



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

**Οικονομικά οφέλη Μικροδικτύου με αυξημένη διείσδυση  
μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής – Στοχαστική προσέγγιση**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΒΙΟΛΕΤΑ Μ. ΑΡΓΥΡΟΠΟΥΛΟΥ**

**Επιβλέποντες:** Νικόλαος Δ. Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Ανέστης Αναστασιάδης  
Υ.Δ. Ε.Μ.Π

Αθήνα, Νοέμβριος 2011





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

**Οικονομικά οφέλη Μικροδικτύου με αυξημένη διείσδυση μονάδων  
διασπαρμένης παραγωγής – Στοχαστική προσέγγιση**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΒΙΟΛΕΤΑ Μ. ΑΡΓΥΡΟΠΟΥΛΟΥ**

**Επιβλέποντες:** Νικόλαος Δ. Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Ανέστης Αναστασιάδης  
Υ.Δ. Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 24<sup>η</sup> Νοεμβρίου 2011.

.....

Ν. Χατζηαργυρίου

Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Σ. Παπαθανασίου

Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Π. Γεωργιλιάκης

Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2011

.....

Βιολέτα Μ. Αργυροπούλου

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

Copyright © Βιολέτα Μ. Αργυροπούλου, 2011.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2010-2011 στον τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ.

Αντικείμενο της εργασίας είναι η βελτιστοποίηση ενός Μικροδικτύου με χρήση του αρμονικού αλγορίθμου, η μελέτη διαφόρων χαρακτηριστικών του με την αύξηση της διείσδυσης της διεσπαρμένης παραγωγής, όπως επίσης και η στοχαστική ανάλυσή του σε σύγκριση με τη ντετερμινιστική που είχε προηγηθεί.

Υπεύθυνος κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας ήταν ο Καθηγητής κ. Ν. Χατζηαργυρίου, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο Διδάκτορα κ. Α. Αναστασιάδη για τις πολύτιμες συμβουλές και την καθοδήγηση που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της εργασίας. Τις θερμές μου ευχαριστίες θα ήθελα να μεταφέρω και στον Ηλεκτρολόγο Μηχανικό Κωνσταντίνο Τσατσάκη για το υλικό που μου παρείχε και τις χρήσιμες υποδείξεις του κατά την εκπόνηση των προσομοιώσεων με τα ηλεκτρικά οχήματα. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τους γονείς μου για τη στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

Αθήνα, Νοέμβριος 2011

Βιολέτα Μ. Αργυροπούλου

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη ενός δικτύου χαμηλής τάσης 17 ζυγών. Πιο συγκεκριμένα, αυτό το δίκτυο περιλαμβάνει μια πληθώρα μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, όπως μια μικροτουρμπίνα, μια κυψέλη καυσίμου, μια ανεμογεννήτρια, δύο σειρές φωτοβολταϊκών και δύο ενεργειακούς διανομείς με μια μονάδα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού-θερμότητας και ένα boiler ο καθένας.

Αρχικά το δίκτυο μελετήθηκε ως προς τέσσερα διαφορετικά σενάρια λειτουργίας (χωρίς διεσπαρμένη παραγωγή, ανεξάρτητη λειτουργία μονάδων DG χωρίς CHPs, ανεξάρτητη λειτουργία μονάδων DG με CHPs και μικροδίκτυο). Σε κάθε προσομοίωση παρατηρούσαμε κάποια σημαντικά χαρακτηριστικά του δικτύου, όπως το κόστος, την έγχυση ισχύος από το ανάντη δίκτυο, την παραγωγή της μικροτουρμπίνας, της κυψέλης καυσίμου, του CHP και του boiler, τις απώλειες, τα προβλήματα στις τάσεις και τις υπερφορτίσεις των γραμμών. Έγιναν πολλές προσομοιώσεις με δύο διαφορετικές οριακές τιμές συστήματος, μια υψηλή (2008) και μια πιο χαμηλή (2009). Επίσης στις προσομοιώσεις άλλαζε και το επίπεδο διείσδυσης των ΑΠΕ (ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά) με σταθερό βήμα κάθε φορά. Όλες αυτές οι αρχικές προσομοιώσεις έγιναν με την ευρέως διαδεδομένη μέθοδο Lagrange, μέσω της συνάρτησης `fmincon` της Matlab.

