η_{fuel}) και του λόγου ανάμειξης καυσίμου (λ_{fuel}) για τη μετατροπή των διαφορετικών συναρτήσεων σε μία. Για παράδειγμα, η καμπύλη της ενθαλπίας για ένα λέβητα με χρήση δύο ειδών καυσίμου περιγράφεται ως εξής:

$$H_{bT}(M_b) = H_b(M_b)(\lambda_{fuel1} + \eta_{fuel1/2}\lambda_{fuel2}) \quad (2.16)$$

όπου

$$\eta_{fuel1/2} = \text{αποδοτικότητα καύσιμο 1} / \text{αποδοτικότητα καύσιμο 2}$$

$$\lambda_{fuel} = \text{ενθαλπία καυσίμου} / \text{συνολική ενθαλπία}$$

και η συνολική συνάρτηση κόστους (CT) του παραπάνω λέβητα είναι :

$$CT(Mb) = H_{bT}(Mb)C \quad (2.17)$$

όπου

$$C = C_{fuel1}\lambda_{fuel1} + C_{fuel2}\lambda_{fuel2}$$

Για τις περιπτώσεις όπου το μοντέλο της μονάδας χρειάζεται μη-κυρτή (non-convex) βελτιστοποίηση, που μπορεί να είναι απαραίτητο για την επίλυση προβλημάτων οικονομικής κατανομής ή/και προγραμματισμού παραγωγής, τότε μοντελοποιούμε τη μονάδα συμπαραγωγής αναπαριστώντας την λειτουργία ως έναν κυρτό συνδυασμό από N_p ακραία σημεία (c_i, p_i, q_i) με βάση την εφικτή περιοχή.

$$C_{chp} = \sum_{i=1}^{N_p} c_i x_i \quad P_{chp} = \sum_{i=1}^{N_p} p_i x_i$$

$$Q_{chp} = \sum_{i=1}^{N_p} q_i x_i$$

$$\sum_{i=1}^{N_p} x_i = 1 \quad x_i \geq 0$$

Πρακτικά, προσπαθούμε να χωρίσουμε την εφικτή περιοχή λειτουργίας σε κυρτές περιοχές, ώστε να μπορέσουμε να χρησιμοποιήσουμε τεχνικές βελτιστοποίησης, όπου κατά κύριο λόγο αφορούν κυρτές γεωμετρίες. Αργότερα, θα δούμε πως ένα τέτοιο "σπάσιμο" δεν είναι πάντοτε αναγκαίο και πως με μεθόδους αναζήτησης μπορούμε να πραγματοποιήσουμε και πάλι βελτιστοποίηση του προβλήματος οικονομικής κατανομής φορτίου.

2.7 ΜΙΚΡΟΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ

2.7.1 Δυνατότητες για μικροσυμπαραγωγή

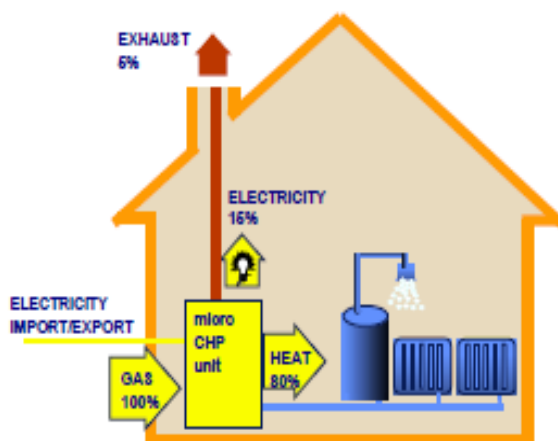
Με δεδομένες τις δεινές τρέχουσες συνθήκες της αγοράς για τη συμπαραγωγή στην απελευθερωμένη ευρωπαϊκή αγορά ενέργειας, η αισιόδοξη πρόγνωση για τη μικροσυμπαραγωγή μπορεί να έρθει ως ένα είδος αιφνιδιασμού. Ακόμη και προτού το πρώτο αληθινό συστήματα μικροσυμπαραγωγής αποκτήσει εμπορική λειτουργία, η κυβέρνηση του Ηνωμένου Βασιλείου είχε προσδιορίσει αυτή την τεχνολογία ως το πιο οικονομικά αποδοτικό μέτρο μείωσης του διοξειδίου του άνθρακα, και ως ένα κλειδί χαρακτηριστικό της ενεργειακής της πολιτικής. Αναμένεται ότι τελικά πάνω από 12 εκατομμύρια συστήματα θα εγκατασταθούν στο Ηνωμένο Βασίλειο και περισσότερα από 50 εκατομμύρια στην ΕΕ στο σύνολό της, αντιπροσωπεύοντας σημαντική επιχειρηματική ευκαιρία στους κατασκευαστές, τους εγκαταστάτες και τους φορείς εκμετάλλευσης, και σημαντική πρόκληση για τους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Έχει επίσης προταθεί πολλές φορές ότι η μικροσυμπαραγωγή θα έχει σημαντικό αντίκτυπο στο δίκτυο διανομής αερίου (μερικοί σχολιαστές πιστεύουν ότι θα αυξήσει τη ζήτηση του φυσικού αερίου, ενώ άλλοι πιστεύουν ακριβώς το αντίθετο). Σε τελική ανάλυση, αυτό θα εξαρτηθεί σε μεγάλο βαθμό από το ποια "κινητήρια δύναμη" της τεχνολογίας θα υιοθετηθεί, αλλά για τα επόμενα 10 χρόνια περίπου είναι πιθανό να υπάρξει μικρή ή καθόλου επίδραση στο δίκτυο φυσικού αερίου.

2.7.2 Ορισμός

Ο όρος μικροσυμπαγωγή αναφέρεται στις τεχνολογίες ταυτόχρονης παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας από την ίδια πηγή για κάλυψη αυτή τη φορά των αναγκών μεμονωμένων σπιτιών ή κτιρίων.

Για όσους δεν είναι εξοικειωμένοι με την έννοια των πολύ μικρών συστημάτων ΣΗΘ μπορεί να είναι χρήσιμο να εξετάσουν πρώτα τις βασικές αρχές λειτουργίας, όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.7.1 Συνολικά, το 80% της αξίας του φυσικού αερίου μετατρέπεται σε θερμότητα, κυρίως με τη μορφή ζεστού νερού το οποίο χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του χώρου και για οικιακό ζεστό νερό, όπως σε ένα κανονικό σύστημα κεντρικής θέρμανσης. Σε αυτό περίπου το 15% μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια και το υπόλοιπο (5%) χάνεται στα καυσαέρια. Ο ηλεκτρισμός που παράγεται και δε χρησιμοποιείται μπορεί να εξαχθεί πίσω στο δίκτυο.

Αυτό συγκρίνεται με ένα σύγχρονο λέβητα κεντρικής θέρμανσης όπου το 80% της ενέργειας που περιέχει το φυσικό αέριο μετατρέπεται σε θερμότητα και το υπόλοιπο 20% χάνεται στα καυσαέρια. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στο σπίτι έχει μια αξία η οποία καλύπτει το κόστος επένδυσης των πολύ μικρών μονάδων συμπαγωγής και παρέχει μια καθαρή οικονομία.



Σχήμα 2.7.1

Σε αυτές τις αναλογίες, είναι σαφές ότι δεν υπάρχει καμία μεταβολή στην οικιακή κατανάλωση φυσικού αερίου, όταν μια μονάδα μικροσυμπαγωγής είναι εγκατεστημένη στη θέση ενός συμβατικού σύγχρονου λέβητα, αν και κατά την αντικατάσταση παλιότερων αναποτελεσματικών λεβήτων θα υπάρχει κάποια εξοικονόμηση αερίου. Ωστόσο, εάν τεχνολογίες με υψηλή ηλεκτρική απόδοση (όπως οι κυψέλες καυσίμων με 40% ηλεκτρική και 40% θερμική απόδοση) εισάγονται, θα υπάρξει μια σημαντική αύξηση της κατανάλωσης φυσικού αερίου για την κάλυψη των θερμικών φορτίων.

Η μονάδα συμπαγωγής αντικαθιστά το συνηθισμένο boiler και παρέχει θερμότητα και ζεστό νερό όπως συνήθως, αλλά επιπρόσθετα παρέχει την

περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για τις ανάγκες του σπιτιού. Παρόλο που εξ' ορισμού οι μεμονωμένες μονάδες παράγουν μικρές ποσότητες ηλεκτρισμού, η σημασία της μικροσυμπαγωγής έγκειται στη δυνατότητα εγκατάστασης ενός πολύ μεγάλου αριθμού τέτοιων μονάδων σε εκατομμύρια σπίτια σε όσες χώρες το φυσικό αέριο είναι το κυρίαρχο καύσιμο θέρμανσης. Αναμένεται ότι τελικά η μικροσυμπαγωγή θα παρέχει το 20% (ή και παραπάνω) της αναγκαίας ζητούμενης ηλεκτρικής ενέργειας στη Μ. Βρετανία, περισσότερη απ' όση παράγεται τώρα από πυρηνική ενέργεια.

2.7.3 Οικονομικοί και περιβαλλοντικοί παράγοντες

Οι βασικές κινητήριες δυνάμεις για την εισαγωγή των πολύ μικρών μονάδων ΣΗΘ είναι περιβαλλοντικές, οικονομικές και τεχνολογικές. Ωστόσο, όπως με την εισαγωγή κάθε νέας τεχνολογίας, τα οικονομικά ζητήματα είναι οι κατ' εξοχήν οδηγοί, και είναι η απελευθερωμένη αγορά ενέργειας στην Ευρώπη αυτή που δημιουργεί ένα ευνοϊκό ανταγωνιστικό περιβάλλον. Η μικροσυμπαγωγή προσφέρει τη δυνατότητα για σημαντική ενεργειακή εξοικονόμηση κόστους και σημαντικά υψηλότερα κέρδη για τους προμηθευτές ενέργειας. Στην ανταγωνιστική Βρετανική αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, για παράδειγμα, νέοι πελάτες λιανικής παράγουν τόσο λίγα όσα £ 4-6 καθαρά κέρδη ετησίως. Αυτό δεν προκαλεί έκπληξη σε μια αγορά εμπορευμάτων όπου όλοι οι παίκτες έχουν πρόσβαση στην ίδια χονδρική προμήθεια (παραγωγή), με το ίδιο κόστος, και όπου όλα τα έξοδα μεταφοράς είναι πανομοιότυπα για όλους τους παίκτες, ανεξάρτητα από τον όγκο. Ο συμβατικός τρόπος να αυξηθεί το καθαρό κέρδος είναι κατ' αρχάς να ελαχιστοποιηθεί το κόστος του προσωπικού, και, δεύτερον, η βελτιστοποίηση του κόστους εξυπηρέτησης των πελατών μέσω της μεγιστοποίησης του αριθμού των πελατών (αν και τα περιθώρια κέρδους παραμένουν εξαιρετικά στενά).

Ωστόσο, μόνο το ήμισυ περίπου των οικιακών τιμολογίων παροχής ενέργειας οφείλεται στο κόστος της ενέργειας, με το υπόλοιπο να είναι κόστος μεταφοράς και άλλα κόστη. Σαφώς, μικροσυμπαγωγή η οποία παράγει στο σημείο της κατανάλωσης αποφεύγει το κόστος μεταφοράς και εν δυνάμει μειώνει στο μισό τον λογαριασμό της ενέργειας, (κατά μέσο όρο £ 330 ανά έτος), και δημιουργεί δυνατότητες κέρδους πέραν των £ 150, ένα συντελεστή υψηλότερο του 30! Οι προμηθευτές ενέργειας έχουν έτσι ένα ισχυρό και κερδοφόρο εργαλείο για την απόκτηση νέων πελατών και, εξίσου σημαντικότερο, για να διατηρήσουν τους υπάρχοντες πελάτες τους, οι οποίοι ποικιλοτρόπως έχουν αξία μεταξύ £ 30 - £ 400 έκαστος.

Καθώς η τεχνολογία έχει εξελιχθεί για την κάλυψη των λειτουργικών παραμέτρων των μονάδων μικροσυμπαγωγής, τα υπόλοιπα τεχνικά εμπόδια σχετίζονται περισσότερο με τη διασύνδεση μεταξύ των προϊόντων και του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας και τη λειτουργία αυτών των δικτύων διανομής. Τρέχοντα προϊόντα ενός Stirling κινητήρα έχουν δείξει επαρκή απόδοση σε πραγματικά σπίτια και φαίνεται να είναι σε θέση να επιτύχουν βιώσιμο κόστος παραγωγής.

Τα περιβαλλοντικά οφέλη από μονάδες μικροσυμπαγωγής έχουν από καιρό αναγνωριστεί και πολλές κυβερνήσεις της ΕΕ υποστηρίζουν την εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας. Ωστόσο, ανεξάρτητα από οποιοδήποτε ιδεαλιστικό κίνητρο, τα περιβαλλοντικά μέτρα εφαρμόζονται μόνο εάν υπάρχει κάποια παράλληλο οικονομικό όφελος, και η εξοικονόμηση ενέργειας από μόνη της, όσο οικονομικά αποδοτική κι αν είναι, είναι σπάνια επαρκές κίνητρο για οικιακούς καταναλωτές. Η εμπειρία έχει δείξει ότι, έως ότου να εισαχθεί νομοθεσία, οι λέβητες συμπύκνωσης αγνοήθηκαν σε μεγάλο βαθμό στο Ηνωμένο Βασίλειο, ακόμη και όταν η οικονομική υπόθεση είχε αποδειχθεί.

Εξαρτώμενες από υποθέσεις που αφορούν εκτοπισμένους λέβητες, οι μονάδες μικροσυμπαγωγής θα μειώσουν σε ένα τυπικό νοικοκυριό τις ετήσιες εκπομπές CO₂ κατά 1,7-9 τόνους. Με βάση τα αναμενόμενα τελικά επίπεδα διείσδυσης στην αγορά, αυτό θα μπορούσε να αντιπροσωπεύει μια μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 60 εκατομμύρια τόνους ετησίως για το Ηνωμένο Βασίλειο. Ωστόσο, η απόδοση οικονομικής αξίας σε αυτές τις εκπομπές είναι ο βασικός οδηγός (όμως ακόμα και αυτό είναι μόνο ένας σημαντικός παράγοντα για αυτούς που παίρνουν "ορθολογικές" αποφάσεις).

2.7.4 Εμπόδια στην αγορά

Από τις προηγούμενες παραγράφους γίνεται φανερό ότι η συμπαραγωγή παρέχει στον καταναλωτή σημαντική δυνατότητα της κάλυψης των τελικών ενεργειακών του αναγκών με πολύ υψηλότερη θερμοδυναμική απόδοση απ' ό,τι οι παραδοσιακές μέθοδοι. Επομένως θα έπρεπε, λογικά, η ευρύτατη διάδοση των τεχνολογιών της συμπαραγωγής να εξαρτάται κυρίως από την οικονομικότητα των εμπορικά διαθέσιμων τεχνολογιών και η προσπάθεια να κατευθύνεται προς τη σταδιακή μείωση του κόστους των συστημάτων αυτών, ώστε να αυξάνει το επιχειρηματικό ενδιαφέρον. Σε επίπεδο εφαρμογής, όμως, το ζήτημα διαφοροποιείται επειδή ο συμπαραγωγός είναι, εν μέρει τουλάχιστον, και παραγωγός ηλεκτρικής ενέργειας. Κι επειδή κατά κανόνα είναι διασυνδεδεμένος με το ηλεκτρικό δίκτυο, έρχεται υποχρεωτικά σε επαφή με τους φορείς παραγωγής και διαχείρισης της ηλεκτρικής ενέργειας. Αναπόφευκτα λοιπόν, η συμπαραγωγή εμπλέκεται στην έντονη συζήτηση που έχει αναπτυχθεί διεθνώς γύρω από τα θέματα της απελευθέρωσης της ηλεκτροπαραγωγής. Κεντρικά ζητήματα στη συζήτηση αυτή θεωρούνται οι όροι και οι περιορισμοί ανάπτυξης της Ιδιοπαραγωγής (autoproduction ή self-production), δηλαδή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εκ μέρους ενός χρήστη προς κάλυψη των δικών του αναγκών, καθώς και της Ανεξάρτητης Ηλεκτροπαραγωγής (independent electricity production), δηλαδή της εκτός ηλεκτρικών εταιρειών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για εμπορική εκμετάλλευση. Η μελέτη των νομοθετικών (θεσμικών, κανονιστικών, χρηματοδοτικών κ.λ.π.) ζητημάτων, που αφορούν την ανάπτυξη και διάδοση της συμπαραγωγής, έχει αποκτήσει επομένως ιδιαίτερη βαρύτητα.

3. Οικονομική Κατανομή Φορτίου

3.1 Εισαγωγή

Ένα ζητούμενο φορτίο κατανάλωσης είναι δυνατόν να τροφοδοτηθεί από ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με πολλούς τρόπους. Ο καλύτερος τρόπος τροφοδότησης (βέλτιστος) είναι αυτός που παρέχει την οικονομικότερη λειτουργία του συστήματος. Το κριτήριο της βέλτιστης λειτουργίας είναι οικονομικό (πλέον υπεισέρχονται και άλλα κριτήρια, όπως π.χ. περιβαλλοντικά). Ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής, με τη χρησιμοποίηση του καταλληλότερου καυσίμου και κόστους μεταφοράς με τη μείωση των απωλειών του δικτύου. Η βέλτιστη λειτουργία του συστήματος σε κάθε περίπτωση για κάθε φορτίο αποτελεί το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου η οποία βασίζεται στα παρακάτω:

1. Ακριβή πρόβλεψη φορτίου, αφενός βραχυπρόθεσμα, αφετέρου μακροπρόθεσμα.
2. Οικονομικό προγραμματισμό γεννητριών (προγραμματισμό ένταξης μονάδων στο σύστημα).
3. Οικονομική φόρτιση μονάδων σε λειτουργία (οικονομική λειτουργία συστήματος).

Με βραχυπρόθεσμη φόρτιση εννοούμε την πρόβλεψη του φορτίου του συστήματος κάθε ώρα για κάθε συγκεκριμένη μέρα (day-ahead). Στη μακροπρόθεσμη πρόβλεψη υπολογίζονται οι πιθανότερες ετήσιες ή εποχιακές αιχμές φορτίου σε μακροχρόνια κλίμακα για το σχεδιασμό του συστήματος. Με την ένταξη των μονάδων αναφερόμαστε στον καθορισμό και τη χρησιμοποίηση του βέλτιστου συνδυασμού γεννητριών για την εξυπηρέτηση της ωριαίας ζήτησης φορτίου. Η οικονομική λειτουργία του συστήματος αναφέρεται στη βελτιστοποίηση της φόρτισης της κάθε μονάδας ενός δεδομένου συνδυασμού μονάδων σε λειτουργία. Για να γίνει η σωστή ένταξη των μονάδων σε λειτουργία χρειάζεται μια όσο το δυνατόν πιο ακριβής πρόβλεψη της ζήτησης φορτίου, διαφορετικά δε θα λειτουργεί το σύστημα στην πιο οικονομική κατάσταση, γεγονός που αποφέρει μεγαλύτερο κόστος. Παράλληλα, αν η πρόβλεψη της ζήτησης δεν είναι ορθή, θα υπάρχουν επιπτώσεις στην αξιοπιστία και την ασφάλεια του συστήματος και κατανάλωση περισσότερου καυσίμου με δυσμενέστερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η προμήθεια του καυσίμου απαιτεί *μακροπρόθεσμο* προγραμματισμό (ανθρακωρυχεία), *μεσοπρόθεσμο* (πυρηνικό καύσιμο), ή *βραχυπρόθεσμο* (ετήσιος προγραμματισμός).

Το πρόβλημα της οικονομικής εκμετάλλευσης του συστήματος, όταν αυτό περιλαμβάνει πολλών ειδών μονάδες παραγωγής, και ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια με τη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της διανεμημένης παραγωγής, σε συνδυασμό με υδροηλεκτρικούς, θερμικούς και πυρηνικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και διασυνδέσεις με άλλα συστήματα, αποτελεί ιδιαίτερα πολύπλοκο πρόβλημα που χρίζει εκτενούς μελέτης. Συνεπώς, το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου σε ένα αυτόνομο σύστημα ενέργειας έγκειται στην εξυπηρέτηση της ζήτησης με το ελάχιστο δυνατό συνολικό κόστος καυσίμου, γεγονός που συμβάλλει στην επίτευξη ελάχιστου κόστους παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Στην ελαχιστοποίηση του κόστους σημαντικό ρόλο παίζουν οι εξής παράγοντες:

- Η λειτουργική απόδοση των μονάδων.
- Το κόστος καυσίμου.

- Οι απώλειες του δικτύου μεταφοράς.

3.2 Η απλούστερη μορφή του προβλήματος οικονομικής κατανομής φορτίου

Το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου μπορεί να διατυπωθεί και να επιλυθεί ως πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς. Στόχος του προβλήματος είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους λειτουργίας, F_T , υπό τον περιορισμό η συνολική παραγωγή των θερμικών μονάδων να ισούται με τη ζήτηση φορτίου, P_R . Το φορτίο, P_R , που πρέπει να καλύψουν οι θερμικές μονάδες είναι, σύμφωνα με τους προηγούμενους ορισμούς, $P_R = P_D - P_H + P_{INT}$. Προς το παρόν στη διατύπωση του προβλήματος έχουν αγνοηθεί τα όρια λειτουργίας των θερμικών μονάδων καθώς και οι απώλειες του συστήματος μεταφοράς.

Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος έχει ως εξής:

$$\min F_T(P_1, \dots, P_N) = F_1 + F_2 + \dots + F_N = \sum_{i=1}^N F_i(P_i) \quad (3.1)$$

$$\text{S.T.} \quad \Phi(P_1, \dots, P_N) = 0 = P_R - \sum_{i=1}^N P_i \quad (3.2)$$

Τά F_1, \dots, F_N είναι οι συναρτήσεις που εκφράζουν τις χαρακτηριστικές εισόδου - εξόδου των μονάδων.

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης με εξισωτικό περιορισμό που περιγράφεται από τις σχέσεις (3.1) και (3.2) μπορεί να επιλυθεί ως πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς αφού πρώτα σχηματισθεί η συνάρτηση LaGrange .

Η συνάρτηση LaGrange σχηματίζεται αν προστεθεί στη συνάρτηση στόχου F_T , ο εξισωτικός περιορισμός, Φ , αφού πρώτα πολλαπλασιασθεί με τον πολλαπλασιαστή LaGrange, λ :

$$L(P_1, \dots, P_N, \lambda) = F_T + \lambda \cdot \Phi \quad (3.3)$$

Οι απαραίτητες συνθήκες βέλτιστου για τη συνάρτηση LaGrange είναι ο μηδενισμός των μερικών παραγώγων ως προς τις $N+1$ ανεξάρτητες μεταβλητές $P_1,$

..., P_N και λ . Η μερική παράγωγος ως προς τον πολλαπλασιαστή LaGrange δίνει τον εξισωτικό περιορισμό (1.2). Οι μερικές παράγωγοι ως προς τις ισχύεις εξόδου των μονάδων δίνουν:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial P_i} = \frac{dF_i(P_i)}{dP_i} - \lambda = 0$$

ή

$$\frac{dF_i}{dP_i} = \lambda \quad i = 1, \dots, N \quad (3.4)$$

Δηλαδή, η απαραίτητη συνθήκη για την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους λειτουργίας είναι όπως εκφράζεται από τη σχέση (3.4) η εξής: Όλες οι θερμικές μονάδες του συστήματος πρέπει να λειτουργούν με το ίδιο διαφορικό κόστος λειτουργίας (€/kWh), ίσο με τον πολλαπλασιαστή LaGrange. Οι εξισώσεις (3.4) ονομάζονται **εξισώσεις συνεργασίας** (coordination equations).

3.3 Οικονομική κατανομή φορτίου και λειτουργικά όρια μονάδων

Μια πιο ρεαλιστική αντιμετώπιση της οικονομικής κατανομής φορτίου λαμβάνει υπόψη και τα όρια λειτουργίας των θερμικών μονάδων. Σ' αυτή την περίπτωση η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος έχει ως εξής:

$$\text{Min } F_T = F_1 + F_2 + \dots + F_N \quad (3.5)$$

$$\text{s.t. } \Phi = P_R - \sum_{i=1}^N P_i - P_D = 0 \quad (3.6)$$

$$P_{i_{min}} \leq P_i \leq P_{i_{max}} \quad i = 1, N \quad (3.7)$$

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης της συνάρτησης στόχου (3.5) (συνολικό κόστος λειτουργίας) υπό τον εξισωτικό περιορισμό (3.6) (εξίσωση διατήρησης ισχύος) και τους ανισωτικούς περιορισμούς (3.7) (λειτουργικά όρια μονάδων) μπορεί να επιλυθεί με την εφαρμογή των συνθηκών Kuhn-Tucker. Εφαρμογή των συνθηκών Kuhn-Tucker μετά από κάποια επεξεργασία, δίνει τις παρακάτω απαραίτητες συνθήκες βέλτιστου :

$$\frac{dF_i}{dP_i} = \ddot{e} \quad \text{για } P_{i_{min}} < P_i < P_{i_{max}}$$

$$\frac{dF_i}{dP_i} \leq \ddot{e} \quad \text{για } P_i = P_{i_{max}} \quad (3.8)$$

$$\frac{dF_i}{dP_i} \geq \ddot{e} \quad \text{για } P_i = P_{i_{min}}$$

$$\sum_{i=1}^N P_i = P_R \quad (3.9)$$

$$P_{i_{min}} \leq P_i \leq P_{i_{max}} \quad (3.10)$$

3.4 Αλγόριθμος επαναλήψεων λάμδα

Η επίλυση του προβλήματος οικονομικής κατανομής φορτίου σε Η/Υ γίνεται με την μέθοδο επαναλήψεων λάμδα.

Με δεδομένο το λ ο υπολογισμός των P_i γίνεται από την επίλυση της εξίσωσης

$$(3.4), \frac{dF_i}{dP_i} = \lambda. \text{ Τα διαφορικά κόστη των μονάδων αποθηκεύονται στον Η/Υ είτε ως}$$

συντελεστές γνωστών πολυονυμικών συναρτήσεων είτε σημείο προς σημείο υπό μορφή τμηματικά γραμμικών ή τμηματικά σταθερών συναρτήσεων. Για την ικανοποίηση των λειτουργικών ορίων των μονάδων, πρέπει $P_i > P_{i_{max}}$ ($P_i < P_{i_{min}}$) τότε τίθεται $P_i = P_{i_{max}}$ ($P_i = P_{i_{min}}$).

Οι επαναλήψεις σταματούν όταν η εξίσωση διατήρησης ισχύος

$$\ddot{O} = P_R - \sum_{i=1}^N P_i \text{ ικανοποιείται μέσα στα όρια κάποιας ανοχής } \varepsilon \text{ (π.χ. } \varepsilon = 0,1 \text{ MW).}$$

Σ' αυτή την περίπτωση εκτυπώνονται τα αποτελέσματα που είναι οι ισχείς εξόδου όλων των μονάδων καθώς επίσης και ο πολλαπλασιαστής LaGrange, λ , που είναι το κοινό διαφορικό κόστος λειτουργίας (€/kWh) όλων των μονάδων που λειτουργούν αυστηρά μεταξύ των ορίων λειτουργίας τους. Το λ εκφράζει το κόστος παραγωγής μιας πρόσθετης kWh από το σύστημα.

Εφόσον δεν ικανοποιείται η εξίσωση διατήρησης ισχύος στο σύστημα επιλέγεται νέα τιμή για το λ και οι επαναλήψεις συνεχίζονται μέχρι να συγκλίνει ο αλγόριθμος ή μέχρι να εκτελεσθεί ένας μεγάλος αριθμός επαναλήψεων χωρίς να επιτευχθεί σύγκλιση. Η επιλογή της νέας τιμής του λ γίνεται κατά την πρώτη

επανάληψη ($k=1$) με αύξηση ή μείωση κατά 10% ανάλογα με το αν $P_R > \sum_{i=1}^N P_i$ ή

$P_R < \sum_{i=1}^N P_i$ όπως έχει περιγραφεί. Κατά τις επόμενες επαναλήψεις, ($k=2, \dots$),

χρησιμοποιείται η μέθοδος των προβολών, που προέρχεται με προσέγγιση της παραγώγου από την επαναληπτική μέθοδο Newton-Raphson:

$$\ddot{e}^{\hat{e}+1} = \ddot{e}^{\hat{e}} - \frac{\ddot{O}(\ddot{e}^{\hat{e}})}{\ddot{O}'(\ddot{e}^{\hat{e}})} = \ddot{e}^{\hat{e}} - \frac{\ddot{O}(\ddot{e}^{\hat{e}})}{\frac{\ddot{O}(\ddot{e}^{\hat{e}}) - \ddot{O}(\ddot{e}^{\hat{e}-1})}{\ddot{e}^{\hat{e}} - \ddot{e}^{\hat{e}-1}}}$$

$$\ddot{e}^{\hat{e}+1} = \ddot{e}^{\hat{e}} - \frac{\ddot{e}^{\hat{e}} - \ddot{e}^{\hat{e}-1}}{\ddot{O}(\ddot{e}^{\hat{e}}) - \ddot{O}(\ddot{e}^{\hat{e}-1})} \cdot \ddot{O}'(\ddot{e}^{\hat{e}}) \quad \hat{e} = 1, 2, \dots$$

3.5 Οικονομική κατανομή φορτίου με απώλειες μεταφοράς

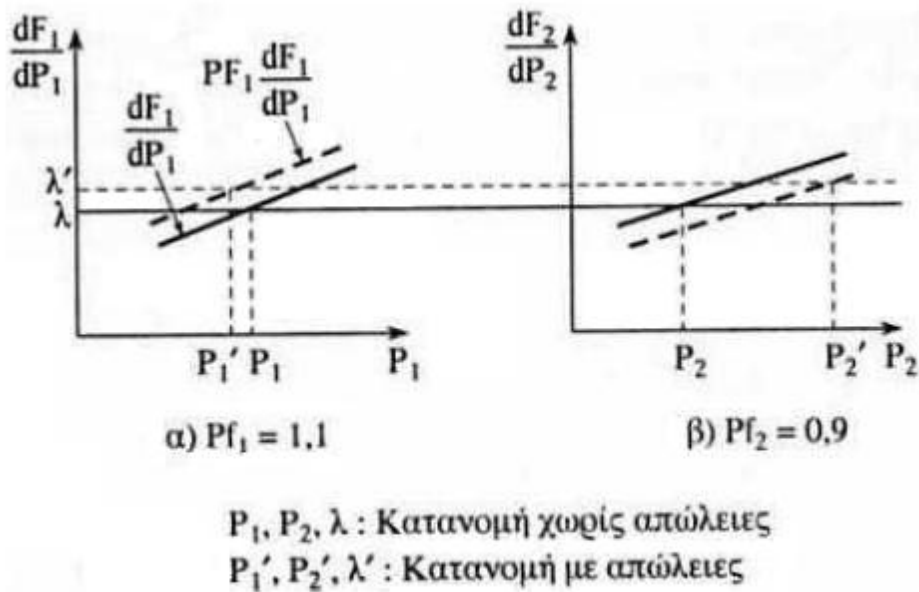
Μέχρι στιγμής κατά τη διατύπωση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου αμελήθηκαν οι απώλειες του συστήματος μεταφοράς. Είναι γνωστό ότι, κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ισχύος, υπάρχουν απώλειες που οφείλονται κυρίως στην ωμική αντίσταση των γραμμών. Άλλες απώλειες στο δίκτυο μεταφοράς είναι αυτές λόγω του φαινομένου Corona των γραμμών και λόγω χαλκού και σιδήρου των μετασχηματιστών.

Σε περίπτωση που ληφθούν υπόψη και οι απώλειες του δικτύου το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου γίνεται πιο σύνθετο, εξαιτίας της συνάρτησης απωλειών που συμμετέχει στο ισοζύγιο της ισχύος. Η εξίσωση διατήρησης ισχύος εκφράζει πλέον το γεγονός ότι η συνολική παραγωγή πρέπει να ισούται με το φορτίο συν τις απώλειες μεταφοράς. Στην περίπτωση αυτή, το πρόβλημα συνίσταται στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους καυσίμου και διατυπώνεται μαθηματικά ως εξής:

$$\text{Min} F_T(P_1, \dots, P_n) = F_1(P_1) + F_2(P_2) + \dots + F_n(P_n) = \sum_{i=1}^n F_i(P_i) \quad (3.11)$$

$$\text{Μ.Π.} : \Phi = PD + PL(P_1, P_2, \dots, P_n) - \sum_{i=1}^n P_i = 0 \quad (3.12)$$

$$P_{i,\text{min}} \leq P_i \leq P_{i,\text{max}} \quad i = 1, \dots, n \quad (3.13)$$



Σχήμα 3.1: Διαφορικό κόστος καυσίμου με και χωρίς απώλειες

3.5.1 Εξίσωση απωλειών με τη μέθοδο των B-συντελεστών

Το πρόβλημα, πλέον, έγκειται στον προσδιορισμό της εξίσωσης των απωλειών συναρτήσει των ισχύων των μονάδων παραγωγής, $PL(P_1 \dots P_n)$. Οι απώλειες εκφράζονται συναρτήσει των συντελεστών απωλειών ή συντελεστών B του δικτύου και των ισχύων από εξισώσεις της μορφής:

$$PL = [P]T [B] [P] + [P]T [B]0 + B00 \quad (3.14)$$

όπου:

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

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

[B]0: διάνυσμα διάστασης $n \times 1$

B00: σταθερά

Η εξίσωση απωλειών 3.14 γράφεται σε πιο γενική μορφή και ως:

$$P_L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^n B_i P_i + B_{00} \quad (3.15)$$

$$\Phi = P_D + \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^n B_i P_i + B_{00} \right) - \sum_{i=1}^n P_i \quad (3.16)$$

οπότε:

$$\frac{\partial L}{\partial P_i} = \frac{\partial F_i}{\partial P_i} + \lambda \left(\sum_{i=1}^n (B_{ij} P_j - B_j) - 1 \right) = 0 \quad (3.17)$$

και οι συντελεστές ποινής γίνονται:

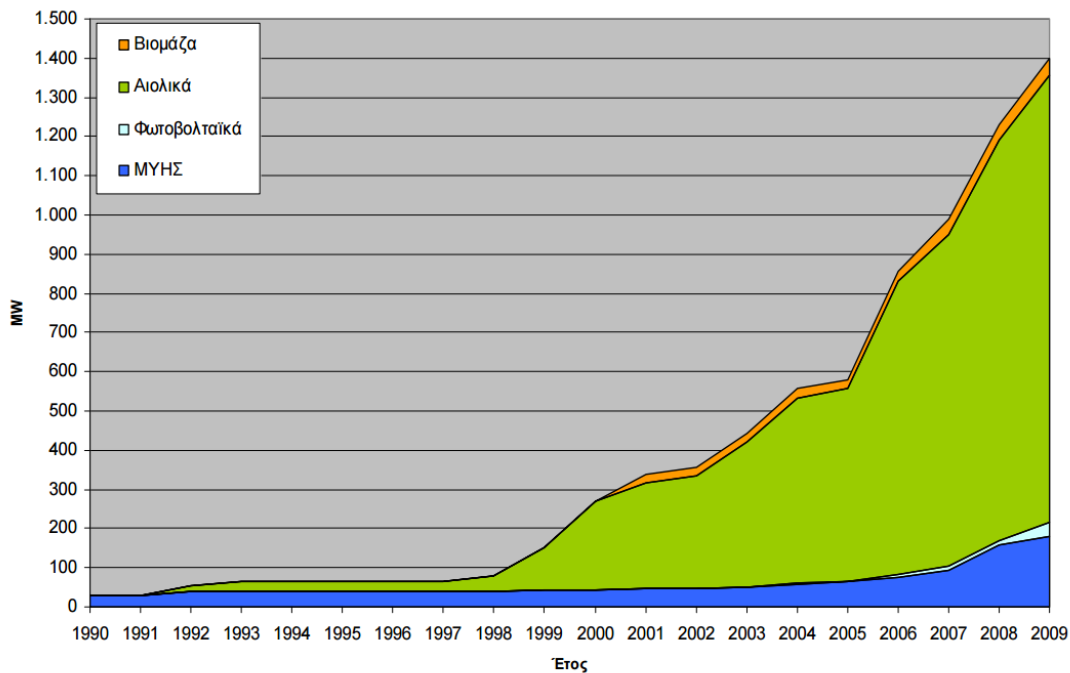
$$Pf_i = \frac{1}{1-2\sum_{j=1}^n B_{ij}P_j - B_j} \quad (3.18)$$

Η παρουσία των διαφορικών απωλειών περιπλέκει την επίλυση των εξισώσεων συνεργασίας 3.17 καθώς περιέχει αφ' ενός τους όρους P_i και αφετέρου όλους τους όρους P_j .

4. Αιολική Ισχύς και Περιορισμοί Διείσδυσης

4.1 Εισαγωγή

Η αιολική ενέργεια έχει αποτελέσει τις τελευταίες δεκαετίες πηγή ενέργειας με μεγάλη διείσδυση στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω της «καθαρής» και οικονομικής μορφής της. Η αιολική μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια μέσω των πτερυγίων των ανεμογεννητριών και στη συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω της γεννήτριας. Η διαδικασία αυτή δεν συμπεριλαμβάνει χημική μετατροπή, άρα δεν προκαλεί εκπομπή αέριων ρύπων ούτε κατανάλωση υγρών ή στερεών καυσίμων. Ωστόσο τα τυχαία χαρακτηριστικά του ανέμου κάνουν δύσκολα προβλέψιμη τη διαθέσιμη ισχύ και οι απότομες μεταβολές μπορεί να προκαλούν προβλήματα στο δίκτυο, συνεπώς χρειάζεται ιδιαίτερη μελέτη τόσο στα ζητήματα δυναμικής ευστάθειας, όσο και στην πρόβλεψη παραγωγής αιολικής ισχύος, όπου αρκετές μεθοδολογίες έχουν αναπτυχθεί και θα περιγράψουμε στη συνέχεια, είτε βραχυπρόθεσμης, είτε μακροπρόθεσμης για το σχεδιασμό και την εγκατάσταση αιολικών πάρκων. Σε διάστημα περίπου 10 ετών η εγκατεστημένη αιολική ισχύς αυξήθηκε ραγδαία στην Ευρώπη. Δε θα πρέπει, όμως, να δημιουργηθεί η εντύπωση ότι σε όλες τις χώρες της EU η ανάπτυξη ήταν η ίδια. Το μεγαλύτερο ποσοστό της εξέλιξης αυτής οφείλεται σε τρεις χώρες: τη Γερμανία, την Ισπανία και λίγο λιγότερο τη Δανία (η οποία εξελίσσεται με σταθερούς ρυθμούς). Τα νέα μέλη, δε, της ευρωπαϊκής ένωσης έχουν σημειώσει ελάχιστη ή μηδενική πρόοδο στον τομέα της παραγωγής αιολικής ισχύος. Σε πολλές χώρες, υπάρχουν ακόμα αμφιβολίες για τις περιβαλλοντικές συνέπειες των ανεμογεννητριών, γεγονός που εμποδίζει την ανάπτυξη της αιολικής ισχύος και λύσεις όπως η εγκατάσταση των αιολικών πάρκων μακριά από τις ακτές (offshore) φαίνεται ότι θα έρθουν στο προσκήνιο. Ήδη έρευνες έχουν δείξει ότι οι μεγάλες μηχανές είναι πιο ελκυστικές αισθητικά όταν παρατηρούνται μακριά από τις ακτές, ενώ παράλληλα βελτιώνεται η αξιοπιστία της παραγόμενης ισχύος (αφού οι άνεμοι εκεί είναι πιο έντονοι) και τα κόστη συντήρησης και επισκευής. Στην Ελλάδα χαρακτηριστικά φαίνεται στο σχήμα 4.1 το μερίδιο που καταλαμβάνει η αιολική ισχύς στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ. Διείσδυση της αιολικής ισχύος ονομάζουμε το μερίδιο της ισχύος που παράγεται από αιολική ενέργεια προς το συνολικό ποσό παραγόμενης ισχύος σε μια χώρα. Η επιτυχία της μεγάλης διείσδυσης πλέον στην Ευρώπη της αιολικής ισχύος οφείλεται στην τοποθέτηση μεγάλων ανεμογεννητριών (>5 MW) τόσο σε παράκτιες όσο και σε απομακρυσμένες από την ακτή περιοχές (αν και στις τελευταίες η τεχνολογία είναι ακόμη υπό εξέταση). Σημαντικό ρόλο έπαιξε και η ανάπτυξη μικρών αιολικών πάρκων, τα οποία είναι ευκολότερα τόσο στην εγκατάσταση, όσο και στη συντηρήσή τους, σε αναπτυσσόμενες χώρες ως κομμάτι του συστήματος ανεξάρτητης παραγωγής ισχύος. Τέλος, ας μην παραλείψουμε να αναφέρουμε και τη μεγάλη πρόοδο των μεθόδων πρόβλεψης της παραγωγής αιολικής ισχύος με την πάροδο των ετών, γεγονός που καταστεί την αιολική ενέργεια ολοένα και πιο αξιόπιστη στα «μάτια» των επενδυτών αλλά και των διαχειριστών των δικτύων μεταφοράς.



Σχήμα 4.1: Αθροιστικά εγκαθιστώμενη ισχύς σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με χρήση ΑΠΕ (πηγή: ΔΕΣΜΗΕ).

4.2 Προβλήματα από τη διείσδυση αιολικής ισχύος

Καθώς η ενσωμάτωση αιολικής ισχύος στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται συνεχώς και τα συστήματα αναπτύσσονται και εξελίσσονται τεχνικά, έτσι ώστε να γίνεται με ασφάλεια η ένταξη αυτή, είναι σκόπιμο να εξετάσουμε τους παράγοντες που τίθενται ως περιορισμοί, που είναι κυρίως τεχνικοί και οικονομικοί, αλλά και κοινωνικοί σε ορισμένες περιπτώσεις. Η αιολική ισχύς προκαλεί αβεβαιότητα σε ένα ενεργειακό σύστημα γιατί είναι μεταβλητή και απρόβλεπτη. Για να αντιμετωπιστούντα παραπάνω θα χρειαστεί ενεργειακό σύστημα με μεγαλύτερη ευελιξία, που εξαρτάται από το μέγεθος της διείσδυσης της αιολικής ισχύος. Ειδικά για τα συστήματα με μεγάλη διείσδυση αιολικής ισχύος, η πρόβλεψη αποκτά πρωτεύουσα σημασία. Προβλέψεις τόσο για τη ζήτηση όσο και για την παραγωγή είναι απαραίτητες τόσο για τον Διαχειριστή του Δικτύου, όσο και για τους διάφορους επενδυτές. Ο διαχειριστής του συστήματος είναι υπεύθυνος για την ασφαλή λειτουργία του δικτύου. Αναλαμβάνει την υποχρέωση της εν λειτουργία (online) ρύθμισης των παραμέτρων του συστήματος, την πρόβλεψη του φορτίου και της διαθέσιμης ισχύος, τις απώλειες του δικτύου κ.ο.κ. Έτσι επιφορτίζεται και με το ρόλο του υπολογισμού της διαθέσιμης αιολικής ισχύος είτε σε επίπεδο πολύ βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης των αμέσως επόμενων ωρών, είτε σε επίπεδο υπολογισμού της επόμενης μέρας για το πρόβλημα της ένταξης των μονάδων και της οικονομικής λειτουργίας του συστήματος. Η απόφαση για την ποσότητα και την ακολουθία με την οποία θα εισέλθει η αιολική ισχύς στο δίκτυο την επόμενη μέρα είναι πιο δύσκολο κομμάτι του σχεδίου παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος. Εκτός από μερικές διακοπές λειτουργίας σε διάφορους σταθμούς και τη μεταβλητότητα του ζητούμενου φορτίου, οι απρόσμενες μεταβολές στην παραγωγή αιολικής ισχύος είναι ο κυριότερος λόγος για τον οποίο η ισχύς χρειάζεται ρύθμιση και αντιστάθμιση. Οι αποφάσεις του διαχειριστή καθορίζονται επίσης και από τους κανονισμούς

λειτουργίας του δικτύου, που διαμορφώνουν και τις σχέσεις του διαχειριστή με τους παραγωγούς αλλά και τους παραγωγούς μεταξύ τους σε περιβάλλον απελευθερωμένης αγοράς. Στόχος του κανονισμού αυτού είναι η εξασφάλιση της αποτελεσματικότητας και της αξιοπιστίας στην παραγωγή και τη μεταφορά της ισχύος και να ρυθμίζουν τα δικαιώματα και τις υποχρεώσεις όλων των συμμετοχόντων στο σύστημα αυτό. Τα βασικά προβλήματα που καλείται να επιλύσει ο διαχειριστής όσον αφορά τη διείσδυση παραγωγής αιολικής ισχύος περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω, και σχετίζονται με την ασφάλεια του δικτύου.

4.2.1 Έλεγχος ενεργού ισχύος

Οι απότομες μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου στις περιοχές των εγκατεστημένων αιολικών πάρκων μπορεί να προκαλέσουν μεταβολή στην παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ και ανισοροπία στο ισοζύγιο παραγωγής και κατανάλωσης ενεργού ισχύος. Αυτό φέρνει σαν αποτέλεσμα τις μεταβολές στη συχνότητα οι οποίες μεταφέρονται στις συμβατικές μονάδες και εάν δεν απορροφηθούν από τους αυτόματους ρυθμιστές και τη ρύθμιση συχνότητας μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στο δίκτυο και στους καταναλωτές. Επίσης μπορεί να υπερθερμανθούν γραμμές μεταφοράς, αύξηση του ρεύματος που εισρέει στις ανεμογεννήτριες κατά την εκκίνηση ή αποσύνδεση, η υπερφόρτιση των μονάδων, και να προκληθούν προβλήματα πιο μακροπρόθεσμου χαρακτήρα από τις στιγμιαίες μεταβολές παραγωγής ενεργού ισχύος των αιολικών πάρκων.

4.2.2 Έλεγχος συχνότητας

Η συχνότητα αποτελεί το δείκτη της ισοροπίας μεταξύ της ζήτησης φορτίου και της παραγόμενης ισχύος, και πρέπει να διατηρείται εντός συγκεκριμένων ορίων απόκλισης από την ονομαστική της τιμή. Στην Ευρώπη έχει τεθεί στα $50\text{Hz} \pm 0.1\text{Hz}$ και σπάνια ξεφεύγει από αυτά τα όρια. Για τη διατήρησή της από τις απότομες μεταβολές του συστήματος συντελείται ο πρωτεύων και ο δευτερεύων έλεγχος. Ο πρωτεύων περιλαμβάνει μονάδες που αυξάνουν/μειώνουν την παραγωγή τους μέχρι η ισοροπία ανάμεσα στην παραγωγή και την κατανάλωση να αποκατασταθεί και η συχνότητα να σταθεροποιηθεί, αν και είναι χαμηλότερη από την ονομαστική και οι εφεδρικές μονάδες του πρωτεύοντος ελέγχου σπάνια χρησιμοποιούνται. Για να αποκατασταθεί η συχνότητα του δικτύου στην ονομαστική της τιμή και να τεθούν σε λειτουργία οι εφεδρικές μονάδες παραγωγής του πρωτεύοντος ελέγχου, χρησιμοποιείται ο δευτερεύων έλεγχος. Οι ανεμογεννήτριες γενικά δεν συμπεριλαμβάνονται στον έλεγχο συχνότητας, αν και κάποιοι διαχειριστές επιλέγουν το αντίθετο, ειδικά σε μη-διασυνδεδεμένα συστήματα.

4.2.3 Έλεγχος τάσης

Για τα ζητήματα ελέγχου τάσης διεξάγονται οι εξής διαδικασίες:

- Αντιστάθμιση άεργου ισχύος. Συμμετέχουν και οι ανεμογεννήτριες στη ρύθμιση της τάσης σε συνδυασμό με τον έλεγχο άεργου ισχύος έτσι ώστε να διατηρούνται στο δίκτυο τα κατάλληλα επίπεδα τάσης.

- Έλεγχος ποιότητας τάσης. Η ποιότητα της τάσης των αιολικών πάρκων εξαρτάται από τις διαρκείς αλλαγές στην τιμή της, από flicker τάσης(χαμηλής συχνότητας παρεμβολές) και από την ύπαρξη αρμονικών (πολλαπλάσια των 50Hz)
- Tap-changers μετασχηματιστές, που χρησιμοποιούνται για να διατηρήσουν τα προκαθορισμένα επίπεδα τάσης.

4.2.4 Προστασία

Το σύστημα προστασίας του δικτύου πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να μπορεί να το υποστηρίξει σε περιπτώσεις διαταραχών. Είναι ζήτημα απόφασης του διαχειριστή το αν θα αποσυνδέονται τα αιολικά πάρκα σε διάφορες διαταραχές, εξετάζεται κατά περίπτωση και εξαρτάται από το ποσοστό διείσδυσης αιολικής παραγωγής, το είδος και μέγεθος της εκ διαταραχής και η τοπολογία του δικτύου. Για παράδειγμα, στα μη διασυνδεδεμένα νησιά που τα αιολικά πάρκα συμμετέχουν στο δευτερεύοντα έλεγχο συχνότητας ο διαχειριστής επιλέγει να μην αποσυνδέει τις ανεμογεννήτριες σε περιπτώσεις διαταραχών καθώς αυτό μπορεί να μεγεθύνει το πρόβλημα δυναμικής ευστάθειας.