Στη συνέχεια, μόνο για λειτουργία του δικτύου ως μικροδίκτυο, που είναι και το πιο ενδιαφέρον σενάριο, έγινε βελτιστοποίηση του ετήσιου κόστους λειτουργίας του με χρήση μετεωριστικής μεθόδου αυτή τη φορά, και πιο συγκεκριμένα του αρμονικού αλγορίθμου αναζήτησης. Έγιναν διάφορες δοκιμές προκειμένου να ευρεθούν οι καταλληλότερες τιμές των παραμέτρων της μεθόδου, η αποτελεσματικότητα της οποίας συγκρίνεται με τη μέθοδο Lagrange και τις τιμές κόστους που πήραμε κατά τις πρώτες προσομοιώσεις.

Όλα όμως τα αποτελέσματα προέκυπταν με την προσομοίωση ενός ντετερμινιστικού μοντέλου, το οποίο δεν ανταποκρίνεται σε πραγματικές εφαρμογές, καθώς τόσο η ζήτηση φορτίου όσο και η παραγωγή των ΑΠΕ θεωρούνται τυχαίες μεταβλητές. Έτσι ακολούθησε και η οικονομική βελτιστοποίηση του μικροδικτύου με χρήση ενός στοχαστικού μοντέλου. Ακόμα, μελετήθηκε στοχαστικά και το CHP των δύο ενεργειακών διανομέων του υπό μελέτη δικτύου και με χρήση της μεθόδου Gram-Charlier βρέθηκε η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF) της ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το CHP κάθε εποχή του έτους.

Τέλος, υπεισήλθαν και τα ηλεκτρικά οχήματα στο μικροδίκτυο, τα οποία μελετήθηκαν μόνο ως αποθηκευτικές διατάξεις (μπαταρίες), δηλαδή σε μια επιπλέον ζήτηση φορτίου. Έγινε εκτενής μελέτη της επίδρασής τους στο κόστος λειτουργίας του μικροδικτύου, στην καμπύλη ζήτησης φορτίου και στην διείσδυση των ΑΠΕ.

## ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ

Μικροδίκτυο, διεσπαρμένη παραγωγή, φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες, μικροτουρμπίνα, κυψέλη καυσίμου, συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας, ΑΠΕ, διείσδυση, οριακή τιμή συστήματος, ηλεκτρικά οχήματα, αρμονικός αλγόριθμος αναζήτησης, οικονομική βελτιστοποίηση, κόστος λειτουργίας, στοχαστικότητα

## **ABSTRACT**

The purpose of this diploma thesis is to study a 17-bus low-voltage power grid. More specifically, this power grid includes a variety of distributed generation units, such as a micro-turbine, a fuel cell, a wind turbine, photovoltaics and two energy distributors each one consisting of a unit of CHP and a boiler.

Initially, four different operation scenarios were studied (without DG units, independent operation of the DG units without the presence of the CHPs, independent operation of the DG units with the presence of the CHPs and Microgrid). In each simulation, observations were made on some important features of the grid, such as its operational cost, the power injection from the upstream grid, the micro-turbine's production, the fuel cell's production, CHPs' and boilers' production, losses, problems on voltages and lines' overcharges. Numerous simulations were completed with two different system marginal prices, a relatively high (that of the year 2008) and a relatively low (that of the year 2009). Also, another feature changing in simulations was the penetration level of renewable energy resources (wind turbines, photovoltaics) with a determined step each time. All these first simulations were carried out with the well-known method of Lagrange, using the function `fmincon` of Matlab.