4.2.5 Επάρκεια ισχύος και εφεδρεία συστήματος

Η μεταβλητότητα που παρουσιάζει η αιολική ισχύς επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τον τρόπο με τον οποίο θα κατανεμηθεί η παραγωγή ισχύος ανάμεσα στις μονάδες του συστήματος. Σε συνδυασμό με τη μεταβλητότητα της ζήτησης φορτίου μπορεί να προκαλέσει μεγάλα προβλήματα στο δίκτυο εάν δεν προβλεφθεί σωστά η ταχύτητα του ανέμου στις διάφορες περιοχές που εγκαθίστανται τα αιολικά πάρκα. Συνεπώς, για να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα μη κάλυψης της ζήτησης σε συγκυρία απότομης μείωσης της παραγωγής αιολικής ισχύος και ίσως αύξησης του φορτίου, ο διαχειριστής οφείλει να διατηρεί σε στρεφόμενη εφεδρεία περισσότερες μονάδες ώστε να καλυφθεί το παραπάνω ενδεχόμενο, αναλόγως με την τοπολογία του δικτύου και το βαθμό διασποράς των αιολικών πάρκων. Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι η εγκατεστημένη ισχύς θα πρέπει να μπορεί να καλύψει την παροχή ισχύος στην περίπτωση μέγιστης ζήτησης φορτίου, η τιμή της οποίας προκύπτει συνδυάζοντας ιστορικά στατιστικά δεδομένα με προβλέψεις ως προς την εξέλιξη του δικτύου.

Θεωρείται ότι συνολικά η παραγόμενη αιολική ισχύς μπορεί να ελέγχεται, έτσι ώστε να μπορεί να μειωθεί αν αυτό απαιτηθεί από το σύστημα, όπως αναλύσαμε και παραπάνω. Για το λόγο αυτό οι αιολικοί σταθμοί πρέπει να είναι μικροί, πολλοί και διάσπαρτοι, με δυνατότητα ελέγχου της παραγόμενης από αυτούς ισχύος για την πλήρη εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας αλλά και την αποφυγή προβλημάτων από την μεγάλη αύξηση της έντασης του ανέμου. Τίθεται όριο για την στιγμιαία διείσδυση αιολικής ισχύος, δεδομένου ότι οι διακυμάνσεις της παραγόμενης ισχύος από τους αιολικούς σταθμούς μπορεί να έχουν δυσμενείς συνέπειες στη διατήρηση της συχνότητας αλλά και στην ευστάθεια του συστήματος. Το όριο αυτό μπορεί να κυμανθεί, ανά περιοχή ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες των συνθηκών λειτουργίας του συστήματος, τόσο από πλευράς συμβατικών μονάδων (πχ ικανότητας ρύθμισης) όσο και από πλευράς αιολικών σταθμών (αριθμός, μέγεθος και είδος ανεμογεννητριών, διασπορά των ανεμογεννητριών κτλ). Με παραμετρική διερεύνηση ως προς τις τιμές των παραμέτρων που εμπλέκονται (ταχύτητα ανέμου, διεύθυνση ανέμου, όριο

στιγμιαίας διείσδυσης, καμπύλη φορτίου κτλ) δίνεται η δυνατότητα καλύτερης εξέτασης του θέματος της αιολικής ισχύος. Θα πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψιν δεδομένα που επηρεάζουν το βαθμό διείσδυσης (πχ η διασπορά των αιολικών σταθμών) αλλά και ότι η απορρόφηση αιολικής ενέργειας θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μην παραβιάζεται η συμφωνημένη απορρόφηση ενέργειας από τους άλλους σταθμούς παραγωγής. Να σημειώσουμε, τέλος, ότι ιδιαίτερα στις περιπτώσεις αιολικών πάρκων που συνδέονται στα αυτόνομα ΣΗΕ, όπως για παράδειγμα σε μη διασυνδεδεμένα νησιά, οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής επιβάλλουν σημαντικούς περιορισμούς στη λειτουργία τους που ο διαχειριστής οφείλει να τους συμπεριλαμβάνει.

4.3 Πιθανοτική ανάλυση παραγωγής αιολικής ισχύος

Ένα μέγεθος με τόσο μεγάλη μεταβλητότητα όπως η ταχύτητα του ανέμου, προφανώς και αξίζει και πρέπει να μοντελοποιηθεί πιθανοτικά. Πολλές μορφές έχουν προταθεί για την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του ανέμου, αλλά αυτή που τα δεδομένα φαίνεται να επαληθεύουν είναι η δι-παραμετρική κατανομή Weibull.

$$f_U(u) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad 0 \leq u \leq \infty \quad (4.1)$$

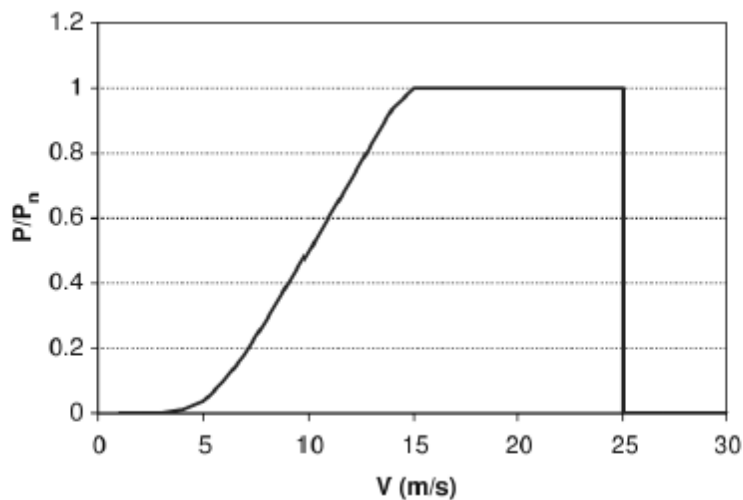
όπου k η παράμετρος μορφής και c η παράμετρος κλίμακας.

Ένα από τα χαρακτηριστικά μεγέθη μίας ανεμογεννήτριας είναι η καμπύλη Ισχύος που μας παρέχει ο κατασκευαστής. Σε αυτή διαφαίνονται τρία χαρακτηριστικές τιμές για τον άνεμο και πέραν από την ονομαστική ισχύ είναι ένας από τους παράγοντες που κρίνουν αν μια ανεμογεννήτρια είναι κατάλληλη για την τοποθεσία του αιολικού πάρκου. Οι τιμές αυτές, όπως φαίνεται και από την παρακάτω καμπύλη ισχύος, είναι οι :

- u_{cut-in} ή αλλιώς ταχύτητα εισόδου, είναι η ταχύτητα του ανέμου όπου μπορεί να ξεπεραστεί η αδράνεια του κινητού μέρους της γεννήτριας

- u_{rated} η ταχύτητα στην οποία η ανεμογεννήτρια δίνει την ονομαστική ισχύ εξόδου

- $u_{cut-out}$ ταχύτητα στην οποία η ανεμογεννήτρια είναι στα όρια μηχανικής αντοχής της και θα πρέπει να αποσυνδεθεί και να σταματήσει για λόγους ασφαλείας.



Σχήμα 4.2: Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας με $v_{in} = 5m/s$, $v_r = 15m/s$ και $v_{out} = 25m/s$

Με δεδομένες τις δύο ταχύτητες που ορίζουν τα όρια λειτουργίας της ανεμογεννήτριας καθώς και έχοντας την πιθανότητα εμφάνισης αυτών μπορούμε να υπολογίσουμε την πιθανότητα να βρίσκεται σε λειτουργία, και να κάνουμε μία εκτίμηση για τη μέση παραγωγή της. Η στατιστική ανάλυση του ανέμου και πιο συγκεκριμένα ο καθορισμός των παραμέτρων της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας Weibull της ταχύτητας του ανέμου είναι ο καταλληλότερος τρόπος για την μελέτη του αιολικού δυναμικού της περιοχής που πρόκειται να εγκατασταθεί ένα αιολικό πάρκο, για αυτό το λόγο τη χρησιμοποιήσαμε και στο πρόβλημα της στοχαστικής βέλτιστης κατανομής φορτίου.

5. Μέθοδοι Βελτιστοποίησης

5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το σημείο θα αναφερθούμε στις μεθόδους βελτιστοποίησης και κυρίως στις αλγοριθμικές αυτές διαδικασίες οι οποίες μας δίνουν την δυνατότητα να βρούμε λύση στα προβλήματα που έχουμε να αντιμετωπίσουμε. Ξεκινάμε ορίζοντας τι εννοούμε βελτιστοποίηση σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και συνεχίζουμε αναλύοντας τις τεχνικές που υπάρχουν για την εύρεση λύσεων. Τέλος παρουσιάζουμε τις επιλογές που κάναμε έτσι ώστε να λύσουμε το δικό μας πρόβλημα που είχαμε να αντιμετωπίσουμε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής.

Βελτιστοποίηση ορίζουμε την διαδικασία εύρεσης της καλύτερης δυνατής λύσης ενός προβλήματος υπό συγκεκριμένες συνθήκες και περιορισμούς. Στόχος μίας διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι είτε η ελαχιστοποίηση του κόστους ή της διεργασίας που πρέπει να καταβληθεί για μία προσπάθεια, είτε η μεγιστοποίηση της ωφέλειας που μπορούμε να έχουμε από μία διαδικασία. Η απαιτούμενη προσπάθεια ή το επιθυμητό όφελος ενός έργου μπορεί να προσεγγισθεί από την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος. Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης τότε μπορεί να οριστεί ως η εύρεση του μέγιστου ή του ελάχιστου αυτής της συγκεκριμένης συνάρτησης που περιγράφει το πρόβλημα με κάποιες συγκεκριμένες μεταβλητές απόφασης [3].

5.2 Κατηγορίες προβλημάτων βελτιστοποίησης

Πριν ξεκινήσουμε να αναλύουμε τις κατηγορίες της βελτιστοποίησης χρειάζεται να ορίσουμε πως εκφράζεται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Σκοπός είναι η εύρεση ενός διάνυσματος x το οποίο προέρχεται ως η βέλτιστη λύση ελαχιστοποίησης της $f(x)$, δηλαδή της αντικειμενικής συνάρτησης.

$$f(x) \xrightarrow[\text{Βελτιστοποίησης}]{\text{Μέσω}} x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$$

Το διάνυσμα x καλείται διάνυσμα σχεδιασμού και έχει διαστάσεις ανάλογα με το πόσες είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές μεταξύ τους. Εάν αυτό το πρόβλημα δεν έχει επιπρόσθετους περιορισμούς τότε αρκεί να βρεθεί το διάνυσμα x και συνεπώς το πρόβλημα καλείται πρόβλημα άνευ περιορισμών. Συνήθως όμως έχουμε περιορισμούς είτε είναι ισοτικοί περιορισμοί, είτε ανισοτικοί ή ακόμα και συνύπαρξη αυτών των δύο ειδών περιορισμών. Έτσι αν έχουμε για παράδειγμα και τους περιορισμούς που περιγράφονται από τις g_i , y_i τότε το πρόβλημα μας κατά την προσπάθεια εύρεσης του x θα πρέπει να λάβει υπόψη του και τους συγκεκριμένους περιορισμούς.

$$\left. \begin{array}{l} g_i = 0, \quad i=1, 2 \dots k \\ y_i \leq 0, \quad i=1, 2 \dots m \end{array} \right\} k, m \in \square$$

Οι περιορισμοί αυτοί μπορεί να είναι περιορισμοί σχεδίασης, περιορισμοί γεωμετρικοί ή άλλοι περιορισμοί τους οποίους εμείς θέτουμε, έτσι ώστε να περιορίσουμε την λύση μας βάσει κάποιων επιθυμητών χαρακτηριστικών που θέλουμε να έχει το σύστημα που προσπαθούμε να βελτιστοποιήσουμε. Είναι κατανοητό πως η σημασία της σωστής επιλογής/διαμόρφωσης της αντικειμενικής συνάρτησης είναι μείζονος σημασίας εάν θέλουμε αξιόπιστα και σωστά αποτελέσματα. Συχνά επίσης μπορούν να χρησιμοποιούνται αντικειμενικές συναρτήσεις οι οποίες να προσπαθούν να βελτιστοποιήσουν περισσότερα από ένα διαφορετικά κριτήρια, ενώ ταυτόχρονα είναι δυνατόν μία αντικειμενική συνάρτηση να περιέχει δύο ή και περισσότερες αντικειμενικές συναρτήσεις οι οποίες έχουν συμπτυχθεί κατάλληλα για παράλληλη βελτιστοποίηση. Σε αυτή την περίπτωση όμως να σημειωθεί πως όσο πιο μεγάλη και πολύπλοκη η αντικειμενική συνάρτηση, καθώς και όσο περισσότεροι περιορισμοί, τόσο η πολυπλοκότητα του προβλήματος αυξάνεται καθιστώντας δύσκολη την εύρεση μιας και γρήγορης σε χρόνο λύσης.

Έπειτα από τον γενικό ορισμό του προβλήματος βελτιστοποίησης προχωράμε στην παρουσίαση μιας κατηγοριοποίησης προβλημάτων βελτιστοποίησης με βάση την μορφή των εξισώσεων που μας οδηγούν να προσανατολιστούμε σε ποια μορφή επίλυσης θα δοκιμάσουμε να χρησιμοποιήσουμε. Σε κάθε περίπτωση, δεν πρέπει να θεωρηθεί πως αυτή η κατηγοριοποίηση είναι και η μοναδική δυνατή, καθώς αναλόγως τα κριτήρια οι κατηγορίες προβλημάτων βελτιστοποίησης είναι αρκετές.

Έτσι έχουμε τα προβλήματα βελτιστοποίησης :

- Μη Γραμμικού Προγραμματισμού: Τα προβλήματα μη γραμμικού προγραμματισμού όπως υποδηλώνει και το όνομα τους, είναι τα προβλήματα στα οποία η αντικειμενική συνάρτηση περιέχει μη γραμμικές εξισώσεις συνήθως αλλά θα μπορούσαμε να χαρακτηρίσουμε ως προβλήματα μη γραμμικού προγραμματισμού και τα προβλήματα των οποίων περιέχουν περιορισμούς οι οποίοι είναι μη γραμμικοί. Εκτός από τα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού θα ήταν ορθό να πούμε πως τα υπόλοιπα προβλήματα είναι υποκατηγορίες του μη γραμμικού προγραμματισμού και διακρίνονται ανάλογα με το είδος των μη γραμμικών εξισώσεων όπως για παράδειγμα γεωμετρικού προγραμματισμού (ύπαρξη συναρτήσεων ως αθροίσματα γινομένων δυνάμεων του διανύσματος x) ή τετραγωνικού προγραμματισμού (γραμμικοί περιορισμοί με τετραγωνικά ορισμένη αντικειμενική συνάρτηση) κ.ά.
- Γραμμικού Προγραμματισμού: Ως γραμμικού προγραμματισμού προβλήματα χαρακτηρίζονται τα προβλήματα τα οποία έχουν γραμμικές εξισώσεις στην αντικειμενική συνάρτηση αλλά και στους περιορισμούς. Αυτά τα προβλήματα

συνήθως λύνονται πιο εύκολα και γρήγορα σε σχέση με τα προβλήματα μη γραμμικού προγραμματισμού καθώς και πιο γρήγορα.

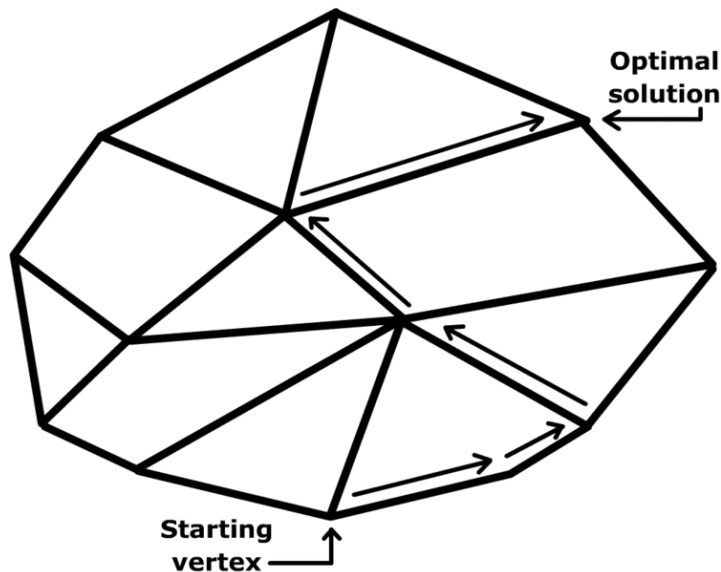
Στα προβλήματα βελτιστοποίησης γίνονται και κάποιοι διαχωρισμοί παρατηρώντας τα προβλήματα τα οποία χρειάζονται να επιλυθούν. Έτσι έχουμε προβλήματα που ανάλογα τις επιτρεπτές τιμές που μπορούν να λάβουν χωρίζονται σε προβλήματα ακεραίου και συνεχών τιμών προγραμματισμού. Ακόμα υπάρχουν τα ντετερμινιστικά και τα στοχαστικά προβλήματα, αναλόγως την φύση των μεταβλητών που εξετάζονται, και αν αυτές είναι πλήρως καθορισμένες ή λαμβάνεται υπόψη και μία πιθανοτική παράμετρος μέσω της στοχαστικότητας. Μία ακόμα διάκριση μπορεί να γίνει αναλόγως με τον αριθμό των αντικειμενικών συναρτήσεων που βελτιστοποιούνται την ίδια στιγμή :

- ➔ Μία αντικειμενική συνάρτηση η βελτιστοποίηση της οποίας μας δίνει την επιθυμητή απάντηση.
- ➔ Περισσότερες από μία αντικειμενικές συναρτήσεις που βελτιστοποιούνται ταυτόχρονα (Multi-Objective Optimization) και ανταγωνιστικά η μία προς την άλλη έχοντας υπόψη την έννοια της ανταπόδοσης (trade-off). Με βάση την αριστεία κατά Pareto παράγεται ένα σύνολο από μη κυριαρχούμενες λύσεις (non-dominated solutions) που ονομάζεται μέτωπο Pareto (Pareto front) .

Στην συνέχεια ακολουθεί μία ανάλυση πάνω στον μη γραμμικό προγραμματισμό και τις μεθόδους που χρησιμοποιούμε με σκοπό να βρούμε την λύση ή τις λύσεις σε ένα μη γραμμικό πρόβλημα.

5.2.1 Μη γραμμικός προγραμματισμός

Για την επίλυση προβλημάτων μη γραμμικού προγραμματισμού δεν υπάρχει μία μέθοδος ή μία συγκεκριμένη τακτική την οποία ακολουθούμε έτσι ώστε να βρούμε την λύση που αναζητούμε. Στην περίπτωση του γραμμικού προγραμματισμού υπάρχει μία μέθοδος η οποία έχει εφαρμογή σε όλες τις περιπτώσεις η λύση των οποίων βασίζεται στην γενική μέθοδο Simplex.



Σχήμα 5.1 Γραφική αναπαράσταση της μεθόδου Simplex που ξεκινάει από έναν κόμβο και διασχίζει τις γραμμικές ανισότητες φτάνοντας στον κόμβο που αποτελεί λύση

Στον μη γραμμικό προγραμματισμό υπάρχουν πολλές μέθοδοι επίλυσης, και κάθε φορά διαλέγουμε την καταλληλότερη με βάσει τις παρατηρήσεις μας πάνω στο πρόγραμμα αλλά και την εμπειρία που ίσως υπάρχει σε επίλυση τέτοιων προβλημάτων. Σε κάθε περίπτωση από την μορφή των αντικειμενικών συναρτήσεων μπορούμε να εξάγουμε κάποια συμπεράσματα ανάλογα με την μέθοδο που θα ακολουθήσουμε. Δηλαδή εάν δεν υπάρχουν καθόλου περιορισμοί στην βελτιστοποίηση της αντικειμενικής συναρτήσεως τότε χρησιμοποιούμε τις κλασικές μεθόδους διαφορικού λογισμού. Αν όμως υπάρχουν περιορισμοί και είναι σε μορφή ισότητας ή ανισότητας τότε χρησιμοποιούμε τους πολλαπλασιαστές Lagrange για την πρώτη περίπτωση ή τις συνθήκες Kuhn-Tucker (οι συνθήκες Kuhn-Tucker χρησιμοποιούνται και στην περίπτωση που στους περιορισμούς συνυπάρχουν ανισότητες και ισότητες).

Διαχωρισμοί, ανάλογα με την μέθοδο και το υπολογιστικό υπόβαθρο, που χρησιμοποιεί για να επιλύσει το ζητούμενο πρόβλημα υπάρχουν πολλοί. Για παράδειγμα ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των παρακάτω τεχνικών μπορεί να γίνει ο εξής διαχωρισμός για αντικειμενικές συναρτήσεις χωρίς περιορισμούς :

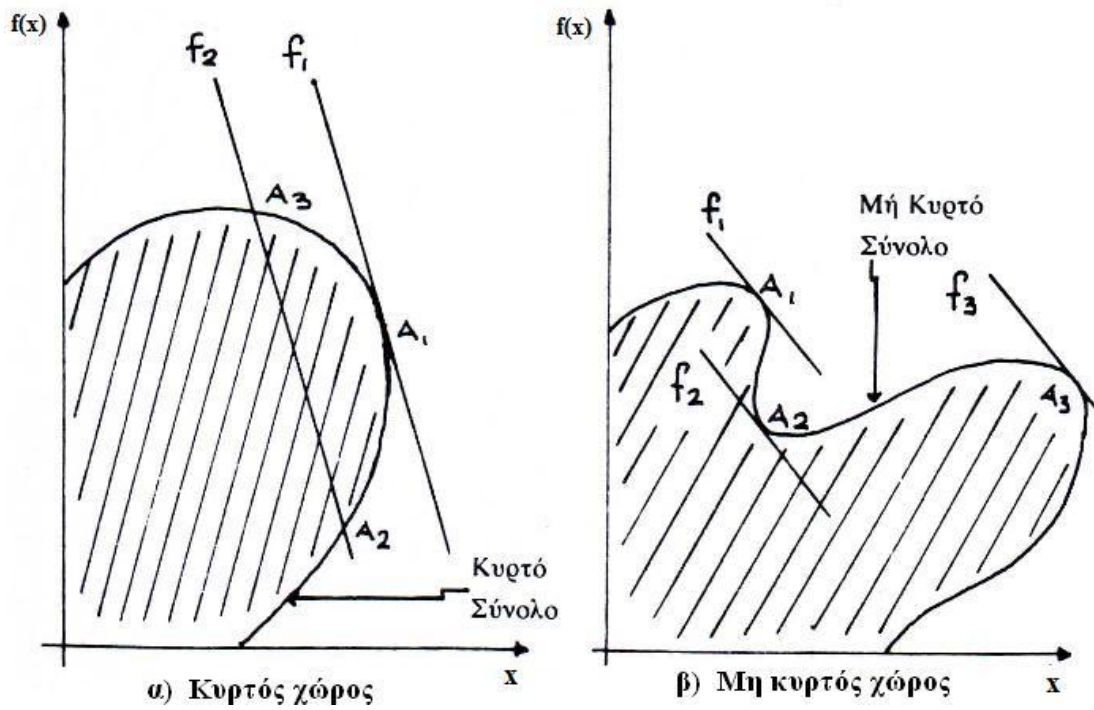
- ❖ Μέθοδοι Gradient (συμβατικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης κλίσης που υπάρχουν εδώ και δεκαετίες)
- ❖ Μέθοδοι Newton (μία ευρεία οικογένεια μεθόδων ανάλογα με το είδος της επίλυσης που ζητάμε)
- ❖ Μετρικές Μέθοδοι διαφόρων ειδών
- ❖ Μέθοδος Συζυγών Διευθύνσεων
- ❖ Μέθοδοι Αναζήτησης

Εδώ να αναφέρουμε πως παρουσιάζονται προβλήματα στις παραπάνω μεθόδους όπως για παράδειγμα η αδυναμία των μεθόδων Newton και Gradient

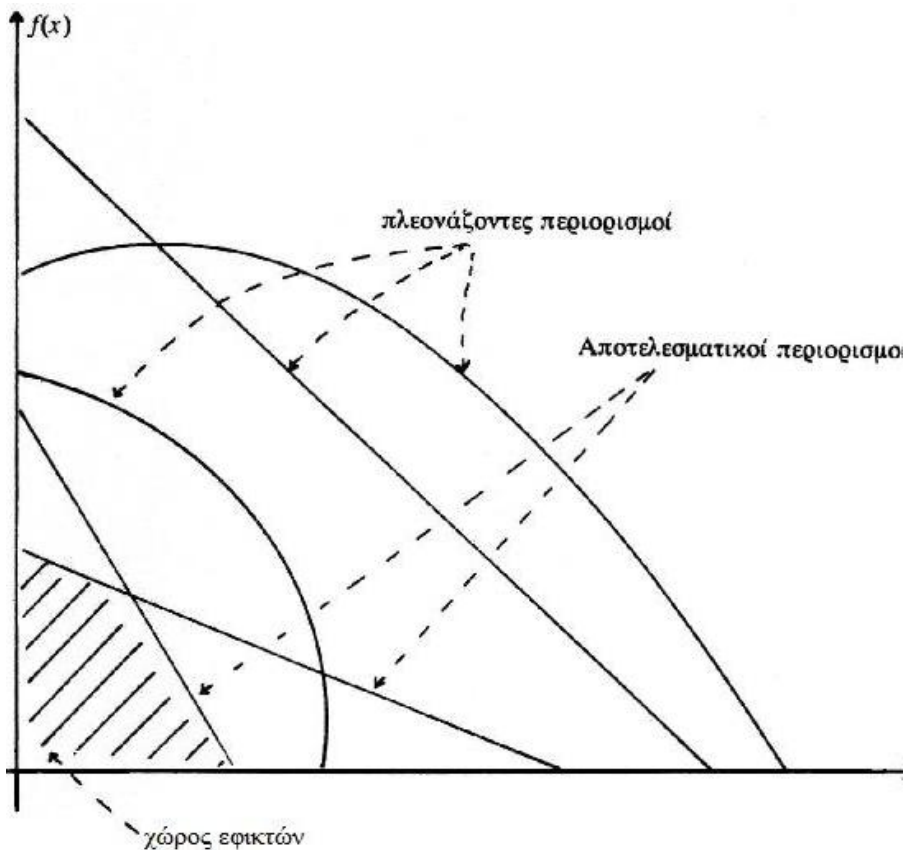
(μέθοδοι κλίσης) να αντιμετωπίσουν προβλήματα με ανισωτικούς περιορισμούς οι οποίοι κάνουν πολύπλοκότερο το πρόβλημα. Αν πάλι λάβουμε ως υπόψη μας τις αντικειμενικές συναρτήσεις με περιορισμούς και γραμμικές προσεγγιστικές μεθόδους τότε προκύπτει ένας διαχωρισμός όπως ο παρακάτω :

- ❖ Προβολικές μέθοδοι (Rosen's Gradient Projection method)
- ❖ Μέθοδος προσεγγιστικού προγραμματισμού (MAP)
- ❖ Μέθοδος εφικτών κατευθύνσεων του Zoutendijk
- ❖ Μέθοδος συνάρτησης ποινής (Penalty function method)

Άλλες αντίστοιχες μέθοδοι υπάρχουν με διαφοροποιημένα χαρακτηριστικά. Ακόμα υπάρχουν και τα προβλήματα που περιορίζονται ανάλογα τους μαθηματικούς χώρους που δημιουργούνται από τις αντικειμενικές συναρτήσεις και τους περιορισμούς τους. Για παράδειγμα είναι δυνατόν οι περιορισμοί σε κάποιο πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού μπορεί να σχηματίζουν κυρτό σύνολο, ή μη κυρτό σύνολο, μπορεί επίσης να είναι αποτελεσματικοί, ή μη αποτελεσματικοί ή πλεονάζοντες. Σε κάθε περίπτωση όμως η λύση μπορεί να είναι σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου των εφικτών λύσεων σε αντίθεση με τα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού που βάσει της μεθόδου Simplex αναφέρεται πως η βέλτιστη λύση θα βρίσκεται σε κάποιο ακραίο σημείο του χώρου των λύσεων. Συνήθως η αντικειμενική μας συνάρτηση είναι γραμμική ενώ ταυτόχρονα οι περιορισμοί μας είναι μη γραμμικοί. Εδώ δίνονται δύο κατευθύνσεις ανάλογα με τον χώρο. Αν ο χώρος μας είναι κυρτός τότε συνήθως ο προσδιορισμός της βέλτιστης λύσης είναι εύκολος και στο σχήμα που παρατίθεται η βέλτιστη λύση (δηλαδή η μέγιστη στην τιμή) είναι η A_1 (βλέπε σχήμα 5.2.α). Οποιαδήποτε άλλη λύση είναι μικρότερη της A_1 και συνεπώς μη βέλτιστη και αποδεικνύεται πως αν κινηθούμε από A_1 προς A_2 ή A_3 τότε η τιμή της συνάρτησης ελαττώνεται από f_1 σε f_2 . Στην περίπτωση όπως τώρα του μη κυρτού χώρου τα πράγματα περιπλέκονται καθώς από το παρατιθέμενο σχήμα (βλέπε σχήμα 5.2.1) παρατηρούμε πως ενώ αρχικά βλέπουμε πως βέλτιστη τιμή είναι η A_1 συνεχίζοντας συναντάμε το σημείο A_2 (όπου $f_2 < f_1$) και μετά το σημείο A_3 (όπου $f_3 < f_1$) κάνοντας δύσκολο το προσδιορισμό του ολικού ακρότατου σε σχέση με τα τοπικά ακρότατα. Για παράδειγμα κάτι τέτοιο θα μπορούσε να συμβεί σε προβλήματα μεγιστοποίησης με κυρτή αντικειμενική συνάρτηση. Επίσης, η ίδια δυσκολία προκύπτει όταν σε προβλήματα μεγιστοποίησης με γραμμική αντικειμενική συνάρτηση ο χώρος των εφικτών λύσεων είναι μη κυρτό σύνολο. Επίσης, συνήθως είναι δύσκολο να βρεθεί η βέλτιστη λύση, καθώς αυτό θα απαιτούσε την εύρεση όλων των τοπικών ακρότατων, εκτός και αν οι συναρτήσεις του προβλήματος είναι κυρτές ή κοίλες με στενή σημασία. Για αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι επίλυσης τέτοιων προβλημάτων που χρησιμοποιούν ευριστικές, μετευριστικές μεθόδους ή στοχαστική αναζήτηση σε ολόκληρο το χώρο των εφικτών λύσεων.



Σχήμα 5.2. Χώροι εφικτών λύσεων (κυρτός και μη κυρτός)



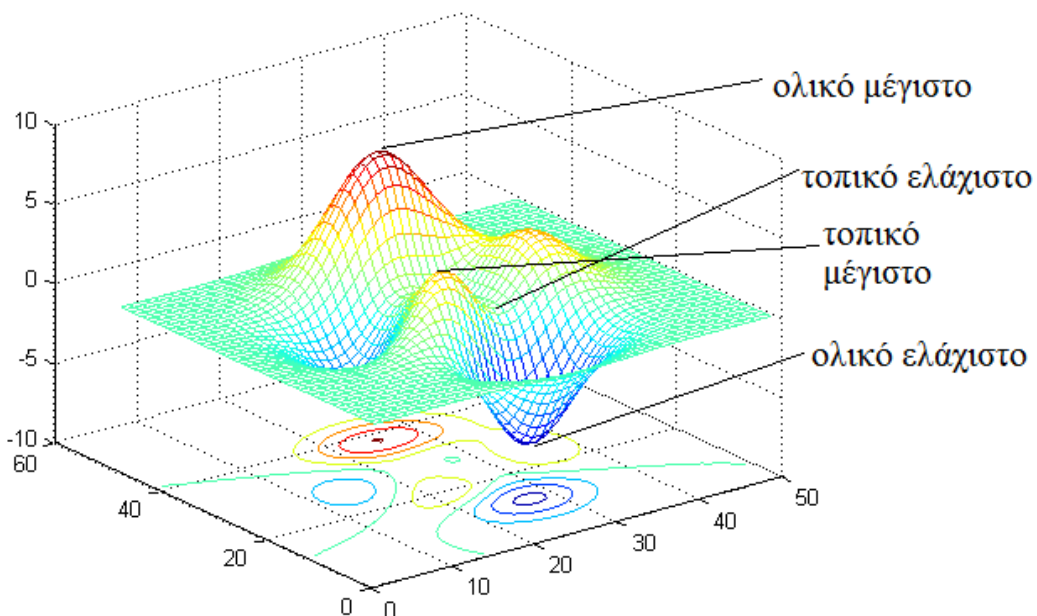
Σχήμα 5.3 Περιορισμοί σε πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού και αποτελεσματικότητά αυτών

5.2.2 Αλγόριθμοι ολικής βελτιστοποίησης

Οι αλγόριθμοι ολικής βελτιστοποίησης έχουν δημιουργηθεί έτσι ώστε να βρίσκεται λύση σε προβλήματα τα οποία έχουν αντικειμενικές συναρτήσεις αλλά και περιορισμούς πάσης φύσεως. Δηλαδή είναι ειδικοί αλγόριθμοι, ανάλογα με την εκάστοτε περίπτωση, ειδικά μελετημένοι έτσι ώστε να αντιμετωπίζουν για παράδειγμα ασυνέχειες στους περιορισμούς ή άλλους αλγορίθμους ως περιοριστικούς παράγοντες κ.ά. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιοι αλγόριθμοι που έχουν δημιουργηθεί ακριβώς για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων και διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες : τους ντετερμινιστικούς αλγορίθμους και τους μη ντετερμινιστικούς ή στοχαστικούς αλγορίθμους.

Ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι:

Ορίζουμε ως ντετερμινιστικούς αλγορίθμους, τους αλγορίθμους οι οποίοι συμπεριφέρονται με έναν τρόπο ο οποίος είναι προβλέψιμος. Με μία δεδομένη είσοδο θα παράγεται η ίδια έξοδος περνώντας πάντα από τις ίδιες ενδιάμεσες καταστάσεις. Αναφορικά με τις μαθηματικές εξισώσεις ένας ντετερμινιστικός αλγόριθμος έχει μία συγκεκριμένη τιμή για κάθε συγκεκριμένη είσοδο και συνεπώς μία συγκεκριμένη έξοδο. Ο χώρος αναζήτησης μπορεί να εξερευνηθεί αποδοτικά με χρήση της τεχνικής διαίρει και κυρίευε (*divide and conquer*). Όταν όμως η αξιολόγηση μίας πιθανής λύσης είναι πολύπλοκη ή όταν οι διαστάσεις του προβλήματος είναι πολλές, τότε η επίλυση γίνεται δύσκολη και καταλήγει στην πλήρη αναζήτηση του χώρου εφικτών λύσεων αυξάνοντας έτσι και την πολυπλοκότητα της επίλυσης του προβλήματος με ότι αυτό συνεπάγεται για τον υπολογιστικό χρόνο που χρειάζεται για να βρεθεί η λύση.



Σχήμα 5.4 Ολικά και τοπικά μέγιστα

Στοχαστικοί αλγόριθμοι:

Οι αλγόριθμοι αυτής της κατηγορίας είναι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούν τυχαίες μεταβλητές. Οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι μπορούν να χειριστούν στοχαστικούς περιορισμούς ή μπορούν να περιέχουν μεθόδους με τυχαίες επαναλήψεις. Γενικότερα πρόκειται για μία οικογένεια πιθανοτικών αλγορίθμων βασισμένη συνήθως (αλλά όχι πάντα) στην προσέγγιση *Monte-Carlo*. Αυτοί οι αλγόριθμοι επιδιώκουν την εύρεση της λύσης σε όσο το δυνατόν μικρότερο υπολογιστικό χρόνο ωστόσο μπορεί να καταλήξουν σε κάποιο τοπικό βέλτιστο. Αποτελούν εκτεταμένο αντικείμενο μελέτης και συνήθως μπορούν να δημιουργηθούν αποκλειστικά και μόνο για την επίλυση ενός προβλήματος και όχι μιας ευρείας οικογένειας προβλημάτων λόγω της στοχαστικής συμπεριφοράς που παρουσιάζουν.

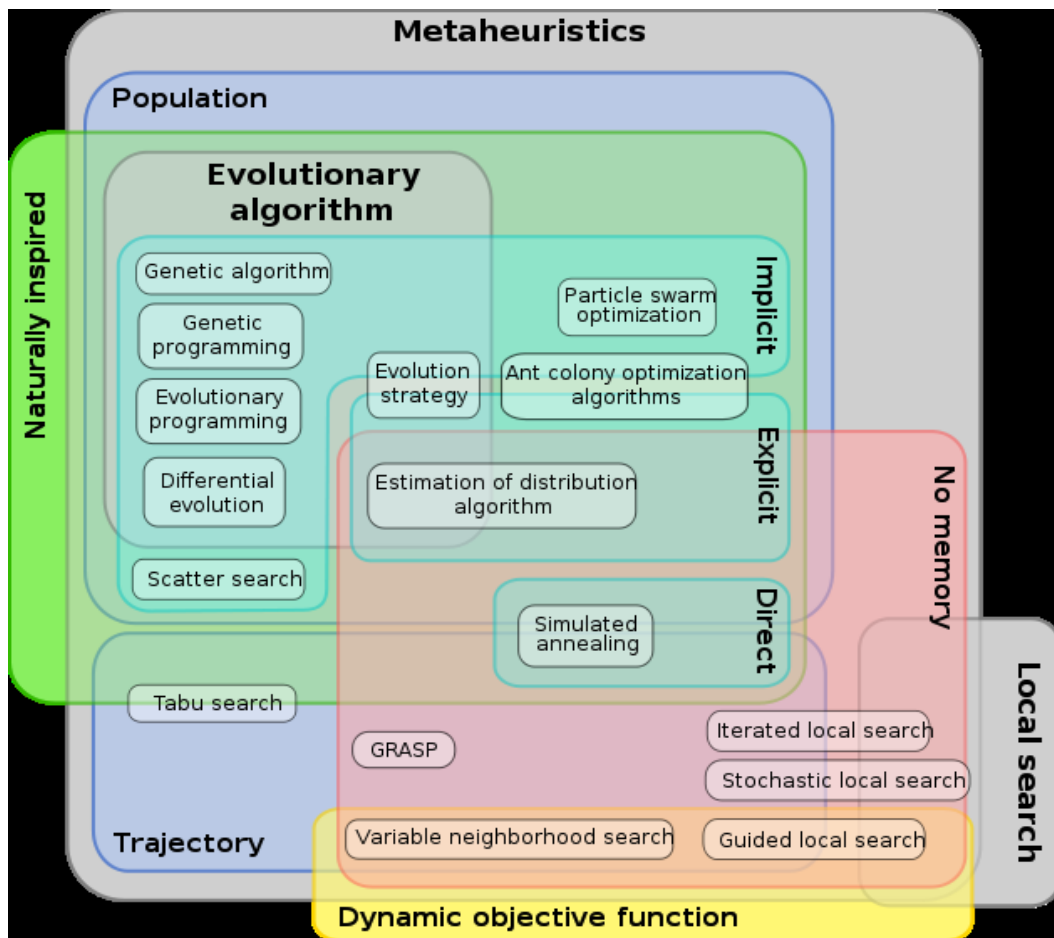
Παρακάτω δίνουμε δύο ορισμούς για τις ευριστικές συναρτήσεις και τις μετά-ευριστικές συναρτήσεις πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση τους.

Ορισμός: Μία ευριστική συνάρτηση είναι το κομμάτι του αλγορίθμου βελτιστοποίησης που χρησιμοποιεί τις ήδη διαθέσιμες/υπάρχουσες πληροφορίες που έχουν συλλεχθεί/υπάρχουν για να καθορίσει ποιά υποψήφια λύση θα εξεταστεί στη συνέχεια ή πώς αυτή θα παραχθεί.

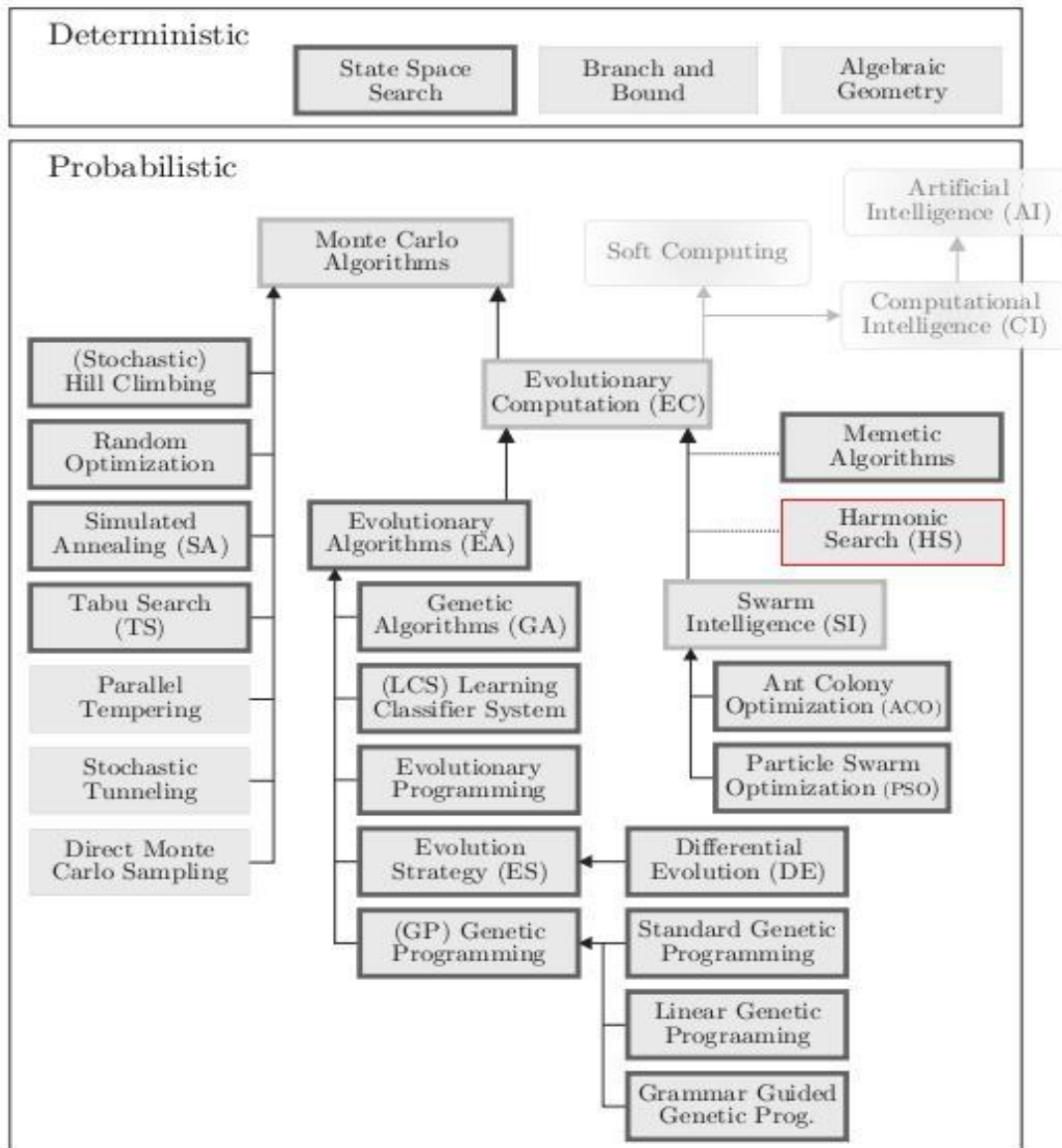
Ορισμός: Μετα-ευριστική είναι η μέθοδος επίλυσης γενικών κλάσεων προβλημάτων. Συνδυάζει αντικειμενικές συναρτήσεις ή ευριστικές συναρτήσεις με έναν αφαιρετικό και αποδοτικό τρόπο, συνήθως χωρίς να επεκτείνεται βαθύτερα στη δομή τους .

Οι ευριστικές συναρτήσεις (*heuristics*) στην ολική βελτιστοποίηση είναι συναρτήσεις, το αποτέλεσμα των οποίων καθορίζει το σύνολο των πιθανών λύσεων που θα εξεταστούν στη συνέχεια της αναζήτησης. Χρησιμοποιούνται ώστε να επιταχύνουν την διαδικασία εύρεσης μίας λύσης εκεί που η αναλυτική αναζήτηση θα ήταν εξαιρετικά χρονοβόρα και ίσως και αδύνατη. Οι ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι τις χρησιμοποιούν για να καθορίσουν τη σειρά εξέτασης των πιθανών λύσεων, ενώ στους στοχαστικούς αλγορίθμους χρησιμοποιούνται απλά για περαιτέρω υπολογισμούς στα στοιχεία που επιλέγονται από το χώρο αναζήτησης. Η πιο βασική και παλιά μέθοδος που χαρακτηρίζεται ως ευριστική είναι η μέθοδος της δοκιμής και του λάθους (*trial and error*) κατά την οποία δοκιμάζεται μία λύση και αν επιστρέψει λάθος (*error*) τότε δοκιμάζεται μία επόμενη. Όμοια και οι μετ-ευριστικοί αλγόριθμοι βελτιστοποιούν ένα πρόβλημα χρησιμοποιώντας επαναληπτικές μεθόδους και έχοντας ως αναφορά κάποιες υποψήφιες περιοχές στις οποίες μπορεί να εμφανίζεται η λύση. Μπορούν να ψάξουν μεγάλες περιοχές για την απαιτούμενη λύση όμως δεν εξασφαλίζουν πως θα βρεθεί λύση. Συνήθως οι μετ-ευριστικοί αλγόριθμοι ενσωματώνουν στοχαστική συμπεριφορά χωρίς όμως αυτό να είναι απόλυτο.

Παρακάτω παρουσιάζονται δύο σχήματα. Στο πρώτο σχήμα φαίνονται οι μετευριστικοί αλγόριθμοι ενώ στο δεύτερο φαίνεται πως συνδέονται μεταξύ τους οι διάφοροι αλγόριθμοι ντετερμινιστικοί και στοχαστικοί μαζί.



Σχήμα 5.5 Οικογένεια Μετ-Ευριστικών Αλγορίθμων



Σχήμα 5.6 Κατηγοριοποίηση Μεθόδων Ολικής Βελτιστοποίησης

Δείγματα του χώρου αναζήτησης ή μοντέλα τα οποία βασίζονται σε φυσικά φαινόμενα συνιστούν τον κατάλληλο συνδυασμό βάσει του οποίου ο ευριστικός αλγόριθμος επιλέγει ποια είναι η επόμενη υποψήφια λύση. Για παράδειγμα η προσομοιωμένη απόπτωση (*simulated annealing*) χρησιμοποιεί την αξιολόγηση λύσεων σύμφωνα με μία συνάρτηση πιθανότητας που εντοπίζεται σε φυσικές διεργασίες δημιουργίας κρυσταλλικών δομών στη φύση. Ένα άλλο παράδειγμα είναι ο αλγόριθμος αναρρίχησης λόφων (*hill-climbing search*), ο οποίος προσομοιώνει την αναζήτηση του βέλτιστου σημείου με την εύρεση του υψηλότερου σημείου ενός λόφου, ενώ ο αλγόριθμος *Tabu search* επεκτείνει αυτή τη λογική προσθέτοντας τον όρο *tabu* (απαγορευμένη κατάσταση) στις περιοχές που έχουν ήδη εξεταστεί. Επιπρόσθετα υπάρχουν οι εξελικτικοί αλγόριθμοι (*evolutionary algorithms*) που προσομοιώνουν τη συμπεριφορά της φυσικής εξέλιξης. Με αυτό τον τρόπο κατάλληλα δημιουργημένοι αλγόριθμοι προσομοιώνουν λειτουργίες όπως η διασταύρωση, η μετάλλαξη, η φυσική επιλογή και η επιβίωση για να καταλήξει ο

αλγόριθμος στη βέλτιστη λύση μέσω πολλών γενεών απογόνων. Σε διάφορα προβλήματα συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας έχουν βρει εφαρμογή οι εξελικτικοί αλγόριθμοι, όπως στο σχεδιασμό επέκτασης του συστήματος παραγωγής και μεταφοράς, στο σχεδιασμό της αέργου ισχύος, στην οικονομική κατανομή φορτίου αλλά και αλλού. Μία οικογένεια αλγορίθμων που έχει γίνει δημοφιλής τα τελευταία χρόνια είναι οι αλγόριθμοι κοινωνικής νοημοσύνης (*Swarm Intelligence*). Βασίζονται στη λογική αυτο-οργανωμένων, αποκεντρωμένων και συλλογικών συστημάτων. Λειτουργούν με βάση ένα πληθυσμό από άτομα (*agents*) που αλληλεπιδρούν τοπικά μεταξύ τους αλλά και με το περιβάλλον τους. Τα άτομα ακολουθούν συγκεκριμένους απλούς κανόνες, και ενώ δεν υπακούν σε κάποιους κεντρικούς κανόνες, η μεταξύ τους αλληλεπίδραση τα καθοδηγεί στην τοπική και ολική τους συμπεριφορά στο χώρο αναζήτησης, καταλήγοντας έτσι σε μία "ευφυή" ολική συμπεριφορά την οποία δεν αντιλαμβάνονται τα άτομα. Φυσικά παραδείγματα νοημοσύνης σμήνους είναι οι αποικίες μυρμηγκιών (*ant colony optimization*), σμήνη πουλιών, ψαριών, και αποικίες βακτηρίων.

Τέλος να σημειωθεί πως υπάρχουν τεχνικές ολικής βελτιστοποίησης οι οποίες δεν είναι κατασκευασμένες για να βρίσκουν ένα ελάχιστο ή ένα μέγιστο αλλά για να μπορούν να αποφασίζουν σε προβλήματα αποφάσεων και σύνθετα προβλήματα βελτιστοποίησης όπου βελτιστοποιείται ένα σύνολο F από αντικειμενικές συναρτήσεις f_i , και καθεμία αντιπροσωπεύει ένα κριτήριο προς βελτιστοποίηση.