Moreover, only for the Microgrid scenario (which is the most interesting scenario to study), we carried out the optimization of the annual operating cost, using a meta-heuristic method this time called Harmony Search algorithm (HS). There were several tests to determine the appropriate parameters of the method, the effectiveness of which is compared with the Lagrange method, and the cost values that were determined in those first simulations mentioned above.

However, all the results were produced with the use of a deterministic simulation model, which does not correspond to real applications, due to the fact that both the load demand and the production of renewable energy resources are random variables. As a result, an economic optimization of the Microgrid using a stochastic model followed. Also, a stochastic study of the CHPs of the two energy distributors (HUBs) was completed, and by using the Gram-Charlier method we found the probability density function (PDF) of the electrical power produced by the CHPs in every season of the year.

Finally, electrical vehicles (plug-in EVs) were introduced in the Microgrid and they were studied only as storage devices (whenever the grid could charge them through a selection algorithm) during the night hours. An extensive study of their effects on the cost of the Microgrid was conducted, along with their effects on the load demand curve and the penetration of the renewable resources as well.

## **KEY-WORDS**

Microgrid, smart-grid, distributed generation, photovoltaics, wind turbines, micro turbine, fuel cell, cogeneration of heat and power, renewable energy resources, penetration, system marginal price, electric vehicles, Harmony Search algorithm, economic optimization, operating cost, stochastic model

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	5
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	6
<b>ABSTRACT</b> .....	7
<b>Κεφάλαιο 1: ΣΗΕ – ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ</b> .....	14
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΗΕ.....	14
1.1.1 Σκοπός και απαιτήσεις.....	14
1.1.2 Δομή.....	14
1.1.3 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.....	16
1.1.4 Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας.....	17
1.1.5 Διανομή ηλεκτρικής ενέργειας.....	19
1.1.6 Φορτία.....	20
1.1.7 Ανάλυση ΣΗΕ.....	20
1.1.7.1 Ανάλυση ροών φορτίου.....	21
1.1.7.2 Οικονομική κατανομή φορτίου.....	21
1.1.8 Λειτουργία και έλεγχος ΣΗΕ.....	21
1.1.9 Μη διασυνδεδεμένα ΣΗΕ.....	22
1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ.....	22
<b>Κεφάλαιο 2: ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ</b> .....	26
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΟΡΙΣΜΟΣ.....	26
2.2 ΧΡΗΣΕΙΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....	28
2.3 ΤΕΧΝΙΚΑ, ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....	29
2.3.1 Πλεονεκτήματα.....	29
2.3.2 Μειονεκτήματα.....	31
2.4 ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....	32
2.5 ΣΥΝΔΕΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ.....	35
2.5.1 Ορισμός-βασικές έννοιες.....	35
2.5.2 Γενικές αρχές και προϋποθέσει σύνδεσης.....	36
2.5.3 Σύνδεση παραγωγών στο δίκτυο χαμηλής τάσης.....	40
2.5.3.1 Γενικά-Διαμόρφωση της σύνδεσης.....	40
2.5.3.2 Διατάξεις ζεύξης και παραλληλισμού – Προστασία της διασύνδεσης.....	41
2.5.3.3 Επιπτώσεις στην τάση του δικτύου.....	43
2.5.3.4 Επιπτώσεις σε συστήματα τηλεχειρισμών ακουστικής συχνότητας.....	48
<b>Κεφάλαιο 3: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ DER</b> .....	50
3.1 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ.....	50
3.1.1 Η Ηλιακή ακτινοβολία.....	50
3.1.1.1 Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.....	50
3.1.1.2 Η ηλιακή σταθερά.....	52
3.1.1.3 Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας.....	52



3.1.1.4	Ολική, απευθείας, διάχυτη και διάχυτα ανακλώμενη ακτινοβολία.....	53
3.1.1.5	Η κίνηση της γης γύρω από τον ήλιο.....	56
3.1.1.6	Ημερήσια ενεργειακή απολαβή.....	57
3.1.1.7	Ηλιοφάνεια.....	58
3.1.1.8	Εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας.....	58
3.1.1.9	Δυνατότητα αξιοποίησης της Φ/Β ενέργειας.....	59
3.1.2	Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	60
3.1.3	Η φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια.....	62
3.1.3.1	Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός Φ/Β στοιχείου.....	62
3.1.3.2	Η καμπύλη I-V ενός Φ/Β στοιχείου.....	63
3.1.3.3	Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του Φ/Β στοιχείου.....	64
3.1.3.4	Απόδοση του Φ/Β στοιχείου.....	64
3.1.4	Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια.....	65
3.1.5	Κατηγορίες φωτοβολταϊκών.....	66
3.1.5.1	Μονοκρυσταλλικό.....	67
3.1.5.2	Πολυκρυσταλλικό.....	67
3.1.5.3	Ταινία πυριτίου.....	68
3.1.5.4	Δισεληνοϊνδιούχος Χαλκό.....	68
3.1.5.5	Άμορφο πυρίτιο.....	69
3.1.5.6	Τελουριούχο κάδμιο.....	70
3.1.5.7	Αρσενικούχο γάλλιο.....	71
3.1.5.8	Υβριδικά φ/β στοιχεία.....	71
3.1.5.9	Άλλες τεχνολογίες.....	72
3.1.6	Τρόποι στήριξης συλλεκτών και προσανατολισμός τους.....	72
3.1.7	Σύνθεση φ/β συστημάτων.....	73
3.1.7.1	Αυτόνομο.....	73
3.1.7.2	Διασυνδεδεμένο.....	74
3.2	ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ.....	76
3.2.1	Εισαγωγή.....	76
3.2.2	Χαρακτηριστικά του ανέμου.....	77
3.2.2.1	Ταχύτητα ανέμου.....	77
3.2.2.2	Μεταβολή ταχύτητας ανέμου με το ύψος.....	79
3.2.2.3	Ενεργειακό περιεχόμενο και ισχύς ανέμου.....	80
3.2.3	Κατασκευαστική διαμόρφωση ανεμογεννητριών.....	81
3.2.3.1	Βασικά υποσυστήματα και άλλα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά.....	81
3.2.3.2	Ηλεκτρικό σύστημα.....	84
3.2.3.3	Μηχανικό σύστημα.....	85
3.2.3.3.1	Οριζόντιου άξονα.....	85
3.2.3.3.2	Κατακόρυφου άξονα.....	86
3.2.3.4	Σύστημα ελέγχου.....	86
3.2.4	Μετατροπή αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική.....	89
3.2.4.1	Αεροδυναμική ισχύς.....	89
3.2.4.2	Λόγος ταχύτητας ακροπερυγίου, λ.....	91
3.2.5	Καθορισμός ονομαστικής ισχύος ανεμογεννήτριας.....	92
3.2.6	Συντελεστής ισχύος ανεμογεννήτριας.....	92