Περισσότερες πληροφορίες για πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση μπορούν να ευρεθούν στις παρακάτω πηγές όπου και αναφέρονται έννοιες όπως βελτιστοποίηση κατά Pareto, προγραμματισμός στόχων (Goal programming) χωρίς όμως να γίνεται περιορισμός σε αυτές τις μεθόδους μόνο καθώς υπάρχουν αρκετές ανάλογα με το είδος της βελτιστοποίησης που ζητείται αλλά και όλες τις ιδιαίζουσες συνθήκες που μπορεί να επικρατούν από πρόβλημα σε πρόβλημα.

5.3 Ο Αρμονικός Αλγόριθμος (Harmony Search Algorithm)

5.3.1 Εισαγωγή

Στην επιστήμη των υπολογιστών, ο αρμονικός αλγόριθμος (HS) είναι ένας μιμητικός αλγόριθμος (επίσης γνωστός ως metaheuristic αλγόριθμος, soft computing algorithm or evolutionary algorithm) εμπνευσμένος από τη διαδικασία αυτοσχεδιασμού των μουσικών. Στον συγκεκριμένο αλγόριθμο, κάθε μουσικός (ο οποίος λαμβάνει μία μεταβλητή απόφαση) παίζει (δηλαδή παράγει) μια σημείωση (δηλαδή μία συγκεκριμένη τιμή) για την εξεύρεση καλύτερης αρμονίας (δηλαδή μίας παγκόσμιας βέλτιστης λύσης του προβλήματος του – Global Solution). Ο αλγόριθμος αναζήτησης Harmony Search έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Δεν απαιτεί υπολογισμούς διαφορικών, με αποτέλεσμα να μπορεί να επιλύσει ή να λάβει υπόψη του ασυνεχείς λειτουργίες, καθώς και συνεχείς συναρτήσεις.
- Μπορεί να χειριστεί διακριτών μεταβλητών συναρτήσεις και διακριτές μεταβλητές το ίδιο εύκολα με συνεχείς συναρτήσεις και συνεχείς μεταβλητές.
- Δεν απαιτείται αρχική ρύθμιση στην αξία των μεταβλητών.
- Είναι απαλλαγμένος από προκαθορισμένα σημεία εκκίνησης της αναζήτησης λύσεως.

- Μπορεί να ξεφύγει από τα τοπικά βέλτιστα.
- Μπορεί να ξεπεράσει το μειονέκτημα των γενετικών αλγορίθμων σύμφωνα με τα οποία ο γενετικός αλγόριθμος λειτουργεί καλά μόνο αν η σχέση μεταξύ των μεταβλητών σε ένα χρωμόσωμα είναι προσεκτικά μελετημένη. Αν οι γειτονικές μεταβλητές σε ένα χρωμόσωμα έχουν ασθενέστερη σχέση από τις απομακρυσμένες μεταβλητές, με βάση τη θεωρία δημιουργίας των γενετικών αλγορίθμων (building block theory) μπορεί να μην λειτουργεί καλά, λόγω πιθανής μίξης μεταβλητών (crossover operation).
- Ορισμένες παραλλαγές του HS δεν απαιτούν ειδικές αλγοριθμικές παραμέτρους, όπως HMCR και PAR, με αποτέλεσμα οι αρχάριοι χρήστες μπορούν εύκολα να χρησιμοποιούν τον αλγόριθμο.
- Έχει στοχαστική παράγωγο που εφαρμόζεται σε διακριτές μεταβλητές και την οποία χρησιμοποιεί για αναζήτηση κατεύθυνσης όπως οι εμπειρίες ενός μουσικού που συνθέτει αρμονίες [6][7].

Παρακάτω περιγράφονται τα βήματα με τα οποία καθορίζεται το πρόβλημα που επιθυμούμε να λύσει ο αρμονικός αλγόριθμος.

5.3.2 Οι παράμετροι του αλγορίθμου

Ο αρμονικός αλγόριθμος προσπαθεί να βρει ένα διάνυσμα x που βελτιστοποιεί (ελαχιστοποιεί ή μεγιστοποιεί) μια συγκεκριμένη λειτουργία του δοθέντος προβλήματος.

Ο αλγόριθμος έχει τα εξής βήματα που χαρακτηρίζονται ως παράμετροι του αλγορίθμου και επιλέγονται κατάλληλα ανάλογα με την φύση του προβλήματος και την έκταση του :

Βήμα 1: Δημιουργία τυχαίων διανυσμάτων $[x^1, \dots, x^{hms}]$ όσο το HMS (Harmony Memory Size), και στη συνέχεια τα αποθηκεύει στη μνήμη (HM-Harmony Memory).

$$HM = \begin{pmatrix} x_1^1 & \dots & x_n^1 & f(x^1) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ x_1^{hms} & \dots & x_n^{hms} & f(x^{hms}) \end{pmatrix}$$

Βήμα 2: Δημιουργία ενός νέου διανύσματος x' . Για κάθε συνιστώσα x'_i συμβαίνουν τα ακόλουθα.

- με πιθανότητα HMCR (λαμβάνοντας υπόψη την μνήμη του αρμονικού αλγορίθμου το HMCR κυμαίνεται από $0 \leq HMCR \leq 1$) επιλέγεται μία αποθηκευμένη τιμή από HM.

- με πιθανότητα $(1 - \text{HMCR})$, διαλέγεται μια τυχαία τιμή εντός του επιτρεπόμενου εύρους.

Βήμα 3: Εκτέλεση πρόσθετων εργασιών, εάν η τιμή στο Βήμα 2 προήλθε από τον HM.

- με πιθανότητα par (pitch adjusting rate, $0 \leq \text{par} \leq 1$), αλλάζει η x_i' κατά ένα μικρό ποσό $x_i' \leftarrow x_i' + \delta$ ή $x_i' \leftarrow x_i' - \delta$ για διακριτές μεταβλητές ή $x_i' \leftarrow x_i' + f_w \cdot u(-1,1)$ για συνεχείς μεταβλητές.
- με πιθανότητα $1 - \text{par}$, δεν συμβαίνει τίποτα.

Βήμα 4: Εάν x' είναι καλύτερο από το χειρότερο x^{worst} φορέα στον HM, αντικαταστήστε το με x' .

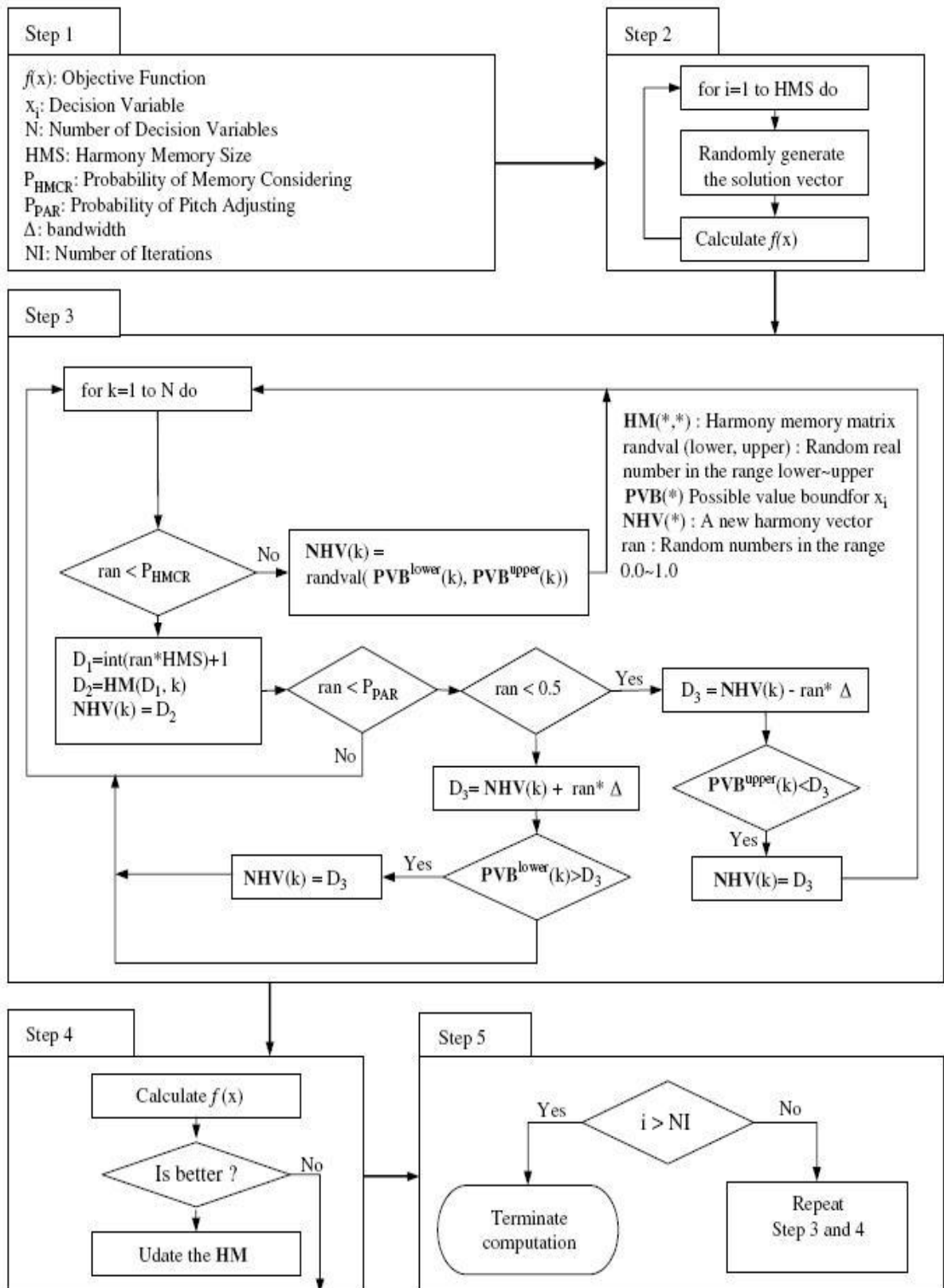
Βήμα 5: Επαναλάβετε το βήμα 2 έως το βήμα 4 μέχρι το κριτήριο τερματισμού (π.χ. μέγιστες επαναλήψεις) να ικανοποιηθεί.

Οι παράμετροι που δηλώνονται για την λειτουργία του αλγορίθμου ανάλογα με το πρόβλημα και την ζητούμενη επίλυση του (ακριβείας, γρήγορη, σύντομη κτλ) είναι οι παρακάτω :

- HMS = το μέγεθος της μνήμης του αρμονικού αλγορίθμου. Κυμαίνεται γενικά από 1 έως 100. (μία τυπική τιμή = 30)
- HMCR = το ποσοστό της επιλογής μιας τιμής από τη μνήμη του αρμονικού αλγορίθμου. Κυμαίνεται γενικά 0,7 έως 0,99. (μία τυπική τιμή = 0.9)
- par = το ποσοστό της επιλογής μιας γειτονικής αξίας. Κυμαίνεται γενικά από 0,1 έως 0,5. (μία τυπική τιμή = 0,3)
- δ = η ποσότητα μεταξύ δύο γειτονικών τιμών σε διακριτό σύνολο υποψηφίων.
- bw (το bandwidth) = το ύψος της μέγιστης αλλαγής στην γειτονική αλλαγή. Αυτό μπορεί να είναι $(0,01 \times \text{επιτρεπόμενο φάσμα})$ να $(0.001 \times \text{επιτρέπεται σειρά})$.

Το bw, όπως θα δούμε παρακάτω, δεν είναι πάντοτε χρήσιμο καθώς μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα κατά την επίλυση, που αντιμετωπίζονται μόνο με την αφαίρεσή του και την ελευθερία μίας πιο ευρείας αναζήτησης από μέρους του αλγορίθμου.

Παρακάτω ακολουθεί ένα αναλυτικό διάγραμμα ροής που απεικονίζει όλα τα βήματα τα οποία εκτελούνται έτσι ώστε ο αρμονικός αλγόριθμος να επιστρέψει μία λύση σε ένα δοθέν πρόβλημα.



Σχήμα 5.7 Διάγραμμα Ροής του Αρμονικού Αλγορίθμου

5.4 Particle Swarm Optimization

5.4.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια της βελτιστοποίησης συνεχών μη γραμμικών συναρτήσεων, αναπτύχθηκε η στοχαστική μέθοδος των ατόμων σμήνους (*Particle Swarm Optimization*) από τους J. Kennedy και R. Eberhart. Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε μέσω της προσομοίωσης απλοποιημένων κοινωνικών μοντέλων, και ενώ υφίσταται η μεταφορά στο κοινωνικό μοντέλο, το αλγόριθμος μπορεί να υπάρξει και χωρίς τη μεταφορική του έννοια. Η βασική ιδέα είναι σχετικά απλή και αναπτύσσεται με λίγες γραμμές προγραμματιστικού κώδικα. Χρησιμοποιεί συγκεκριμένους μαθηματικούς τελεστές, και ενώ συγκλίνει ταχύτατα, η υπολογιστική του χρονική και χωρική πολυπλοκότητα είναι μικρή (μικρές απαιτήσεις σε μνήμη), γι' αυτό έχει βρεί εφαρμογή σε πλήθος προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Η μέθοδος PSO έχει ρίζες σε δύο βασικές μεθοδολογίες. Η πιο προφανής είναι η οικογένεια της «τεχνητής ζωής» και στα σμήνη πουλιών, ψαριών και γενικά στη θεωρία σμήνους. Επίσης σχετίζεται άμεσα με τους εξελικτικούς αλγορίθμους (*evolutionary computation*) και στους γενετικούς αλγόριθμους (*genetic algorithms*). Συνοψίζοντας, τα βασικά της πλεονεκτήματα, συγκρινόμενη με άλλες μεθόδους, είναι τα εξής:

- *Ταχύτερη σύγκλιση*, η μέθοδος PSO μπορεί να παράγει αποτελέσματα ίδιας ποιότητας σε σημαντικά λιγότερες αξιολογήσεις υποψηφίων λύσεων (*fitness evaluations*) και περιορισμών.
- *Ευέλικτη* ως προς το εύρος των προβλημάτων που μπορούν να λυθούν. Μπορεί να εφαρμοστεί σε προβλήματα με συναρτήσεις που παρουσιάζουν ασυνέχειες, που δεν είναι παραγωγίσιμες σε σημεία, και μη κυρτές συναρτήσεις, όπου οι μέθοδοι μερικών παραγώγων δεν είναι αποτελεσματικές
- *Ποιοτική*, τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι πιο βελτιωμένα συγκρινόμενα με αυτά αντίστοιχων μεθόδων στη βιβλιογραφία, και ο αλγόριθμος έχει εξαιρετική ικανότητα να μην εμπλέκεται σε τοπικά βέλτιστα. Συγκρινόμενος με τους γενετικούς αλγορίθμους και άλλες ευριστικές τεχνικές, έχει ένα ευέλικτο και ισορροπημένο μηχανισμό βελτίωσης της ικανότητας ολικής και τοπικής αναζήτησης.
- «*Φτηνότερη*» σε υπολογιστική ισχύ, καθώς ο αλγόριθμος λειτουργεί με «διορατικότητα» και δεν χρειάζεται μετασχηματισμούς που καταναλώνουν υπολογιστική ισχύ, όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι.

Ωστόσο, υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί στη χρήση του, κυρίως λόγω της στοχαστικής φύσης των εξελικτικών αλγορίθμων, που καθιστούν δύσκολο το χειρισμό των περιορισμών ισότητας, και έτσι είναι δύσκολη η εύρεση συνόλου αρχικών λύσεων στην εφικτή περιοχή, ειδικά σε προβλήματα με «στενή» εφικτή περιοχή.

5.4.2 Βασικά χαρακτηριστικά της μεθόδου

Οι αλγόριθμοι PSO βελτιστοποιούν μία αντικειμενική συνάρτηση διεξάγοντας μία στοχαστική αναζήτηση βασισμένη στον «πληθυσμό» του αλγορίθμου. Ο πληθυσμός αποτελείται από πιθανές λύσεις, που καλούνται άτομα (*particles*, μεταφορά των ατόμων ενός σμήνους), τα οποία στην αρχή της διαδικασίας

αρχικοποιούνται τυχαία εντός του χώρου αναζήτησης, της εφικτής περιοχής δηλαδή, και «πετούν» ελεύθερα εντός του πολυδιάστατου χώρου αναζήτησης. Στη διαδικασία των επαναλήψεων, κάθε άτομο ανανεώνει την «ταχύτητα» (*velocity*) και τη «θέση» (*position*) του, βασίζόμενο στην βέλτιστη προηγούμενη εμπειρία του ίδιου (*cognitive*) αλλά και του συνολικού πληθυσμού έως τη συγκεκριμένη στιγμή (*social*). Ο κανόνας της ανανέωσης της θέσης και της ταχύτητας έχει το ρόλο του να κατευθύνει το «σμήνος» προς μία βέλτιστη περιοχή με καλύτερη τιμή για την αντικειμενική συνάρτηση, βάση μίας σχέσης ή και μίας συνάρτησης καταλληλότητας (*fitness function*), και τελικά όλα τα άτομα συγκεντρώνονται γύρω από τη βέλτιστη περιοχή ή σημείο, όπου ελέγχεται πιο σχολαστικά ο χώρος αναζήτησης για μεγαλύτερη ακρίβεια. Έτσι, η βασική μέθοδος συνίσταται από τα εξής βήματα:

- **Βήμα 1ο:** Αρχικοποίηση. Στην αρχή της επαναληπτικής διαδικασίας ρυθμίζεται η θέση και η ταχύτητα όλων των ατόμων τυχαία, εντός της εφικτής περιοχής του προβλήματος, ώστε να ισχύουν οι περιορισμοί ισότητας και ανισότητας.

- **Βήμα 2ο:** Ανανέωση της ταχύτητας. Σε κάθε επανάληψη, οι ταχύτητες όλων των ατόμων ανανεώνονται με βάση την ακόλουθη σχέση

$$\vec{u}_{i+1} = \omega \vec{u}_i + c_1 r_1 (\vec{p}_{i,best} - \vec{p}_i) + c_2 r_2 (\vec{g}_{best} - \vec{p}_i)$$

όπου p_i και u_i είναι η θέση και η ταχύτητα του ατόμου i , αντίστοιχα, $p_{i,best}$ και g_{best} είναι οι θέσεις με την καλύτερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που έχει βρεθεί έως αυτή τη στιγμή από το άτομο i και ολόκληρο τον πληθυσμό, αντίστοιχα.

Οι μεταβλητές r_1 , r_2 λαμβάνουν τυχαία τιμή στο διάστημα $[0, 1]$ εισάγοντας ένα στοχαστικό χαρακτήρα στην αναζήτηση, ενώ οι c_1 , c_2 αποτελούν παράγοντες βαρύτητας. Η ω είναι μία παράμετρος που ελέγχει τη δυναμική της «πτήσης» και καθορίζει το βαθμό στον οποίο τα άτομα αναζητούν λύσεις στην κοντινή τους περιοχή ή ακολουθούν ταχύτερα το ολικό καλύτερο άτομο, και παίζει ουσιαστικό ρόλο στην αποφυγή των τοπικών βέλτιστων. Μεταβάλλεται γραμμικά από τη σχέση:

$$\omega = \omega_{max} - ((\omega_{max} - \omega_{min}) / iterations) * iter$$

όπου ω_{max} , ω_{min} η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή που έχουμε ορίσει, αντίστοιχα, $iterations$ ο συνολικός αριθμός των επαναλήψεων και $iter$ η συγκεκριμένη επανάληψη.

- **Βήμα 3ο:** Ανανέωση της θέσης. Μεταξύ συνεχόμενων επαναλήψεων, οι θέσεις όλων των ατόμων ανανεώνονται σύμφωνα με τον ακόλουθο κανόνα:

$$\vec{p}_{i+1} = \vec{p}_i + \vec{u}_i$$

- **Βήμα 4ο:** Ανανέωση της μνήμης. Τα στοιχεία $\sim p_{i,best}$ και $\sim g_{best}$ ανανεώνονται εφόσον οι αντίστοιχες προϋποθέσεις ισχύουν:

$$\begin{array}{ll} \vec{p}_{i,best} = \vec{p}_i & \text{εάν } f(\vec{p}_i) < f(\vec{p}_{i,best}) \\ \vec{g}_{best} = \vec{p}_i & \text{εάν } f(\vec{p}_i) < f(\vec{g}_{best}) \end{array}$$

όπου $f(x)$ είναι η αντικειμενική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση.

- **Βήμα 5ο:Εξέταση κριτηρίων τερματισμού.** Ο αλγόριθμος επαναλαμβάνει τα βήματα 2 έως 4 έως ότου να ικανοποιούνται συγκεκριμένες συνθήκες τερματισμού. Μετά τον τερματισμό, εξάγονται οι λύσεις g_{best} και $f(g_{best})$.

5.4.3 Πολυκριτηριακή Προσέγγιση

Η παραπάνω διαδικασία, έχει σα σκοπό την αναζήτηση βέλτιστου για μία αντικειμενική συνάρτηση. Πολλές φορές όμως τα κριτήρια με βάση τα οποία μια λύση θεωρείται βέλτιστη είναι περισσότερα από ένα. Παραπάνω αναφερθήκαμε στην αριστεία κατά Pareto. Είναι μια από τις προσεγγίσεις μέσω της οποίας θα ξεχωρίζουμε τις λύσεις που θα κρατάμε και εν τέλη θα τυπώνει στο τέλος ο αλγόριθμος μας. Στη ουσία με την PSO θα προσπαθήσουμε να προσεγγίσουμε το μέτωπο Pareto για το συγκεκριμένο πρόβλημα και τις υπό βελτιστοποίηση αντικειμενικές.

Βελτιστοποίηση κατά Pareto

Η μαθηματική θεμελίωση της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης υπό ανταγωνιστικά κριτήρια που λαμβάνονται υπόψη με έναν ίσο τρόπο έγινε από τον Vilfredo Pareto. Η αριστεία Pareto έχει εφαρμοστεί εκτενώς στην οικονομική θεωρία, στη θεωρία παιγνίων, σε τεχνικά προβλήματα, ακόμη και σε κοινωνικές επιστήμες. Ορίζεται ένα μέτωπο (*frontier*) λύσεων που μπορεί να προκύψει από την «ανταπόδοση» (*trade-off*) πόρων μεταξύ ανταγωνιστικών αντικειμενικών συναρτήσεων με έναν βέλτιστο τρόπο. Χρησιμοποιώντας το παραγόμενο «μέτωπο» ο αποφασίζων (*decision-maker*, είτε άνθρωπος είτε υπολογιστής) μπορεί τελικά να επιλέξει τη ρύθμιση που θα καλύπτει βέλτιστα τον αρχικό σχεδιασμό

Ορισμός (Κυριαρχία-Domination):

Ένα στοιχείο x_1 κυριαρχεί (είναι προτιμότερο από) ένα στοιχείο x_2 εάν το x_1 είναι «καλύτερο» από το x_2 σε τουλάχιστον μία αντικειμενική συνάρτηση και όχι «χειρότερο» σε όλες τις υπόλοιπες.

Ορισμός (Pareto optimal):

Ένα στοιχείο $x \in X$ είναι άριστο κατά Pareto (Pareto optimal) ή μη κυριαρχούμενο, εάν δεν κυριαρχείται από κανένα άλλο στοιχείο στο χώρο αναζήτησης X του προβλήματος. Με τους όρους της βελτιστοποίησης Pareto, το X καλείται σύνολο Pareto ή μέτωπο Pareto (Pareto Frontier).

Με βάση τις παραπάνω παραδοχές, η βελτιστοποίηση μας ουσιαστικά είναι να βρούμε μία όσο καλύτερη προσέγγιση του συνόλου αυτών των μη κυριαρχούμενων λύσεων ή με άλλα λόγια το μέτωπο Pareto. Για αυτό το σκοπό ορίζουμε επιπλέον στα παραπάνω περιγραφέντα βήματα και την αποθήκευση των μη κυριαρχούμενων λύσεων που θα βρίσκονται κατά την αναζήτηση σε ένα εξωτερικό αρχείο (*archive*). Σε κάθε επανάληψη, κάθε υποψήφια λύση θα εξετάζεται σε σύγκριση με κάθε στοιχείο αυτού του αρχείου. Αν δεν είναι κυριαρχούμενη από καμία εκ των λύσεων που είναι αποθηκευμένες τότε θα προστίθεται στο αρχείο, ειδάλλως θα απορρίπτεται. Όμως δεν μπορούμε να προσθέτουμε επ' άπειρο λύσεις σε αυτό το αρχείο. Το μέγεθος

αυτού είναι ένας από τους καθοριστικούς παράγοντες της ταχύτητας εκτέλεσης του αλγορίθμου. Αυτό έχει σαν το αρχείο μας να επιλέγεται να έχει καθορισμένο μέγεθος. Αυτό μας περιορίζει, και μας αναγκάζει να ορίσουμε ένα δεύτερο κριτήριο για αντικατάσταση λύσεων στο archive.

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά το οποίο είναι αναγκαίο και επιθυμητό είναι η διασπορά του μετώπου Pareto. Αυτό θα είναι και το δεύτερο κριτήριο με βάση το οποίο θα γίνεται η διαλογή των λύσεων. Υπάρχουν πάρα πολλοί τρόποι που έχουν προταθεί για να το καταφέρουν αυτό, με πιο διαδεδομένες το Crowding Distance, το e-Dominance και το niche-count.

Για τη συγκεκριμένη διπλωματική και υλοποίηση θα κάνουμε χρήση του Crowding Distance[24] μιας και είναι υπολογιστικά ελαφρύ και φαίνεται να έχει πολύ καλά αποτελέσματα σε σύγκριση και με τις άλλες μεθόδους. Πρακτικά σε κάθε επανάληψη υπολογίζουμε την ευκλείδεια απόσταση του κάθε στοιχείου του αρχείου από τα υπόλοιπα στον χώρο των αντικειμενικών. Για να μπορέσει μια λύση αν προστεθεί στο εξωτερικό αρχείο αφού έχει φτάσει το μέγιστο μέγεθος του δεν θα πρέπει μόνο να είναι μη κυριαρχούμενη αλλά και να έχει μεγαλύτερο Crowding Distance ώστε πρακτικά να συνεισφέρει στη διασπορά του μετώπου. Σε περιπτώσεις ισοπαλιών, μετράται και η απόσταση στον χώρο του διανύσματος απόφασης σαν δευτερεύον κριτήριο.

Συνοπτικά ο αλγόριθμος είναι ο εξής:

```

1: Initialize external Archive
2: for all  $I \in$  particles do
3:   Initialize  $\{x_i, u_i, p_{best}\}_i$  to satisfy Constraints
4: end for
5:  $\{g_{best}\} \leftarrow$  gbestSelection( $p_{best}$ )
6: for all  $it \in$  iterations do
7:   for all particles  $\in$  swarm do
8:     for all dimensions of  $\bar{x}$  do
9:        $u_{it} \leftarrow wu_{it} + c_1r_1(P_{it} - x_{it}) + c_2r_2(G_{it} - x_{it})$ 
10:       $x_{it} \leftarrow x_{it} + u_{it}$ 
11:    end for
12:     $\{x, feasible\} \leftarrow$  Constraints( $x$ )
13:    if feasible then
14:       $\{archive\} \leftarrow$  archiving( $x, archive$ )
15:       $\{p_{best}\} \leftarrow$  evaluatePbest( $x, p_{best}$ )
16:    end if
17:  end for
18:  $\{g_{best}\} \leftarrow$  gbestSelection( $p_{best}$ )
19: end for
20: return  $\{archive\}$ 

```

Μία δεύτερη διαφοροποίηση σε σχέση με την κλασσική μορφή της μεθόδου είναι και ένας μηχανισμός ασαφοποίησης για την επιλογή του Οδηγού του σμήνους. Ο οδηγός επιλέγεται όπως είπαμε και πιο πάνω ως το βέλτιστο μεταξύ των επιμέρους βέλτιστων όλων των σωματιδίων τους σμήνους. Εδώ αυτό το βέλτιστο ορίζεται και πάλι με την αριστεία κατά Pareto. Αφού όμως οριστεί αυτό περνά από τον μηχανισμό

ασαφοποίησης. Ο μηχανισμός αυτός δημιουργεί 10 τυχαία διανύσματα με τυπική απόκλιση 2% και μέση τιμή τον οδηγό (κανονική κατανομή). Έπειτα από τα 10 νέα αυτά διανύσματα προσπαθεί αν βρει το μη κυριαρχούμενο για να είναι ο οδηγός στην επόμενη επανάληψη. Μέσω αυτής της διαδικασίας προσθέτουμε ένα ακόμα στοιχείο στοχαστικότητας στη μέθοδο για να ενισχύσουμε τις διερευνητικές τις δυνατότητες.

Χειρισμός περιορισμών

Η ικανοποίηση των περιορισμών καθορίζει και αν θα βρίσκονται οι λύσεις στην εφικτή περιοχή, συνεπώς είναι απαραίτητος ο έλεγχός τους πριν τη διαδικασία εξαγωγής στοιχείων για το σύνολο Pareto. Για τις περισσότερες προσεγγίσεις βασισμένες σε στοχαστική αναζήτηση, ο τρόπος χειρισμού των περιορισμών πάντα έχει ένα βαθύ αντίκτυπο στην ποιότητα των λύσεων που εξάγονται. Οι κυριότερες στρατηγικές περιλαμβάνουν τακτική απόρριψης, τακτική διόρθωσης, συνάρτηση ποινής κ.ο.κ.. Καθώς η μέθοδος PSO είναι κατά κόρον αλγόριθμος βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς, η τακτική χειρισμού των περιορισμών πρέπει να ενταχθεί σε αυτήν έτσι ώστε να επιλύονται προβλήματα σύνθετων περιορισμών. Στην επιλογή των άριστων κατά Pareto λύσεων, όταν δύο πιθανές λύσεις εξετάζονται, οι περιορισμοί τους εξετάζονται πρώτα. Αν και οι δύο τους ικανοποιούν, η τακτική της κυριαρχίας Pareto εισάγεται στη συνέχεια και θα κρίνει ποια από τις δύο θα επικρατήσει. Αν και οι δύο δεν ανήκουν στην εφικτή περιοχή, τότε απορρίπτονται. Αν η μία καλύπτει τους περιορισμούς και η άλλη όχι, κυριαρχεί η πρώτη. Παρόλο που είναι πολύ απλή σαν λογική, καταλήγει να είναι αρκετά αποδοτικό στην εγγύηση της εφικτότητας των μη κυριαρχούμενων λύσεων κατά την επαναληπτική διαδικασία.

6. Μοντελοποίηση Προβλημάτων και Προσομοιώσεις

6.1 Οικονομική κατανομή φορτίου με περιβαλλοντικούς Περιορισμούς- Μεγάλο Δίκτυο

6.1.1 Εισαγωγή

Ο στόχος της οικονομικής κατανομής φορτίου, είναι ο διαμοιρασμός της παραγωγής ισχύος στις διαθέσιμες μονάδες του δικτύου ελαχιστοποιώντας το κόστος και χωρίς να παραβιάζονται οι τεχνικοί και φυσικοί περιορισμοί του συστήματος[16]. Τα προβλήματα οικονομικής κατανομής φορτίου εν γένη αντιμετωπίζονται με ντετερμινιστικό τρόπο. Αυτή βεβαίως η διατύπωση απέχει κατά πολύ από την πραγματικότητα λόγω της στοχαστικότητας των παραμέτρων που εμπλέκονται σε ένα σύγχρονο δίκτυο. Παράγοντες όπως η ηλεκτρική και θερμική ζήτηση αλλά και η παραγόμενη ηλεκτρική και θερμική ισχύς είναι δύσκολο να προβλεφθούν με βεβαιότητα διότι υπάρχουν αναρίθμητοι απρόβλεπτοι παράγοντες που μπορούν να μεταβάλλουν τις τιμές τους ανά πάσα χρονική στιγμή. Ειδικά, το πρόβλημα ανακύπτει ιδιαίτερα έντονο στις μέρες μας με την αυξημένη διείσδυση μονάδων ΑΠΕ (ιδιαίτερα των Αιολικών και των Φωτοβολταϊκών μονάδων παραγωγής). Οι καιρικές συνθήκες, οι τιμές των καυσίμων, είναι ορισμένοι από τους παράγοντες που μπορούν να μεταβάλλουν τη λύση ενός προβλήματος οικονομικής κατανομής φορτίου. Επομένως, κρίνεται απαραίτητο για μία ολοκληρωμένη προσέγγιση του προβλήματος να αναπτυχθεί ένα στοχαστικό μοντέλο το οποίο θα θεωρεί ότι οι μεταβλητές απόφασης (π.χ. η παραγόμενη ηλεκτρική και θερμική ισχύς) και οι συντελεστές που σχηματίζουν τις συναρτήσεις κόστους αποτελούν στοχαστικές μεταβλητές που ακολουθούν μία γνωστή κατανομή[15][16]. Συνήθως, θεωρούμε η κατανομή που ακολουθούν να είναι η κανονική κατανομή με γνωστή τυπική απόκλιση οπότε η λύση του προβλήματος είναι η μέση τιμή της κάθε μεταβλητής. Σε πρώτο στάδιο θα παρουσιαστεί η μαθηματική περιγραφή του στοχαστικού προβλήματος καθώς και η έννοια του ρίσκου.

Τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν εισαχθεί νέοι περιορισμοί στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα πλαίσια της μείωσης των εκπομπών αερίων NO_x , SO_2 και CO_2 . Οι περιορισμοί αυτοί υποχρεώνουν αφενός τη βιομηχανία και τις μεταφορές και αφετέρου την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας να τους λαμβάνουν υπόψη. Έτσι στον προγραμματισμό παραγωγής και την οικονομική λειτουργία ενός Σ.Η.Ε πρέπει ο αποφασίζων να λαμβάνει μέτρα για την ελαχιστοποίηση όσο το δυνατόν εντός των στόχων εκπομπών αερίων και σε σχέση με την ελαχιστοποίηση του κόστους αλλά και τις υπόλοιπες παραμέτρους, έτσι ώστε να μην παραβιάζονται οι κανόνες που έχουν θεσπιστεί. Σε αυτή τη στρατηγική κεντρικό ρόλο παίζει η διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια με μηδενικούς ρύπους, και μειώνοντας την κατανάλωση και την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα[20][21].

Όμως μεγάλη διείσδυση αιολικών πάρκων σε ένα δίκτυο εισάγει μεγάλη στοχαστικότητα λόγω του ευμετάβλητου της ταχύτητας του ανέμου. Αυτό εισάγει με τη σειρά του αβεβαιότητα ως προς την παραγωγή των πάρκων μία δεδομένη χρονική στιγμή καθώς και θέματα δυναμικής ευστάθειας για το δίκτυο, καθώς σε υψηλά ποσοστά αιολικής διείσδυσης απότομες μεταβολές στη ταχύτητα του ανέμου άρα και στην παραγωγή των πάρκων μπορεί να θέσουν σε κίνδυνο την ομαλή λειτουργία του δικτύου[18].

Πέραν όμως των αιολικών πάρκων και της συμπαραγωγής, δοκιμάζονται και άλλες τεχνολογίες στα πλαίσια των έξυπνων και περιβαλλοντικά φιλικών δικτύων. Μία από αυτές είναι σταθμοί φόρτισης αυτοκινήτων όπου κάνουν χρήση μέρους της ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στις μπαταρίες, ως μέσω στήριξης των αναγκών του δικτύου. Αυτή η τεχνολογία η οποία ονομάζεται Vehicle 2 Grid ευελπιστεί να κάνει χρήση των όλο και πιο δημοφιλών ηλεκτρικών αυτοκινήτων για ανακούφιση των αιχμών του δικτύου και έξυπνη αποθήκευση πλεονασμάτων παραγόμενης ενέργειας σε ώρες χαμηλής ζήτησης. Όμως, αυτό εμπλέκει και τον ανθρώπινο παράγοντα, καθώς απαιτείται από τον οδηγό να έχει συνδεδεμένο το όχημα του συγκεκριμένες ώρες σε προκαθορισμένα σημεία ώστε ο διαχειριστής εύκολα να μπορεί να κατανέμει το φορτίο. Αλλά όπου υπάρχει άνθρωπος υπάρχει και αβεβαιότητα η οποία δυνητικά μπορεί να επιβαρύνει το δίκτυο.

Για την επίλυση τέτοιων πολύπλοκων προβλημάτων πολλές μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί με πιο διαδεδομένη τη Lagrange. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη μέθοδο των μερικών διαφορικών εξισώσεων και εφαρμόζεται με την παραδοχή της συνεχούς διαφορισιμότητας των εξεταζόμενων συναρτήσεων. Όμως, πολλές φορές οι αντικειμενικές προς ελαχιστοποίηση συναρτήσεις εμφανίζουν ασυνέχειες ή να είναι δύσκολος ο προσδιορισμός παραγώγου, καθιστώντας τη μέθοδο χρονοβόρα και πολλές φορές αναξιόπιστη[22][23]. Αυτό το κενό στις μεθόδους βελτιστοποίησης καλύπτουν οι ευριστικοί και μετευριστικοί αλγόριθμοι αναζήτησης οι οποίοι αναζητούν μέσα στον εφικτό χώρο επίλυσης περιοχές όπου η ζητούμενη συνάρτηση βελτιστοποιείται. Η αναζήτηση αυτή πολλές φορές πραγματοποιείται με μεθόδους εμπνευσμένες από τη φύση. Χαρακτηριστικότερα παραδείγματα είναι οι δύο που θα εξετάσουμε σε αυτή τη διπλωματική εργασία. Η PSO (Particle Swarm Optimization) η οποία βασίζεται στην κίνηση των σμηνών των πουλιών και των ψαριών και η Αρμονική Αναζήτηση (Αρμονικός για συντομία), όπου βασίζεται στη διαδικασία αυτοσχεδιασμού των μουσικών (εύρεση καλύτερης αρμονίας).

6.1.2. Αντικειμενικές Συναρτήσεις Συστήματος

6.1.2.1 Αναμενόμενο ωριαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος με διείσδυση αιολικής παραγωγής

Η συνάρτηση λειτουργικού κόστους μιας συμβατικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος περιγράφεται, τις περισσότερες φορές, από την πολυωνυμική συνάρτηση δευτέρου βαθμού[27]:

$$c_{p,i}(p_i) = a_i + \beta_i \cdot p_i + \gamma_i \cdot p_i^2 \quad (2.1\alpha)$$

Στην παραπάνω σχέση θεωρούμε ότι η αβεβαιότητα των τιμών καυσίμων εκφράζεται μέσω των τυχαίων μεταβλητών a_i , β_i , γ_i της συνάρτησης λειτουργικού κόστους, σχέση 5.2.α,. Οι εν λόγω συντελεστές αποτελούν σταθερές για την περίπτωση της ντετερμινιστικής ανάλυσης.

Στόχος της στοχαστικής ανάλυσης είναι να κάνει μία εκτίμηση του λειτουργικού κόστους του κάθε σταθμού παραγωγής. Υπολογίζοντας την αναμενόμενη (ή εκτιμώμενη ή προσδοκώμενη ή μαθηματική ελπίδα) τιμή της συνάρτησης λειτουργικού κόστους παρατηρούμε ότι σχηματίζονται οι ορισμοί της Διακύμανσης (Var – Variance) και της Συνδιακύμανσης (Cov – Covariance), άρα ο παραπάνω τύπος απλοποιείται στον:

$$\bar{c}_{p,i} = \bar{a}_i + \bar{\beta}_i \cdot \bar{p}_i + \bar{\gamma}_i \cdot \bar{p}_i^2 + \bar{\gamma}_i \cdot Var(p_i) + Cov(p_i, \beta_i) + 2\bar{p}_i \cdot Cov(p_i, \gamma_i) \quad (2.1\beta)$$

Γνωρίζοντας, λοιπόν, τη διασπορά της ηλεκτρικής ισχύος και τη συσχέτιση με τους συντελεστές λειτουργικού κόστους επιτυγχάνεται η συμμετοχή της στοχαστικότητας της ηλεκτρικής ισχύος στο πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου. Για απλοποίηση του προβλήματος θεωρείται ότι οι παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς δε συσχετίζεται με τους συντελεστές κόστους και αυτό διότι είναι μία πληροφορία που δύσκολα βρίσκεται με βεβαιότητα. Η σχέση μπορεί με τη βοήθεια του Συντελεστή Μεταβλητότητας $C_V = \sigma/\mu$ (σ : τυπική απόκλιση, μ : μέση τιμή) και του Συντελεστή Συσχέτισης $\rho_{x,y} = Cov(x,y)/\sigma_x \sigma_y$ να γραφτεί σε μία μορφή όμοια με την αρχική συνάρτηση λειτουργικού κόστους. Η μαθηματική επεξεργασία οδηγεί στις παρακάτω εκφράσεις:

$$\begin{aligned} Var(p_i) &= C_{V,p_i}^2 \cdot \bar{p}_i^2 \\ Cov(p_i, \beta_i) &= \rho_{p_i, \beta_i} \cdot C_{V,p_i} \cdot C_{V,\beta_i} \cdot \bar{p}_i \cdot \bar{\beta}_i \quad (2.1\beta-\gamma-\delta) \\ Cov(p_i, \gamma_i) &= \rho_{p_i, \gamma_i} \cdot C_{V,p_i} \cdot C_{V,\gamma_i} \cdot \bar{p}_i \cdot \bar{\gamma}_i \end{aligned}$$

Έτσι, η στοχαστική μορφή της συνάρτησης λειτουργικού κόστους ενός συμβατικού σταθμού γράφεται ως:

$$\bar{c}_{p,i} = \bar{a}_i + \left(1 + \rho_{p_i, \beta_i} \cdot C_{V,p_i} \cdot C_{V,\beta_i}\right) \cdot \bar{\beta}_i \cdot \bar{p}_i + \left(1 + C_{V,p_i}^2 + 2 \cdot \rho_{p_i, \gamma_i} \cdot C_{V,p_i} \cdot C_{V,\gamma_i}\right) \cdot \bar{\gamma}_i \cdot \bar{p}_i^2 \quad (2.1 \epsilon)$$

Η αναμενόμενη τιμή λειτουργικού κόστους δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} \bar{c}_{chp,i} &= \bar{a}_i + \bar{\beta}_i \cdot \bar{p}_i + \bar{\gamma}_i \cdot \bar{p}_i^2 + \bar{\gamma}_i \cdot Var(p_i) + Cov(p_i, \beta_i) + 2\bar{p}_i \cdot Cov(p_i, \gamma_i) + \\ &\bar{\varepsilon}_i \cdot Var(h_i) + Cov(h_i, \delta_i) + 2\bar{h}_i \cdot Cov(h_i, \varepsilon_i) + \\ &\bar{h}_i \cdot Cov(p_i, \zeta_i) + \bar{p}_i \cdot Cov(h_i, \zeta_i) + \bar{\zeta}_i \cdot Cov(p_i, h_i) \end{aligned} \quad (2.1.\zeta)$$

Επομένως η στοχαστική μορφή της συνάρτησης λειτουργικού κόστους ενός σταθμού συμπαραγωγής γράφεται ως:

$$\begin{aligned} \bar{c}_{chr,i} = & \bar{a}_i + \left(1 + \rho_{p_i,\beta_i} \cdot C_{V,p_i} \cdot C_{V,\beta_i}\right) \cdot \bar{\beta}_i \cdot \bar{p}_i + \left(1 + C_{V,p_i}^2 + 2 \cdot \rho_{p_i,\gamma_i} \cdot C_{V,p_i} \cdot C_{V,\gamma_i}\right) \cdot \bar{\gamma}_i \cdot \bar{p}_i^2 + \\ & \left(1 + \rho_{h_i,\delta_i} \cdot C_{V,h_i} \cdot C_{V,\delta_i}\right) \cdot \bar{\delta}_i \cdot \bar{h}_i + \left(1 + C_{V,h_i}^2 + 2 \cdot \rho_{h_i,\varepsilon_i} \cdot C_{V,h_i} \cdot C_{V,\varepsilon_i}\right) \cdot \bar{\varepsilon}_i \cdot \bar{h}_i^2 + \\ & \left(1 + \rho_{p_i,\zeta_i} \cdot C_{V,p_i} \cdot C_{V,\zeta_i} + \rho_{h_i,\zeta_i} \cdot C_{V,h_i} \cdot C_{V,\zeta_i} + \rho_{p_i,h_i} \cdot C_{V,p_i} \cdot C_{V,h_i}\right) \cdot \bar{\zeta}_i \cdot \bar{p}_i \cdot \bar{h}_i \end{aligned} \quad (2.1\eta)$$

Δεν πρέπει βέβαια να αμεληθούν οι απώλειες μεταφοράς στο δίκτυο:

$$P_L = \sum_{i=1}^{n_g} \sum_{j=1}^{n_g} p_i B_{ij} p_j + \sum_{i=1}^{n_g} B_{oi} P_i + B_{00} \quad (2.1\theta)$$

η οποία μπορεί να απλοποιηθεί στην επίσης δευτεροβάθμια (όπου n_g είναι ο συνολικός αριθμός των σταθμών παραγωγής):

$$P_L = \sum_{i=1}^{n_g} \sum_{j=1}^{n_g} p_i B_{ij} p_j \quad (2.1\iota)$$

Επομένως, και οι απώλειες του δικτύου εξαρτώνται από τη στοχαστικότητα της ηλεκτρικής ισχύς του κάθε σταθμού παραγωγής. Όμοια, επομένως, εάν αναπτύξουμε την (5.2.θ) σε σειρά Taylor βρίσκουμε:

$$\begin{aligned} \bar{p}_L = & \sum_{i=1}^{n_g} \sum_{j=1}^{n_g} \bar{p}_i \bar{B}_{ij} \bar{p}_j + \sum_{i=1}^{n_g} \bar{B}_{ii} Var(p_i) + \sum_{i=1}^{n_g-1} \sum_{j=i+1}^{n_g} 2\bar{B}_{ij} Cov(p_i, p_j) + \\ & \sum_{i=1}^{n_g} 2\bar{p}_i Cov(p_i, B_{ii}) + \sum_{i=1}^{n_g} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n_g} 2\bar{p}_i Cov(p_i, B_{ij}) \end{aligned} \quad (2.1\kappa)$$

η οποία γράφεται ως:

$$\begin{aligned} \bar{p}_L = & \sum_{i=1}^{n_g} \left(1 + C_{V,p_i}^2 + 2 \cdot \rho_{p_i,B_{ij}} \cdot C_{V,p_i} \cdot C_{V,B_{ij}}\right) \bar{B}_{ii} \bar{p}_i^2 + \\ & \sum_{i=1}^{n_g} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n_g} \left(1 + \rho_{p_i,p_j} \cdot C_{V,p_i} \cdot C_{V,p_j} + 2 \cdot \rho_{p_i,B_{ij}} \cdot C_{V,p_i} \cdot C_{V,B_{ij}}\right) \cdot \bar{p}_i \cdot \bar{B}_{ij} \cdot \bar{p}_j \end{aligned} \quad (2.1\lambda)$$

Μαθηματική Έκφραση Της Αναμενόμενης Συνάρτησης Συνολικού Λειτουργικού Κόστους

Το εξεταζόμενο ΣΗΕ περιλαμβάνει τέσσερεις (4) διαφορετικούς τύπους μονάδων παραγωγής ισχύος[27]:

- i) Τις συμβατικές θερμικές μονάδες για την παραγωγή μόνο ηλεκτρικής ισχύος, P_i με συνολικό λειτουργικό κόστος:

$$C_i(P_i) = a_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2 \quad (2.1.μ)$$

όπου a_i, β_i, γ_i εκφράζουν τους συντελεστές κόστους για την i -οστή μονάδα και έστω, N_p ο αριθμός των μονάδων.

- ii) Τις συμβατικές θερμικές μονάδες για την παραγωγή μόνο θερμικής ισχύος, T_k με συνολικό λειτουργικό κόστος:

$$C_k(T_k) = a_k + \delta_k T_k + \theta_k T_k^2 \quad (2.1.ν)$$

όπου a_k, δ_k, θ_k εκφράζουν τους συντελεστές κόστους για την k -οστή μονάδα και έστω, N_h ο αριθμός των μονάδων.

- iii) Τις μονάδες ΣΗΘ με απομάστευση για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, O_j και θερμικής ισχύος, H_j με συνολική συνάρτηση λειτουργικού κόστους:

$$C_j(O_j, H_j) = a_j + \beta_j O_j + \gamma_j O_j^2 + \delta_j H_j + \theta_j H_j^2 + \xi O_j H_j \quad (2.1.ξ)$$

όπου $a_j, \beta_j, \gamma_j, \delta_j, \theta_j$ εκφράζουν τους συντελεστές κόστους της j -οστής μονάδας και έστω, N_c ο αριθμός των μονάδων.

- iv) Τις μονάδες παραγωγής αιολικής ισχύος (N_w) – αιολικά πάρκα. Θεωρούμε ότι ένα αιολικό πάρκο μπορεί να αποτελείται από μία ή πολλές ανεμογεννήτριες. Από τον εκάστοτε λειτουργό του συστήματος, σχετικά με τη διείσδυση αιολικής ισχύος, εισάγεται η συνάρτηση, μ για να δηλώσει το επίπεδο ασφάλειας του συστήματος. Στην περίπτωση αυτή η μαθηματική έκφραση της συνάρτησης, μ έχει ως ακολούθως[17]:

$$\mu = \begin{cases} 1, & W \leq W(P_D)_{\min} \\ \frac{W(P_D)_{\max} - W}{W(P_D)_{\max} - W(P_D)_{\min}}, & W_{\min} \leq W \leq W_{\max} \\ 0, & W \geq W(P_D)_{\max} \end{cases} \quad (2.1.ο)$$

όπου, W είναι η αιολική ισχύς που συμμετέχει στο πρόβλημα της οικονομικής κατανομής, $W(P_D)_{\min}$ είναι το κατώτατο όριο διείσδυσης αιολικής ισχύος κάτω από το οποίο το σύστημα θεωρείται ασφαλές, $W(P_D)_{\max}$ είναι το ανώτατο όριο διείσδυσης αιολικής ισχύος πάνω από το οποίο το σύστημα είναι μη ασφαλές (ασταθές) λόγω των έντονων διαταραχών του ανέμου. Τόσο η παράμετρος $W(P_D)_{\min}$ όσο και η $W(P_D)_{\max}$ εξαρτώνται από το συνολικό φορτίο ζήτησης που συμμετέχει στο πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου (θεωρείται γραμμική η σχέση αυτή). Επίσης, $WC = \sum_{l=1}^{N_w} WC_l$ εκφράζει το τρέχον κόστος (κόστη λειτουργίας) της αιολικής παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος που συμμετέχει στο πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου, $WC(P_D)_{\min}$ είναι το κατώτατο όριο κόστους της διείσδυσης αιολικής ισχύος.