3.2.7 Σύνδεση ανεμογεννήτριας στο ηλεκτρικό δίκτυο.....	93
3.3 ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.....	94
3.4 ΜΙΚΡΟΤΟΥΡΜΠΙΝΕΣ.....	97
<b>Κεφάλαιο 4: ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ, ΜΙΚΡΟΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>100</b>
4.1 ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ-ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	100
4.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	100
4.1.1.1 Ορισμός.....	100
4.1.1.2 Σύγκριση με συμβατικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρισμού.....	101
4.1.1.3 Τομείς εφαρμογής.....	102
4.1.1.4 Τεχνικές συμπαραγωγής.....	104
4.1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	107
4.1.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ-ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ.....	108
4.1.4 Η ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ.....	112
4.1.4.1 Συμπαραγωγή και φυσικό αέριο.....	112
4.1.4.2 Συμπαραγωγή και βιομάζα.....	112
4.2 ΜΙΚΡΟΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ.....	114
4.2.1 Δυνατότητες για μικροσυμπαραγωγή.....	114
4.2.2 Ορισμός.....	114
4.2.3 Οικονομικοί και περιβαλλοντικοί παράγοντες.....	116
4.2.4 Η μικροσυμπαραγωγή σαν ένα μέτρο ενεργειακής αποδοτικότητας μέσα στο σπίτι.....	118
4.2.5 Εμπόδια στην αγορά.....	119
<b>Κεφάλαιο 5: ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ.....</b>	<b>121</b>
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	121
5.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ.....	122
5.3 ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ.....	125
5.3.1 Αυτονομία και προβλήματα.....	125
5.3.2 Ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά μπαταριών προοριζόμενων για κίνηση.....	126
5.3.3 Σημερινές τιμές και πρόβλεψη τιμών.....	128
5.4 ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ.....	130
5.5 VEHICLE-TO-GRID (V2G) CONCEPT.....	133
5.5.1 Ορισμός.....	133
5.5.2 Εγκατάσταση ενός V2G προγράμματος.....	134
5.5.3 Φόρτιση και εκφόρτιση.....	136
5.5.4 Επιτρεπόμενη ανταλλαγή ισχύος και περιορισμοί.....	137
5.6 ΠΑΡΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΑΓΟΡΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ.....	139
5.6.1 Εισαγωγή.....	139
5.6.2 Αγορές Ηλεκτρικής ισχύος.....	139
5.6.3 Παρούσα κατάσταση και εμπορικά EVs που κυκλοφορούν σήμερα.....	142
<b>Κεφάλαιο 6: ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ, ΕΞΥΨΗΝΑ ΔΙΚΤΥΑ.....</b>	<b>146</b>
6.1 ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ.....	146
6.1.1 Η έννοια του μικροδικτύου.....	146

6.1.2	Επιδράσεις μικροδικτύου στη γενικότερη λειτουργία ενός ΣΗΕ .....	148
6.1.2.1	Πλεονεκτήματα μικροδικτύου.....	148
6.1.2.2	Ποιότητα ισχύος και αξιοπιστία μικροδικτύου.....	150
6.1.2.3	Λειτουργικά οφέλη για το δίκτυο.....	152
6.1.2.4	Μικροδίκτυο και περιβάλλον.....	153
6.1.3	Δομή μικροδικτύου.....	154
6.1.4	Αρχιτεκτονική ελέγχου.....	156
6.1.4.1	Κεντρικός έλεγχος και αρμοδιότητες του MGCC.....	157
6.1.4.2	Πλήρως αποκεντρωμένος έλεγχος.....	160
6.1.4.3	Εφαρμογές αποκεντρωμένου και κεντρικού ελέγχου λειτουργίας μικροδικτύου.....	162
6.1.5	Πολιτικές συμμετοχής του μικροδικτύου σε ιδεατή αγορά ενέργειας .....	164
6.1.5.1	Πολιτική 1η - Η πολιτική του «καλού πολίτη» .....	165
6.1.5.2	Πολιτική 2η - Η πολιτική του «αδανικού πολίτη» .....	166
6.1.6	Λειτουργία αγοράς μικροδικτύου περιλαμβάνοντας προσφορές καταναλωτών – demand side bidding (DSB) .....	166
6.1.6.1	Η πολιτική της προσφοράς φορτίων προς σύνδεση – παραλλαγή Α’.....	168
6.1.6.2	Η πολιτική της προσφοράς φορτίων προς αποκοπή – παραλλαγή Β’.....	169
6.1.7	Χρήση συναρτήσεων οικονομικής λειτουργίας για το μικροδίκτυο.....	170
6.1.7.1	Ένταξη μονάδων (unit commitment) .....	170
6.1.7.2	Οικονομική κατανομή (Economic Dispatch) .....	172
6.1.8	Τα μικροδίκτυα στην Ελλάδα .....	173
6.2	ΕΞΥΠΝΑ ΔΙΚΤΥΑ.....	174
6.2.1	Εισαγωγή.....	174
6.2.2	Ορισμός - Χαρακτηριστικά.....	175
6.2.3	Παράγοντες που οδηγούν στην ανάπτυξη των έξυπνων δικτύων στην Ευρώπη.....	176
6.2.4	Η μετάβαση από το σήμερα στο αύριο.....	176
6.2.5	Δημιουργία έξυπνων δικτύων.....	178
6.2.6	Έξυπνοι μετρητές.....	180
6.2.7	Μοντέλο ίντερνετ.....	181
6.2.8	Επενδύσεις για την ανάπτυξη των έξυπνων δικτύων.....	181
6.2.9	Τα έξυπνα δίκτυα ανά τον κόσμο.....	182