Και τα δύο μεγέθη εξαρτώνται από το συνολικό φορτίο ζήτησης που συμμετέχει στο πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου.

Εξαιτίας, λοιπόν, της αβεβαιότητας προσδιορισμού της διαθέσιμης αιολικής ενέργειας, παράγοντες υπερεκτίμησης και υποεκτίμησης για τη διαθέσιμη αιολική ενέργεια θα πρέπει να συμπεριληφθούν. Ο παράγοντας υπερεκτίμησης εύκολα

εξηγείται αφού εάν υποθεθεί ένα καθορισμένο επίπεδο διαθέσιμης αιολικής ισχύος το οποίο δεν ανταποκρίνεται τη χρονική στιγμή που θα απαιτηθεί τότε επιπλέον ισχύς θα πρέπει να αγοραστεί από εναλλακτικές πηγές ή φορτία να αποκοπούν. Στην περίπτωση της υποεκτίμησης, εάν η διαθέσιμη ισχύς το δεδομένο χρονικό διάστημα είναι περισσότερη από την υποτιθέμενη, τότε ισχύς θα χαθεί και είναι λογικό για τον λειτουργό του συστήματος να πληρώσει ένα κόστος στον παραγωγό αιολικής ισχύος γι' αυτό το «χάσιμο». Η πλεονάζουσα αιολική ισχύς μπορεί να πωληθεί σε παρακείμενα ηλεκτρικά συστήματα ή να επαναπροσδιοριστούν οι παραγωγές των συμβατικών σταθμών μέσω νέας οικονομικής κατανομής φορτίου. Διαφορετικά, χάνεται άσκοπα η πλεονάζουσα διαθέσιμη αιολική ισχύς. Προφανώς, αυτές οι περιπτώσεις μπορεί να μοντελοποιηθούν μέσω συναρτήσεων ποινής κόστους τόσο για την περίπτωση της υποεκτίμησης όσο και για την αντίστοιχη της υπερεκτίμησης. Στην παρούσα μελέτη ενσωματώνουμε και τις δύο περιπτώσεις.

Για να χρησιμοποιηθεί όπου απαιτείται και είναι αναγκαίο από τον λειτουργό του συστήματος μικρότερη αιολική ισχύ (W_l) από τη διαθέσιμη (W_{av}), εισάγεται μία συνάρτηση ποινής κόστους για τη διαφορά της διαθέσιμης αιολικής ισχύος από την προγραμματισμένη. Η εν λόγω συνάρτηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανεξάρτητα από το αν ο λειτουργός του συστήματος είναι ιδιοκτήτης η μη των αιολικών μονάδων (ή πάρκων). Η συνάρτηση ποινής κόστους υποεκτίμησης της αιολικής παραγωγής για κάθε ανεμογεννήτρια εκφράζεται ως ακολούθως:

$$C_{w,l}(W_{av,l} - W_l) = k_{p,l}(W_{av,l} - W_l) \quad (2.1.\pi)$$

και της υπερεκτίμησης:

$$C_{r,l}(W_l - W_{av,l}) = k_{r,l}(W_l - W_{av,l}) \quad (2.1.\rho)$$

όπου $k_{p,l}$ ο συντελεστής ποινής κόστους υποεκτίμησης και $k_{r,l}$ ο συντελεστής ποινής κόστους υπερεκτίμησης για την l -οστή αιολική μονάδα, $W_{av,l}$ η διαθέσιμη ισχύς από την l -οστή αιολική μονάδα. Η διαθέσιμη ισχύς θεωρείται μια τυχαία μεταβλητή που ορίζεται στο διάστημα $[0, w_{r,l}]$, όπου w_r η ονομαστική ισχύς εξόδου για κάθε αιολική μονάδα (ή πάρκο) ως άθροισμα των επιμέρους ανεμογεννητριών, όπως θα αναλυθεί λεπτομερέστερα παρακάτω.

Αντίστοιχη αβεβαιότητα εισάγεται και για το σταθμό Vehicle to Grid που υπάρχει στο εξεταζόμενο δίκτυο. Πέραν του κόστους ισχύος του σταθμού χρειάζονται και γι' αυτόν αντίστοιχες σχέσεις που να μοντελοποιούν το κόστος τις αβεβαιότητας για την οικονομική κατανομή. Η υποεκτίμηση θα εκφράζεται αντίστοιχα:

$$C_{p,v}(W_{av} - W_v) = k_{p,v}(W_{av,l} - W_v) \quad (2.1.\sigma)$$

και της υπερεκτίμησης:

$$C_{r,v}(W_v - W_{av,v}) = k_{r,v}(W_v - W_{av,v}) \quad (2.1.τ)$$

Με βάση τα ανωτέρω, η συνάρτηση του συνολικού λειτουργικού κόστους τυποποιείται ως ακολούθως:

$$J_1 = \sum_{i=1}^{N_p} C_i(P_i) + \sum_{j=1}^{N_c} C_j(O_j, H_j) + \sum_{k=1}^{N_h} C_k(T_k) - \mu \times \Delta WC + WC_{max} + \sum_{l=1}^{N_w} C_{w,l}(W_{av,l} - W_l) + \sum_{l=1}^{N_w} C_{r,l}(W_l - W_{av,l}) + \sum_{l=1}^{V2G} C_{p,v}(W_{av} - W_v) + \sum_{l=1}^{V2G} C_{r,v}(W_v - W_{av,v}) + \sum_{l=1}^{V2G} C_{V2G} * W_l \quad (2.1.υ)$$

Όπου $\Delta WC = WC_{max} - WC_{min}$.

Η στοχαστική έκφραση της αντικειμενικής συνάρτησης J_1 σχηματίζεται υποθέτοντας την ηλεκτρική και τη θερμική ζήτηση ως τυχαίες μεταβλητές. Έτσι το αναμενόμενο λειτουργικό κόστος μπορεί να δοθεί ως ακολούθως:

$$\begin{aligned} \bar{J}_1 = & \sum_{i=1}^{N_p} \left\{ a_i + \beta_i \bar{P}_i + \gamma_i \left(\bar{P}_i^2 + Var(P_i) \right) \right\} + \sum_{j=1}^{N_c} \left\{ a_j + \beta_j \bar{O}_j + \right. \\ & \left. \gamma_j \bar{O}_j^2 + Var(O_j) + \delta_j \bar{H}_j \right\} + \sum_{k=1}^{N_h} \left\{ a_k + \delta_k \bar{T}_k + \right. \\ & \left. \theta_k \bar{T}_k^2 + Var(T_k) - \mu \Delta WC + WC_{max} + l=1 N_w k_p, l W_{av, l} - W_l + l=1 N_w k_r, l W_l - W_{av, l} + \right. \\ & \left. \sum_{l=1}^{V2G} k_{p,v} (\bar{W}_{av,v} - \bar{W}_v) + \sum_{l=1}^{V2G} k_{r,v} (\bar{W}_v - \bar{W}_{av,v}) + \sum_{l=1}^{V2G} C_{V2G} * \bar{W}_l \right\} \quad (2.1.υ') \end{aligned}$$

Η αναμενόμενη τιμή της διαφοράς μεταξύ της υπολογισθείσας για τη βέλτιστη κατανομή ισχύος των ανεμογεννητριών από την προβλεπόμενη διαθέσιμη αιολική ισχύ προκύπτει από τη τυχαία μεταβλητή, Z_l :

$$Z_l = W_{av,l} - W_l \quad (2.1.φ)$$

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf) της Z_l προκύπτει μέσω συνέλιξης αφού σύμφωνα με την ανωτέρω σχέση ισούται με τη διαφορά δύο γνωστών τυχαίων μεταβλητών οι οποίες ακολουθούν διαφορετικές κατανομές. Η τυχαία μεταβλητή, $W_{av,l}$ έχει μια pdf, η οποία υπολογίζεται παρακάτω, που προκύπτει μέσω του μετασχηματισμού της τυχαίας μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου ενώ η αντίστοιχη pdf της W_l προκύπτει από την pdf της ζήτησης φορτίου (έχει υποτεθεί ότι ακολουθεί κανονική κατανομή για λόγους απλότητας). Επομένως, ισχύει:

$$\begin{aligned} h_l(Z) &= f_{w,l}(W_{av,l}) * g_l(-W_l) = \int_w^{w_{r,l}} f_{w,l}(W_{av,l}) g_l(Z - W_{av,l}) dW_{av,l} \\ E\{Z\} &= \int_0^{w_{r,l}} \left(z \int_w^{w_{r,l}} f_{w,l}(w) g_l(z - w) dw \right) dz \quad (2.1.χ) \end{aligned}$$

όπου $w_{r,l}$ η ονομαστική ισχύς του l -οστού αιολικού πάρκου και w_l η μεταβλητή απόφασης για την αιολική ισχύ. Για την υπερεκτίμηση τώρα η μεταβλητή θα είναι:

$$Z_l = W_l - W_{av,l} \quad (2.1.\psi)$$

Επομένως, ισχύει:

$$h_l(Z) = f_{w,l}(W_{av,l}) * g_l(-W_l) = \int_0^W f_{w,l}(W_{av,l}) g_l(W_{av,l} - Z) dW_{av,l}$$

$$E\{Z\} = \int_0^{w_{r,l}} (z \int_0^W f_{w,l}(w) g_l(w - z) dw) dz \quad (2.1.\omega)$$

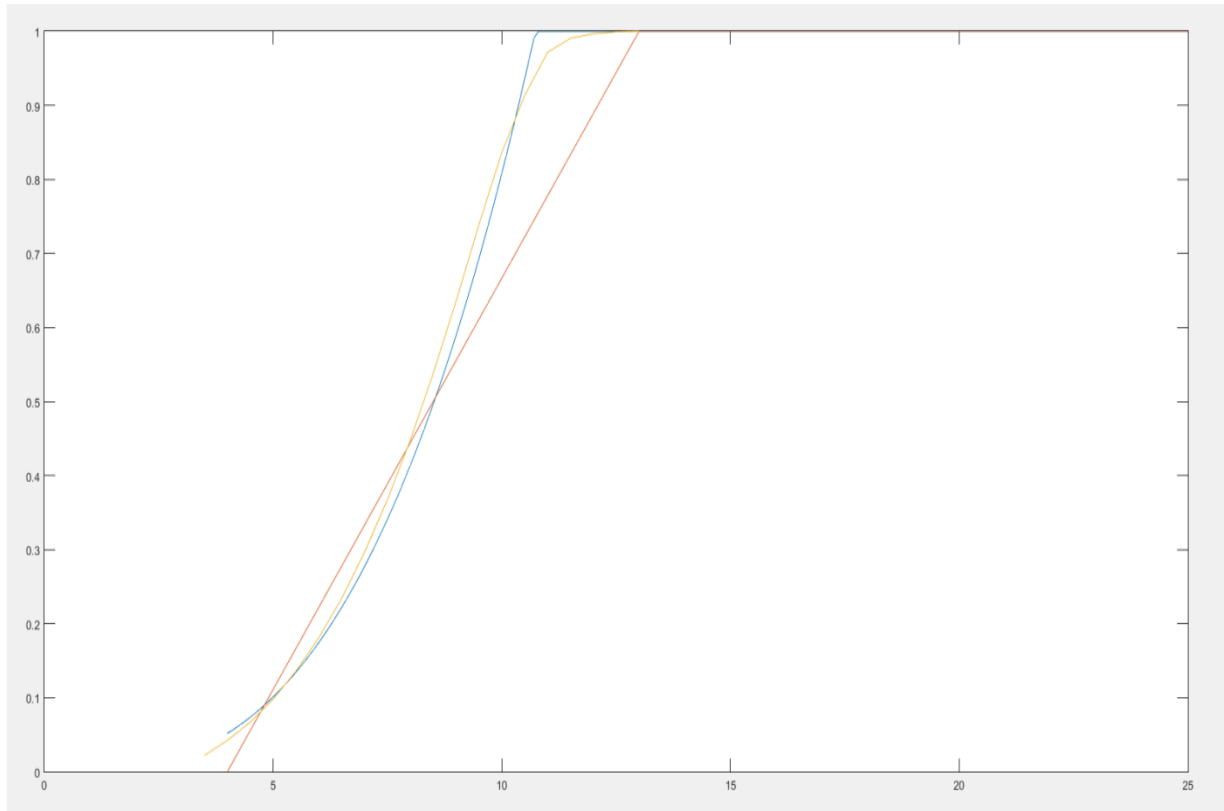
Με ακριβώς αντίστοιχες εκφράσεις υπολογίζονται και οι ποινές υπερεκτίμησης και υποεκτίμησης και για το σταθμό φόρτισης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Η κύρια διαφορά είναι πως υποθέτουμε τη διαθέσιμη ισχύ του σταθμού να ακολουθεί κανονική κατανομή με μέση τιμή αυτή που του ζητάμε στο Dispatch.

Υπολογισμός Της pdf (possibility density function) Για Τη Διαθέσιμη Αιολική Ισχύ

Η τυχαία μεταβλητή της ισχύος εξόδου είναι συνεχής στο διάστημα $(0, w_r)$ και έχει διακριτές τιμές για ισχύ εξόδου 0 και w_r αφού ακολουθεί την προσέγγιση της ταχύτητας του ανέμου μέσω της κατανομής Weibull. Η κατανομή της ταχύτητας του ανέμου μπορεί λοιπόν να μετασχηματισθεί σε ισχύ εξόδου της ανεμογεννήτριας, έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί στο μαθηματικό μοντέλο της οικονομικής κατανομής [16][19].

Για να γίνει όμως ο μετασχηματισμός αυτός απαιτείται πρώτα να έχουμε μία έκφραση που να συνδέει την ταχύτητα ανέμου με την παραγόμενη ισχύ. Η καμπύλες ισχύος που χρησιμοποιούνται συνήθως για τέτοιες εφαρμογές υποθέτουν γραμμική σχέση ανέμου και παραγόμενης ισχύος. Αυτή η προσέγγιση, είναι αρκετά ανακριβής καθώς στη πλειονότητα των περιπτώσεων αποκόπτεται μεγάλο εύρος πληροφοριών από την καμπύλη.

Έχουν γίνει πολλές προσεγγίσεις, πολυωνυμικές, δευτέρου βαθμού και πιο διαδεδομένα οι γνωστές κυβικές μορφές από τη βιβλιογραφία.



Η μορφή που θα χρησιμοποιήσουμε για τους σκοπούς αυτής της μελέτης είναι κυβικής μορφής, αλλά με μία σημαντική παραλλαγή. Αρχικά, στο παραπάνω γράφημα σημειώνονται με κόκκινο η **Γραμμική** μορφή, με κίτρινο η **Πραγματική** καμπύλη και με **Μπλε** η προτεινόμενη. Οι καμπύλες είναι ανοιγμένες στα ονομαστικά μεγέθη. Η καμπύλη αναφοράς είναι της ανεμογεννήτριας Vestas V60 850KW V2 αναγνωσμένα από πιστοποιημένο αρχείο του πακέτου WaSP.

Στην υπόθεση που κάναμε, υποθέτουμε μία ονομαστική ταχύτητα ελαφρώς μειωμένη (συγκεκριμένα εδώ από τα 13m/s στα 11,4) και κάνουμε προσέγγιση τρίτου βαθμού στη πραγματική καμπύλη. Από ότι βλέπουμε, έχουμε κατά πολύ καλύτερη προσέγγιση της πραγματικής καμπύλης (R-squared 0,98 από 0,95) στην οποία φαίνεται να χάνουμε μόνο κάποια πληροφορία κοντά στην ονομαστική ταχύτητα. Η πληροφορία αυτή πάντως είναι ανεπαίσθητη αφού τα ολοκληρώματα υπολογίζονται προσεγγιστικά με αριθμητικές μεθόδους για μεγαλύτερη ταχύτητα εκτέλεσης.

Άρα η μαθηματική έκφραση της πιθανότητας της παραγόμενης ισχύος θα προκύπτει:

$$W = T(V) = aV^3 \quad (2.1.\omega\alpha)$$

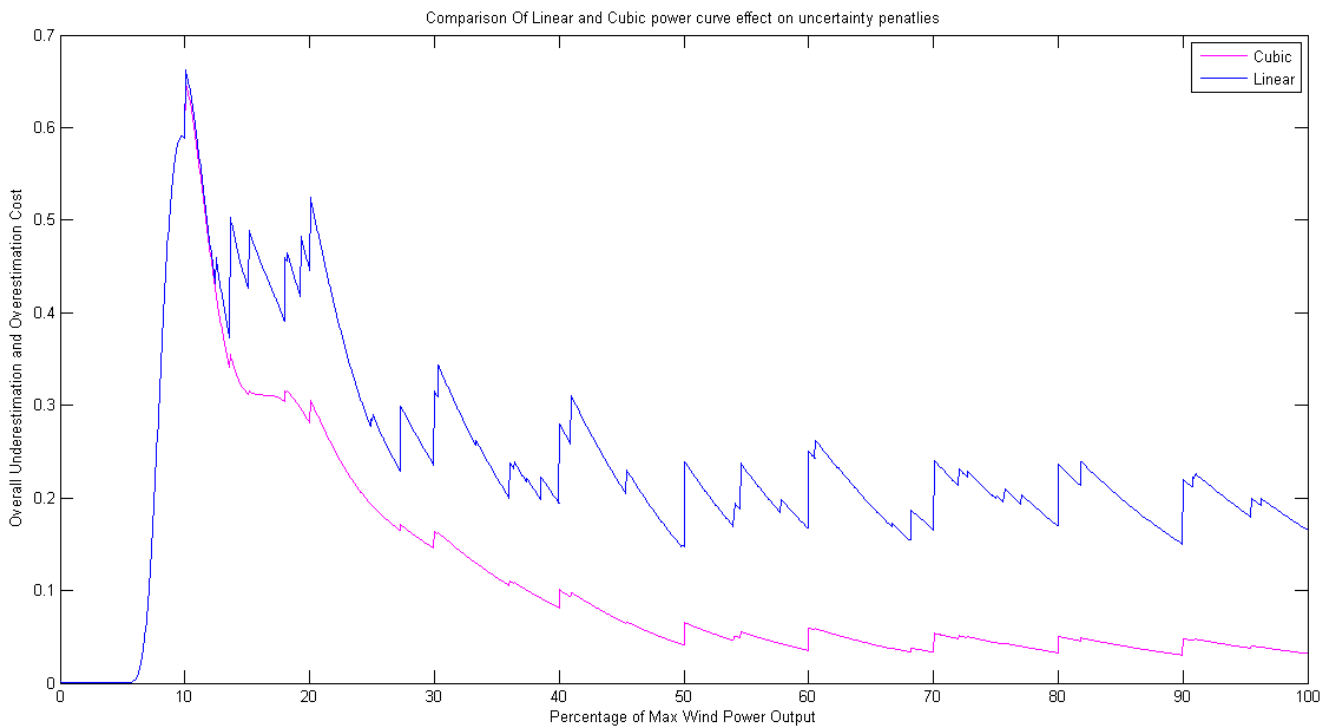
$$f_w(w) = f_v[T^{-1}(w)] \left[\frac{dT^{-1}(w)}{dw} \right] = f_v \left(\left(\frac{w}{a} \right)^{\frac{1}{3}} \right) \left| \frac{1}{(3a^{\frac{1}{3}}w^{\frac{2}{3}})} \right| \quad (2.1.\omega\beta)$$

$$P_r\{W = 0\} = F_V(v_i) + (1 - F_V(v_o)) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v_i}{c}\right)^k\right) + \exp\left(-\left(\frac{v_o}{c}\right)^k\right) \quad (2.1.\omega\gamma)$$

$$P_r\{W = w_r\} = F_V(v_o) - F_V(v_r) = \exp\left(-\left(\frac{v_r}{c}\right)^k\right) - \exp\left(-\left(\frac{v_o}{c}\right)^k\right) \quad (2.1.\omega\delta)$$

$$f_w(w) = \left| \frac{1}{(3a^{\frac{1}{3}}w^{\frac{2}{3}})} \right| \frac{k}{c} \left(\frac{w^{1/3}}{a^{\frac{1}{3}}c} \right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{w^{1/3}}{a^{\frac{1}{3}}c}\right)^k\right)$$

Όμως, ποια είναι η επίδραση αυτής της μορφής καμπύλης ισχύος στο κόστος, ώστε να την καθιστά καταλληλότερη από την απλή γραμμική μορφή; Για τα το απαντήσουμε αυτό αξίζει να επισημάνουμε ότι η παραπάνω Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας θα χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστούν οι ποινές υπερεκτίμησης και υποεκτίμησης αιολικής ισχύος. Για να γίνουν οι διαφορές εμφανείς, υποθέτουμε διείσδυση από το 0 μέχρι το 100% των δυνατοτήτων των αιολικών πάρκων και υπολογίζουμε το κόστος ποινής.



Όπως είναι εμφανές, η προτεινόμενη μορφή, ρίχνει αισθητά το κόστος ποινής μέχρι και 70% κοντά στα μέγιστα των αιολικών πάρκων. Οι διαφορές μπορεί να είναι σχετικά και σε απόλυτες τιμές μικρές, όμως καθώς οι ποινές για την στοχαστικότητα της παραγόμενης από τα αιολικά πάρκα ισχύος θα γίνονται και αυστηρότεροι τόσο πιο αναγκαίες θα είναι τέτοιες μοντελοποιήσεις ώστε να μην υπερεκτιμούνται τα κόστη της αιολικής διείσδυσης για τα ΣΗΕ.

6.1.2.2 Μαθηματικές Εκφράσεις Για Την Αναμενόμενη Απόκλιση Παραγωγής Ηλεκτρικής και Θερμικής Ισχύος (Ρίσκο Κάλυψης Ισχύος)

Η στοχαστική μελέτη μας δίνει τη δυνατότητα να εντάξουμε την έννοια του ρίσκου στο πρόβλημά μας. Η έννοια του ρίσκου ορίζεται ως η αναμενόμενη ή προσδοκώμενη τιμή του τετραγώνου της μη ικανοποιημένης ζήτησης φορτίου (ηλεκτρικού ή θερμικού). Οπότε, μιλάμε τόσο για ρίσκο κάλυψης της ηλεκτρικής ζήτησης όσο και ρίσκο κάλυψης της θερμικής ζήτησης (αναμενόμενες αποκλίσεις). Οι συναρτήσεις του ρίσκου που ακολουθούν μπορούν να αποτελέσουν αντικειμενικές συναρτήσεις προς ελαχιστοποίηση ώστε να αυξηθεί η αξιοπιστία του συστήματος μελέτης.

$$r_p = E \left[\left(\bar{p}_D + \bar{p}_L - \sum_{i=1}^{n_g} p_i \right)^2 \right] \quad (2.2.α)$$

$$r_p = \sum_{i=1}^{n_g} Var(p_i) + \sum_{i=1}^{n_g-1} \sum_{j=i+1}^{n_g} 2Cov(p_i, p_j) \quad (2.2.β)$$

$$r_p = \sum_{i=1}^{n_g} C_{V,p_i}^2 \bar{p}_i^2 + \sum_{i=1}^{n_g-1} \sum_{j=i+1}^{n_g} 2\rho_{p_i,p_j} \cdot C_{V,p_i} \cdot C_{V,p_j} \cdot \bar{p}_i \cdot \bar{p}_j \quad (2.2.γ)$$

$$r_h = E \left[\left(\bar{h}_D - \sum_{i=1}^{n_g} h_i \right)^2 \right] \quad (2.2.δ)$$

$$r_h = \sum_{i=1}^{n_g} Var(h_i) + \sum_{i=1}^{n_g-1} \sum_{j=i+1}^{n_g} 2Cov(h_i, h_j) \quad (2.2.ε)$$

$$r_h = \sum_{i=1}^{n_g} C_{V,h_i}^2 \bar{h}_i^2 + \sum_{i=1}^{n_g-1} \sum_{j=i+1}^{n_g} 2\rho_{h_i,h_j} \cdot C_{V,h_i} \cdot C_{V,h_j} \cdot \bar{h}_i \cdot \bar{h}_j \quad (2.2.στ)$$

Εντάσσοντας, γενικά, το ρίσκο στα προβλήματα στοχαστικής βελτιστοποίησης αυτής της κατηγορίας απαιτείται να ακολουθηθεί μία προσέγγιση πολλών αντικειμενικών συναρτήσεων (πολυκριτηριακή). Επομένως, με αυτό τον τρόπο εισάγονται και οι λεγόμενοι συντελεστές βαρύτητας (σταθμίσεις των αντικειμενικών συναρτήσεων), ώστε ο εκάστοτε διαχειριστής του συστήματος να είναι σε θέση λήψης αποφάσεων ανάλογα με τις ιδιαίτερες καταστάσεις π.χ. αν επιθυμεί να μηδενίσει το ρίσκο είτε αν δεν τον ενδιαφέρει το ρίσκο και θέλει να έχει το ελάχιστο δυνατό κόστος λειτουργίας.

Η αναμενόμενη απόκλιση ανάμεσα στην προγραμματισμένη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος και στη ζήτηση ισχύος μπορεί να μοντελοποιηθεί με τη χρήση της αναμενόμενης ή προσδοκώμενης έκφρασης του τετραγώνου της μη ικανοποίησης του φορτίου ζήτησης (ηλεκτρικού και θερμικού αντίστοιχα) και δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{J}_2 = E \left\{ \left(p_D + p_L - \sum_{i=1}^{N_p} P_i - \sum_{j=1}^{N_c} O_j - \sum_{l=1}^{N_w} W_l - \sum_{k=1}^{V2G} V_k \right)^2 \right\} \quad (2.2.\zeta)$$

όπου, p_D είναι η ζήτηση ισχύος και p_L οι ενεργές ηλεκτρικές απώλειες του εξεταζόμενου ΣΗΕ. Η ανάπτυξη της ανωτέρω σχέσης, σύμφωνα και με την ανάλυση που προηγήθηκε, οδηγεί στην παρακάτω αναλυτικότερη έκφραση:

$$\begin{aligned} \bar{J}_2 = & \sum_{i=1}^{N_p} \text{Var}(P_i) + \sum_{j=1}^{N_c} \text{Var}(O_j) + \sum_{l=1}^{N_w} \text{Var}(W_l) + \sum_{k=1}^{V2G} \text{Var}(V_k) + 2 \sum_{i=1}^{N_p-1} \sum_{m=i+1}^{N_p} \text{Cov}(P_i, P_m) \\ & + 2 \sum_{j=1}^{N_c-1} \sum_{m=j+1}^{N_c} \text{Cov}(O_j, O_m) + 2 \sum_{l=1}^{N_w-1} \sum_{m=l+1}^{N_w} \text{Cov}(W_l, W_m) + 2 \sum_{k=1}^{V2G-1} \sum_{m=k+1}^{V2G} \text{Cov}(V_k, V_m) + \\ & 2 \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_c} \text{Cov}(P_i, O_j) + 2 \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{l=1}^{N_w} \text{Cov}(P_i, W_l) + 2 \sum_{j=1}^{N_c} \sum_{l=1}^{N_w} \text{Cov}(O_j, W_l) + \\ & 2 \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{V2G} \text{Cov}(P_i, V_j) + 2 \sum_{i=1}^{V2G} \sum_{j=1}^{N_c} \text{Cov}(V_i, O_j) + 2 \sum_{i=1}^{N_w} \sum_{j=1}^{V2G} \text{Cov}(W_i, V_j) \quad (2.2.\eta) \end{aligned}$$

Ακριβώς με παρόμοιο τρόπο μπορεί να περιγραφεί και η αναμενόμενη θερμική απόκλιση, \bar{J}_3 :

$$\bar{J}_3 = E \left\{ \left(h_D - \sum_{j=1}^{N_c} H_j - \sum_{k=1}^{N_h} T_k \right)^2 \right\} \quad (2.2.\eta')$$

$$\begin{aligned} \bar{J}_3 = & \sum_{j=1}^{N_c} \text{Var}(H_j) + \sum_{k=1}^{N_h} \text{Var}(T_k) + 2 \sum_{j=1}^{N_c-1} \sum_{m=j+1}^{N_c} \text{Cov}(H_j, H_m) + 2 \sum_{k=1}^{N_h-1} \sum_{m=k+1}^{N_h} \text{Cov}(T_k, T_m) + 2 \sum_{j=1}^{N_c} \sum_{k=1}^{N_h} \text{Cov}(H_j, T_k) \\ & (2.2.\eta'') \end{aligned}$$

6.1.2.3 Μαθηματική Έκφραση Των Αναμενόμενων Εκπομπών Αερίων Ρύπων CO₂, SO₂, NO_x

Οι συνολικές εκπομπές σε ton/hour των αερίων ρύπων SO₂ και NO_x εκφράζονται αθροιστικά μέσω μίας τετραγωνικής συνάρτησης της ισχύος εξόδου των μονάδων παραγωγής, μέσω ενός εκθετικού συντελεστή για τις συμβατικές θερμικές μονάδες παραγωγής και μέσω ενός γραμμικού συντελεστή για τις μονάδες ΣΗΘ με απομάστευση. Η τελική σχέση δίνεται ως ακολούθως:

$$J_4 = \sum_{i=1}^{N_p} \{10^{-2}(a_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2) + \zeta_i e^{\lambda_i P_i}\} + \sum_{j=1}^{N_c} \{(\theta_j + \eta_j) O_j\} + \sum_{k=1}^{N_h} \{(\pi_k + \rho_k) T_k\} \quad (2.3.α)$$

όπου P_i είναι η ισχύς εξόδου των συμβατικών μονάδων παραγωγής, O_j είναι η ισχύς εξόδου των μονάδων ΣΗΘ με απομάστευση και $a_i, \beta_i, \gamma_i, \zeta_i, \lambda_i$ είναι οι συντελεστές εκπομπών αερίων ρύπων για τις παραδοσιακές θερμικές μονάδες παραγωγής, θ_j, η_j είναι οι συντελεστές εκπομπών αερίων ρύπων για τις μονάδες ΣΗΘ και π_k, ρ_k οι συντελεστές εκπομπών για τις μονάδες αποκλειστικά παραγωγής θερμικής ισχύος, αντίστοιχα. Λαμβάνοντας τις αναμενόμενες τιμές των τυχαίων μεταβλητών και χρησιμοποιώντας σειρές Taylor για τον εκθετικό μέρος η σχέση (5.4.ρ) παίρνει τη μορφή:

$$\bar{J}_4 = \sum_{i=1}^{N_p} \left\{ 10^{-2} \left(a_i + \beta_i \bar{P}_i + \gamma_i (\bar{P}_i^2 + Var(P_i)) \right) + \zeta_i + \zeta_i \lambda_i \bar{P}_i + \frac{\zeta_i \lambda_i}{2} (\bar{P}_i^2 + Var(P_i)) \right\} + \sum_{j=1}^{N_c} \{(\theta_j + \eta_j) \bar{O}_j\} + \sum_{k=1}^{N_h} \{(\pi_k + \rho_k) \bar{T}_k\} \quad (2.3.β)$$

Με τον ίδιο τρόπο, οι εκπομπές CO_2 μπορούν να προσεγγισθούν από μία γραμμική εξίσωση της ισχύος εξόδου των μονάδων παραγωγής και με ένα στοχαστικό μετασχηματισμό ως ακολούθως:

$$\bar{J}_{4c} = \sum_{i=1}^{N_p} \tau_i \bar{P}_i + \sum_{j=1}^{N_c} \kappa_j \bar{O}_j + \sum_{k=1}^{N_h} \sigma_k \bar{T}_k \quad (2.3.γ)$$

όπου $\tau_i, \kappa_j, \sigma_k$ οι συντελεστές εκπομπών CO_2 .

6.1.2.4 Μαθηματική Έκφραση Της Αναμενόμενης Ασφάλειας Του ΣΗΘ Λόγω Της Διείσδυσης Μονάδων Αιολικής Παραγωγής Ισχύος

Σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε, ο εκάστοτε λειτουργός του ΣΗΘ πρέπει να αποφασίσει το ποσοστό διείσδυσης αιολικής ισχύος εξασφαλίζοντας παράλληλα τις συνθήκες ασφαλείας λόγω προβλημάτων δυναμικής ευστάθειας εξαιτίας των διακυμάνσεων του ανέμου. Από τις σχέσεις (2.1.ο) είναι φανερό ότι όσο η τιμή της συνάρτησης, μ είναι μεγαλύτερη τόσο πιο ασφαλές είναι το σύστημα, αυξάνοντας ταυτόχρονα το κόστος λειτουργίας αλλά και τις εκπομπές αερίων ρύπων. Κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης, ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης για την επίτευξη όσο το δυνατόν μεγαλύτερης ασφάλειας του συστήματος. Γι' αυτό ορίζουμε την αντικειμενική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση:

$$\bar{J}_5 = \frac{1}{\bar{\mu}} \quad (2.4.\alpha)$$

6.1.2.5 Μαθηματικές Εκφράσεις Για Τους Αναμενόμενους Περιορισμούς Του Προβλήματος

i) Η συνολική αναμενόμενη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος πρέπει να καλύπτει τη συνολική αναμενόμενη ηλεκτρική ζήτηση και τις αναμενόμενες απώλειες ενεργού ισχύος στις γραμμές μεταφοράς του ΣΗΕ (ισοζύγιο ενεργού ισχύος):

$$\bar{p}_D + \bar{p}_L - \sum_{i=1}^{N_p} \bar{P}_i - \sum_{j=1}^{N_c} \bar{O}_j - \sum_{l=1}^{N_w} \bar{W}_l + \sum_{k=1}^{V2G} V_k = 0 \quad (2.5.\alpha)$$

όπου \bar{p}_L είναι η αναμενόμενες ενεργές απώλειες του ΣΗΕ οι οποίες εκφράζονται μέσω των συντελεστών απωλειών του Kron (Κεφάλαιο 2, παράγραφος 2.17.1):

$$p_L = \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{m=1}^{N_p} P_i B_{im} P_m + \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_c} P_i B_{ij} O_j + \sum_{j=1}^{N_c} \sum_{n=1}^{N_c} O_j B_{jn} O_n \quad (2.5.\beta)$$

όπου B_{ij} είναι οι συντελεστές ενεργών απωλειών για ένα κλάδο δικτύου που συνδέει τις μονάδες i και j .

ii) Αντίστοιχα, η συνολική αναμενόμενη παραγωγή θερμικής ισχύος θα πρέπει να ισούται με τη συνολική αναμενόμενη θερμική ζήτηση ισχύος (ισοζύγιο θερμικής ισχύος):

$$\bar{h}_D = \sum_{j=1}^{N_c} \bar{H}_j + \sum_{k=1}^{N_h} \bar{T}_k \quad (2.5.\gamma)$$

iii) Λαμβάνοντας υπόψη τα τεχνικά ελάχιστα και μέγιστα των μονάδων παραγωγής για σταθερή λειτουργία, συμπεριλαμβανομένων και των μονάδων παραγωγής αιολικής ισχύος (ανεμογεννητριών, αιολικών πάρκων), οι αναμενόμενες τιμές περιορίζονται ως ακολούθως:

$$P_i^{\min} \leq \bar{P}_i \leq P_i^{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, N_p$$

$$O_j^{\min} \leq \bar{O}_j \leq O_j^{\max}, \quad j = 1, 2, \dots, N_c$$

$$H_j^{\min} \leq \bar{H}_j \leq H_j^{\max}, \quad j = 1, 2, \dots, N_c \quad (2.5.\delta)$$

$$T_k^{\min} \leq \bar{T}_k \leq T_k^{\max}, \quad k = 1, 2, \dots, N_h$$

$$0 \leq \bar{W}_l \leq w_{r,l}, \quad l = 1, 2, \dots, N_w$$

$$0 \leq \bar{W}_v \leq w_{r,v}, \quad l = 1, 2, \dots, V2G$$

$$0 \leq \bar{\mu} \leq 1$$

όπου P^{\min} , P^{\max} , O^{\min} , O^{\max} τα όρια ενεργού ισχύος των συμβατικών θερμικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος και των μονάδων ΣΗΘ με απομάστευση, w_r η ονομαστική ισχύς εξόδου των ανεμογεννητριών και H^{\min} , H^{\max} , T^{\min} , T^{\max} τα όρια παραγωγής θερμικής ισχύος των μονάδων ΣΗΘ και των μονάδων που παράγουν αποκλειστικά θερμική ισχύ.

iv) Επίσης, θα πρέπει:

$$\sum_{l=1}^{N_w} \bar{W}_l = W_{max} - \bar{\mu}\Delta W \quad (2.5.ε)$$

v) Τέλος, θα πρέπει η επιλεγόμενη ισχύς από τις ανεμογεννήτριες να μην υπερβαίνει την αναμενόμενη διαθέσιμη αιολική ισχύ:

$$W_{max} - \bar{\mu}\Delta W \leq \sum_{l=1}^{N_w} \bar{W}_{av,l} \quad (2.5.στ)$$

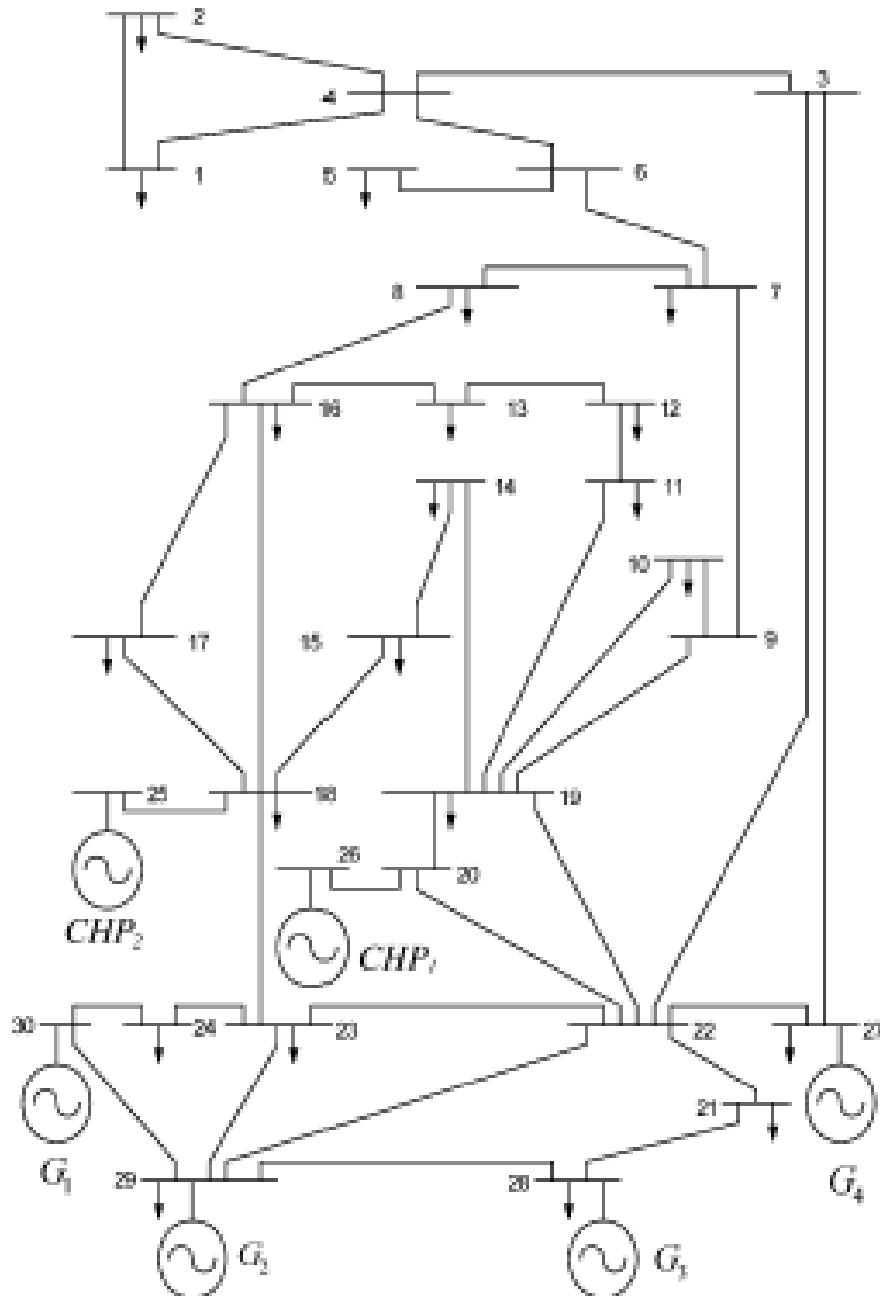
και τέλος όπου αυτό απαιτείται:

$$\bar{J}_{4c} \leq \Pi \quad (2.5.ζ)$$

όπου Π να είναι το άνω όριο εκπομπών αερίων ρύπων CO₂ σε ton/hour.

6.2 Δίκτυο Μελέτης Και Δεδομένα Του Προβλήματος

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν στο τροποποιημένο ΣΗΕ των 30 ζυγών της IEEE . Το εν λόγω δίκτυο περιλαμβάνει δύο (2) μονάδες ΣΗΘ με απομάστευση και είκοσι (20) αιολικά πάρκα σε πραγματική λειτουργία του αυτόνομου δικτύου της νήσου Κρήτης.



Σχήμα 6.1.2.6.α. Το Τροποποιημένο ΣΗΕ 30 Ζυγών Της IEEE Με Δύο (2) Μονάδες ΣΗΘ Απομάστευσης.

Συντελεστές Ενεργών Απωλειών Κατά Kron Για Το Δίκτυο Του Σχήματος 6.1.2.6.α.

$$B_{ij} = \begin{bmatrix} 0.1382 & -0.0299 & 0.0044 & -0.0022 & -0.0010 & -0.0008 \\ -0.0299 & 0.0487 & -0.0025 & 0.0004 & 0.0016 & 0.0041 \\ 0.0044 & -0.0025 & 0.0182 & -0.0070 & -0.0066 & -0.0066 \\ -0.0022 & 0.0004 & -0.0070 & 0.0137 & 0.0050 & 0.0033 \\ -0.0010 & 0.0016 & -0.0066 & 0.0050 & 0.0109 & 0.0005 \\ -0.0008 & 0.0041 & -0.0066 & 0.0033 & 0.0005 & 0.0244 \end{bmatrix}$$

Το δίκτυο έχει βάση τα 100 MVA. Η ζήτηση την οποία υποθέτουμε είναι :

Ηλεκτρική 2,834 α.μ. και Θερμική 0,8 α.μ.

Τα όρια διείσδυσης αιολικής ισχύος είναι 10% κατώτερο και 30% ανώτατο της ζήτησης ή πιο συγκεκριμένα 0,3 και 0,8 α.μ.

Η τιμή αγοράς της αιολικής ισχύος ανά ώρα υποτίθεται στα 120 ευρώ.

Τοποθεσία/Ονομασία Αιολικών Μονάδων Κρήτης	Συντελεστές της Κατανομής Weibull	
	k	c
Iweco	1,6259	16,0425
Iweco Χρόνος	0,3346	1,51370
WRE	1,4975	7,70510
Αίολος	1,5930	19,8043
Έντεκα	1,5801	9,61700
Ξηρολίμνη	1,3830	7,87120
Πλαστικά Κρήτης	1,7294	9,80720
Ρόκας	1,9585	10,3270
Τέρνα Ενεργειακή	0,3822	0,07580
Υδροαιολική Κρήτης	0,5180	4,31600

Πίνακας 6.1.2.6.α Συντελεστές Της Κατανομής Weibull Για Την Ταχύτητα Του Ανέμου Στην Κρήτη.

ΜΟΝΑΔΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ						ΜΕΓΙΣΤΑ- ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΟΡΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	
	α	β	γ	Δ	θ	ξ	MIN (α.μ.)	MAX (α.μ.)
	€/h	€/MWh	€/MW ² h	€/MWh	€/MW ² h	€/MW ² h		
<i>α/α</i>	ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ							
G₁	100	200	10	-	-	-	0,05	0,50
G₂	120	150	10	-	-	-	0,05	0,60
G₃	40	180	20	-	-	-	0,05	1,00
G₄	60	100	10	-	-	-	0,05	1,20
<i>α/α</i>	ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ							
HEAT₁	110	41	23	-	-	-	0	2
<i>α/α</i>	ΜΟΝΑΔΕΣ ΣΗΘ ΜΕ ΑΠΟΜΑΣΤΕΥΣΗ (Ο/Η)							
CHP₁	265	145	34,5	42	30	31	0,05	1
							0	0,6
CHP₂	125	360	43,5	6	27	11	0,05	0,6
							0	0,6

Πίνακας 6.1.2.6.β Συντελεστές Λειτουργικού Κόστους Και Όρια Των Συμβατικών Μονάδων Παραγωγής Ηλεκτρικής Και Θερμικής Ισχύος Καθώς Και Των Μονάδων ΣΗΘ Με Απομάστευση.

Μονάδες Παραγωγής	$\alpha_i 10^{-2}$	$\beta_i 10^{-2}$	$\gamma_i 10^{-2}$	ζ_i	λ_i	r_i
G_1	4,091	-5,554	6,490	2,0e-4	2,857	0,32
G_2	2,543	-6,047	5,638	5,0e-4	3,333	0,26
G_3	4,258	-5,094	4,586	1,0e-6	8,000	0,38
G_4	5,326	-3,550	3,380	2,0e-3	2,000	0,44

Πίνακας 6.1.2.6.γ Συντελεστές Εκπομπών Αερίων Ρύπων CO_2 , SO_2 και NO_x Για Τις Θερμικές Μονάδες Παραγωγής Ηλεκτρικής Ισχύος.

Συντελεστές	Αιολικών	Ηλεκτρικών αυτοκινήτων
Υποεκτίμηση	30	30
Υπερεκτίμηση	40	30
Αγοράς	120	100

Το όριο ισχύος της μονάδας φόρτισης ορίζεται στα 800kw. Δεδομένου ότι δεν μπορούμε να αποφορτίσουμε πλήρως τις μπαταρίες των οχημάτων, διότι θα προκαλέσουμε προβλήματα στη διάρκεια ζωής τους υποθέτουμε πως κατά μέσο όρο μπορούμε να πάρουμε κατά μέγιστο 2kw από τις μπαταρίες υποθέτοντας ότι το σύννηθες μέγεθος είναι στα 10-15 kwh. Με δεδομένο το μέγεθος του δικτύου, υποθέτουμε σταθμό φόρτισης μέχρι 400 αυτοκινήτων, και έτσι προκύπτει το πάνω όριο.

6.3 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Προσομοιώσεων

6.3.1. Σενάριο ύπαρξης μόνο θερμικών μονάδων

6.3.1.1 Κυρτή Μορφή Εφικτού Συνόλου CHP

Σε αυτή την προσομοίωση υποτίθεται η χρήση μόνο των θερμικών μονάδων που περιγράφηκαν στην παρουσίαση των χαρακτηριστικών του δικτύου παραπάνω. Η βελτιστοποίηση σε αυτή την σύνθεση του δικτύου θα γίνει με τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις. Επίσης υποθέτουμε την κυρτή μορφή των συνόλων λύσεων για τις μονάδες συμπαραγωγής.

α) Ολική βελτιστοποίηση των αντικειμενικών κόστους, απόκλισης ενεργού και θερμικής ισχύος καθώς και των εκπομπών NO_x.

β) Το παραπάνω σενάριο, με βελτιστοποίηση και των εκπομπών CO₂

γ) Βελτιστοποίηση κόστους λειτουργίας

δ) Βελτιστοποίηση εκπομπών NO_x - CO₂

6.3.1.1α) Ολική βελτιστοποίηση των αντικειμενικών κόστους, απόκλισης ενεργού και θερμικής ισχύος καθώς και των εκπομπών NO_x (J1-J2-J3-J4) .

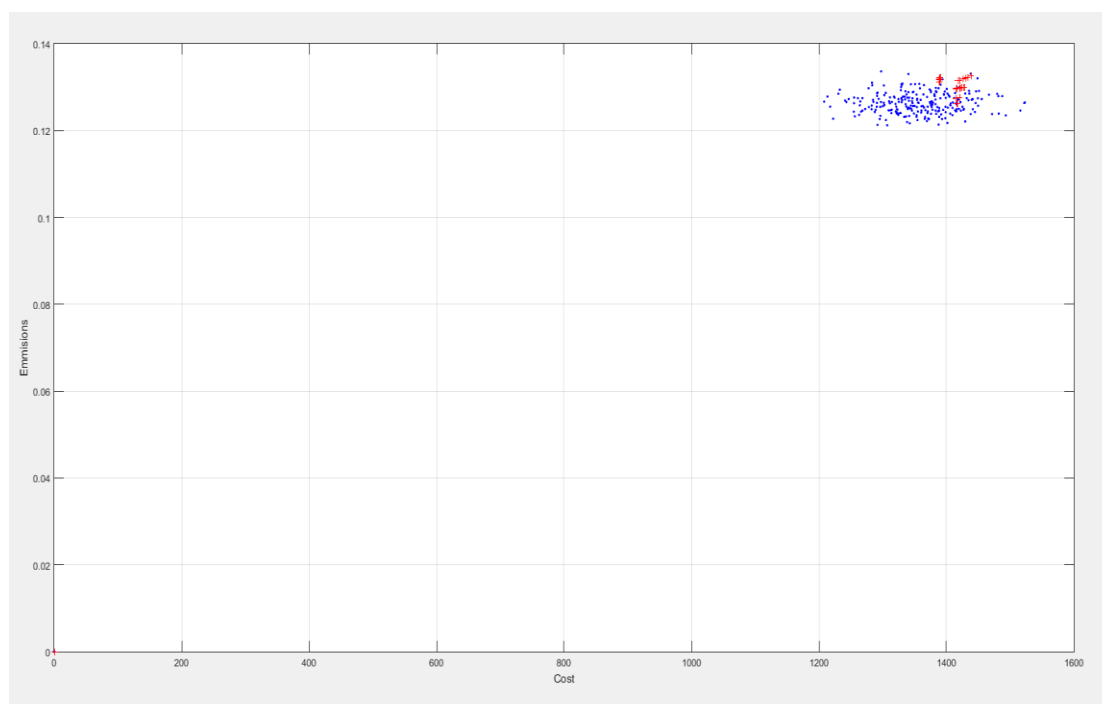
Μονάδα	Ελάχιστο Κόστος(PSO)	Ελάχιστες εκπομπές NO _x (PSO)	HS
Συμβατική 1	0,4599	0,4017	0,4070
Συμβατική 2	0,5259	0,3063	0,6000
Συμβατική 3	0,2107	0,7705	0,6141
Συμβατική 4	0,7659	0,5695	0,6551
Συμπαραγωγή 1 Ηλ.	0,6776	0,5032	0,4964
Συμπαραγωγή 2 Ηλ.	0,2257	0,2997	0,0503
Συμπαραγωγή 1 Θερ.	0,0325	0,1450	0,6314
Συμπαραγωγή 2 Θερ.	0,1354	0,4313	0,0646
Θερμική	0,5968	0,1749	0,0540
Απόκλιση Ηλεκτρικής	0,6576	0,6567	0,6381
Απόκλιση Θερμικής	0,0338	0,0389	0,0303
Κόστος	1.338,6	1.416,8	1.372,7
Εκπομπές NO _x	0,1311	0,1262	0,1229
Εκπομπές CO ₂	1,1204	0,9821	0,9388
Χρόνος (sec)	79	79	41

Ο Αρμονικός Αλγόριθμος λόγω της φιλοσοφίας του μπορεί να μας επιστρέψει μια μόνο λύση. Αυτή η λύση είναι η καλύτερη ισορροπία που κατάφερε να βρει κατά την αναζήτηση του στον εφικτό χώρο λύσεων. Η MOPSO πάλι μας επιστρέφει μια πληθώρα μη κυριαρχούμενων λύσεων (κατά Pareto) όπως αυτή βρήκε κατά την αναζήτηση. Φυσικά, οι λύσεις αυτές θα έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά, αφού θα υστερούν σε κάποιες αντικειμενικές και θα υπερیشχύουν σε άλλες και είναι πλέον

στην κρίση του διαχειριστή του συστήματος να διαλέξει τη λύση που θεωρεί πως συμβιβάζει καλύτερα τις ανάγκες του.

Η MOPSO συγκεκριμένα φαίνεται να εντόπισε λύση με μικρότερο κόστος, η οποία όμως έχει αισθητά περισσότερους ρύπους σε σχέση με τη λύση του αρμονικού. Η λύση με τους ελάχιστους ρύπους από την άλλη ανεβάζει το κόστος σε σχέση με τον αρμονικό και είναι χειρότερη ποιοτικά από αυτή. Εδώ διαφαίνεται, πως ο αρμονικός όπως και θα παρατηρηθεί και πιο κάτω βρίσκει μια μέση λύση η οποία ποιοτικά είναι χρήσιμη και καλή, απλώς για να καταφέρει να την εντοπίσει απαιτείται πολύ προσεκτική επιλογή των βαρών, όπως θα αναλύσουμε και πιο κάτω.

Η υπεροχή της σχετικά με την απόδοση του αλγορίθμου, είναι από την άλλη ξεκάθαρη, καθώς αποδίδει λύσεις σχεδόν στο μισό χρόνο. Η διαφορά αυτή θα γίνει πιο έντονη παρακάτω, καθώς οι διαστάσεις του προβλήματος θα είναι πολλαπλάσιες και θα διαφανεί η υπεροχή αυτή πολύ πιο ξεκάθαρα.

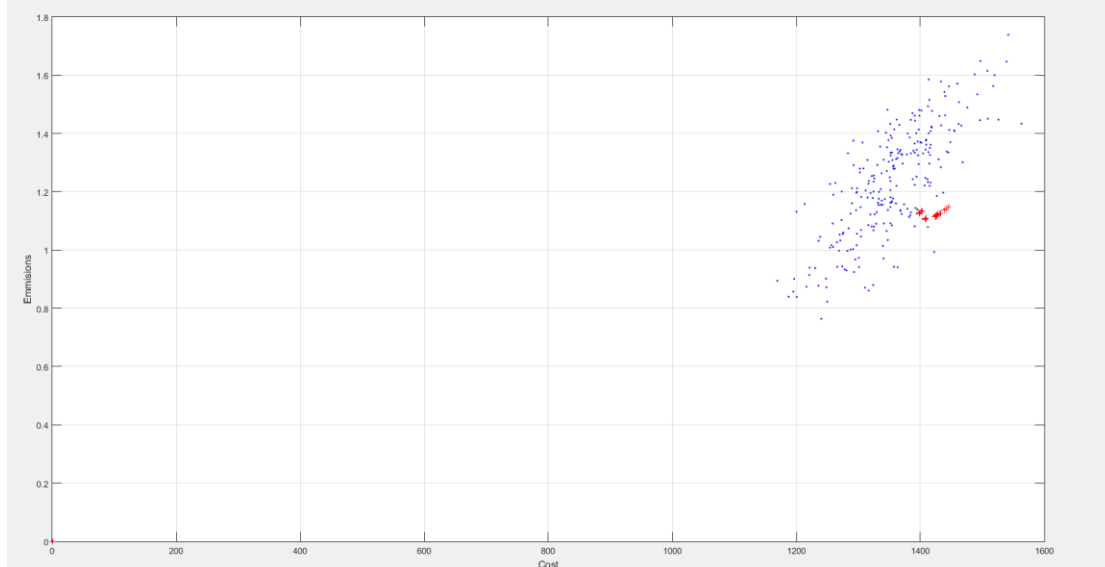


Σχήμα 6.3.1.1α Απεικόνιση σμήνους και λύσεων στο χώρο των αντικειμενικών κόστους και εκπομπών (Λύσεις σημειωμένες με κόκκινους σταυρούς)

6.3.1.1β Ολική βελτιστοποίηση των αντικειμενικών κόστους, απόκλισης ενεργού και θερμικής ισχύος καθώς και των εκπομπών NO_x - CO₂

Για το δεύτερο σενάριο θα βάλουμε αθροιστικά στην αντικειμενική εκπομπών NO_x την αντικειμενική CO₂ και θα επαναλάβουμε την προηγούμενη προσομοίωση.

Μονάδα	Ελάχιστο Κόστος(PSO)	Ελάχιστες εκπομπές (PSO)	Ελάχιστο Κόστος(HS)
Συμβατική 1	0,2789	0,2381	0,3788
Συμβατική 2	0,3161	0,4006	0,5991
Συμβατική 3	0,6702	0,2713	0,4460
Συμβατική 4	0,7929	0,9489	0,5009
Συμπαραγωγή 1 Ηλ.	0,5647	0,6541	0,5000
Συμπαραγωγή 2 Ηλ.	0,2719	0,3918	0,3942
Συμπαραγωγή 1 Θερ.	0,2590	0,1823	0,6493
Συμπαραγωγή 2 Θερ.	0,2960	0,4382	0,0507
Θερμική	0,1488	0,1432	0,0504
Απόκλιση Ηλεκτρικής	0,6717	0,6708	0,6473
Απόκλιση Θερμικής	0,0357	0,0402	0,0293
Κόστος	1.401,1	1.408	1.448,5
Εκπομπές NO _x	0,1295	0,1369	0,1218
Εκπομπές CO ₂	1,0018	0,9674	0,8659
Χρόνος (sec)	78	78	39



Σχήμα 6.3.1.1β Απεικόνιση σμήνους και λύσεων στο χώρο των αντικειμενικών κόστους και εκπομπών (Λύσεις σημειωμένες με κόκκινους σταυρούς)

Παρατηρούμε ότι πρακτικά δεν υπάρχει λύση που να μπορεί να ελαχιστοποιεί ταυτόχρονα και τις δύο μορφές εκπομπών. Βλέπουμε πως λύσεις με χαμηλότερες εκπομπές NO_x δίνουν κατά τι υψηλότερες τιμές για το διοξείδιο του άνθρακα (δρουν ανταγωνιστικά). Το παραπάνω γεγονός είναι εμφανές και εκ πρώτης όψης, διότι είναι σαφές πως το σμήνος αδυνατεί να συγκλίνει σε μια περιοχή και συνεχίζει να αναζητά

λύσεις κατά πολύ πιο διεσπαρμένο. Σε τέτοιες περιπτώσεις διαφαίνεται η χρησιμότητα της αριστείας κατά Pareto, καθώς μας επιστρέφει μια πληθώρα λύσεων όπου μπορούν να ικανοποιήσουν τις εκάστοτε ανάγκες του διαχειριστή και καλύπτουν διάφορες μορφές κατανομής της παραγωγής, ώστε να μπορεί να έχει μια εποπτεία για το πώς οι επιλογές του θα επηρεάσουν τα εξεταζόμενα μεγέθη (κόστος, εκπομπές κλπ.).

6.3.1.1γ Βελτιστοποίηση κόστους λειτουργίας

Σε αυτό το σενάριο το πρόβλημα ανάγεται σε μονοκριτηριακό.

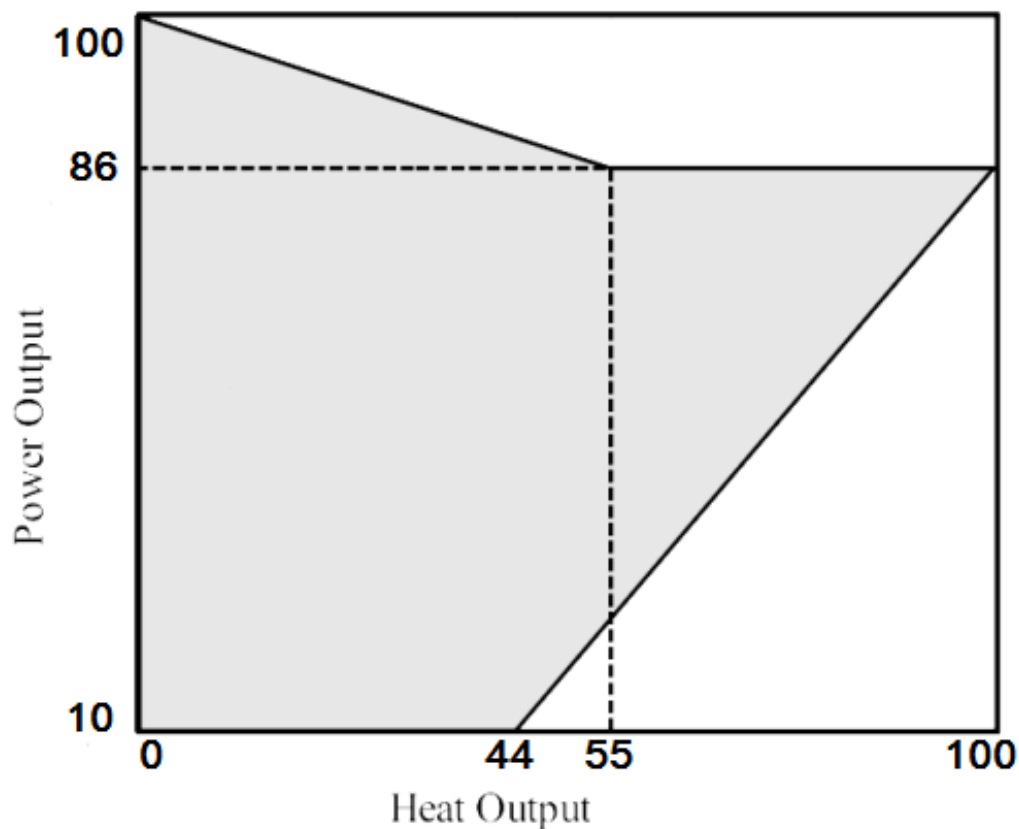
Μονάδα	Ελάχιστο Κόστος(PSO)	Ελάχιστο Κόστος(HS)
Συμβατική 1	0,0650	0,0696
Συμβατική 2	0,2967	0,5994
Συμβατική 3	0,4844	0,4877
Συμβατική 4	1,2000	1,2000
Συμπααραγωγή 1 Ηλ.	0,3236	0,3687
Συμπααραγωγή 2 Ηλ.	0,2291	0,0562
Συμπααραγωγή 1 Θερ.	0,1214	0,0990
Συμπααραγωγή 2 Θερ.	0,0855	0,5586
Θερμική	0,6542	0,0926
Απόκλιση Ηλεκτρικής	0,5116	0,5873
Απόκλιση Θερμικής	0,0442	0,0341
Κόστος	1.321,9	1292,2
Εκπομπές NO _x	0,1538	0,1507
Εκπομπές CO ₂	1,1822	1,0135
Χρόνος (sec)	89	39

6.3.1.1δ Βελτιστοποίηση εκπομπών NO_x - CO₂

Μονάδα	PSO	HS
Συμβατική 1	0,1589	0,4967
Συμβατική 2	0,4259	0,6000
Συμβατική 3	0,5355	0,4941
Συμβατική 4	0,7006	0,1546
Συμπααραγωγή 1 Ηλ.	0,7864	0,4988
Συμπααραγωγή 2 Ηλ.	0,2482	0,6000
Συμπααραγωγή 1 Θερ.	0,1570	0,2848
Συμπααραγωγή 2 Θερ.	0,5142	0,4450
Θερμική	0,0455	0,0502
Απόκλιση Ηλεκτρικής	0,6506	0,6539
Απόκλιση Θερμικής	0,0317	0,0407
Κόστος	1.385,2	1.507,2
Εκπομπές NO _x	0,1282	0,1248
Εκπομπές CO ₂	0,8984	0,8106
Χρόνος (sec)	79	39

6.3.1.2 Μη Κυρτή Μορφή Εφικτού Συνόλου CHP

Το ζητούμενο στην προσομοίωση τέτοιου είδους προβλημάτων δεν είναι να εξετάζονται μόνο εξιδανικευμένες προσεγγίσεις των στοιχείων του συστήματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα απόκλισης του θεωρητικού και του πρακτικού είναι οι μονάδες συμπαραγωγής, καθώς το εφικτό σύνολο λύσεων μεταξύ ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας είναι πιο πολύπλοκο από ένα απλό παραλληλόγραμμο και συνήθως είναι κοίλο. Παραπάνω αναλύσαμε τα προβλήματα που μπορεί να ανακύψουν στην βελτιστοποίηση επί μη κυρτών συνόλων. Μία κοινή μορφή η οποία υπάρχει στη βιβλιογραφία είναι και η παρακάτω και βάσει αυτής θα κάνουμε όλες τις παρακάτω προσομοιώσεις.



Σχήμα 6.3.1.2α Μορφή συνόλου εφικτών λύσεων των μονάδων συμπαραγωγής (μεγέθη ανοιγμένα στο μέγιστο)

6.3.1.2α Ολική βελτιστοποίηση των αντικειμενικών κόστους, απόκλισης ενεργού και θερμικής ισχύος καθώς και των εκπομπών NO_x (J1-J2-J3-J4) .

Μονάδα	Ελάχιστο Κόστος(PSO)	Ελάχιστες εκπομπές NO _x (PSO)	HS
Συμβατική 1	0,3164	0,3164	0,233
Συμβατική 2	0,4823	0,4823	0,6000
Συμβατική 3	0,5269	0,5269	0,5385
Συμβατική 4	0,9655	0,9655	1,0924
Συμπααραγωγή 1 Ηλ.	0,3119	0,3119	0,2567
Συμπααραγωγή 2 Ηλ.	0,1373	0,1373	0,0565
Συμπααραγωγή 1 Θερ.	0,3577	0,3577	0,0626
Συμπααραγωγή 2 Θερ.	0,2421	0,2421	0,1378
Θερμική	0,1419	0,1419	0,4996
Απόκλιση Ηλεκτρικής	0,5941	0,5941	0,5959
Απόκλιση Θερμικής	0,0392	0,0392	0,0305
Κόστος	1.334,1	1.334,1	1.312,8
Εκπομπές NO _x	0,1314	0,1314	0,1397
Εκπομπές CO ₂	0,9993	0,9993	1,1784
Χρόνος (sec)	110	110	40

Εκ πρώτης όψεως και οι δύο αλγόριθμοι φαίνονται να μην αντιμετωπίζουν προβλήματα με τα μη κυρτά σύνολα και να καταφέρνουν να βρισκουν λύσεις χωρίς να "κολλάνε" σε τοπικά ελάχιστα. Αυτό συμπαιρένεται καθώς οι τιμές είναι αρκετά κοντά με τα αποτελέσματα των κυρτών συνόλων.

6.3.1.2β Ολική βελτιστοποίηση των αντικειμενικών κόστους, απόκλισης ενεργού και θερμικής ισχύος καθώς και των εκπομπών NO_x - CO₂

Μονάδα	Ελάχιστο Κόστος(PSO)	Ελάχιστες εκπομπές NO _x - CO ₂ (PSO)	HS
Συμβατική 1	0,3157	0,2742	0,3817
Συμβατική 2	0,4559	0,3307	0,5999
Συμβατική 3	0,5126	0,1701	0,4813
Συμβατική 4	0,7668	0,7659	0,4873
Συμπααραγωγή 1 Ηλ.	0,7078	0,7949	0,4998
Συμπααραγωγή 2 Ηλ.	0,05	0,4227	0,3692
Συμπααραγωγή 1 Θερ.	0,5327	0,0208	0,1546
Συμπααραγωγή 2 Θερ.	0,1563	0,5681	0,4776
Θερμική	0,0288	0,1440	0,0678
Απόκλιση Ηλεκτρικής	0,6269	0,6271	0,6472
Απόκλιση Θερμικής	0,0309	0,0311	0,0313
Κόστος	1.356,9	1.418,0	1.414,9
Εκπομπές NO _x	0,1253	0,1347	0,1215
Εκπομπές CO ₂	0,9148	0,8865	0,8763
Χρόνος (sec)	83	83	40

6.3.1.2γ Βελτιστοποίηση κόστους λειτουργίας

Σε αυτό το σενάριο το πρόβλημα ανάγεται σε μονοκριτηριακό.

Μονάδα	Ελάχιστο Κόστος(PSO)	Ελάχιστο Κόστος(HS)
Συμβατική 1	0,3267	0,0955
Συμβατική 2	0,5353	0,5997
Συμβατική 3	0,6392	0,4779
Συμβατική 4	0,3758	1,2000
Συμπααραγωγή 1 Ηλ.	0,4787	0,3570
Συμπααραγωγή 2 Ηλ.	0,4809	0,0514
Συμπααραγωγή 1 Θερ.	0,0787	0,1270
Συμπααραγωγή 2 Θερ.	0,0580	0,2421
Θερμική	0,5931	0,3309
Απόκλιση Ηλεκτρικής	0,5933	0,5880
Απόκλιση Θερμικής	0,0348	0,0349
Κόστος	1.326,0	1.296,4
Εκπομπές NO _x	0,1302	0,1500
Εκπομπές CO ₂	1.0826	1,1101
Χρόνος (sec)	85	33

6.3.1.2δ Βελτιστοποίηση εκπομπών NO_x - CO₂

Μονάδα	PSO	HS
Συμβατική 1	0,4445	0,4997
Συμβατική 2	0,5153	0,6000
Συμβατική 3	0,6774	0,6029
Συμβατική 4	0,3055	0,1211
Συμπααραγωγή 1 Ηλ.	0,4748	0,5000
Συμπααραγωγή 2 Ηλ.	0,4385	0,5209
Συμπααραγωγή 1 Θερ.	0,3242	0,4290
Συμπααραγωγή 2 Θερ.	0,5429	0,2407
Θερμική	0	0,0501
Απόκλιση Ηλεκτρικής	0,6625	0,6529
Απόκλιση Θερμικής	0,0477	0,0344
Κόστος	1.470,0	1.449,6
Εκπομπές NO _x	0,1221	0,1256
Εκπομπές CO ₂	0,8507	0,8226
Χρόνος (sec)	90	47

Από τα παραπάνω αποτελέσματα διαφαίνεται, πως και οι δύο αλγόριθμοι κατάφεραν να διαχειριστούν αποτελεσματικά τα μη κυρτά σύνολα αποδίδοντας λύσεις ανάλογης ποιότητας με τα κυρτά. Επίσης, όσον αφορά τις μεταξύ τους διαφορές στα αποτελέσματα είναι σχετικά μικρές. Ειδικά στα αποτελέσματα των πολύ - κριτηριακών βελτιστοποιήσεων, δεν διαφάνηκε ξεκάθαρη υπεροχή κάποιας εκ

των δύο μεθόδων, καθώς κάθε επιμέρους λύση υπερείχε σε μια αντικειμενική και ίσως υστερούσε σε κάποια άλλη.

Παρόλα ταύτα, η MOPSO φαίνεται καταλληλότερη για την αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων, ειδικά όταν οι διαστάσεις αυτών αυξάνονται κατά πολύ. Αυτό έγκειται στο γεγονός ότι μπορεί να παρέχει στον διαχειριστή πληθώρα λύσεων οι οποίες θα ανταποκρίνονται σε πληθώρα σεναρίων που ίσως κληθεί να αντιμετωπίσει.

Πέραν, όμως της ποιότητας και του πλήθους άλλος ένας καθοριστικός παράγοντας είναι και η ταχύτητα με την οποία η μέθοδος μπορεί να παράσχει τη ζητούμενη απάντηση. Ο Αρμονικός φαίνεται να υπερέχει ξεκάθαρα σε αυτό τον τομέα, καθώς εκτελείται με διπλασία ταχύτητα. Θεωρητικά, μπορούμε να μειώσουμε το μέγεθος του σμήνους ή των επαναλήψεων της PSO αλλά αυτό φάνηκε να επηρεάζει άμεσα την ποιότητα των λύσεων.

Ένα τελευταίο πρόβλημα που ανακύπτει αφορά τον αρμονικό αλγόριθμο. Το πρόβλημα είναι δομικό και συγκεκριμένα αφορά τη δυνατότητα του κώδικα να μπορεί να διαχειριστεί μονό - κριτηριακά προβλήματα μόνο. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως οι παραπάνω αντικειμενικές συναρτήσεις πρέπει να αθροιστούν με βάρη σε μία ώστε να μπορέσει να τη βελτιστοποιήσει ο αλγόριθμος. Αυτό όμως με τη σειρά του φέρνει νέα προβλήματα. Μια απλή άθροιση των αντικειμενικών με ίσα βάρη, θεωρητικά, θα δούλευε. Όμως μετά από πληθώρα προσομοιώσεων έδειξε πως τα βάρη χρειάζονταν μια άλλη προσέγγιση. Συγκεκριμένα, υποθέτοντας ίσα βάρη για τις 4 αντικειμενικές μας πραγματοποιούμε το δεύτερο σενάριο πάλι. Παραθέτουμε τις τιμές των αντικειμενικών που επέστρεψε ο αλγόριθμος.

Μονάδα	HS (original)	HS(equal weights)	HS(cost optimization)
Απόκλιση Ηλεκτρικής	0,5959	0,5945	0,5880
Απόκλιση Θερμικής	0,0305	0,0331	0,0349
Κόστος	1.312,8	1.298,4	1.296,4
Εκπομπές NOx	0,1397	0,1526	0,1500
Εκπομπές CO ₂	1,1784	1,1188	1,1101

Αυτό που γίνεται εμφανές είναι ότι ο παράγοντας που αφορά το κόστος κυριαρχεί στις άλλες αντικειμενικές καθώς η τιμή αυτού είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από τις άλλες. Αυτό οδηγεί την βελτιστοποίηση να γίνεται κυρίως ως προς το κόστος παρά ως προς όλα τα μεγέθη. Αν το αναλογιστεί κανείς, είναι απολύτως λογικό. Π.χ. ελέγχονται δύο λύσεις (χρησιμοποιούμε ένα ακραίο σενάριο για να γίνει πιο εμφανές το πρόβλημα). Η μία προσφέρει βελτίωση 2% στο κόστος σχέση με το μέχρι τώρα βέλτιστο του κώδικα, και 5% βελτίωση στην αντικειμενική που αφορά την αναμενόμενη απόκλιση ηλεκτρικής ισχύος. Μία δεύτερη λύση αντίστοιχα προσφέρει 1% μείωση κόστους και 50% βελτίωση της δεύτερης αντικειμενικής. Αν όμως τα βάρη είναι ίσα, η πρώτη λύση, αν και ποιοτικά χειρότερη, θα υπερισχύσει καθώς το

1% παραπάνω μείωση στο κόστος θα προτιμηθεί (1% στα 1350 είναι 1,35 ενώ 45% στο 0,65 είναι 0,2925).

Είναι λοιπόν εμφανής η ανάγκη να είμαστε ιδιαίτερα προσεκτικοί με τα βάρη άθροισης στην αντικειμενική συνάρτηση. Εδώ τα βάρη επιλέχθηκαν ύστερα από αρκετά "τρεξίματα" του κώδικα ώστε να μην υποσκελίζεται καμία αντικειμενική. Πρακτικά, επιδιώχθηκε όλες να πολλαπλασιασθούν κατάλληλα ώστε να έρθουν σε αντίστοιχες τιμές. Π.χ. η αντικειμενική που αφορά τις εκπομπές ρύπων διοξειδίου του άνθρακα έχει μέση τιμή περί το 1 άρα πολλαπλασιάστηκε με βάρος 100 ώστε να έρθει σε συγκρίσιμες τιμές με το κόστος. Καταλληλότερη προσέγγιση θα ήταν ένας προσαρμοστικός αλγόριθμος για τα βάρη, ώστε να μην περιοριζόμαστε σε προκαθορισμένες τιμές αλλά σε αντιπροσωπευτικές για τις λύσεις που είναι εκείνη την ώρα στη μνήμη του αλγορίθμου.

6.3.2 Σενάριο ύπαρξης θερμικών μονάδων και αιολικών πάρκων

Σε αυτό το σενάριο έχουμε την εισαγωγή και της αντικειμενικής ασφαλείας του δικτύου. Οι αντικειμενικές που θα βελτιστοποιηθούν εδώ θα είναι αυτές του κόστους, αναμενόμενης απόκλισης (και οι δύο) καθώς και αυτή της δυναμικής ασφαλείας του δικτύου. Οι ρύποι θα αντιμετωπιστούν με διαφορετικές προσεγγίσεις είτε σαν ανισωτικοί περιορισμοί είτε σαν αντικειμενικές προς βελτιστοποίηση.

Τώρα, ότι αφορά τις μονάδες συμπαραγωγής θα γίνει μία σύγκριση μεταξύ κυρτών και μη κυρτών συνόλων στο πρώτο σενάριο αλλά από εκεί και πέρα όλες οι προσομοιώσεις θα γίνουν με χρήση των μη κυρτών συνόλων.

6.3.2.1 Ολική βελτιστοποίηση χωρίς περιορισμό ρύπων (J1-J2-J3-J5)

Μη Κυρτό Σύνολο

Μονάδα	Ελάχιστο Κόστος (PSO)	HS
Συμβατική 1	0,2017	0,0677
Συμβατική 2	0,0803	0,5184
Συμβατική 3	0,5993	0,2319
Συμβατική 4	1,1896	1,2000
Συμπαραγωγή 1 Ηλ.	0,1748	0,1063
Συμπαραγωγή 2 Ηλ.	0,0690	0,0564
Συμπαραγωγή 1 Θερ.	0,2076	0,2606
Συμπαραγωγή 2 Θερ.	0,1259	0,1846
Θερμική	0,4660	0,2593
Ροκας	0,0067	0,0499
Toplu3	0,0155	0,0150
Toplu12	0,0288	0,0203
Έντεκα	0,0097	0,0270
Ξυρολίμνη	0,0510	0,0450
Enercon	0,0194	0,0201
Wre	0,0275	0,0289
Κρια	0,0336	0,0302
Αχλαδιά	0,0536	0,0044
Ανεμοέσσα	0,0232	0,0074
Iweco Χώνος	0,0120	0,0081
Iweco	0,0379	0,00094
Αίολος	0,0124	0,0527
Envitec Βατάλη	0,0492	0,0167
Envitec Βάρδια	0,0353	0,0178
Υδροαιολική	0,0044	0,0675
WF Μοίρες	0,0074	0,0445
Διεθνής Αιολική	0,0154	0,0420
Τέρνα	0,0505	0,0705
Πλάστικα Κρήτης	0,0647	0,0163
Απόκλιση Ηλεκτρικής	0,6438	0,5982
Απόκλιση Θερμικής	0,0438	0,0362
Κόστος	1.276,1	1.227,1
Εκπομπές NOx	0,1553	0,1543
Εκπομπές CO ₂	1,0720	0,9088
μ	0,5035	0,4293
Χρόνος (sec)	802	100

Κυρτό Σύνολο

Μονάδα	Ελάχιστο Κόστος (PSO)	HS
Συμβατική 1	0,2876	0,0683
Συμβατική 2	0,5325	0,6000
Συμβατική 3	0,2363	0,2611
Συμβατική 4	0,7798	1,2000
Συμπαραγωγή 1 Ηλ.	0,2860	0,0887
Συμπαραγωγή 2 Ηλ.	0,1155	0,0510
Συμπαραγωγή 1 Θερ.	0,0248	0,2527
Συμπαραγωγή 2 Θερ.	0,2624	0,4456
Θερμική	0,5129	0,1094
Ροκας	0,0763	0,1800
Τορlu3	0,0058	0,0041
Τορlu12	0,0260	0,0363
Έντεκα	0,0243	0,0024
Ξυρολίμνη	0,0130	0,0094
Enercon	0,0056	0,0017
Wre	0,0117	0,0300
Κρια	0,0854	0,0062
Αγλαδιά	0,0209	0,0311
Ανεμοέσσα	0,0185	0,0034
Iweco Χόνος	0,0215	0,0050
Iweco	0,0311	0,0325
Αίολος	0,0696	0,0069
Envitec Βατάλη	0,0164	0,0253
Envitec Βάρδια	0,0427	0,0540
Υδροαιολική	0,0197	0,0923
WF Μοίρες	0,0475	0,000312
Διεθνής Αιολική	0,0603	0,0348
Τέρνα	0,0032	0,0321
Πλάστικα Κρήτης	0,0384	0,0015
Απόκλιση Ηλεκτρικής	0,6865	0,6368
Απόκλιση Θερμικής	0,0417	0,0450
Κόστος	1.285,0	1.239,9
Εκπομπές NOx	0,1305	0,1538
Εκπομπές CO ₂	0,9489	0,8768
μ	0,3241	0,4216
Χρόνος (sec)	1000	120

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα διαφαίνεται μια ξεκάθαρη υπεροχή στη λύση του Αρμονικού πάνω στο κυρτό σύνολο, ενώ η λύση της MOPSO υπερισχύει εκτός του κόστους στα μη κυρτά σύνολα. Αξιοσημείωτο είναι δε αυτό που αναφέρθηκε και νωρίτερα, δηλαδή η όξυνση της διαφοράς στο χρόνο εκτέλεσης των μεθόδων. Αυτό οφείλεται σε πληθώρα παραγόντων που λόγω της πολυπλοκότητας της MOPSO έχουν αυτό το αποτέλεσμα.

1) Μέγεθος εξωτερικού αρχείου αποθήκευσης των μη κυριαρχούμενων λύσεων.

Για κάθε μη κυριαρχούμενη λύση στο αρχείο, απαιτείται σε κάθε επανάληψη, η σύγκριση αυτής με όσα σωματίδια του σμήνους είναι μέσα στον επιτρεπτό χώρο λύσεων. Πρακτικά, όσο το αρχείο αυτό γεμίζει, τόσο πιο αργή γίνεται και η περάτωση μιας επαναλήψης του αλγορίθμου.

2) Μηχανισμός διασποράς μετώπου Pareto Παράλληλα, πέραν του ελέγχου για το αν μια λύση είναι μη κυριαρχούμενη γίνεται και έλεγχος για το αν η λύση θα δώσει μεγαλύτερη διασπορά στο μέτωπο. Αυτό πραγματοποιείται με τον υπολογισμό της

ευκλείδειας απόστασης των λύσεων στο χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων και συγκρίνοντας με την εξεταζόμενη λύση.

3) **Μέγεθος σμήνους και αριθμός επαναλήψεων και διαστάσεις προβλήματος** Αν και ο πιο προφανής, αυτός ο λόγος είναι η κύρια αιτία που ο αλγόριθμος μένει τόσο πίσω στο θέμα του χρόνου καθώς τον αυξάνει εκθετικά.

6.3.2.2 Ολική βελτιστοποίηση (J1-J2-J3-J5) υπό περιορισμό J4c (ρύπων CO₂)

Μη Κυρτό Σύνολο

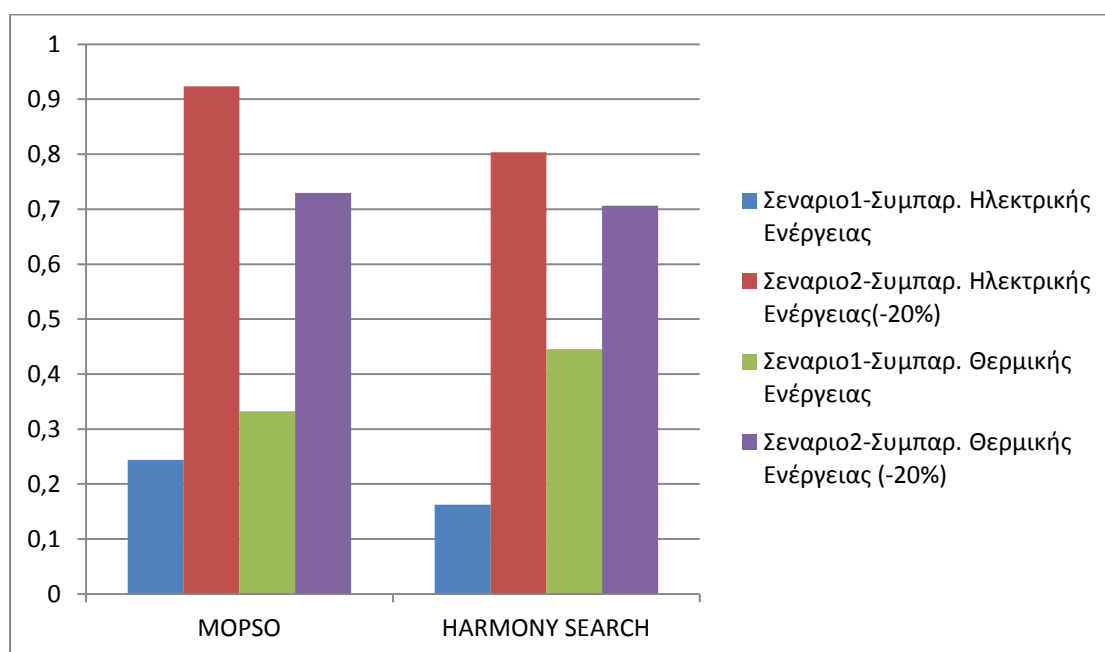
Μονάδα	Ελάχιστο Κόστος (PSO) -50%	HS -50%	Ελάχιστο Κόστος (PSO) -20%	HS -20%
Συμβατική 1	0,2085	0,0625	0,1307	0,0691
Συμβατική 2	0,4341	0,1654	0,4223	0,6000
Συμβατική 3	0,01046	0,2228	0,2739	0,1270
Συμβατική 4	0,0599	0,5008	0,3873	0,7423
Συμπαράγωγή 1 Ηλ.	0,8183	0,0704	0,6317	0,3745
Συμπαράγωγή 2 Ηλ.	0,5609	0,2315	0,2916	0,4289
Συμπαράγωγή 1 Θερ.	0,2328	0,2615	0,4286	0,1724
Συμπαράγωγή 2 Θερ.	0,5667	0,3763	0,3009	0,5338
Θερμική	0,00043	0,0627	0,0130	0,0893
Ροκας	0,0325	0,1800	0,1405	0,0027
Toplu3	0,0036	0,0150	0,0045	0,0150
Toplu12	0,0213	0,0510	0,0435	0,0156
Έντεκα	0,0235	0,0279	0,0138	0,0270
Ξυρολίμνη	0,0140	0,1320	0,0302	0,0462
Enercon	0,0206	0,0250	0,0030	0,0227
Wre	0,0203	0,0300	0,0052	0,0173
Κρια	0,0738	0,1000	0,0623	0,0066
Αγλαδιά	0,0439	0,1000	0,0554	0,0099
Ανεμοέσσα	0,0028	0,0500	0,00084	0,0235
Iweco Χώνος	0,0267	0,0450	0,0369	0,0184
Iweco	0,0207	0,0490	0,0290	0,0398
Αίολος	0,0859	0,0990	0,0294	0,0103
Envitec Βατάλη	0,0471	0,0540	0,0255	0,0540
Envitec Βάρδια	0,0528	0,0540	0,0231	0,0456
Υδροαιολική	0,0317	0,0935	0,0440	0,0427
WF Μοίρες	0,0396	0,0486	0,0056	0,0525
Διεθνής Αιολική	0,0463	0,0720	0,0333	0,0136
Τέρνα	0,1353	0,1445	0,0847	0,0585
Πλάστια Κρήτης	0,0267	0,1190	0,0047	0,0109
Απόκλιση Ηλεκτρικής	0,7188	0,6497	0,6646	0,6799
Απόκλιση Θερμικής	0,0388	0,0335	0,0359	0,0408
Κόστος	1.438,4	1.116,7	1.337,3	1.344,9
Εκπομπές NOx	0,1378	0,1388	0,1292	0,1405
Εκπομπές CO ₂	0,5200	0,4535	0,6160	0,7494
μ	0,0619	0,0001	0,2500	0,4657
Χρόνος (sec)	1150	800	1450	290

Τα παραπάνω αποτελέσματα προέκυψαν με τη βελτιστοποίηση των αντικειμενικών 1-2-3-5 με περιορισμό τους 0,55 τόνους διοξειδίου/ώρα. Οι αλγόριθμοι κατάφεραν να επιστρέψουν αποτελέσματα αλλά το πρόβλημα αυτών από ότι φάνηκε δεν ήταν να πραγματοποιήσουν την πολυ - κριτηριακή βελτιστοποίηση αλλά πιο πολύ να καταφέρουν να βρουν έστω και αρχικές λύσεις που να ικανοποιούν τους τόσο στενούς, αυτούς περιορισμούς (η αρχικοποίηση λύσεων κράτησε το 50% του χρόνου εκτέλεσης). Επί των αποτελεσμάτων, η PSO επέστρεψε μία λύση στην οποία φαίνεται να κατάφερε, όσο αυτό ήταν εφικτό, να σταθμίσει τις αντικειμενικές,

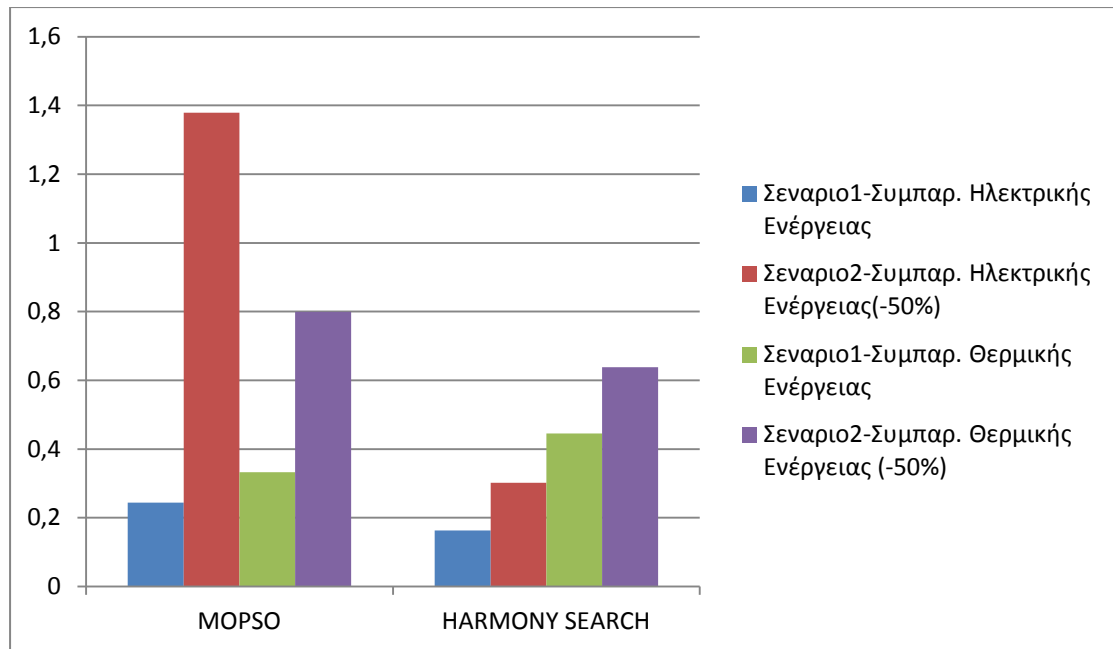
αλλά με προφανές αντίκτυπο στο κόστος. Από την άλλη, ο Αρμονικός επέστρεψε μία λύση με εντυπωσιακή μείωση (πλέον του 50%) με ένα πάρα πολύ ικανοποιητικό κόστος, αλλά αντίκτυπο αυτού ήταν η χειρότερη επίδοση σε όλες τις άλλες αντικειμενικές συναρτήσεις καθώς και η πίεση του δικτύου στα όρια δυναμικής ευστάθειας, εξαντλώντας τα όρια διείσδυσης της ισχύος από τα αιολικά πάρκα.

Δευτερεύοντος, όσον αφορά τις μονάδες συμπαραγωγής διαφάνηκαν τα εξής:

1) Η καταλυτική συμβολή τους στη μείωση, των εκπεμπόμενων ρύπων, καθώς σε αυτό το ακραίο σενάριο περιβαλλοντικών περιορισμών φάνηκε πως η αύξηση χρησιμοποίησης των δυνατοτήτων των μονάδων επέφερε αυτές τις εντυπωσιακές μειώσεις.



Διαφαίνεται ξεκάθαρα από τα γραφήματα πως η αύξηση της χρήσης των δυνατοτήτων, των σταθμών συμπαραγωγής παίζει καταλυτικό ρόλο στη συμμόρφωση με περιβαλλοντικές πολιτικές επιτρέποντας μειώσεις ρύπων χωρίς το δίκτυο να εξωθείται στα όρια του λόγω της πολύ μεγάλης διείσδυσης αιολικών. Αντιθέτως, στις περιπτώσεις ακραίως περιοριστικών περιβαλλοντικών πολιτικών, φαίνεται πως γίνεται μεγαλύτερη χρήση των αιολικών πάρκων και κυρίως οι δυνατότητες θερμικής παραγωγής των σταθμών συμπαραγωγής.



2) Τα σύνολα, αν και κοίλα δεν διαφάνηκε να παρουσιάζουν εμπόδια στη λειτουργία των αλγορίθμων εν γένη. Παρόλα αυτά, ο Αρμονικός στην δεύτερη προσομοίωση, φάνηκε να μην κάνει βέλτιστη χρήση των μονάδων συμπαραγωγής και να στρεφότανε στην εξώθηση των δυνατοτήτων των αιολικών μονάδων στα ανώτατα όρια αυτών. Αυτό αντίστοιχα, δεν παρατηρήθηκε πριν από την προσθήκη των αιολικών στο εξεταζόμενο σύστημα.

3) Αξιοσημείωτη δε είναι η μείωση του κόστους λειτουργίας του συστήματος με την εισαγωγή των αιολικών πάρκων. Πέραν λοιπόν των περιβαλλοντικών οφελών διαφαίνεται και το χρηματικό. Είναι προφανής λοιπόν η προοπτική, ότι καθώς τα δίκτυα θα είναι έτοιμα να επιτρέπουν μεγαλύτερα ποσοστά διείσδυσης των αιολικών πάρκων τόσο θα μειώνεται και το κόστος λειτουργίας και τόσο πιο βιώσιμες θα γίνονται οι επενδύσεις αυτών.

6.3.2.3 Ολική βελτιστοποίηση (J1-J2-J3-J4-J5) υπό περιορισμό J4c (ρύπων CO₂)

Μονάδα	Ελάχιστο Κόστος (PSO)	HS	Ελάχιστο Κόστος (PSO) -20%	HS -20%
Συμβατική 1	0,2378	0,2736	0,1437	0,2410
Συμβατική 2	0,2751	0,5195	0,3888	0,6000
Συμβατική 3	0,7489	0,4291	0,1385	0,4311
Συμβατική 4	0,7321	0,7976	0,0714	0,4051
Συμπαγωγή 1 Ηλ.	0,1517	0,1963	0,3491	0,5000
Συμπαγωγή 2 Ηλ.	0,1040	0,0518	0,4645	0,1123
Συμπαγωγή 1 Θερ.	0,0545	0,0781	0,1809	0,3707
Συμπαγωγή 2 Θερ.	0,2348	0,2127	0,5137	0,2998
Θερμική	0,4150	0,5000	0,0244	0,1297
Ροκας	0,1065	0,0093	0,1743	0,0080
Torlu3	0,0122	0,0048	0,0015	0,0054
Torlu12	0,0390	0,0510	0,0426	0,0510
Έντεκα	0,0213	0,0119	0,0226	0,0270
Ξυρολίμνη	0,0934	0,0123	0,0586	0,00019
Enercon	0,0017	0,0250	0,0132	0,0040
Wre	0,0107	0,0231	0,0119	0,0095
Κρια	0,0242	0,1000	0,0928	0,0372
Αγλαδιά	0,0228	0,0275	0,0070	0,00012
Ανεμοέσσα	0,0108	0,0023	0,0036	0,0377
Iweco Χόνος	0,0085	0,0450	0,0385	0,0360
Iweco	0,0287	0,0411	0,0116	0,0184
Αίολος	0,0626	0,0061	0,0182	0,0990
Envitec Βατάλη	0,0188	0,0148	0,0046	0,0540
Envitec Βάρδια	0,0327	0,0278	0,0254	0,00042
Υδροαιολική	0,0430	0,0033	0,149	0,0474
WF Μοίρες	0,0376	0,0253	0,0186	0,0307
Διεθνής Αιολική	0,0051	0,0308	0,0539	0,0720
Τέρνα	0,0021	0,0492	0,0888	0,0556
Πλάστικα Κρήτης	0,0097	0,0749	0,0182	0,0052
Απόκλιση Ηλεκτρικής	0,6617	0,6733	0,6483	0,6976
Απόκλιση Θερμικής	0,0331	0,0412	0,0317	0,0454
Κόστος	1.294,3	1.276,3	1.338,4	1.317,1
Εκπομπές NOx	0,1306	0,1272	0,1339	0,1232
Εκπομπές CO ₂	0,9715	0,9862	0,6236	0,7495
μ	0,4168	0,4199	0,1583	0,5971
Χρόνος (sec)	1359	231	1982	290

6.3.3. Σενάριο ύπαρξης θερμικών μονάδων, αιολικών πάρκων και V2G σταθμού

6.3.3.1 Ολική βελτιστοποίηση (J1-J2-J3-J5) υπό περιορισμό J4c (ρύπων CO₂)

Μονάδα	Ελάχιστο Κόστος (PSO)	HS	Ελάχιστο Κόστος (PSO) (<0,7tons/hr)	HS (<0,7tons/hr)
Συμβατική 1	0,1759	0,0505	0,1416	0,1109
Συμβατική 2	0,3934	0,6000	0,4244	0,6000
Συμβατική 3	0,5320	0,1827	0,5374	0,0851
Συμβατική 4	0,9498	1,2000	0,3035	0,5636
Συμπαραγωγή 1 Ηλ.	0,0915	0,2480	0,5990	0,5000
Συμπαραγωγή 2 Ηλ.	0,0528	0,0532	0,2235	0,55
Συμπαραγωγή 1 Θερ.	0,0220	0,3030	0,2379	0,2647
Συμπαραγωγή 2 Θερ.	0,1935	0,1447	0,5069	0,3776
Θερμική	0,5845	0,3454	0,0553	0,1526
Ροκας	0,0072	0,0073	0,1026	0,1800
Torlu3	0,0063	0,0150	0,0112	0,0150
Torlu12	0,0320	0,0106	0,0122	0,0510
Έντεκα	0,0059	0,0270	0,0013	0,0105
Ευρολίμνη	0,0790	0,1320	0,0189	0,0026
Enercon	0,0022	0,0059	0,0223	0,0153
Wre	0,0093	0,0300	0,0120	0,0300
Κρια	0,0474	0,0286	0,0407	0,0068
Αγλαδιά	0,0659	0,1000	0,0183	0,0026
Ανεμοέσσα	0,0410	0,00027	0,0199	0,0100
Iweco Χόνος	0,000116	0,0450	0,0414	0,0413
Iweco	0,0342	0,0014	0,0435	0,0121
Αίολος	0,0690	0,0109	0,0824	0,0543
Envitec Βατάλη	0,0157	0,0103	0,0103	0,0231
Envitec Βάρδια	0,0142	0,0142	0,000028	0,00063
Υδροαιολική	0,0255	0,0179	0,0546	0,0935
WF Μοίρες	0,0484	0,0010	0,0123	0,0473
Διεθνής Αιολική	0,693	0,0060	0,0401	0,0180
Τέρνα	0,0560	0,0129	0,0868	0,0027
Πλάστια Κρήτης	0,0246	0,0539	0,0340	0,0698
V2G	0,0055	0,0080	0,0063	0,0079
Απόκλιση Ηλεκτρικής	0,6569	0,6417	0,7025	0,6915
Απόκλιση Θερμικής	0,0386	0,0450	0,0418	0,0451
Κόστος	1.269,3	1.250,2	1.341,7	1.333,3
Εκπομπές NOx	0,1347	0,1576	0,1259	0,1375
Εκπομπές CO ₂	1,0413	0,9680	0,6800	0,6999
μ	0,2934	0,5396	0,2705	0,2267
Χρόνος (sec)	1653	190	781	322

6.3.3.2 Ολική βελτιστοποίηση (J1-J2-J3-J4-J5) υπό περιορισμό J4c (ρύπων CO₂)

Μονάδα	Ελάχιστο Κόστος (PSO)	HS	Ελάχιστο Κόστος (PSO) (<0,7tons/hr)	HS (<0,7tons/hr)
Συμβατική 1	0,2002	0,3938	0,3178	0,3085
Συμβατική 2	0,5794	0,5290	0,4639	0,5001
Συμβατική 3	0,3566	0,5095	0,5083	0,4365
Συμβατική 4	0,5696	0,5437	0,4108	0,3530
Συμπαραγωγή 1 Ηλ.	0,4527	0,1647	0,3034	0,2258
Συμπαραγωγή 2 Ηλ.	0,1455	0,1022	0,1652	0,4056
Συμπαραγωγή 1 Θερ.	0,2396	0,0806	0,2485	0,211
Συμπαραγωγή 2 Θερ.	0,5412	0,2937	0,5359	0,5182
Θερμική	0,0192	0,4175	0,0156	0,0608
Ροκας	0,1239	0,0072	0,0848	0,1800
Torlu3	0,0097	0,0150	0,0062	0,0150
Torlu12	0,0304	0,0112	0,0458	0,0144
Έντεκα	0,000892	0,0270	0,0135	0,0270
Ευρολίμνη	0,0138	0,0071	0,0405	0,0024
Enercon	0,0173	0,0250	0,0063	0,0075
Wre	0,0236	0,0231	0,0109	0,0300
Κρια	0,0880	0,0044	0,0606	0,0112
Αγλαδιά	0,0253	0,0624	0,0752	0,0075
Ανεμοέσσα	0,0088	0,0053	0,0434	0,0023
Iweco Χώνος	0,0216	0,0400	0,0261	0,0450
Iweco	0,0197	0,0140	0,0091	0,0219
Αίολος	0,0412	0,0166	0,0470	0,0110
Envitec Βατάλη	0,0281	0,0502	0,0379	0,0103
Envitec Βάρδια	0,0091	0,0192	0,0342	0,0540
Υδροαιολική	0,0694	0,0104	0,0112	0,0935
WF Μοίρες	0,0169	0,0076	0,0332	0,0157
Διεθνής Αιολική	0,0203	0,0205	0,0447	0,0388
Τέρνα	0,0067	0,1445	0,0566	0,0497
Πλάστικα Κρήτης	0,0033	0,1148	0,0137	0,0021
V2G	0,0053	0,0080	0,0075	0,0080
Απόκλιση Ηλεκτρικής	0,6932	0,6843	0,6965	0,6929
Απόκλιση Θερμικής	0,0401	0,0431	0,0401	0,0404
Κόστος	1.303,1	1.303,7	1.316,9	1.371,3
Εκπομπές NOx	0,1256	0,1208	0,1204	0,1214
Εκπομπές CO ₂	0,7282	0,9168	0,6962	0,6997
μ	0,4437	0,3590	0,1984	0,2214
Χρόνος (sec)	862	182	851	544

Αν και οι σταθμοί **Vehicle to Grid**, φαίνεται να είναι στόχος αρκετού σκεπτικισμού, σχετικά με το αν είναι βιώσιμο να έχεις ηλεκτρικά αυτοκίνητα έτοιμα για να τους καταναμηθεί φορτίο, η προσομοίωση φαίνεται να κάνει πολύ καλή χρήση τους. Δεδομένου ότι εξετάζουμε ένα σενάριο αιχμής με ζήτηση της τάξης των **280 MW**, ο σταθμός φαίνεται να βοηθά καθώς γίνεται χρήση του προσφερόμενου φορτίου σε ποσοστό της τάξης του **50%** και πλέον. Πόσο μάλλον αν σκεφτεί κανείς ότι μιλάμε για ένα σχετικά μικρό σταθμό για τα δεδομένα του δικτύου. Συγκεκριμένα, στο σενάριο **3.2** η **PSO** σε κατάσταση περιορισμού ρύπων αυξάνει τη χρήση του σταθμού, σε σχέση με το ελεύθερο περιορισμών σενάριο, κατά **25%** φτάνοντας τον στο **93,75%** δυναμικότητας. Στο **3.1** πάλι είχαμε αντίστοιχα αύξηση αλλά της τάξης του **12,5%**. Ο **Αρμονικός** πάλι, είναι η πλήρης επιβεβαίωση της χρησιμότητας αυτών των σταθμών κάνοντας **100%** χρήση σε όλα τα σενάρια. Αντίστοιχα, στα σενάρια

χωρίς περιορισμούς, ο σταθμός φαίνεται να επιμερίζεται φορτίο κυρίως από τις θερμικές μονάδες και να μην εμποδίζει την αιολική διείσδυση, ενώ στα περιοριστικά σενάρια αναγκαστικά παίρνει φόρτο από τα αιολικά για να κρατήσει το επίπεδο ασφάλειας σε ανεκτά επίπεδα.

Όσο προχωράμε στη εποχή των έξυπνων δικτύων και με τα ηλεκτρικά οχήματα να βελτιώνονται και να κερδίζουν μεγαλύτερο μερίδιο αγοράς, μεγαλύτερης κλίμακας σταθμοί και με μεγαλύτερες μπαταρίες στα οχήματα θα μπορούσαν να γίνουν μια πηγή ισχύος στη οποία ο διαχειριστής μπορεί να βασιστεί εν γένη. Στη συγκεκριμένη μελέτη, εξετάσαμε ένα ακραίο φαινόμενο αιχμής, αλλά η χρήση των σταθμών τέτοιου τύπου, ίσως διευρυνθεί σε όλες τις καταστάσεις λειτουργίας του δικτύου. Αυτό βέβαια προϋποθέτει βελτίωση της τεχνολογίας και χωρητικότητας των μπαταριών, διότι πέραν από τις ανάγκες του δικτύου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και ο χρόνος ζωής της μπαταρίας καθώς και το αναγκαίο επίπεδο φόρτισης ώστε να μπορέσει ο οδηγός του οχήματος να πραγματοποιήσει τις ανάγκες του.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

MOPSO

Σενάριο	Σωματίδια	Επαναλήψεις	Αδράνεια	C1	C2	Vel_x
1	300	500	0,8-0,4 (1 για μονοκριτηριακά)	1.4	1.4	0,001
2	150	100	0,8-0,4	1	1	0,001
3	150	100	0,8-0,4	1	1	0,001

Αρμονική Αναζήτηση

Σενάριο	HMCR	PAR	Επαναλήψεις	W1	W2	W3	W4	W4c	W5
1	0,95	0,2	10000	1	100	100	1000	1	-
2	0,95	0,2	10000	1	100	100	1000	-	10
3	0,95	0,2	10000	1	100	100	1000	-	10

Παρατηρήσεις για τις παραμέτρους

Στη MOPSO όπως είναι φυσικό μειώσαμε το μέγεθος του σμήνους. Όπως αναφέραμε και νωρίτερα, η πολυπλοκότητα είναι εκθετικά ανάλογη με το μέγεθος του σμήνους καθώς και των διαστάσεων του προβλήματος.

Σχετικά, με τις σταθερές C1 & C2 επιλέξαμε μικρότερες τιμές στα σενάρια όπου οι διαστάσεις ήταν 29 και 30 αντίστοιχα για να ενισχύσουμε τις διερευνητικές ικανότητες της μεθόδου. Πολύ μεγάλες τιμές ίσως οδηγήσουν σε πρόωρη σύγκλιση και να αφήσουν εκτός των λύσεων πολύτιμα κομμάτια του μετώπου Pareto. Αυτή ακριβώς είναι και η φιλοσοφία της προσαρμοστικής μορφής της τιμής της αδράνειας κίνησης των σωματιδίων. Μεγαλύτερες τιμές αρχικά για να διερευνηθεί ο εφικτός χώρος και μικρότερες τιμές προοδευτικά, για να επιτευχθεί σύγκλιση του σμήνους.

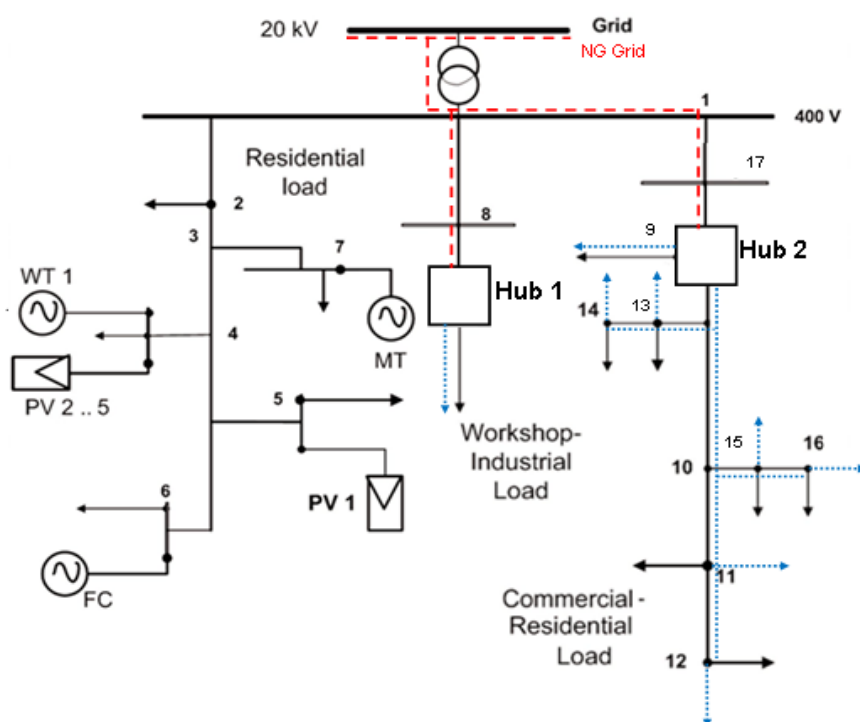
Τέλος, στα μονο-κριτηριακά προβλήματα, από σχετική έρευνα σε δημοσιεύσεις και δοκιμές ο αλγόριθμος φαίνεται να συγκλίνει αποτελεσματικότερα σε λύσεις για τιμές αδρανείας ίσες με 1.

6.4 Βελτιστοποίηση Μικροδικτύου

6.4.1 Το δίκτυο Εφαρμογής

6.4.1.1 Στοιχεία του συστήματος

Το εξεταζόμενο δίκτυο είναι το εξής:



Σχήμα 6.4.1 Το υπό μελέτη δίκτυο. Με μαύρο χρώμα το δίκτυο ηλεκτρισμού XT, με κόκκινο και παχιά διακεκομμένη γραμμή το δίκτυο φυσικού αερίου, με διακεκομμένη μπλε το δίκτυο τηλεθέρμανσης και με μπλε βέλη τα θερμικά φορτία.

Οι αλγόριθμοι για τη μελέτη των μικροδικτύων εφαρμόστηκαν στο δίκτυο του παραπάνω σχήματος. Πρόκειται για ένα τυπικό δίκτυο χαμηλής τάσης. Αποτελείται από τρεις διακλαδώσεις, με την πρώτη να τροφοδοτεί μια αστική περιοχή, τη δεύτερη

να παρέχει ισχύ σε έναν βιομηχανικό καταναλωτή και την τρίτη να τροφοδοτεί μια αστική-εμπορική περιοχή.

Οι ηλεκτρικές γραμμές μπορούν να είναι είτε υπόγεια καλώδια, τα οποία συναντώνται κυρίως σε αστικές περιοχές με μεγάλη πυκνότητα φορτίου, είτε εναέριες γραμμές, τις οποίες και βρίσκουμε σε περιοχές όπως οι αγροτικές με μάλλον χαμηλή πυκνότητα. Στην περίπτωση μας στα υποδίκτυα που τροφοδοτούν το αστικό και το αστικό-εμπορικό φορτίο θεωρήσαμε εναέριες γραμμές, ενώ στο υποδίκτυο που αναφέρεται στο βιομηχανικό φορτίο μόνο υπόγεια καλώδια.

Το δίκτυο φυσικού αερίου είναι ένα συνηθισμένο αστικό δίκτυο, περιορισμένης όμως έκτασης. Παρέχει φυσικό αέριο στους ενεργειακούς διανομείς, έτσι ώστε να μπορούν να λειτουργήσουν οι μονάδες συμπαραγωγής και τα Boiler για την κάλυψη των θερμικών αναγκών των φορτίων. Τα μεμονωμένα φορτία δεν είναι συνδεδεμένα με το δίκτυο. Οι θερμικές ανάγκες του βιομηχανικού φορτίου καλύπτονται απευθείας από τον αντίστοιχο διανομέα, ενώ για την εξυπηρέτηση των θερμικών φορτίων στο αστικό-εμπορικό μικροδίκτυο θεωρήσαμε πως υπάρχει εγκατεστημένο δίκτυο τηλεθέρμανσης. Το δίκτυο τηλεθέρμανσης μεταφέρει την παραγόμενη θερμότητα από το δεύτερο ενεργειακό διανομέα στα διάφορα απομακρυσμένα φορτία της αστικής-εμπορικής περιοχής.

6.4.1.2 Μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής

Το μελετώμενο δίκτυο διαθέτει πληθώρα μέσων παραγωγής ηλεκτρικής καθώς και θερμικής ισχύος ώστε να καλύπτει μέρος των αναγκών του στις πρώτες και πλήρως τις δεύτερες. Συγκεκριμένα διαθέτει μία μικροτουρμπίνα (MT), μία μονάδα τύπου Fuel Cell (FC), δύο μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και ζεστού νερού καθώς και δύο μποίλερ (BL) για κάλυψη των αναγκών σε ζεστό νερό που δεν θα καλύπτει η συμπαραγωγή. Επίσης είναι εγκατεστημένες δύο συστοιχίες Φωτοβολταϊκών καθώς και μία ανεμογεννήτρια.

- Η ανεμογεννήτρια είναι της τάξης 3.504 kWh/kW εγκατεστημένης ισχύος. Ο συντελεστής φόρτισής της θεωρήθηκε ίσος προς 40% είναι Η ισχύς της ανεμογεννήτριας θεωρήθηκε 15 kW και η καμπύλη παραγωγής ισχύος της προσεγγίζεται από πολυώνυμο 3^{ου} βαθμού, με τα δεδομένα για την ταχύτητα του ανέμου να αντιπροσωπεύουν μετρήσεις για το νησί της Κρήτης.
- Για τα φωτοβολταϊκά η ετήσια παραγωγή είναι 1.300-1.400 kWh/kW_p. Για την παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά χρησιμοποιήσαμε κανονικοποιημένες χρονοσειρές από τις συστοιχίες φωτοβολταϊκών ισχύος 1,1 kW που είναι εγκατεστημένες στο χώρο του ΕΜΠ στου Ζωγράφου.
- Η διαθεσιμότητα της μικροτουρμπίνας είναι 95% και η απόδοσή της θεωρήθηκε ίση με 26%.
- Η διαθεσιμότητα της κυψέλης καυσίμου είναι 90% και η απόδοσή της 45%.
- Τόσο η μικροτουρμπίνα όσο και η κυψέλη καυσίμου χρησιμοποιούν ως καύσιμο φυσικό αέριο, του οποίου η απόδοση είναι 8,8 kWh/m³ και η τιμή 10 €/m³.

Θεωρούμε πως όλες οι προαναφερθείσες πηγές παρέχουν στο σύστημα και ενεργό και άεργο ισχύ, οπότε ο συντελεστής ισχύος τους δεν ισούται με τη μονάδα, αλλά δίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Το κόστος παραγωγής ενέργειας από τις μονάδες DG δίνεται από την ακόλουθη συνάρτηση:

$$C_i = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2$$

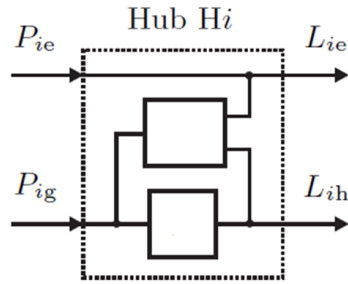
Για τις ΑΠΕ συγκεκριμένα θεωρήσαμε πως τα κόστη λειτουργίας τους είναι μηδενικά (δηλαδή δωρεάν η πώληση της αιολικής και της φωτοβολταϊκής ενέργειας), καθώς σκοπός μας ήταν να ελαχιστοποιήσουμε τα έξοδα των καταναλωτών. Συγκεντρωτικά τα δεδομένα (ελάχιστη και μέγιστη παραγόμενη ισχύς και συντελεστές κόστους) για τις μονάδες DG δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Μονάδα	Ελάχιστη Παραγόμενη Ισχύς kW	Μέγιστη Παραγόμενη Ισχύς kW	a_i €/ct/h	b_i €/ct/kWh	c_i €/ct/kWh ²
MT	6	30	0,01	4,37	0,01
FC	3	30	0,8415	2,41	0,033
WT	0,001	15	0	0	0
PV1	0,001	3	0	0	0
PV2...PV5	0,001	2,5	0	0	0

Πίνακας 6.4.1α Δεδομένα των μονάδων DG.

6.4.1.3 Ενεργειακοί διανομείς

Οι δύο ενεργειακοί διανομείς στους ζυγούς 8 και 9 είναι όμοιοι και απεικονίζονται στο ακόλουθο σχήμα. Θεωρούμε πως καθένας τους είναι εφοδιασμένος με μία ηλεκτρική γραμμή μικρού μήκους η οποία συνδέει άμεσα την ηλεκτρική είσοδο με την ηλεκτρική έξοδο, με μία μονάδα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (CHP), με την οποία επιτυγχάνεται σύζευξη μεταξύ του ηλεκτρικού δικτύου και του δικτύου φυσικού αερίου, και με ένα Boiler.



Σχήμα 6.4.1β Οι ενεργειακοί διανομείς που χρησιμοποιήθηκαν

Για τη μοντελοποίηση των μονάδων CHP χρησιμοποιήθηκε η υπάρχουσα μονάδα στο κτίριο των Γ.Ε. του ΕΜΠ, η οποία καταναλώνει φυσικό αέριο. Με θεώρηση μεταβλητού βαθμού απόδοσης, επιδιώχθηκε η όσο το δυνατόν πιο πιστή μοντελοποίηση του CHP. Όσον αφορά στα Boiler, χρησιμοποιήσαμε μονάδες του εμπορίου. Οι ικανότητες τους επιλέχθηκαν έτσι ώστε σε περίπτωση προβλήματος στα CHP να επαρκούν για την πλήρη κάλυψη των θερμικών αναγκών της βιομηχανικής και της αστικής-εμπορικής περιοχής.

Μονάδα	a_i €/ct/h	b_i €/ct/kWh	c_i €/ct/kWh ²
CHP	10	3,738	0
Boiler	0,001	5,098	0

Πίνακας 6.4.1γ Συντελεστές κόστους των μονάδων των διανομέων.

Μονάδα	Ελάχιστη Είσοδος Φυσ. Αερίου kW	Μέγιστη Είσοδος Φυσ. Αερίου kW	Απόδοση
CHP	10	286	βλ. πίνακα 9.5
Boiler	0	400	80%

Πίνακας 6.4.1δ Είσοδος φυσικού αερίου και απόδοση των μονάδων των διανομέων.

Είσοδος Φυσ. Αερίου P_g kW	η_e	η_h
10	0,09	0,43
50	0,14	0,44
100	0,21	0,45
150	0,25	0,45
200	0,25	0,425
250	0,27	0,45
286	0,28	0,47

Πίνακας 6.4.1ε Δεδομένα για τους βαθμούς απόδοσης των CHP

Πρακτικά λοιπόν το Boiler αποδίδει:

$$P_{out} = gas_{in} * n_{boiler}$$

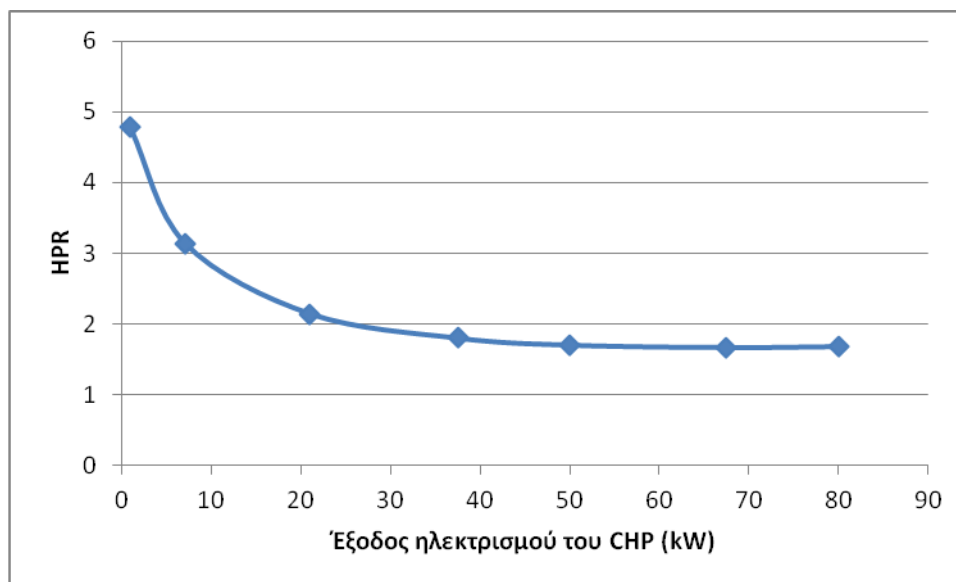
$$max gas_{in} = 400 \text{ kw}$$

και το CHP

Είσοδος φυσικού αερίου kW	η_e	η_h	P_{out_e}	P_{out_h}	HPR
			kW	kW	
10	0,09	0,43	0,9	4,3	4,777778
50	0,14	0,44	7	22	3,142857
100	0,21	0,45	21	45	2,142857
150	0,25	0,45	37,5	67,5	1,8
200	0,25	0,425	50	85	1,7
250	0,27	0,45	67,5	112,5	1,666667
286	0,28	0,47	80,08	134,42	1,678571

Πίνακας 6.4.1στ Δεδομένα για την έξοδο των CHP

άρα κάνοντας ένα Fit μεταξύ των τιμών που προέκυψαν πιο πάνω για το HPR μπορούμε να έχουμε μια πολύ καλή προσέγγιση της εφικτής περιοχής λειτουργίας του CHP όσον αφορά την παραγωγή Ηλεκτρικής και Θερμικής Ισχύος. Μια καλή προσέγγιση είναι με πολυωνυμικό άθροισμα πέμπτου βαθμού. Αυτό μας δίνει την παρακάτω γραφική. Βλέπουμε πως η σχέση είναι γνησίως μονότονη. Η απλή γεωμετρία της εφικτής περιοχής λειτουργίας είναι ένα θετικό γεγονός, διότι παράξενες γεωμετρίες αποτελούν πολλές φορές τροχοπέδη για τις βελτιστοποιήσεις.



Σχήμα 6.4.1 Σχέση Ηλεκτρικής-Θερμικής Ενέργειας εξόδου CHP

Πρακτικά, αφού η μεταβλητή απόφασης που θα αφορά το CHP θα είναι η ηλεκτρική ισχύς θα μπορούμε να βρούμε μέσω του HPR και τη θερμότητα εξόδου και έπειτα θα βλέπουμε αν αυτή είναι εφικτή άρα δηλαδή αν δεν παραβιάζει τα όρια λειτουργίας της μονάδας.

Η Αντικειμενική συνάρτηση είναι λοιπόν

$$\text{Cost} = AX + \sum_{i=1}^{N_{DG}} (a_i + b_i \cdot x_i + c_i \cdot x_i^2) + \sum_{j=1}^{N_{CHP}} C_{\text{gas_input}} \frac{x_j}{\eta_e(x_j)}$$

Όπου A η οριακή τιμή δικτύου και X η ποσότητα ισχύος που "αγοράζουμε" από αυτό και οι άλλες δύο σχέσεις αφορούν τις συμβατικές μονάδες και τα Boiler όπως τα περιγράψαμε παραπάνω.

6.4.1.4 Φορτία

Τα δεδομένα της ζήτησης προέκυψαν από το IEEE-Reliability Test System (IEEE RTS) για μία τυπική ημέρα του κάθε μήνα και για κάθε ζυγό. Από αυτά, και υποθέτοντας κανονική κατανομή της ζήτησης του κάθε ζυγού για ένα μήνα, με μέση τιμή κάθε ώρας την δοθείσα τιμή της τυπικής ημέρας του αυτού μήνα και με τυπική απόκλιση ίση με το 10% αυτής, προσδιορίσαμε τις ζητήσεις του κάθε ζυγού για κάθε ημέρα του κάθε μήνα.

Για τα θερμικά φορτία χρησιμοποιήσαμε συνηθισμένες καμπύλες ζήτησης θερμότητας σε βιομηχανικές και αστικές-εμπορικές περιοχές, τις οποίες προσαρμόσαμε κατάλληλα στο σύστημα μας. Πιο συγκριμένα, θεωρήσαμε πως το συνολικό θερμικό φορτίο (το άθροισμα του θερμικού φορτίου το μεσαίου και το δεξή κλάδου) σχετίζεται με το συνολικό ηλεκτρικό με την αναλογία: $\frac{TL_{th}}{TL_{el}} = \frac{55}{45}$, όπου

TL_{th} και TL_{el} είναι το συνολικό θερμικό και ηλεκτρικό φορτίο αντίστοιχα. Το συνολικό θερμικό φορτίο με τη σειρά του μοιράζεται στους δύο κλάδους ως εξής: $TL_{th,1} = 0,3 \cdot TL_{th}$ και $TL_{th,2} = 0,7 \cdot TL_{th}$, όπου $TL_{th,1}$ και $TL_{th,2}$ το θερμικό φορτίο του μεσαίου (βιομηχανικού) και του δεξή (αστικού - εμπορικού) κλάδου αντίστοιχα.

6.4.1.5 Τα Ηλεκτρικά Αυτοκίνητα

Υπάρχουν αρκετοί τύποι ηλεκτρικών οχημάτων. Οι μπαταρίες αυτών αποθηκεύουν ηλεκτροχημική ενέργεια για να καταφέρουν την επιθυμητή κίνηση. Οι τρόποι φόρτισης αυτών είναι είτε με απευθείας φόρτιση, είτε με ανάκτηση ισχύος κατά το φρενάρισμα.

Ένας άλλος τύπος ηλεκτρικού οχήματος (θα τα αποκαλούμε electric vehicle-EV για συντομία) είναι αυτά με κυψέλες καυσίμου. Αποθηκεύουν ενέργεια σε μορφή υδρογόνου, με το οποίο τροφοδοτούν την κυψέλη και μαζί με οξυγόνο και ηλεκτρόλυση παράγεται θερμότητα και νερό.

Τέλος υπάρχουν και τα υβριδικά τα οποία κάνουν χρήση κινητήρα εσωτερικής καύσης καθώς και ηλεκτρικού. Η φόρτιση των μπαταριών αυτών γίνεται συνήθως μόνο μέσω της ανάκτησης ισχύος κατά το φρενάρισμα. Όμως υπάρχουν και υβριδικά οχήματα τα οποία μπορούν να συνδεθούν και να φορτίσουν από το δίκτυο. Οι μπαταρίες τους είναι τουλάχιστον της τάξης των 4kwh και έχουν τουλάχιστον έναν ακόμα ηλεκτρικό κινητήρα για την κίνηση.

Τώρα η φόρτιση αυτών μπορεί να είναι τριών τύπων[9]:

Charging Level	Απαιτήσεις	Τυπική φόρτιση	Ώρες φόρτισης για μπαταρία 35 KWh
Level 1	Μέσω Κοινής Οικιακής Εγκατάστασης	3 kW	12 h
Level 2	Αποκλειστική Ειδική έξοδο φόρτισης και καλωδίωση	10-20 kW	2 - 4 h
Level 3	Αποκλειστική Ειδική έξοδο φόρτισης και καλωδίωση – Αποκλειστικός Επιπλέον ειδικός φορτιστή με ειδική καλωδίωση για DC φόρτιση στο EV	40 kW	45 min

Για το παρών πρόβλημα υποθέτουμε παροχή του πρώτου τύπου και υποθέτουμε πως δεν μπορούμε να πάρουμε πάνω από 4kw (τυπικά 3) ισχύ καθώς

τότε θα θέταμε την εγκατάσταση στα όρια της, δεδομένου ότι λειτουργούν και άλλες συσκευές κατά τη φόρτιση.

Να σημειώσουμε ότι καθώς το θερμικό φορτίο εξυπηρετείται μόνο από τους διανομείς, στην περίπτωση της αστικής-εμπορικής περιοχής όπου έχουμε πολλά θερμικά φορτία δεν επιμερίσαμε το συνολικό θερμικό φορτίο σε κάθε κόμβο του δικτύου και γι' αυτό δεν παρουσιάζουμε δεδομένα για κάθε κόμβο ξεχωριστά.

Άρα το πρόβλημα είναι το εξής:

$\min(\text{Cost})$

$$\text{Cost} = AX + \sum_{i=1}^{N_{DG}} (a_i + b_i \cdot x_i + c_i \cdot x_i^2) + \sum_{j=1}^{N_{CHP}} C_{\text{gas_input}} \frac{x_j}{\eta_e(x_j)}$$

$$P_{\min,k} \leq x_k \leq P_{\max,k}$$

$$Q_{\min,n} \leq x_n \leq Q_{\max,n}$$

$$P_{\min,j} \leq x_j \leq P_{\max,j}$$

$$Q_{\min,j} \leq x_j \cdot \text{HPR}(x_j) \leq Q_{\max,j}$$

Ισοτικός περιορισμός Ισοζυγίου Ηλεκτρικής Ισχύος:

$$X + \sum_{k=1}^{N_{DG,e}} x_k + \sum_{j=1}^{N_{CHP}} x_j + P_{RES} = P_{demand}$$

Ισοτικός περιορισμός Ισοζυγίου Θερμικής Ισχύος:

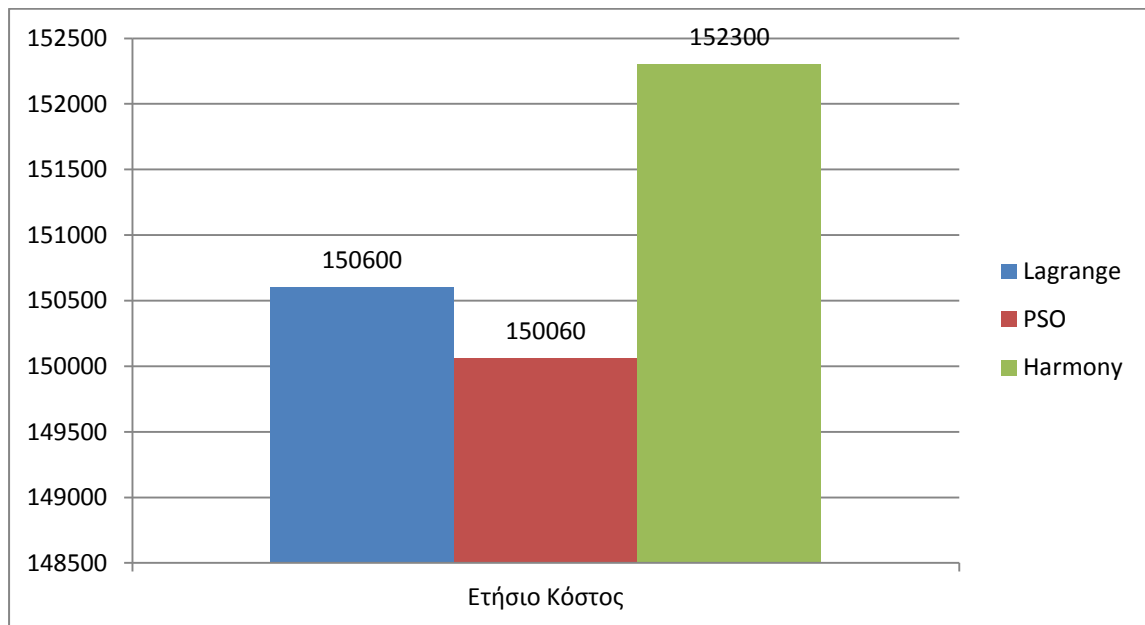
$$\sum_{n=1}^{N_{DG,h}} x_n + \sum_{j=1}^{N_{CHP}} x_j \cdot \text{HPR}(x_j) = Q_{demand}$$

6.5 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Ντετερμινιστικής Βελτιστοποίησης

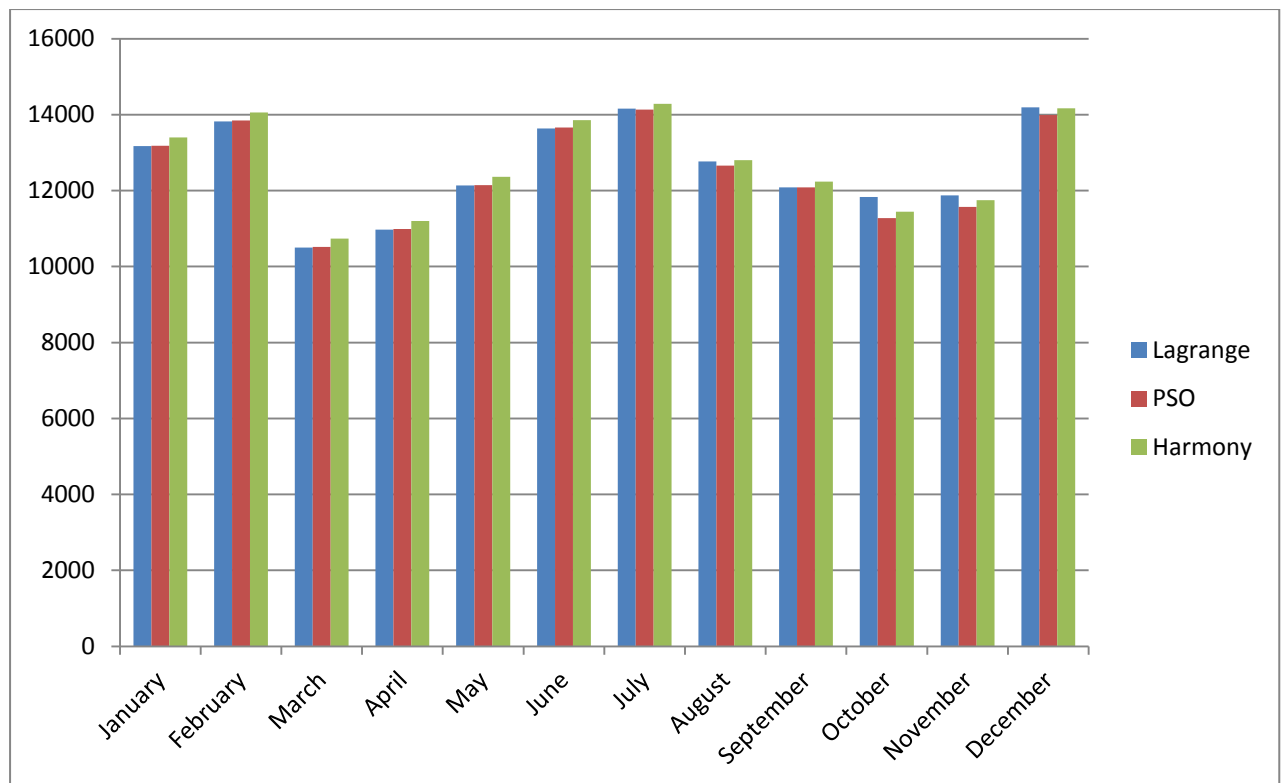
6.5.1. Μικροδίκτυο με ηλεκτρικά οχήματα-Πολιτική του καλού πολίτη

Υποθέτουμε την ύπαρξη μόνο των φορτίων που περιγράφηκαν προηγουμένως. Η βελτιστοποίηση θα πραγματοποιηθεί με τρεις μεθόδους για να γίνει η σύγκριση. Οι μέθοδοι είναι ο Αρμονικός Αλγόριθμος, η PSO καθώς και η ευρέως διαδεδομένη Lagrange. Σκοπός, είναι να συγκριθούν οι επιδόσεις των μεθόδων τόσο σε ποιότητα λύσεων όσο και σε υπολογιστικά.

Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις αφορούν το έτος 2008. Τα στοιχεία αυτά περιλαμβάνουν ώρα προς ώρα τη ζήτηση, την παραγωγή των ΑΠΕ, καθώς και την οριακή τιμή του δικτύου.



Σχήμα 6.5.1α Ετήσιο κόστος λειτουργίας μικροδικτύου



Σχήμα 6.5.1β Μηνιαίο κόστος λειτουργίας μικροδικτύου

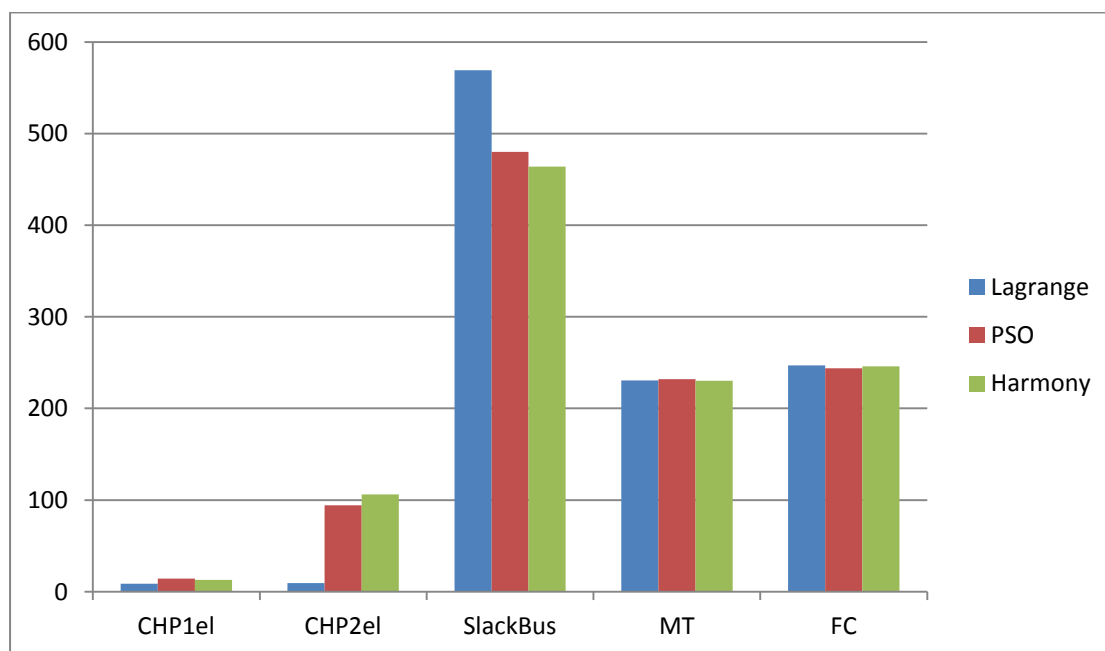
Συγκριτικά η μέθοδος PSO φαίνεται να πετυχαίνει το καλύτερο ετήσιο αποτέλεσμα αλλά η διαφορές είναι σχετικά μικρές. Ο Αρμονικός πάλι πετυχαίνει κόστος πολύ κοντά στα άλλα δύο. Η διαφορά ποσοστιαία είναι μόλις 1,49% από τη χαμηλότερη.

Ένας άλλος παράγοντας που ίσως δώσει μία άλλη διάσταση στη σύγκριση είναι ο χρόνος εκτέλεσης. Ειδικά, όταν μιλάμε για βελτιστοποιήσεις ώρα με την ώρα είναι αναγκαίο χαρακτηριστικό της χρησιμοποιούμενης μεθόδου η ταχεία εκτέλεση και εύρεση του αποτελέσματος.

	Lagrange	PSO	Harmony
Time(sec)	656	1743	353

Οι διαφορές εδώ είναι αρκετά εμφανείς για να καταστήσουν ξεκάθαρα μια μέθοδο πιο ελκυστική από τις άλλες. Ο Αρμονικός αλγόριθμος κατάφερε μόλις με διαφορά 1,49% στα αποτελέσματα του να περατώσει 8760 ωριαίες βελτιστοποιήσεις σχεδόν 2 φορές γρηγορότερα από τη Lagrange και 5 από την PSO. Αυτή η διαφορά είναι καθοριστική καθώς μας δείχνει το πόσο γρήγορα και αποτελεσματικά μπορούν οι μετεωριστικοί αλγόριθμοι να εντοπίσουν βέλτιστα. Από την άλλη, η PSO δίνει και αυτή με τη σειρά τα βέλτιστα αποτελέσματα, αλλά σε χρόνο πολλαπλάσιο από τον Αρμονικό.

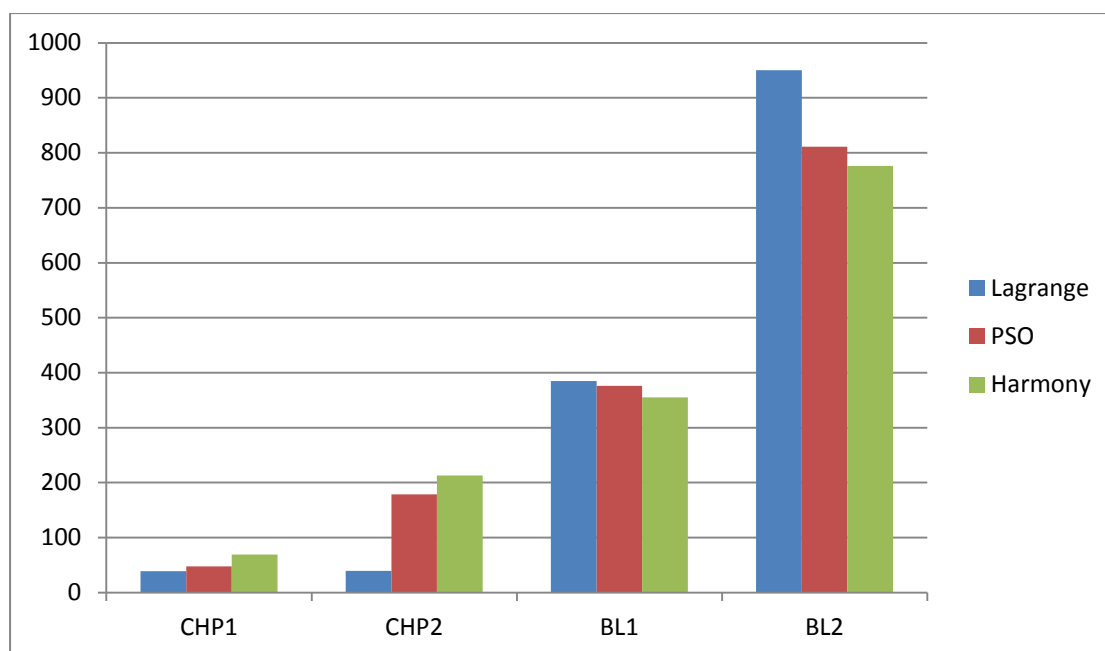
Παρακάτω θα δούμε αναλυτικά πως η κάθε μέθοδος κατένειμε την παραγωγή μεταξύ των διαθέσιμων μέσων παραγωγής του δικτύου.



Σχήμα 6.5.1γ Κατανομή Φορτίου (Ηλεκτρική)

Παρατηρούμε πως η PSO πετυχαίνει το ελάχιστο κόστος. Φαίνεται να πετυχαίνει αυτό το αποτέλεσμα βρίσκοντας μία ενδιάμεση λύση μεταξύ των άλλων δύο μεθόδων. Κάνοντας, ικανοποιητική χρήση των δυνατοτήτων παραγωγής και συμπαραγωγής του δικτύου, καθώς και λίγο πιο αυξημένη σε σχέση με τον αρμονικό, αγορά από το άναντι δίκτυο, πετυχαίνει τη βέλτιστη χρήση των μονάδων του μικροδικτύου και ελαχιστοποιεί και το κόστος. Η Lagrange φαίνεται εδώ να αδυνατεί να βρει τα ολικά βέλτιστα, στην εφικτή περιοχή του προβλήματος οικονομικής κατανομής, Αυτό το, αποτέλεσμα είναι ενθαρρυντικό και είναι και ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής, δηλαδή να καταδείξει τη χρησιμότητα των μετευριστικών μεθόδων αναζήτησης σε τέτοια σχετικά απλά προβλήματα αλλά και στο πιο σύνθετο πρόβλημα οικονομικής κατανομής του μεγάλου δικτύου που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια.

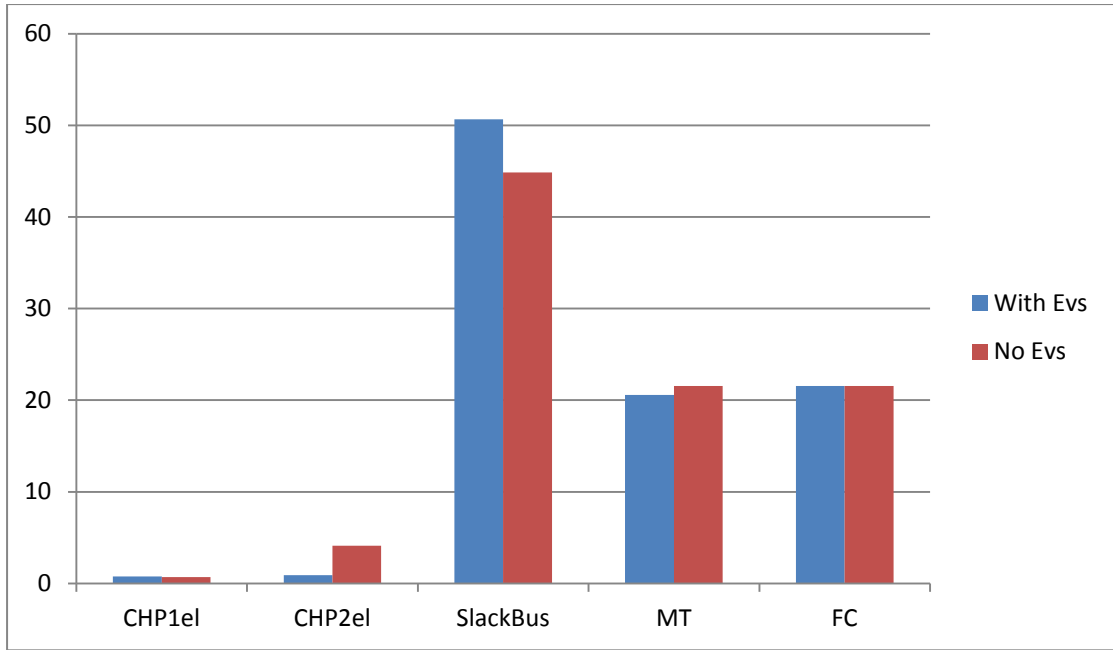
Για το διαμοιρασμό του θερμικού φορτίου αντίστοιχα:



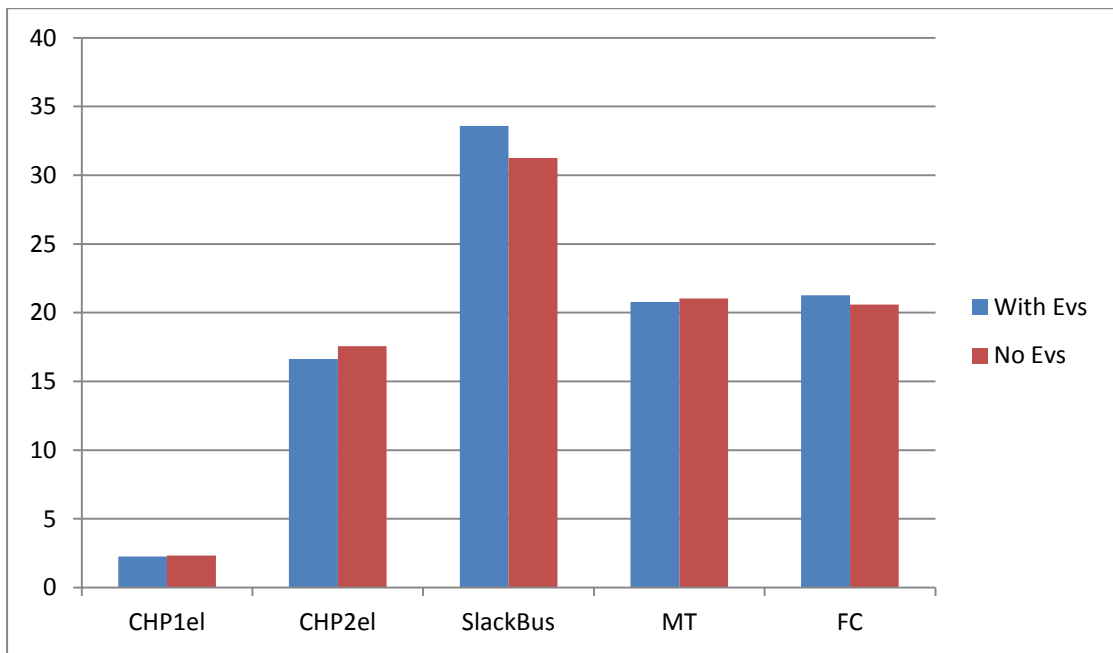
Σχήμα 6.5.1δ Κατανομή Φορτίου (Θερμική)

Από ότι βλέπουμε και εδώ, η Lagrange έκανε περιορισμένη χρήση των μονάδων συμπαραγωγής και βασίστηκε στα Boiler για την κάλυψη του θερμικού φορτίου. Οι άλλες δύο μέθοδοι έκαναν αυξημένη χρήση των μονάδων συμπαραγωγής. Η PSO φαίνεται να καταφέρνει να βρίσκει τη χρυσή τομή, όσον αφορά τη συμπαραγωγή η οποία φαίνεται να έπαιξε τον καθοριστικό ρόλο στις διαφορές κόστους μεταξύ των μεθόδων.

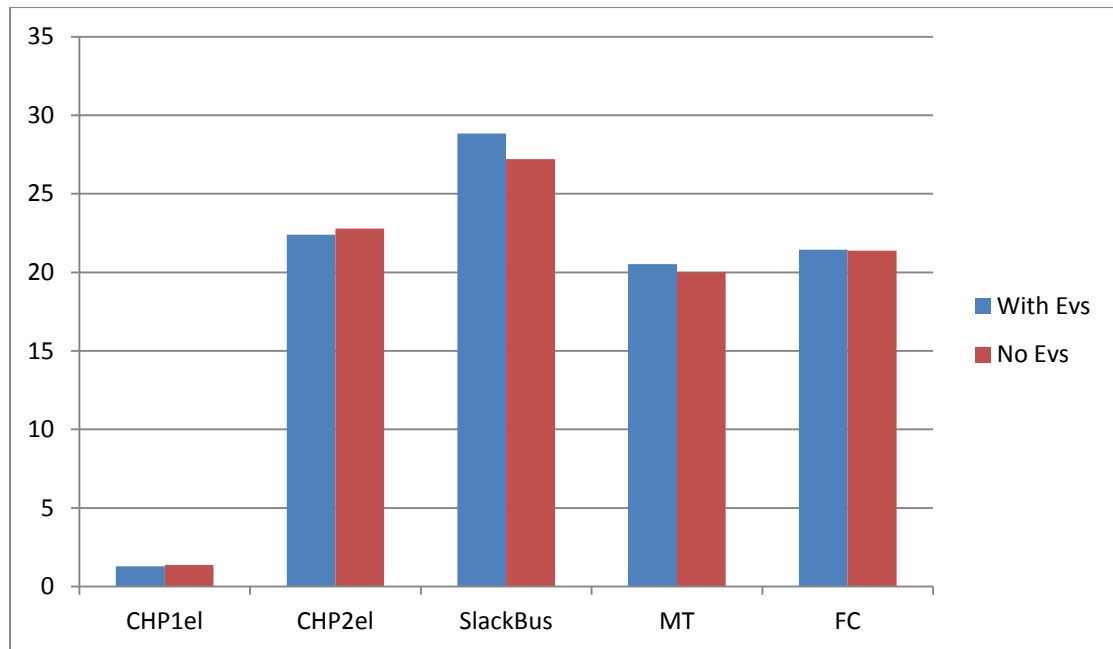
Παράλληλα, πρέπει να ερευνηθεί και η επίδραση παρουσίας ηλεκτρικών αυτοκινήτων στο δίκτυο, και αν η φόρτιση αυτών μπορεί να είχε κάποια επίδραση στο διαμοιρασμό ισχύος που περιγράφηκε παραπάνω. Για τη σύγκριση αυτή θα επιλέξουμε ένα μήνα με αυξημένη ζήτηση, τον Ιούλιο. Οι μήνες αυτοί εξωθούν τα δίκτυα στα όρια τους λόγω της εμφάνισης μεγάλων ζητήσεων κατά τη διάρκεια της ημέρας.



Lagrange



PSO



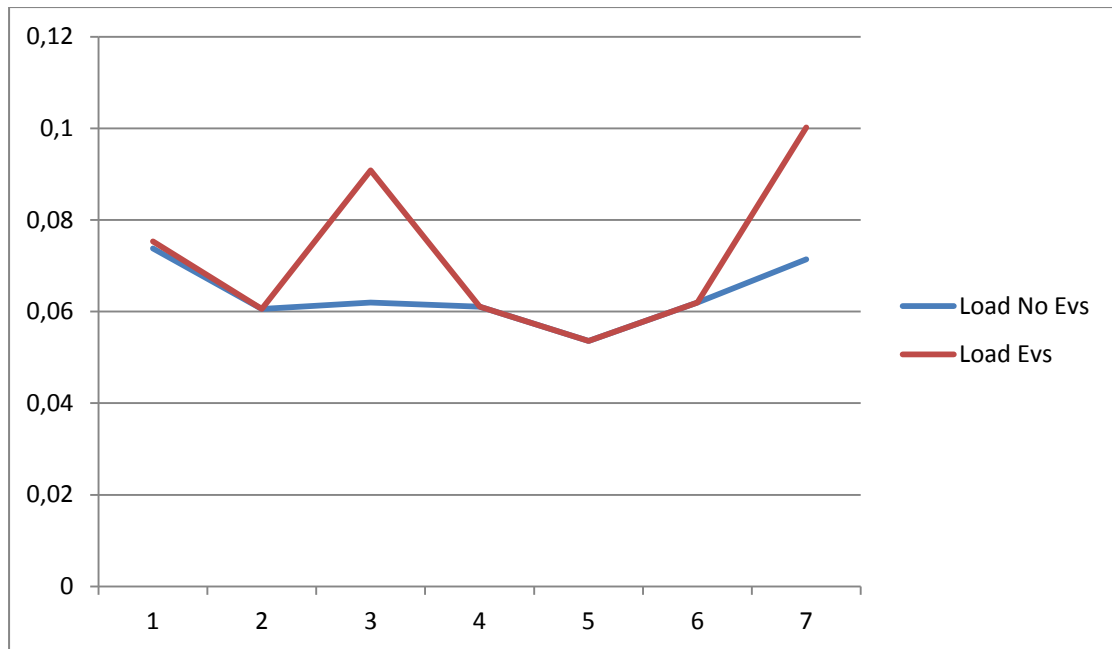
Harmony

Από τα παραπάνω διαφαίνονται για όλες τις μεθόδους τα εξής:

1) Το αυξημένο φορτίο δεν φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά την κατανομή φορτίου στη Μικροτουρμπίνα καθώς και το Fuel Cell.

2) Οι μονάδες συμπαραγωγής φαίνεται να μην παίρνουνε παραπάνω φορτίο κατά την επίλυση του προβλήματος για αυξημένη ζήτηση και να προτιμάται η αγορά του κυρίως από το κυρίως δίκτυο. Αυτό το γεγονός είναι απολύτως λογικό. Δεδομένου ο ζυγός σύνδεσης με το δίκτυο μπορεί να καλύπτει εξ ολοκλήρου πάντα τη ζήτηση, σχεδόν πάντα ορίζει και την οριακή τιμή του συστήματος μας. Δηλαδή, μπορούμε να αναθέτουμε στις μονάδες μας να παράγουν ενέργεια μέχρις ότου το ανά μονάδα κόστος φτάσει την οριακή τιμή του δικτύου. Τότε, δεδομένου ότι αμελούνται οι απώλειες μεταφοράς, συμφέρει η αγορά ενέργειας από το δίκτυο παρά η τοπική παραγωγή του. Αυτό το γεγονός εκμεταλλευτήκαμε και φτιάξαμε τον αλγόριθμο βέλτιστης φόρτισης για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα.

Η επίδραση της φόρτισης στο φορτίο θα φανεί στο παρακάτω διάγραμμα και αφορά τις 20 Ιουλίου, για τις ώρες φόρτισης, αφού έχει αφαιρεθεί η παραγωγή από τις μονάδες ΑΠΕ.



Σχήμα 6.5.1ε Επίδραση φόρτισης Ηλεκτρικών Αυτοκινήτων στη ζήτηση

Βλέπουμε πως ο αλγόριθμος φόρτισης επέλεξε φόρτιση κατά την τρίτη και έβδομη ώρα. Αν αυτές τις ώρες οι οριακές τιμές του δικτύου είναι σχετικά χαμηλές είναι λογικό η αγορά από το δίκτυο να συμφέρει οικονομικά σε σχέση με την παραγωγή τοπικά. Άρα είναι εμφανής η επίδραση των ηλεκτρικών οχημάτων τόσο την καμπύλη ζήτησης όσο και στο πρόβλημα οικονομικής κατανομής φορτίου.

6.5.2. Μικροδίκτυο με ηλεκτρικά οχήματα-Σενάριο μετάθεσης φορτίου-Πολιτική του καλού πολίτη

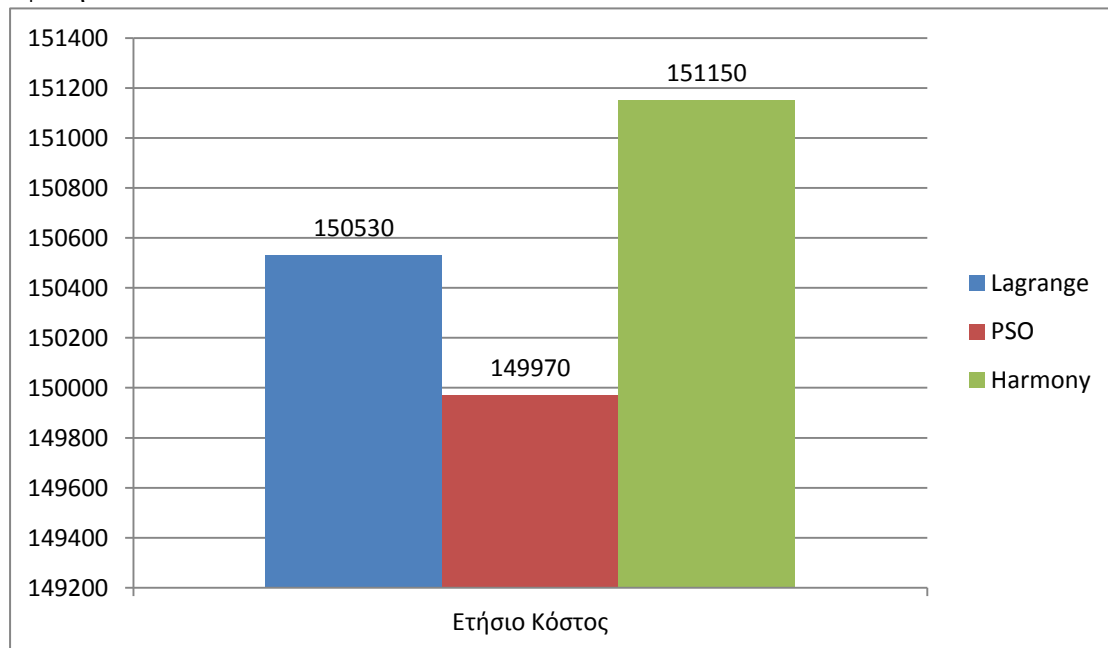
Where there is a problem, there is opportunity.

Αλλά, όπου ανακύπτει θέμα, ανακύπτει και ευκαιρία. Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα μπορεί να αυξάνουν τη ζήτηση και να δίνουν άλλη διάσταση στο πρόβλημα της οικονομικής κατανομής, αλλά μπορούν να προσφέρουν με τη σειρά τους και κάτι το οποίο είναι ακριβό και περιορισμένο στα σύγχρονα δίκτυα, μέσα αποθήκευσης. Στο πρόβλημα μας υποθέτουμε την ύπαρξη δώδεκα (12) ηλεκτρικών οχημάτων τα οποία φέρουν συσσωρευτές χωρητικότητας 10 kWh.

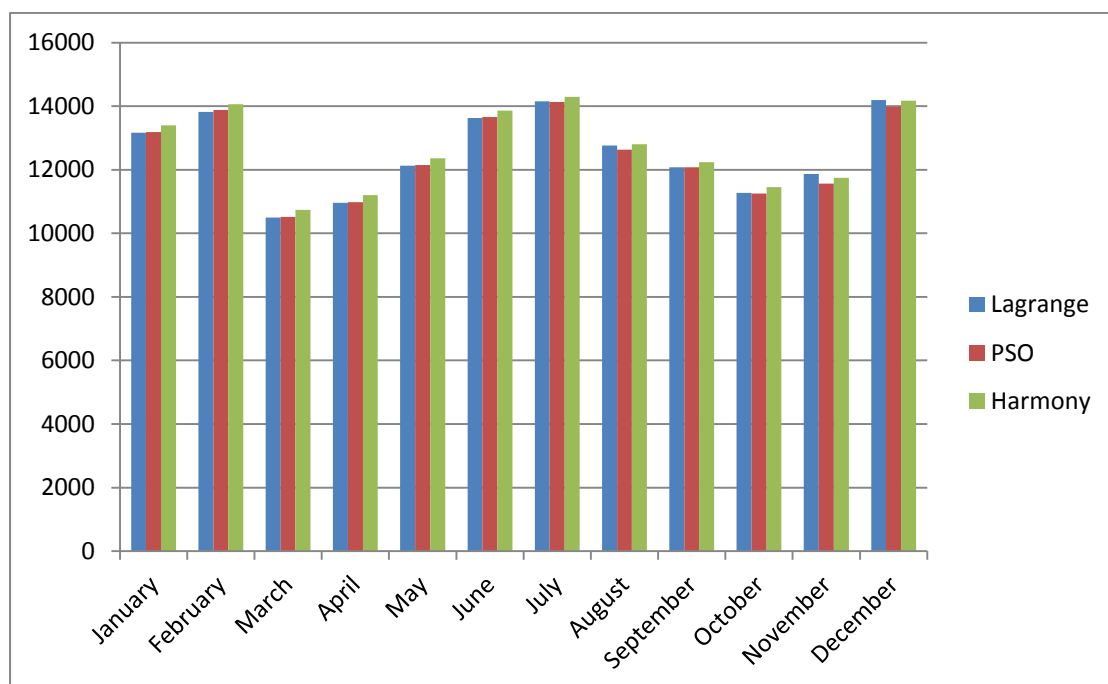
Στο παραπάνω σενάριο υποθέσαμε πως αυτές οι μπαταρίες πάντα θα βρίσκονται μεταξύ των ορίων που δίνει ο κατασκευαστής για τη βέλτιστη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Τα όρια αυτά είναι, 30% το κατώτερο και 78% το ανώτερο. Οι κατασκευαστές θέτουν σαν ανώτερο το 80% απλά λόγω της μορφής του προβλήματος και της βελτιστοποίησης ανά ώρα αναγκαστήκαμε να πάμε σε κβαντισμένη στάθμη φόρτισης πολλαπλάσια του βήματος φόρτισης των 400 Watts. Αν επιλέξουμε να φορτίσουμε τις μπαταρίες κατά μια στάθμη παραπάνω φτάνοντας τις στο 82%, και χωρίς να τις εξωθούμε στα άκρα, μας δίνεται η δυνατότητα της κάλυψης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία θα έχει αποθηκευτεί σε φθηνότερες

ώρες (μικρότερες οριακές τιμές δικτύου) και θα δίνεται πίσω σε ώρες όπου παρατηρούνται αιχμές. Σε ετήσια βάση αυτή η ενέργεια ανέρχεται σε 1.708 kwh.

Για τα δεδομένα του δικτύου μας μπορεί να μην είναι τόσο μεγάλο σαν μέγεθος, αλλά τέτοιες μικρές βελτιώσεις και ψαλιδίσματα του κόστους στο μέλλον, μπορούν να συνεισφέρουν στην οικονομική βιωσιμότητα τέτοιων μικρο-δικτύων. Επίσης, μπορούν να συνηγορήσουν υπέρ των τεχνολογιών V2G, που είναι στόχος κριτικής για το αν συνεισφέρουν στα σύγχρονα δίκτυα καθώς και για τα οικονομικά τους οφέλη.



Σχήμα 6.5.2α Ετήσιο Κόστος λειτουργίας

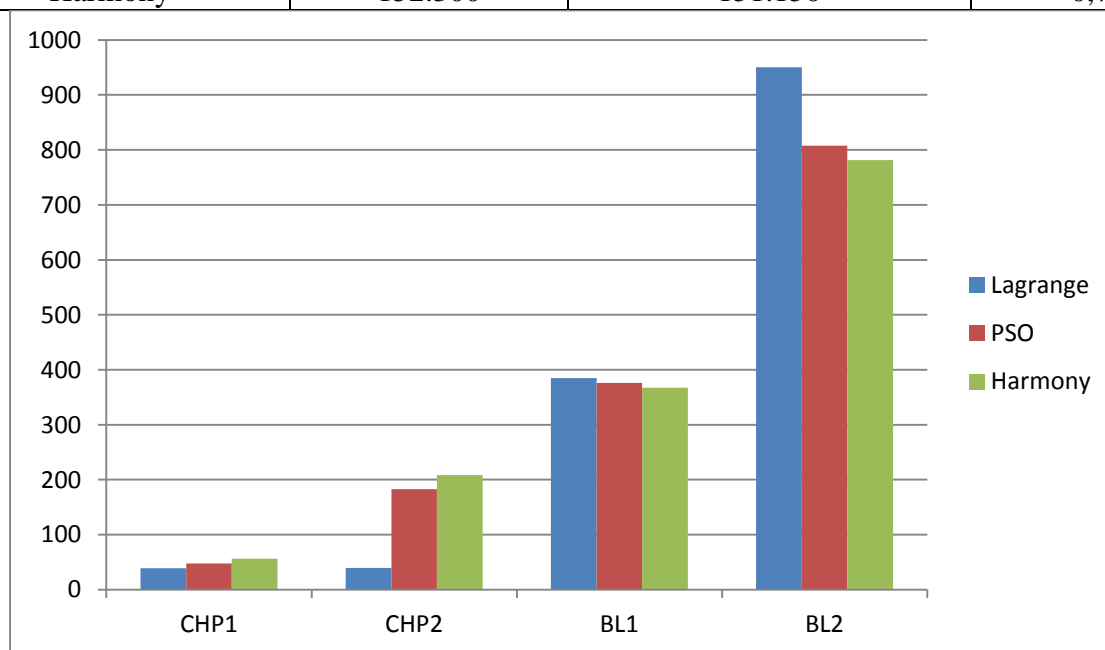


Σχήμα 6.5.2β Μηνιαίο Κόστος λειτουργίας

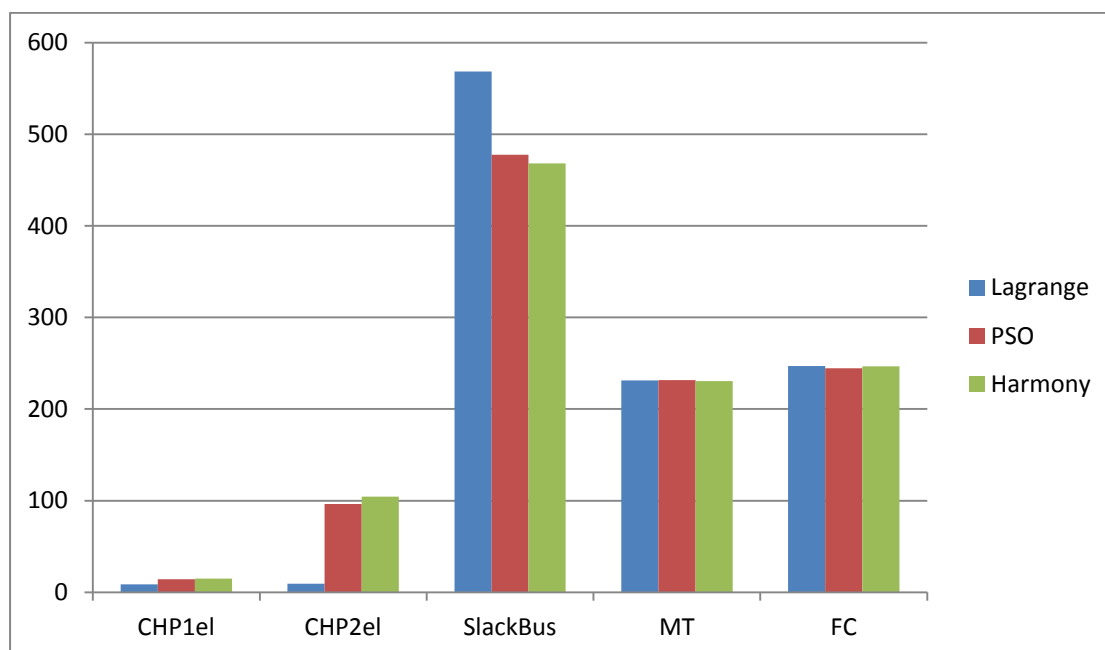
Παρατηρούμε πως αυτή η πολιτική καταφέρνει να μειώσει τα κόστη κάλυψης της ζήτησης σε ετήσια βάση.

Οι μειώσεις που επιτεύχθηκαν είναι οι εξής:

Σενάριο	EVs (Κόστος)	EVS- Arbitrage (Κόστος)	Μεταβολή (%)
Lagrange	150.600	150.530	-0,05
PSO	150.060	149.970	-0,06
Harmony	152.300	151.150	-0,76



Σχήμα 6.5.2γ Κατανομή Ηλεκτρικού Φορτίου

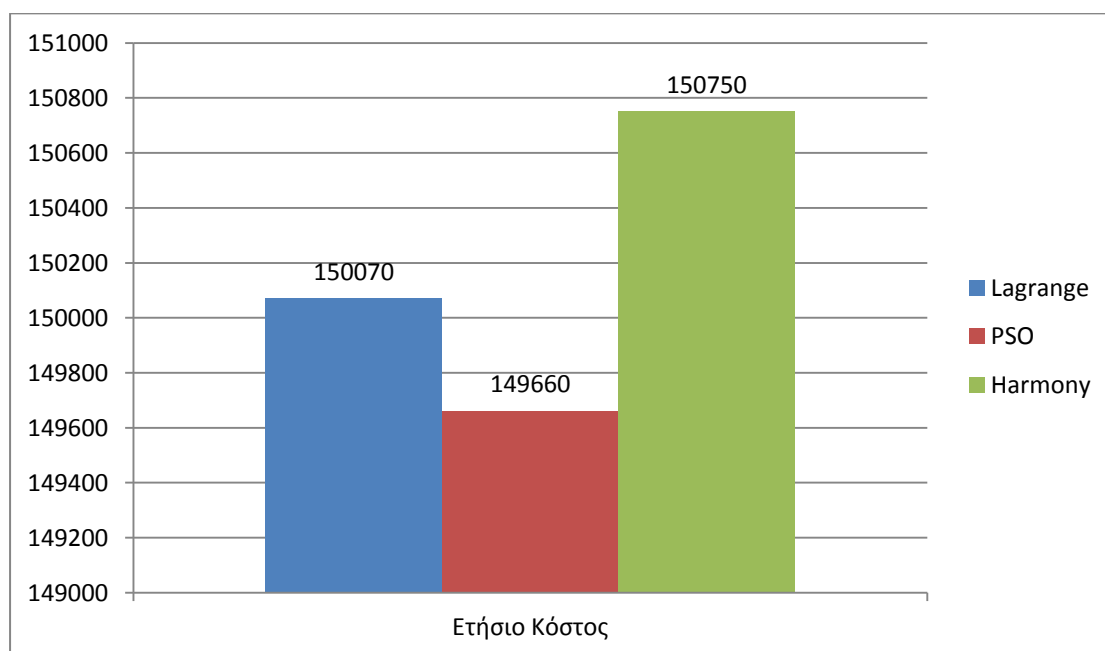


Σχήμα 6.5.2δ Κατανομή Θερμικού Φορτίου

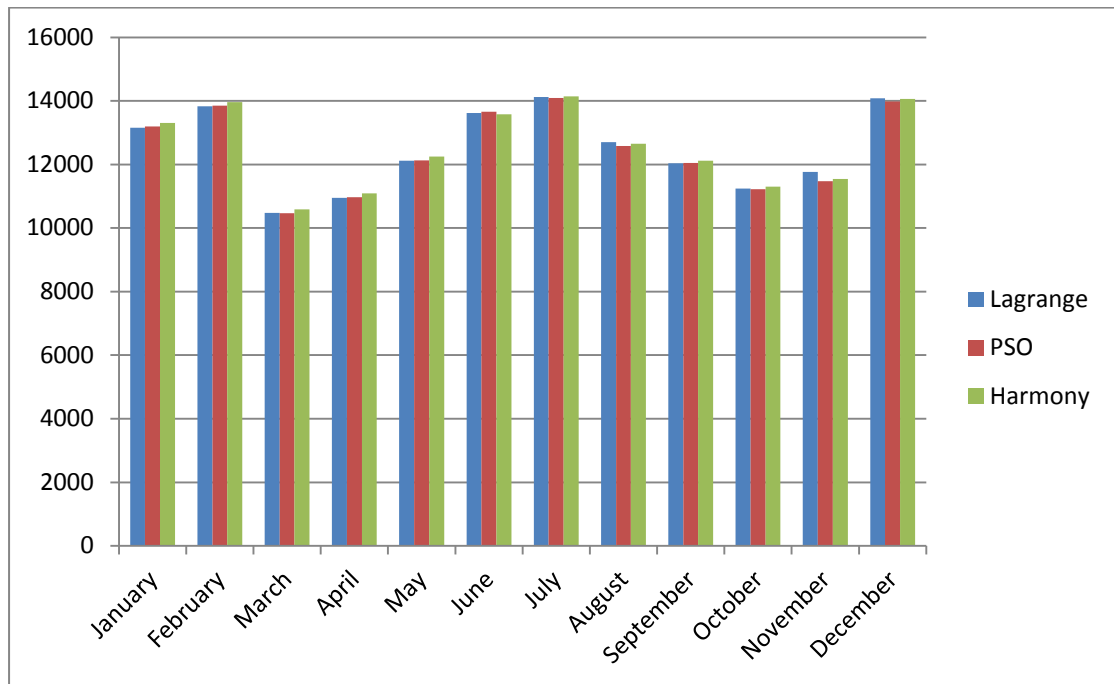
Τα αποτελέσματα αυτά είναι λίγο έως πολύ αναμενόμενα. Ο λόγος είναι πολύ απλός. Οι μπαταρίες των αυτοκινήτων, είναι συγκριτικά με τις ανάγκες του δικτύου, μικρές. Σαν αποτέλεσμα αυτό έχει, η συμβολή τους να είναι μικρή σε ετήσια βάση. Παρόλα ταύτα, η μείωση υπάρχει και είναι σημαντική διότι όσο οι τεχνολογίες των μπαταριών προχωρούν και τα ηλεκτρικά οχήματα γίνονται όλο και πιο διαδεδομένα, τα οφέλη από τέτοιας μορφής μετάθεσης φορτίου μπορούν να είναι σημαντικά. Αν παραδείγματος χάρη μιλούσαμε για μπαταρίες 15 ή και 20 kWh τότε δυνητικά θα είχαμε δυνατότητες για πιο "γενναίες" πολιτικές τέτοιου τύπου. Επί των αποτελεσμάτων, όλες οι μέθοδοι κατάφεραν να εντοπίσουν μείωση με την PSO να καταφέρνει και πάλι να βρει το ελάχιστο εκ των τριών.

6.5.3. Μικροδίκτυο με ηλεκτρικά οχήματα-Σενάριο μετάθεσης φορτίου-Πολιτική του ιδανικού πολίτη

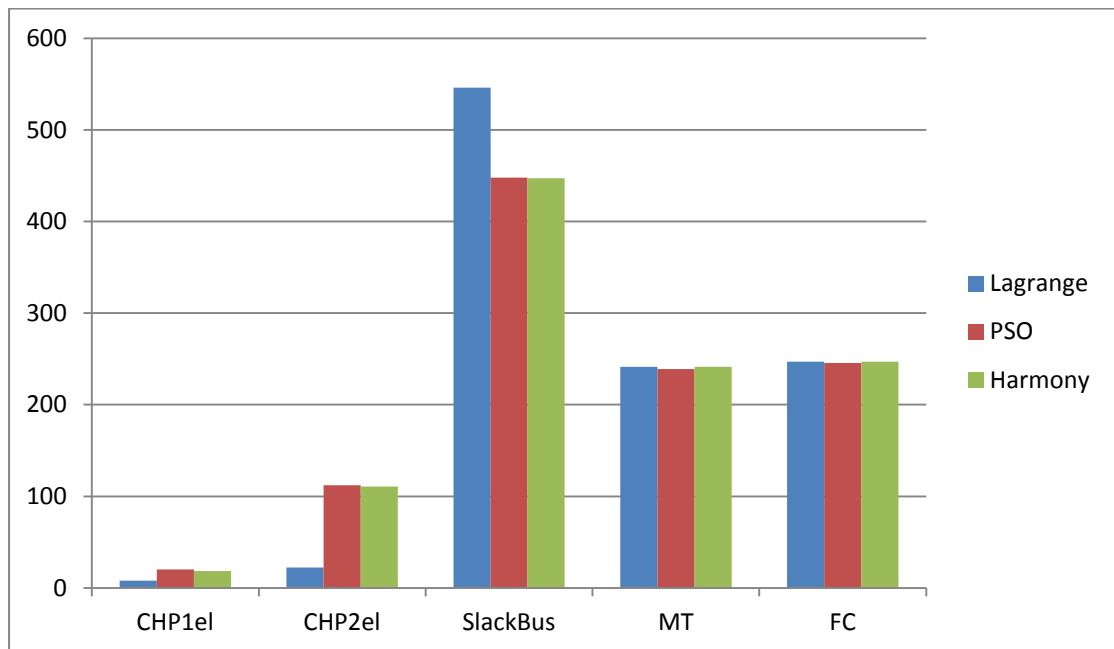
Παραπάνω υποθέσαμε τον πολίτη ως καταναλωτή, όπου έχει στη διάθεση του μέσα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και προσπαθεί να κάνει βέλτιστες επιλογές μεταξύ των μονάδων του και των δυνατοτήτων που του προσφέρει το δίκτυο. Όμως, ιδανικά θα μπορούσε να περάσει από την παραγωγή για τις ανάγκες του στην παραγωγή και για την τροφοδότηση του δικτύου όταν οι συνθήκες το επιτρέπουν. Πρακτικά, υποθέτουμε πως το εξεταζόμενο μικρο-δίκτυο θα μπορεί να διαθέτει στο κυρίως σύστημα μέχρι το 25% της ισχύος που μπορεί να πάρει από αυτό στο ζυγό σύνδεσης (0,1/0,4 α.μ. αντίστοιχα). Εν συντομία, το δίκτυο μπορεί να εκμεταλλευτεί στιγμές όπου η οριακή τιμή είναι υψηλή αλλά η δική του ζήτηση είναι χαμηλή, παράγοντας στην ουσία το πλεόνασμα ισχύος που μπορεί μέχρι να εξισωθούν οι οριακές τιμές των δύο συστημάτων.



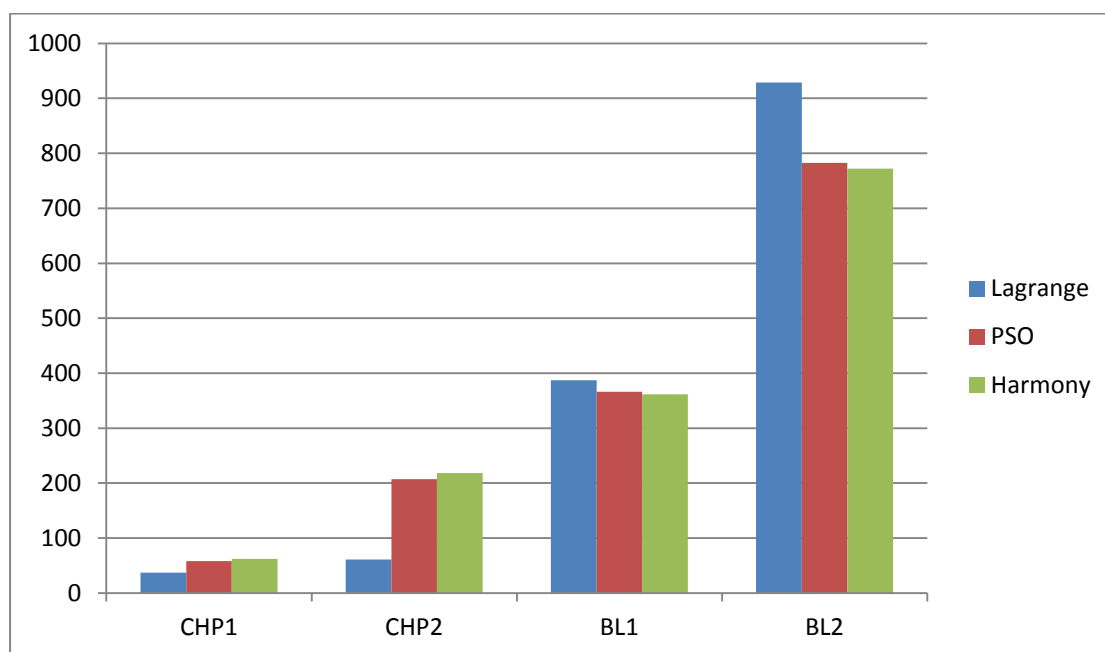
Σχήμα 6.5.3α Ετήσιο Κόστος λειτουργίας



Σχήμα 6.5.3β Μηνιαίο Κόστος λειτουργίας



Σχήμα 6.5.3γ Κατανομή Ηλεκτρικού Φορτίου



Σχήμα 6.5.3δ Κατανομή Θερμικού Φορτίου

Σενάριο	EVs (Κόστος)	EVS- Arbitrage-Ideal Citizen	Μεταβολή (%)
Lagrange	150.600	150.070	-0,35
PSO	150.060	149.660	-0,33
Harmony	152.300	150.750	-1,02

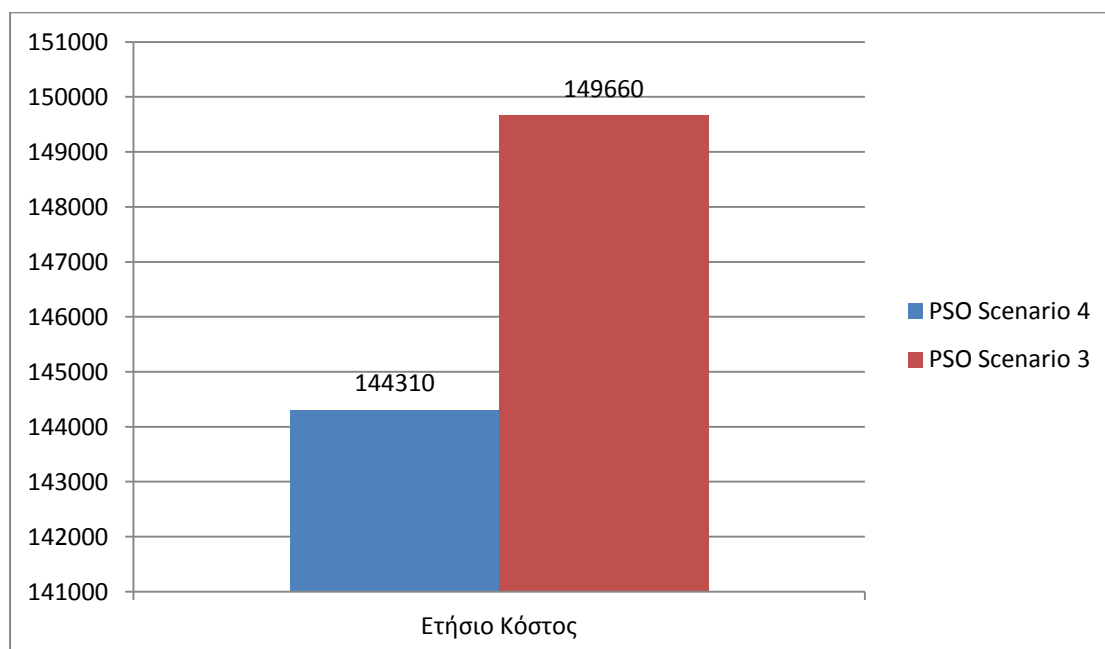
Όπως παρατηρούμε έχουμε μία μικρή μείωση του κόστους. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι υπάρχει δυνατότητα για πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στο κυρίως δίκτυο τις ώρες του χρόνου όπου το δίκτυο είναι σχετικά σε χαμηλά επίπεδα ζήτησης, ή οι ΑΠΕ παράγουν αρκετά ώστε να δίνουν τη δυνατότητα να παράγει το δίκτυο ενέργεια με οριακή τιμή κάτω από του δικτύου και να του την πουλά.

Οι δυνατότητες αυτές θα ήταν ακόμα πιο αυξημένες, αν στο δίκτυο ήταν εγκατεστημένη μεγαλύτερη ισχύς Ανανεώσιμων Πηγών. Σε όλες τις προσομοιώσεις βλέπουμε την PSO να μην καταφέρνει να μειώσει όσο οι άλλες μέθοδοι τα κόστη και αυτό καταδεικνύει ένα πράγμα. Η μέθοδος πραγματοποιεί βέλτιστη χρήση των μονάδων του δικτύου και εξαντλεί τα περιθώρια και τις δυνατότητες τους με γνώμονα το κόστος. Άρα στα σενάρια, όπου πολλές φορές θεωρητικά το δίκτυο μπορεί να παράξει για να πουλήσει, οι μονάδες είναι ήδη σχεδόν στα βέλτιστα τους χωρίς μεγάλα περιθώρια για επιπλέον παραγωγή.

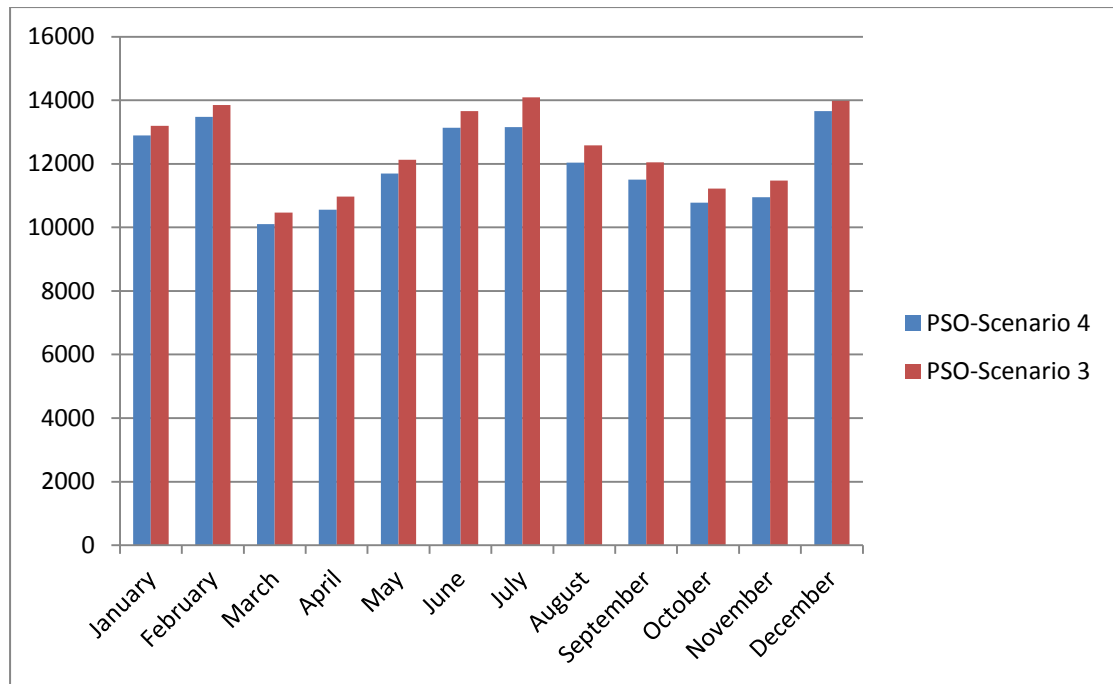
6.5.4 Μικροδίκτυο με ηλεκτρικά οχήματα-Σενάριο μετάθεσης φορτίου-Πολιτική του ιδανικού πολίτη-Αυξημένη διείσδυση

Στο συγκεκριμένο σενάριο θα κάνουμε χρήση της PSO καθώς είναι πλέον εμφανές πως η Lagrange φαίνεται να κολλάει σε τοπικά ελάχιστα στο σύνολο των μονάδων συμπαραγωγής και να κάνει κακή χρήση τους.

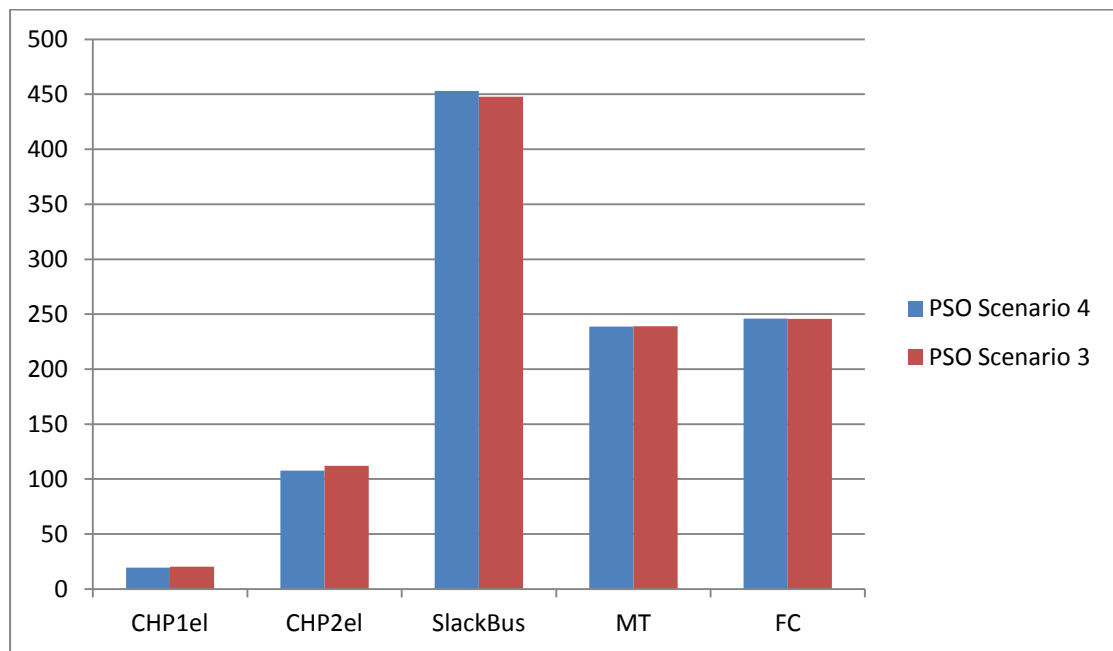
Για αυτό το σενάριο υποθέτουμε τετραπλάσια ισχύ στη θέση του φωτοβολταϊκού Α. Υποθέτουμε αύξηση των Φωτοβολταϊκών μιας και σαν επενδύσεις βρίσκουν ευκολότερα χρηματοδότηση και λόγω της πτώσης του κόστους υλικών και εγκατάστασης γίνονται όλο και ελκυστικότερες την τελευταία δεκαετία.



Σχήμα 6.5.4α Ετήσιο Κόστος Λειτουργίας



Σχήμα 6.5.4β Μηνιαίο Κόστος Λειτουργίας



Σχήμα 6.5.4γ Κατανομή Ηλεκτρικού Φορτίου

Η συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μαζί με ζεστό νερό φάνηκε να προσφέρει και αυτή με τη σειρά της οφέλη στο εξεταζόμενο δίκτυο τουλάχιστον εν μέρη. Είναι γεγονός, το ότι οι μονάδες συμπαραγωγής φάνηκαν συγκριτικά ακριβότερες σε σχέση με τις άλλες δύο και γι αυτό έλαβαν σε όλες τις προσομοιώσεις μικρότερα ποσοστά ισχύος.

Σε δεύτερη φάση εξετάστηκε η επίδραση της φόρτισης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στο πρόβλημα της οικονομικής κατανομής. Αρχικά, αφού με ένα

σχετικά απλό αλγόριθμο καταναίμαμε τις ώρες φορτίσης μέσα στο επτά-ωρο που μας ήταν διαθέσιμο, έπειτα εξετάσαμε αν θεωρητικά μια επιπλέον φόρτιση των μπαταριών με σκοπό την εκφόρτιση αργότερα μέσα στην ημέρα θα ήταν επωφελής. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν μια μικρή μείωση στο ετήσιο κόστος λειτουργίας η οποία αν και από πολλούς μπορεί να θεωρηθεί μη υπολογίσιμη, είναι μια καλή ένδειξη πως στο μέλλον της ηλεκτρικής αυτοκίνησης μπορεί να εμπλακεί ενεργά και η αγορά ενέργειας αποκομίζοντας οφέλη.

Τέλος, εξετάσαμε, την περίπτωση πώλησης ενέργειας στο κυρίως δίκτυο. Οι προσομοιώσεις κατέδειξαν πως αυτό ήταν εφικτό και αυτό διαφάνηκε στο κόστος το οποίο μειώθηκε κατά λίγο ακόμα. Η μείωση αυτή έγινε κατά πολύ αισθητή όταν υποθέσαμε αύξηση της φωτοβολταϊκής παραγωγής και καταφέραμε συνολική μείωση κόστους σε σχέση με το αρχικό σενάριο της τάξεως του 3,8%. Σαν ποσοστό μπορεί να μοιάζει πολύ μικρό αλλά όσο τα μικρο-δίκτυα ενσωματώνονται στα σύγχρονα δίκτυα ενέργειας τόσο περισσότερα οφέλη θα αρχίσουν και να δρέπουν οι κάτοικοι όσο και οι διαχειριστές.

6.5.5 Σχετικά με τις μεθόδους

Lagrange

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος βελτιστοποίησης, φάνηκε να αποτυγχάνει. Παρακάμπτοντας το γεγονός ότι κάθε φορά που άλλαζαν οι περιορισμοί του προβλήματος παρατηρούνταν πολλές φορές "κώλυμα" της μεθόδου και επέστρεφε ασύλληπτα νούμερα, ακόμα και στις βελτιστοποιήσεις όπου επέστρεψε εφικτά αποτελέσματα, φάνηκε να αποτυγχάνει να κάνει καλή χρήση των μονάδων συμπαραγωγής. Η Lagrange φάνηκε να κολλάει σε τοπικά βέλτιστα, καθώς να μην κατάφερε να επιστρέψει καλές τιμές για το κόστος αλλά διαφάνηκε σε όλες τις προσομοιώσεις να κρατά τη συμπαραγωγή στα ελάχιστα δυνατά. Οι δύο άλλες μέθοδοι, αντιθέτως, κάνοντας χρήση αυτών κατάφεραν να επιστρέψουν ανάλογα ή ακόμη και μικρότερα κόστη ετήσιας λειτουργίας.

PSO

Μια από τις πιο διαδεδομένες μετεωριστικές μεθόδους βελτιστοποίησης φάνηκε να υπερφαλαγγίζει στην ποιότητα των αποτελεσμάτων της τις άλλες δυο μεθόδους. Κατάφερε να κάνει καλή χρήση όλων των διαθέσιμων μονάδων που από ότι φάνηκε ήταν και η βέλτιστα οικονομικά πολιτική. Το μόνο πρόβλημα ήταν ο σχετικά μεγαλύτερος χρόνος τρεξίματος. Αν χρειαζόμασταν πιο συχνά τρεξίματα ή αν οι μεταβλητές απόφασης ήταν περισσότερες τότε ίσως οι μεγαλύτερες υπολογιστικές απαιτήσεις να αποτελούν ανασταλτικό παράγοντα. Για το παρών πρόβλημα, αν και πιο αργός η απόδοση του κρίνεται ικανοποιητική.

Harmony Search

Ο αρμονικός αλγόριθμος κατάφερε να βελτιστοποιήσει με καλή ποιότητα (διαφορές 1-2%) το δοθέν πρόβλημα. Αξιοσημείωτη είναι η ταχύτητα με την οποία το κατάφερε η οποία και ήταν κλάσμα του χρόνου των άλλων δύο. Αν και σαν μέθοδος έχει δεχθεί πολύ κριτική για την αυθεντικότητα της και τις επιδόσεις της, ο Αρμονικός Αλγόριθμος φαίνεται να είναι ιδανική λύση για προβλήματα όπου ο χρόνος αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στη λήψη μίας απόφασης.

6.5.6 Σύγκριση Αλγορίθμων φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων

Όπως αναλύσαμε και πιο πάνω μία από τις καθοριστικές διαστάσεις του προβλήματος οικονομικής κατανομής, του παρόντος μικροδικτύου είναι η φόρτιση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Αυτό το επιμέρους πρόβλημα, αποτελεί στόχος βελτιστοποίησης μέσα στην ίδια τη βελτιστοποίηση, ανεβάζοντας την πολυπλοκότητα του προβλήματος κατακόρυφα, και κάνοντας την εύρεση λύσεων λιγότερο προφανή και χρονοβόρα.

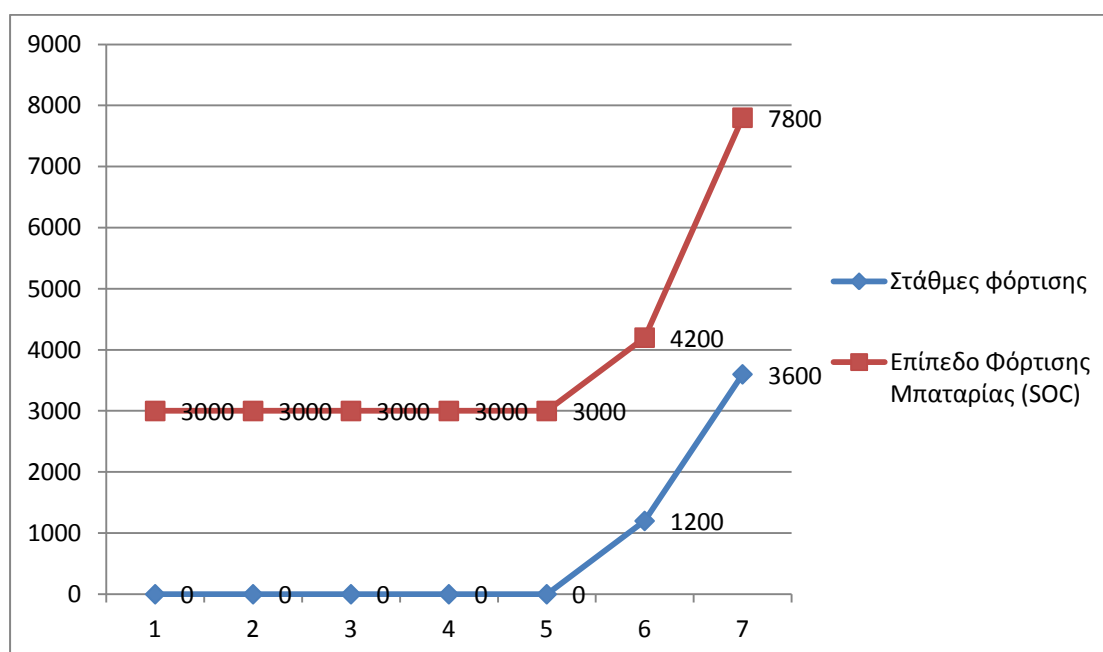
Σε προηγούμενες προσπάθειες που είχαν γίνει στο εργαστήριο ΣΗΕ να λυθεί αυτό το πρόβλημα, είχε γίνει χρήση του δυναμικού προγραμματισμού. Ένας αλγόριθμος, δοκιμάζοντας αναδρομικά τα στάδια φόρτισης ανά ώρα, προσπαθούσε να φτιάξει ένα γράφο όπου κόμβοι ήταν τα στάδια φόρτισης και να ευρεθεί το κόστος που τα συνδέει. Στη συνέχεια επιλεγόταν η βέλτιστη διαδρομή. Το πρόβλημα όμως ήταν η πολυπλοκότητα αυτής της μεθόδου. Στο παρόν πρόβλημα για ένα τυπικό επτάωρο φόρτισης υπάρχουν $4 \cdot 10^6$ συνδυασμοί φόρτισης. Άρα, το να προσπαθήσεις να βρεις για κάθε συνδυασμό το κόστος φόρτισης και να επιλέξεις το βέλτιστο ανέβαζε τον χρόνο εκτέλεσης από τα 300 δεύτερα που είδαμε στην ενότητα 1 σε 2 και πλέον ώρες.

Στην παρούσα διπλωματική, για τον ίδιο σκοπό κάναμε χρήση μίας παρατήρησης που αναφέραμε και νωρίτερα. Συγκεκριμένα, αναφέραμε πως από τη στιγμή που το ανάντη δίκτυο μπορεί ανά πάσα στιγμή να καλύψει τη ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος του δικτύου ορίζει πρακτικά και το πάνω όριο για την οριακή τιμή του δικτύου.

Στον αλγόριθμο φόρτισης βασιζόμενοι σε αυτή την παρατήρηση φτιάξαμε ένα διάγραμμα απόφασης το οποίο ξεκινώντας από τα μέγιστα επίπεδα φόρτισης ανά ώρα ξεκινά να αφαιρεί στάθμες φόρτισης από την ακριβότερη ώρα με βάση την οριακή τιμή του δικτύου, μέχρι το άθροισμα των σταθμών να αποδίδει το επιθυμητό επίπεδο φόρτισης ή η οι στάθμες να έχουν φτάσει στο 0. Παράλληλα, μια υπο-ρουτίνα ελέγχει να επαληθεύεται ο περιορισμός στου δικτύου, δηλαδή το ότι οι στάθμες φόρτισης από ώρα σε ώρα θα μπορούν να διαφέρουν το πολύ κατά 6 (ή 2400 watts σε ισχύ).

Με αυτό τον τρόπο κατανέμουμε, με αρκετά καλή ακρίβεια σε φθηνές ώρες την "αιχμή" που προκαλεί η φόρτιση. Με το αρκετά καλή ακρίβεια, εννοούμε το ότι η κατανομή αυτή μπορεί να μην είναι πάντα βέλτιστη. Αυτό μπορεί να συμβαίνει για ένα συγκεκριμένο λόγο, πολύ χαμηλή ζήτηση. Αν η ζήτηση σε μία από τις ώρες της φόρτισης είναι υπερβολικά χαμηλή, τότε δυνητικά τα μέσα παραγωγής του δικτύου ίσως μπορούν να παράγουν σε τιμή πολύ μικρότερη της οριακής οπότε και η οριακή τιμή είναι αδιάφορη. Αυτό όμως αποτελεί εξαίρεση και όχι τον κανόνα, συνήθως στις φθηνές ώρες το δίκτυο επιλέγει να αγοράσει ενέργεια παρά να παράγει διότι αυτό επιτάσσει το κριτήριο ελαχίστου κόστους.

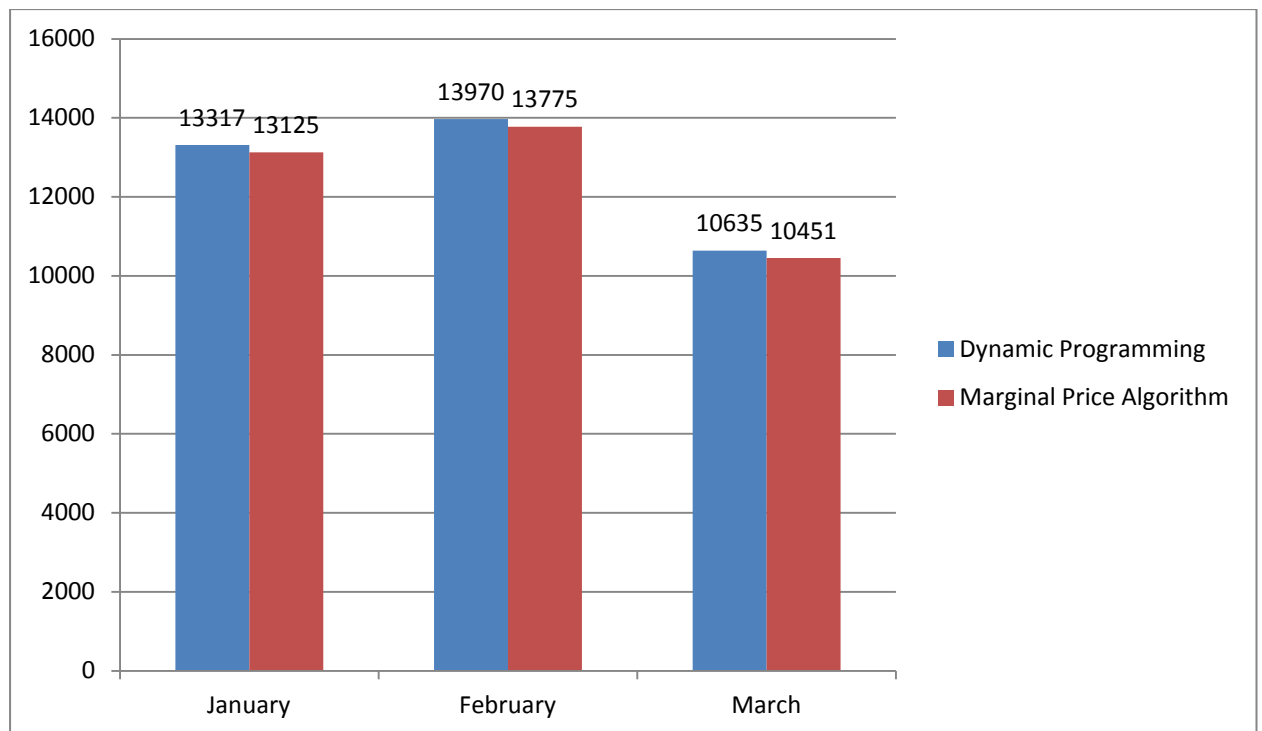
Παράδειγμα λειτουργίας αλγορίθμου για 1 Ιανουαρίου



Σχήμα 6.5.5α Φόρτιση Μπαταρίας με αλγόριθμο οριακής τιμής

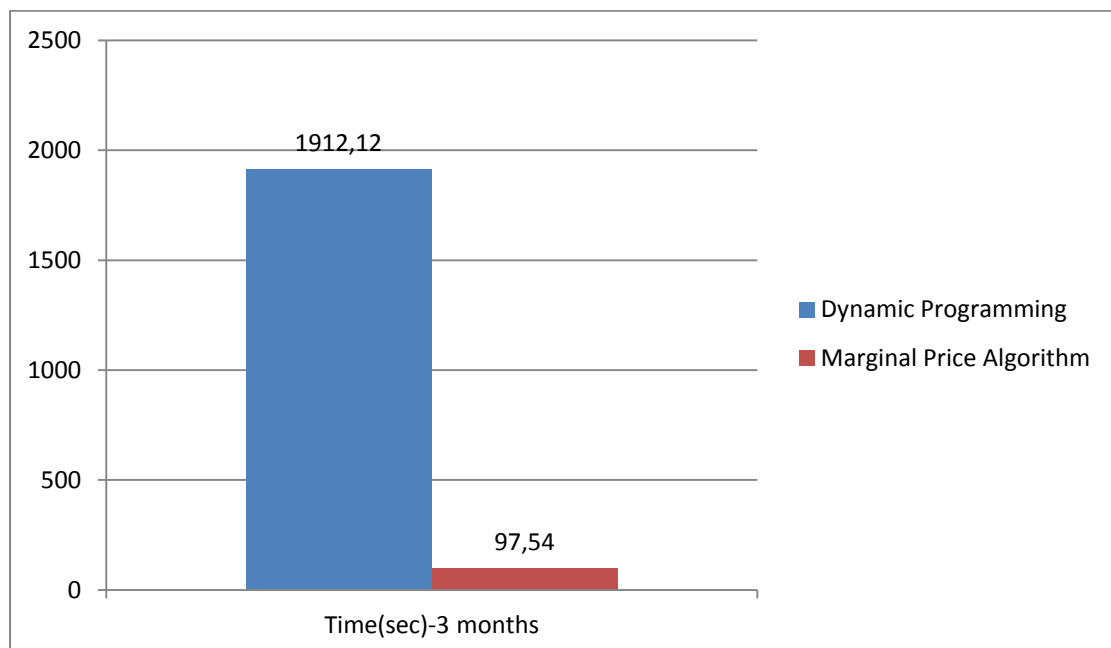
Οριακή/Ωρα	1	2	3	4	5	6	7
Τιμή	70,35	54,97	65,96	36,31	33,53	33,53	32,84

Συγκριτικά



Σχήμα 6.5.5β Μηνιαίο Κόστος Λειτουργίας

Παρά την απλή λογική με την οποία λειτουργεί ο αλγόριθμος φαίνεται να καταφέρνει καλύτερα αποτελέσματα στην επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης, αν και κατά ελάχιστα (είναι μέσα στα όρια του σφάλματος, μιας και μιλάμε για μέθοδο αναζήτησης βέλτιστου).



Χρόνοι Εκτέλεσης Ετήσιας βελτιστοποίησης

Διαφάνεται ξεκάθαρα η υπεροχή της νέας μεθόδου φόρτισης, τόσο ποιοτικά, όσο και υπολογιστικά. Βεβαίως προκύπτει ένα ερώτημα. Θα είναι πάντα διαθέσιμα στοιχεία για την οριακή τιμή του δικτύου ώστε να μπορεί κανείς να πραγματοποιήσει μια τέτοια βελτιστοποίηση. Η απάντηση είναι όχι, αλλά με μια καλή και καλά δομημένη πρόβλεψη για την οριακή τιμή καθώς και για την παραγωγή των μονάδων ΑΠΕ ο διαχειριστής μπορεί να κάνει μια αντίστοιχη κατανομή των σταδίων φόρτισης η οποία σε ετήσια βάση θα αποφέρει οφέλη στο δίκτυο.

6.6 Στοχαστική Βελτιστοποίηση Μικροδικτύου

6.6.1 Αντικειμενικές Συναρτήσεις

Στην παρουσίαση του προβλήματος του μεγάλου δικτύου αναλύσαμε εκτενώς πως προκύπτουν οι στοχαστικές εκφράσεις των αντικειμενικών προς βελτιστοποίηση καθώς και τα μεγέθη που αφορούν την απόκλιση. Σε αυτό το μοντέλο, που είναι μία καλύτερη έκφραση της πραγματικότητας και του ευμετάβλητου των μεγεθών ενός πραγματικού δικτύου θα εισαχθούν και άλλα κριτήρια βελτιστοποίησης.

Αντικειμενική κόστους:

$$\bar{J}_1 = A\bar{P}_{Grid} + \sum_{i=1}^{N_{DG,e}} \left[a_i + b_i \bar{P}_i + c_i \left(\bar{P}_i^2 + Var(P_i) \right) \right] + \sum_{k=1}^{N_{DG,h}} \left[a_k + b_k \bar{Q}_k + c_k \left(\bar{Q}_k^2 + Var(Q_k) \right) \right] + \sum_{j=1}^{N_{CHP}} Cost_{MWh_gas_input} \frac{\bar{P}_j}{\eta_e}$$

$$Var(x) = C_v(x)^2 \bar{x}^2 = \sigma_x^2$$

Αντικειμενική αναμενόμενη απόκλιση Ηλεκτρικής Ισχύος:

$$\bar{J}_2 = \sum_{z=1}^{N_p} Var(P_z) + 2 \sum_{z=1}^{N_p-1} \sum_{m=z+1}^{N_p} Cov(P_z, P_m)$$

$$N_p = N_{Grid} + N_{DG,e} + N_{CHP} + N_{RES} \quad (N_{Grid}=1)$$

$$Cov(X, Y) = C_v(X) \cdot C_v(Y) \cdot R(X, Y) \cdot \bar{X} \cdot \bar{Y}$$

Αντικειμενική αναμενόμενη απόκλιση Θερμικής Ισχύος:

$$\bar{J}_3 = \left[\sum_{k=1}^{N_{DG,h}} Var(Q_k) + \sum_{j=1}^{N_{CHP}} Var(P_j \cdot HPR(P_j)) \right] + 2 \sum_{k=1}^{N_{DG,h}} \sum_{j=1}^{N_{CHP}} Cov(Q_k, P_j \cdot HPR(P_j))$$

Αντικειμενική Εκπομπών Διοξειδίου:

$$\bar{J}_4 = EmissionsCost_{CO_2} \cdot \sum_{n=1}^{N_{emissions}} \gamma_n \bar{P}_n$$

Τα νέα μεγέθη που εισάγονται είναι τα εξής:

Var=0,1

Cov=0.99

Συντελεστές Εκπομπών CO₂

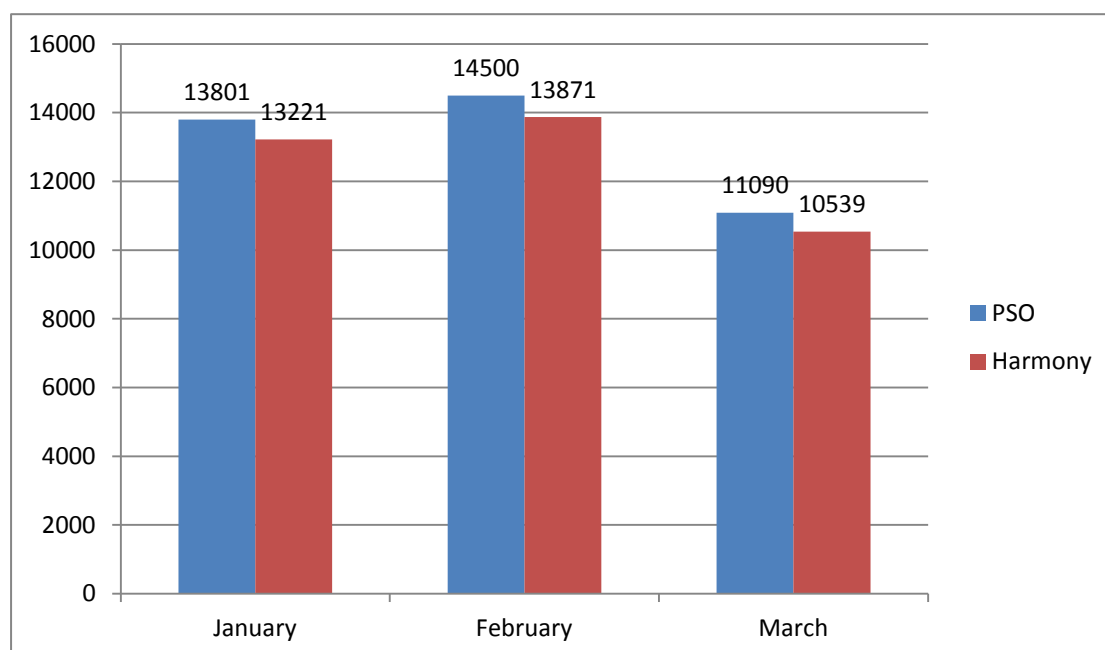
Unit	Slack Bus	MicroTurbine	FuelCell	CHP
$\gamma_n(\text{tn/Mwh})$	1,1	0,7246	0,4894	17

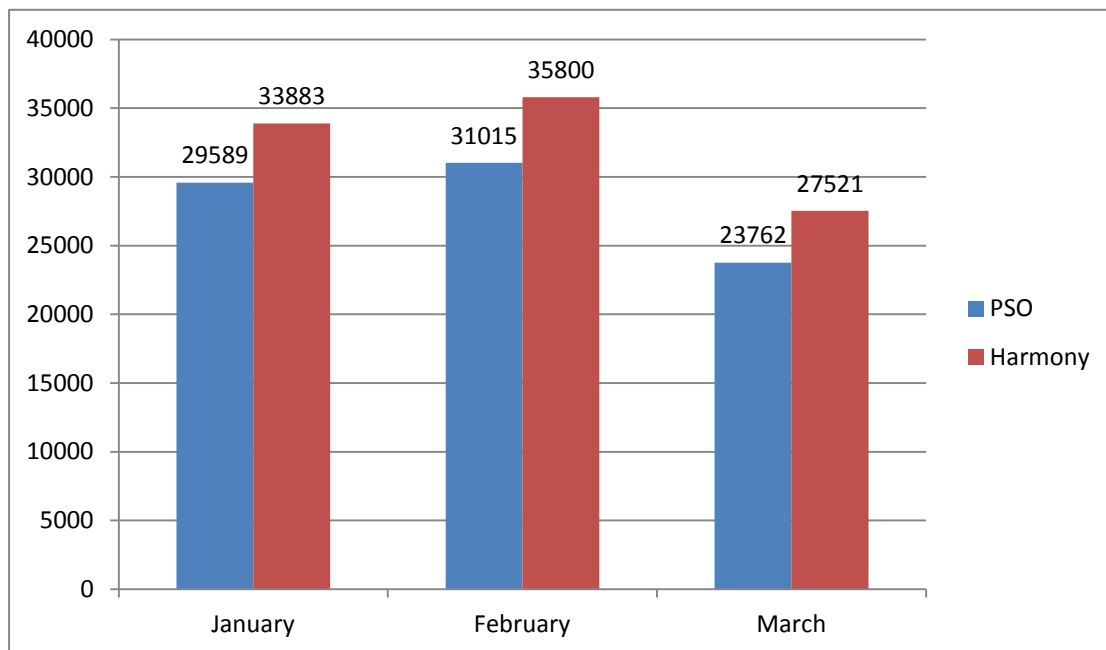
EmissionsCost_{CO₂}=17€/tnCO₂.

6.6.2 Αποτελέσματα προσωμοιώσεων

Για αυτό το πρόβλημα θα γίνει χρήση μόνο των μετρωριστικών αλγορίθμων μιας και η Lagrange φάνηκε προβληματική στη λύση καθώς ούτε υπήρξε πιο αποδοτική, ούτε και ταχύτερη και αφήνοντας υπόνοιες εγκλωβισμού σε τοπικά βέλτιστα. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για τους 3 πρώτους μήνες του έτους.

6.6.2.1 Βελτιστοποίηση Κόστους





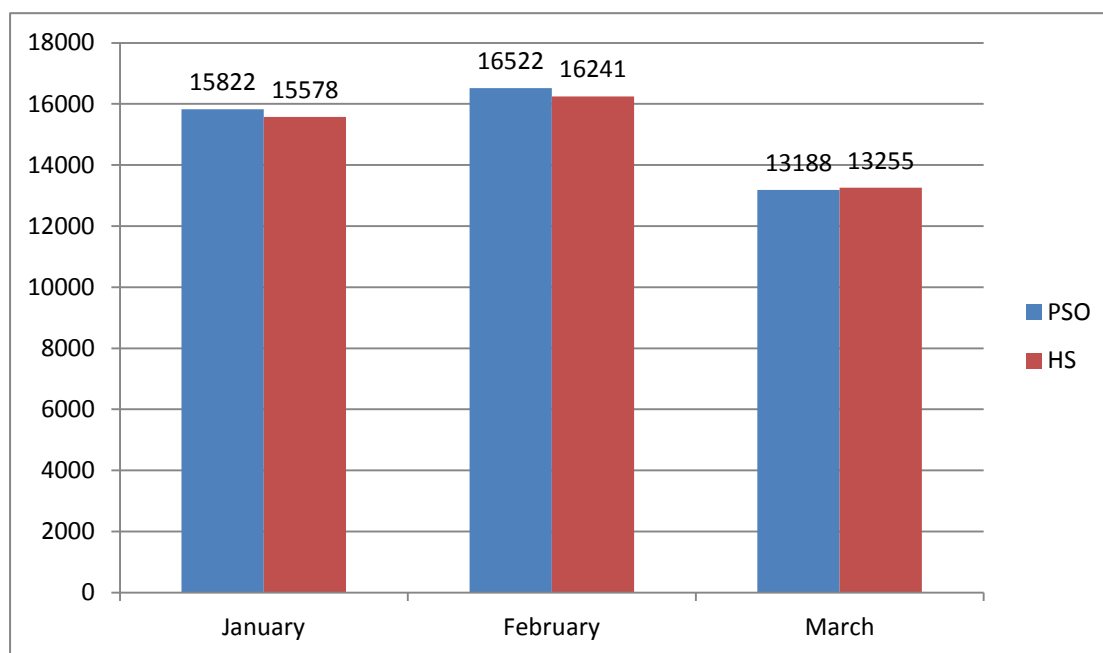
	PSO	HS
CHP el	30,69	7,26
CHP th	75,24	31,84
FC	53,6	62,58
MT	50,11	57,86
Slack Bus	134,41	141,11
Boilers	279,55	322,95
Cost (€)	39.391	37.631
Power Deviation (avg)	0,0027	0,00197
Heat Deviation (avg)	0,00024	0,0002
Emissions' Cost (€)	84.366	97.204

Αποτελέσματα αφορούν MW ισχύος, σε όλο το διάστημα της προσομοίωσης

Η μειωμένη χρήση των CHP φαίνεται να είναι η κύρια διαφορά η οποία δίνει και μικρότερο κόστος στη λύση του Αρμονικού. Εν μέρει, οι αναλογίες όσων αφορά την κατανομή φορτίου είναι κοντά σε αυτά του ντετερμινιστικού μοντέλου. Η μεγάλη διαφορά υπάρχει όσων αφορά τις εκπομπές. Αν υποθέσουμε πως αυτό το κόστος το επημερίζεται το δίκτυο, τότε εμείς δεν επηρεαζόμαστε, αλλά σε αντίθετη

περίπτωση το μικροδίκτυο θα επιβαρυνόταν σημαντικά, ειδικά με τη λύση του αρμονικού

6.6.2.2 Βελτιστοποίηση Ρύπων

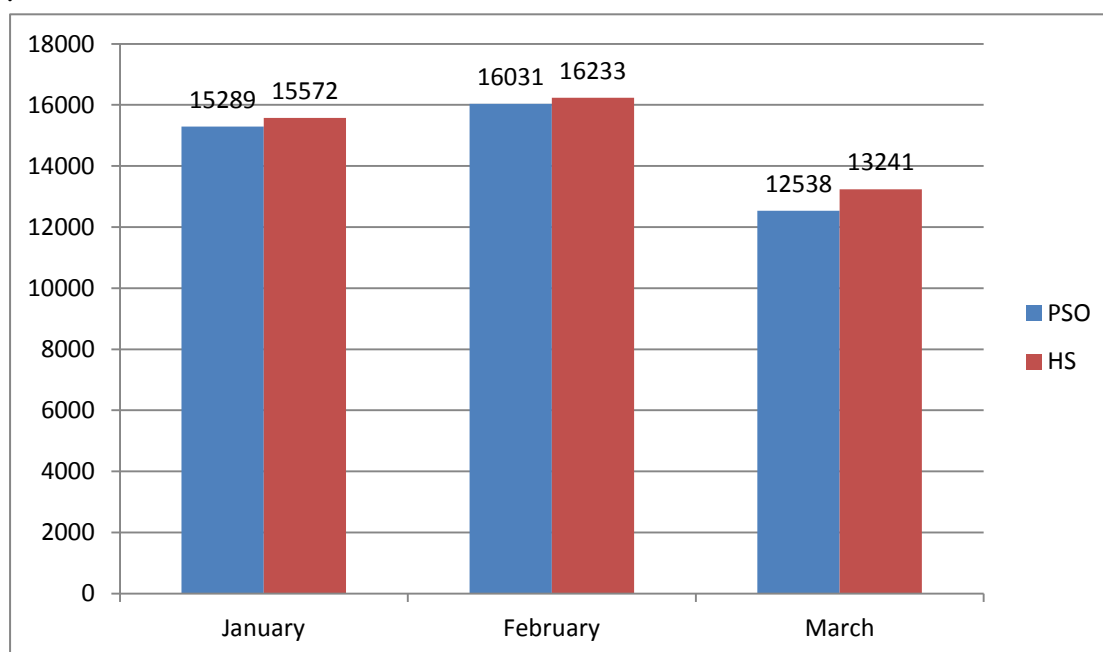


	PSO	HS
CHP el	177,64	181,9
CHP th	321,47	321,03
FC	28,4	47,6
MT	33,81	32,24
Slack Bus	28,94	6,39
Boilers	30,99	33,74
Cost (€)	45.532	45.074
Power Deviation (avg)	0,0085	0,01126
Heat Deviation (avg)	0,0002	0,0002
Emissions' Cost (€)	9.957	10.669

Οι δύο μέθοδοι μας δώσανε το αναμενόμενο. Μας δείξαν πως μεγάλη χρήση των μονάδων συμπαραγωγής σημαίνει και μείωση των εκπομπών. Συγκεκριμένα και οι 2 κάνανε χρήση των μονάδων συμπαραγωγής πάνω από 90% αφήνοντας μικρά κομμάτια ισχύος για κάλυψη από τις άλλες μονάδες του μικροδικτύου ή από το ανάντη δίκτυο. Αυτό βέβαια είχε σαφές αντίκτυπο στο κόστος λειτουργίας, όμως

παρατηρούμε δραματική μείωση στο κόστος εκπομπών. Αυτή η μεγάλη διαφορά στο κόστος μας δείχνει πως μια περιβαλλοντική πολιτική που ελευθερώνει διαθέσιμους ρύπους είναι βιώσιμη καθώς μπορεί να επιδοτηθεί από το δίκτυο το παραπάνω κόστος λειτουργίας. Τέλος, η πολιτική αυτή φαίνεται να είχε επίσης σοβαρότατο αντίκτυπο στην αναμενόμενη απόκλιση ισχύος (κυρίως την ηλεκτρική) καθώς υπερτριπλασιάστηκε.

6.6.2.2 Ολική Βελτιστοποίηση (J1-J2-J3-J4)



	PSO	HS
CHP el	90,84	183,52
CHP th	182,46	324,42
FC	33,36	48,88
MT	36,24	31,41
Slack Bus	108,17	4,95
Boilers	172,25	30,26
Cost (€)	43.858	45.046
Power Deviation (avg)	0,0041	0,0114
Heat Deviation (avg)	0,00025	0,0002

Emissions' Cost (€)	52.228	9.657
---------------------	--------	-------

Παρατηρούμε, αυτό που επισημάναμε και στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση του μεγάλου δικτύου. Όταν τα βάρη δεν επιλεγθούν σωστά τότε αντικειμενικές με μεγάλες απόλυτες τιμές υποσκελίζουν τις άλλες. Πρακτικά, ο αρμονικός εδώ έκανε κατά 90% βελτιστοποίηση ρύπων, παρά ολική, διότι είδαμε τι μεγάλο εύρος διακύμανσης έχει η J4.

Σημείωση: Τα βάρη ήταν 0,25 για όλες τις αντικειμενικές στα παραπάνω

Τα διορθωμένα βάρη θα είναι:

$$w_1=1 \quad w_2=20 \quad w_3=1 \quad w_4=0.1$$

	PSO	HS
CHP el	90,84	127,88
CHP th	182,46	227,00
FC	33,36	62,58
MT	36,24	57
Slack Bus	108,17	21,32
Boilers	172,25	127,76
Cost (€)	43.858	40.615
Power Deviation (avg)	0,0041	0,0104
Heat Deviation (avg)	0,00025	0,00024
Emissions' Cost (€)	52.228	38.534

Παρατηρούμε πως ισορρόπησαν κάπως οι αποκλίσεις καθώς δινόταν πλέον μεγαλύτερη βαρύτητα στις άλλες αντικειμενικές. Θα μπορούσαν τα βάρη για τις αναμενόμενες αποκλίσεις να είναι μεγαλύτερα τα οποία πιθανώς να μας πήγαιναν πιο κοντά στα αποτελέσματα της PSO. Παρόλα ταύτα, τα αποτελέσματα του αρμονικού είναι ικανοποιητικά, καθώς υπερिशύουν σε όλες πλην μιας αντικειμενικές.

Χρόνοι Εκτέλεσης

Αξίζει να επισημανθεί πως πλέον αντιμετωπίζαμε πολυκριτηριακό πρόβλημα, άρα και η πολυπλοκότητα της βελτιστοποίησης ανέβηκε κατακόρυφα. Ο αρμονικός αλγόριθμος για μία αντικειμενική εκτελούσε τη βελτιστοποίηση σε 2400 δεύτερα και

για τις 4 σε 4800. Από την άλλη, η PSO για μία αντικειμενική έκανε περί τη μία ώρα ενώ για τις τέσσερις αντικειμενικές ο χρόνος εκτέλεσης ανέβηκε περί τις τέσσερις ώρες.

Όπως και σε όλες τις παραπάνω προσομοιώσεις έτσι και εδώ διαφάνηκε ξεκάθαρη υπολογιστική υπεροχή του Αρμονικού. Αυτό όπως είπαμε οφείλεται κυρίως στη διαφορά της φιλοσοφίας των αλγορίθμων καθώς και στην υπολογιστική πολυπλοκότητα του Pareto Efficiency.

6.6.2.3 Παρατηρήσεις

Η στοχαστική προσέγγιση, φάνηκε να μας αποδίδει αντίστοιχα αποτελέσματα με τη ντετερμινιστική προσέγγιση. Για την κλίμακα του δικτύου μας είναι λογικό καθώς οι αλλαγές στις αντικειμενικές δεν είναι τόσο χαώδεις που να φέρουν ριζικές αλλαγές στα αποτελέσματα. Όμως αυτές του τύπου οι μελέτες είναι αναγκαίες, διότι όσο τέτοιου τύπου δίκτυα θα αρχίζουν να επωμίζονται μεγαλύτερο φόρτο παραγωγής και θα επιδιώκουν την βέλτιστη αποδοτικότητα τους, οι στοχαστικές προσεγγίσεις θα βοηθούν ώστε η αβεβαιότητα να μετριαστεί και να μπορούν να λειτουργούν αξιόπιστα και αποδοτικά.

Στο κομμάτι που αφορά τους ρύπους, διαφάνηκαν δύο πολύ καίρια σημεία:

- 1) Η συμπαραγωγή, ήταν το καίριο χαρακτηριστικό του δικτύου το οποίο μετρίασε εντυπωσιακά τους ρύπους, κάνοντας το εξεταζόμενο δίκτυο σημαντικότερα πιο φιλικό στο περιβάλλον.
- 2) Θεωρώντας πως έχουμε τιμή για τους ρύπους 17€/tn διαφάνηκε πως εν τέλη, η βελτιστοποίηση κόστους, κάθε άλλο παρά αυτό επιτυγχάνει. Αν δούμε το θέμα συστημικά, πέραν από το άμεσο κόστος λειτουργίας έχουμε και το αντίστοιχο κόστος των αερίων του θερμοκηπίου. Σε μια βελτιστοποίηση απλά του κόστους λειτουργίας, ναι μεν έχουμε άμεσα οικονομικά οφέλη στα καύσιμα μας αλλά σπαταλάμε σημαντικό μέρος των διαθέσιμων εκπομπών που μας αντιστοιχούν οι οποίοι φέρουν και αυτοί κόστος. Από τα αποτελέσματα φάνηκε πως αυτό το κόστος ήταν τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο. Άρα, μονόπλευρες αντιμετώπισεις από την σκοπιά του κόστους λειτουργίας μόνο ίσως να μην είναι όχι απλά βέλτιστες αλλά και άρδην αντίθετες με τον στόχο της οικονομικής λειτουργίας.

7. Συμπεράσματα και Προοπτικές

7.1 Μετεωριστικοί Αλγόριθμοι

Στην παρούσα διπλωματική μοντελοποιήσαμε και λύσαμε τρία διαφορετικά προβλήματα οικονομικής κατανομής φορτίου. Δεδομένης της φύσης των προβλημάτων και της πολυπλοκότητας σε κάποιες περιπτώσεις οδηγηθήκαμε στη χρήση μετεωριστικών μεθόδων αναζήτησης βέλτιστου, πάρα στην διαδεδομένη μέθοδο των πολλαπλασιαστών Lagrange.

PSO

Η PSO αποτελεί τα τελευταία χρόνια μία από τις πιο δημοφιλείς μεθόδους αναζήτησης βέλτιστων. Οι λόγοι είναι πολλοί, αλλά κυρίως οφείλονται στην ταχύτητα επίλυσης σε σχέση με παλαιότερες εξελικτικές μεθόδους (χρόνοι περί τη μισή ώρα) καθώς και τις τη δεινότητα της να διαχειρίζεται δύσκολα προβλήματα χωρίς να εγκλωβίζεται σε τοπικά βέλτιστα. Αυτά τα χαρακτηριστικά διαφάνηκαν ξεκάθαρα στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας καθώς η PSO κατάφερε σε πάρα πολλά σενάρια, μέσα σε λογικούς χρόνους, να επιστρέφει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα και πολλές φορές να αφήνει πίσω τις άλλες δύο συγκρινόμενες μεθόδους. Οι προοπτικές της μεθόδου, πάνω σε θέματα επίλυσης προβλημάτων οικονομικής κατανομής φορτίου είναι υπέρ του δέοντος θετικές. Πόσο μάλλον, όταν η προσέγγιση μας ήταν από τις πιο πιστές προσεγγίσεις ενός πραγματικού συστήματος με 20 αιολικά πάρκα καθώς και σταθμούς ηλεκτρικών οχημάτων, καθώς και της στοχαστικότητας που αυτά εισάγουν. Στην περίπτωση του μικροδικτύου πάλι, και στην πολυκριτηριακή καθώς και την μονοκριτηριακή περίπτωση η επιδόσεις ήταν πολύ καλές, με ένα μικρό θέμα στους χρόνους εκτέλεσης ειδικά στο 1ο. Παρόλα αυτά, οι επιδόσεις ήταν καλές και μπορεί πολύ εύκολα να χρησιμοποιηθεί στους κεντρικούς ελεγκτές του μικροδικτύου.

Harmony Search

Από τον κλάδο αυτό, των αλγορίθμων αναζήτησης, επιλέξαμε μία δεύτερη μέθοδο με αντίστοιχες ταχύτητες επίλυσης, η οποία όμως τυγχάνει κριτικής λόγω των ομοιοτήτων της με τους γενετικούς αλγόριθμους. Παρόλα αυτά, η μέθοδος αυτή διαφαίνεται να κατέχει συγκριτικά εξαιρετικούς χρόνους εκτέλεσης σε σχέση με Lagrange και PSO και κατάφερε να αποδίδει ανάλογα με αυτές στην ποιότητα των αποτελεσμάτων. Διαφάνηκε να είναι ιδανική για σχεδόν real-time βελτιστοποίηση καθώς η ταχύτητα της ήταν ασύγκριτη. Η μόνη τροχοπέδη είναι πως είναι εγγενώς μονοκριτηριακή μέθοδος, και αναγκαστικά σε διαφορετικού τύπου προβλήματα πρέπει να γίνονται σταθμισμένες αθροίσεις οι οποίες είναι χρονοβόρες και πολλές

φορές μη αποδοτικές. Με αυτό δεδομένο, η απόδοση της μεθόδου ήταν ικανοποιητική με βάση τον χρόνο εκτέλεσης της, η ταχύτητα και η απόδοση της την κάνουν καλή εναλλακτική της Lagrange σε γενική χρήση και στην Ανάλυση ΣΗΕ ειδικότερα.

Έτσι θεωρούμε ότι οι αλγόριθμοι αυτοί θα μπορούσαν να βρουν εφαρμογή σε πολλά προβλήματα βελτιστοποίησης στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς είναι ήδη σε επίπεδο έρευνας οι πιθανές εφαρμογές στη βέλτιστη ροή φορτίου, την ένταξη μονάδων, το σχεδιασμό επέκτασης δικτύου μεταφοράς, το Var σχεδιασμό, τον υπολογισμό μοντέλων πρόβλεψης αιολικής ισχύος, την υδροθερμική συνεργασία, τον υπολογισμό των θέσεων των FACTS, υπολογισμό στρατηγικών ενεργειακών αγορών, στη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων

7.2 Πολυκριτηριακή προσέγγιση

Όσο πιο πολύ προσπαθούμε να βελτιστοποιήσουμε τις δραστηριότητες μας και δει σε ότι αφορά πολύπλοκα συστήματα σαν τα ΣΗΕ τόσο πιο ακριβής χρειάζεται να είναι οι μοντελοποιήσεις αυτών. Η πολυκριτηριακή προσέγγιση έχει ακριβώς αυτό τον σκοπό. Να αποτυπώσει στην τελική "απόφαση" η στο αποτέλεσμα του αλγορίθμου η εν γένη της διαδικασίας λήψης όλα τα χαρακτηριστικά και γνωρίσματα τα οποία είναι επιθυμητά. Βεβαίως, κάτι τέτοιο ούτε εύκολο είναι ούτε μπορεί να προσδιοριστεί μονοσήμαντα. Παρόλα ταύτα η προσέγγιση που επιδιώξαμε σε αυτή τη διπλωματική εργασία έχει σαν σκοπό να συνυφάνει όλα τα κριτήρια που καθιστούν μια λύση "βέλτιστη", κάνοντας το με τον πιο αποδοτικό τρόπο. Συγκεκριμένα, είδαμε πως η προσέγγιση Pareto είναι σαν διαδικασία πιο χρονοβόρα, όμως δεν βασίζεται πάνω σε αυθαίρετες αθροίσεις βαρών που πολλές φορές παραπλανητικά να μας οδηγούν σε κακές λύσεις. Επίσης αυτή η προσέγγιση, όπως έχουμε αναφέρει πολλάκις, αντιλαμβάνεται πως σε τέτοια σύνθετα προβλήματα δεν υπάρχει μία απάντηση και γι αυτό δίνει ένα σύνολο λύσεων και αφήνει την δυνατότητα επιλογής στον χρήστη ή εν προκειμένω τον διαχειριστή του συστήματος.

7.3 Στοχαστική Προσέγγιση

Η στοχαστική προσέγγιση, όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή της μοντελοποίησης των προβλημάτων, προσδίδει άλλη μια διάσταση στα προβλήματα μας, την απόκλιση. Αρχικά, σε ότι αφορά το κόστος λειτουργίας οι διαφορές με τη ντετερμινιστική προσέγγιση δεν είναι τόσο μεγάλες, σε ότι αφορά τις θερμικές μονάδες. Επίσης, μπορεί να αμεληθεί και το Valve loading effect, διότι αντιμετωπίζουμε την έξοδο σαν μέση τιμή οπότε η επίδραση του είναι αμελητέα. Όμως με την εισαγωγή αιολικών σταθμών, καθώς και σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, η μεταβλητότητα της παραγωγής είναι τέτοια που επιβάλλει τη στοχαστική αντιμετώπιση, και τη μοντελοποίηση των αποκλίσεων παραγωγής από τα επιθυμητά. Έτσι ο διαχειριστής λαμβάνει υπόψη του αυτό το γεγονός και έχει τους διαθέσιμους

πόρους να ξανακάνει dispatch αν αυτό κριθεί αναγκαίο. Επίσης, με βάση τη νέα προσέγγιση για την απόκλιση στην παραγωγή των αιολικών βλέπουμε πως υπάρχει μείωση στα κόστη που πηγάζουν από αυτή. Αυτό το γεγονός μπορεί να είναι καθοριστικό στο μέλλον, καθώς δεν θα υπερεκτιμάται πλέον το κόστος διείσδυσης των αιολικών δίνοντας τους μεγαλύτερο έδαφος να αναπτυχθούν.

7.4 Συμπαραγωγή

Τα οφέλη της συμπαραγωγής, αναλύθηκαν εκτενώς στο αντίστοιχο κεφάλαιο, και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων τα επαλήθευσαν πλήρως. Τα CHP κατείχαν ένα καλό ποσοστό συμμετοχής όταν τα συστήματα είχαν σαν κριτήριο το κόστος, διότι σαν μονάδες παραγωγής έχουν πολύ καλύτερο βαθμού εκμετάλλευσης του καυσίμου τους. Όμως, εκεί που φάνηκε ξεκάθαρα η συμμετοχή τους να είναι καθοριστική, είναι όταν εισήχθησαν και περιβαλλοντικά κριτήρια. Παρά τους περιορισμούς που έθεταν οι μη κυρτές γεωμετρίες των εφικτών τους συνόλων, χρησιμοποιούνταν σε κάθε σενάριο σε μεγάλο ποσοστό.

7.5 Αιολικά

Όσον αφορά την αιολική παραγωγή, όπως μελετήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, θεωρούμε ότι το μοντέλο που αναπτύξαμε εισάγει στο πρόβλημα της κατανομής με ορθό τρόπο τα αιολικά πάρκα, και ιδιαίτερα η στοχαστική προσέγγιση της αιολικής παραγωγής αλλά και ο έλεγχος διείσδυσης. Η ασαφής αναπαράσταση και η αντικειμενική συνάρτηση του συντελεστή διείσδυσης αποτελούν έναν αρκετά απλό και εύκολο στο χειρισμό τρόπο να ελέγχει ο διαχειριστής την ασφάλεια του συστήματος, που μέσω των λύσεων του συνόλου Pareto μπορεί να επιλεγεί η πιο κατάλληλη λύση και να αποφευχθούν τα προβλήματα στο δίκτυο που προαναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Τα αιολικά πάρκα της Κρήτης με τα ανεμολογικά δεδομένα ήταν άριστη εφαρμογή στην οποία ανταποκρίθηκε ικανοποιητικά ο αλγόριθμος.

7.6 Ηλεκτρικά Οχήματα

Η ύπαρξή τους, διαφάνηκε πως έχει εμφανείς συνέπειες στα δίκτυα, είτε σε μικρή είτε σε μεγάλη κλίμακα. Αρχικά, στο μικροδίκτυο, καταφέραμε να αντιμετωπίσουμε ικανοποιητικά την φόρτιση των οχημάτων σε ώρες εκτός αιχμής. Το φορτίο αυτό δεν ήταν διόλου ευκαταφρόνητο, καθώς όπως είδαμε προκαλούσε αισθητές αιχμές μέσα στις ώρες φόρτισης. Στο μεγάλο δίκτυο, διαφάνηκε πάλι, η χρησιμότητα της αποθηκευμένης στις μπαταρίες ενέργειας. Στο σενάριο αιχμής το οποίο εξετάσαμε, η χρήση αυτής της ενέργειας ήταν καθοριστική ώστε το σύστημα να καταφέρει να κρατήσει όλα τα μεγέθη σε επιτρεπτά επίπεδα, με άκρως περιοριστικά μέτρα για τους ρύπους. Οι τεχνολογίες αυτές φαίνονται να έχουν καλές προοπτικές στη διαχείριση αιχμών και ίσως αποτελέσουν ένα καλό μέσο αποθήκευσης, ιδίως της πλεονάζουσας ισχύος από ΑΠΕ, μέχρι οι τεχνολογίες των μπαταριών να εξελιχθούν περαιτέρω.

Βιβλιογραφία

- [1]. Hadi Saadat, Power system analysis, PSA Publishing, 2004
- [2]. Κ. Βουρνάς and Γ. Κονταξής, Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. ΕΜΠ,2001.
- [3]. Πιπεράγκας Γρηγόριος, Ανάπτυξη Πολυκριτηριακής μεθόδου Particle Swarm Optimization : εφαρμογή σε στοχαστική βέλτιστη περιβαλλοντική κατανομή φορτίου-θερμότητας με CHP και αιολική παραγωγή, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σεπτέμβριος 2009.
- [4]. P.S.Rao, Combined heat and power economic dispatch: a direct solution, *Elect. Power Components Syst.* 34 (9) (2006) 1043-1056
- [5]. Αλέξανδρος Παπαστεφανάκης, Μελέτη ένταξης σταθμών συμπαραγωγής ηλεκτρισμού θερμότητας σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας υπό τεχνοοικονομικούς και περιβαλλοντικούς περιορισμούς, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ιούλιος 2009.
- [6]. Leandro dos Santos Coelho, Viviana Cocco Mariani, An improved harmony search algorithm for power economic load dispatch, *Energy Conversion and Management*, Volume 50, Issue 10, October 2009, Pages 2522-2526, ISSN 0196-8904, 10.1016/j.enconman.2009.05.034.
- [7]. M. Fesanghary, E. Damangir, I. Soleimani, Design optimization of shell and tube heat exchangers using global sensitivity analysis and harmony search algorithm, *Applied Thermal Engineering*, Volume 29, Issues 5-6, April 2009, Pages 1026-1031, ISSN 1359-4311, 10.1016/j.applthermaleng.2008.05.018.
- [8]. Martin Geidl, Integrated Modeling and Optimization of Multi-Carrier Energy Systems, PhD dissertation, ETH Zurich, 2007
- [9]. G. Anastasiadis, E. Voreadi, and N. D. Hatziaargyriou, Probabilistic Load Flow Methods with High Integration of Renewable Energy Sources and Electric Vehicles – Case Study of Greece, Issue Date: 19-23 June 2011 On pages: 1 – 8, E-ISBN: 978-1-4244-8417-1
- [10]. Κ. Τσατσάκης, Μελέτη μικροδικτύου με αυξημένη διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων, μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σεπτέμβριος 2010.
- [11]. <http://www.teslamotors.com/>
- [12]. <http://www.toyota.com/>
- [13]. Κ.Θ.Δέρβος, Εισαγωγή στα ημιαγώγιμα υλικά και φωτοβολταϊκές διατάξεις, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2009
- [14]. F. Salgado and P. Pedrero, “Short-term operation planning on cogeneration systems: A survey,” *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 5, pp. 835 – 848, 2008.
- [15]. C. Chang and W.Fu, “Stochastic multiobjective generation dispatch of combined heat and power systems,” in *IEE Proceedings, Generation Transmission and Distribution*, vol. 145, no. 5, 1998.
- [16]. J. Hetzer, D. Yu, and K. Bhattarai, “An economic dispatch model incorporating wind power,” *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 23, no. 2, pp. 603–611, June 2008.
- [17]. V. Miranda and P. S. Hang, “Economic dispatch model with fuzzy wind constraints and attitudes of dispatchers,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 20, no. 4, 2005.

- [18]. A. I. Tsouchnikas and N. D. Hatziargyriou, "Probabilistic analysis of isolated power systems with wind power penetration limitations," in *9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, 2006.
- [19]. S. A. Papathanassiou and N. G. Boulaxis, "Power limitations and energy yield evaluation for wind farms operating in island systems," *Renewable Energy*, vol. 31, no. 4, pp. 457 – 479, 2006.
- [20]. L. Wang and C. Singh, "Stochastic economic emission load dispatch through a modified particle swarm optimization algorithm," *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 8, pp. 1466 – 1476, 2008.
- [21]. "Environmental/economic power dispatch using a fuzzified multi-objective particle swarm optimization algorithm," *Electric Power Systems Research*, vol. 77, no. 12, pp. 1654 – 1664, 2007.
- [22]. J. Momoh, *Electric Power System Applications of Optimization*. New York: MarcelDekker, Inc, 2001.
- [23]. S. K. Bath, J. S. Dhillon, and D. P. Kothari, "Fuzzy satisfying stochastic multi-objective generation scheduling by weightage pattern search methods," *Electric Power Systems Research*, vol. 69, no. 2-3, pp. 311 – 320, 2004.
- [24]. Noura Al Moubayed Phd Thesis, "MultiObjective Particle Swarm Optimization: Methods and Applications", Robert Gordon University, February 2014
- [25]. S.D. Beigvand, H. Abdia, Massimo La Scala, "Combined Heat and Power Economic Dispatch Problem Using Gravitational Search Algorithm"
- [26]. *Μεθοδολογία υπολογισμού ορίου διείσδυσης ΑΠΕ στα μη διασυνδεδεμένα νησιά*, Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας, Αθήνα, Φεβρουάριος 2003.
- [27]. "Αναστασιάδης Ανέστης, "Συμβολή στην Διαχείριση Μικροδικτύων Ηλεκτρικής Ενέργειας με Ενσωμάτωση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και Συστημάτων Συμπαράγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας", Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχ. & Μηχ. Υπολογιστών, ΕΜΠ, Δεκέμβριος 2014".
- [28]. Πιπεράγκας Γρηγόρης, "Ανάπτυξη πολυκριτηριακής μεθόδου *Particle Swarm Optimization*: Εφαρμογή σε στοχαστική βέλτιστη περιβαλλοντική κατανομή φορτίου θερμότητας με *CHP* και αιολική παραγωγή", διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σεπτέμβριος 2009
- [29]. Βιολέτα Αργυροπούλου, " *Οικονομικά οφέλη Μικροδικτύου με αυξημένη διείσδυση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής – Στοχαστική προσέγγιση*", διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Νοέμβριος 2011