## **Κεφάλαιο 7: ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ**

7.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	184
7.2	ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	184
7.2.1	Μη γραμμικός προγραμματισμός .....	186
7.2.2	Αλγόριθμοι ολικής βελτιστοποίησης.....	190
7.3	Ο ΑΡΜΟΝΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ .....	194
7.3.1	Εισαγωγή.....	194
7.3.2	Οι παράμετροι του αλγορίθμου.....	195
7.3.3	Ο βελτιωμένος αρμονικός αλγόριθμος.....	198

## **Κεφάλαιο 8: ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ**.....199

8.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	199
8.2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	199
8.2.1	Αναμενόμενο κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας.....	200

8.2.2 Αναμενόμενη απόκλιση παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος.....	200
8.2.3 Αναμενόμενη απόκλιση παραγωγής θερμότητας.....	201
8.2.4 Περιορισμοί.....	201
8.2.5 Τελικό πρόβλημα.....	202
8.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ.....	202
<b>Κεφάλαιο 9: ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ.....</b>	<b>203</b>
9.1 ΔΙΚΤΥΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ.....	203
9.1.1 Στοιχεία του συστήματος.....	203
9.1.2 Μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής.....	205
9.1.3 Ενεργειακοί διανομείς.....	207
9.1.4 Φορτία.....	211
9.1.5 Σύστημα (ανάτη δίκτυο).....	211
9.2 ΣΕΝΑΡΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΙΑΣ.....	212
9.3 ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....	213
9.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΣΕΝΑΡΙΩΝ.....	214
9.5 ΜΕΓΕΘΗ ΠΡΟΣ ΜΕΛΕΤΗ.....	219
9.6 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΟΝ ΑΡΜΟΝΙΚΟ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ.....	219
9.7 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΟ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.....	220
9.7.2 Προσομοίωση στοχαστικού μοντέλου του CHP.....	220
9.7.1 Προσομοίωση στοχαστικού μοντέλου για εύρεση ετήσιου λειτουργικού κόστους.....	220
9.8 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ.....	220
9.8.1 Παράμετροι και εξεταζόμενα μεγέθη.....	220
9.8.2 Το πρόγραμμα και η δομή του.....	224
<b>Κεφάλαιο 10: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ.....</b>	<b>226</b>
10.1 ΜΕΛΕΤΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΔΙΑΦΟΡΑ ΜΕΓΕΘΗ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ.....	226
10.1.1 Ετήσιο κόστος.....	226
10.1.1.1 Μελέτη ως προς ένα επίπεδο DG διείσδυσης (88kW).....	226
10.1.1.2 Μελέτη ως προς περισσότερα επίπεδα DG διείσδυσης (88-151 kW).....	228
10.1.2 Ετήσια παραγωγή ΜΤ και FC.....	232
10.1.3 Εγγυόμενη από το δίκτυο ισχύς.....	236
10.1.4 Συνολικές απώλειες.....	237
10.1.5 Παραγωγή των ενεργειακών διανομέων (HUBS).....	240
10.1.5.1 Παραγωγή θερμότητας του Hub1.....	240
10.1.5.2 Παραγωγή θερμότητας του Hub2.....	243
10.1.5.3 Παραγωγή ηλεκτρισμού του Hub1.....	245
10.1.5.4 Παραγωγή ηλεκτρισμού του Hub2.....	247
10.1.6 Προβλήματα τάσεων.....	249
10.1.6.1 Τρόπος εύρεσης πιθανών προβλημάτων τάσεων στους ζυγούς.....	249
10.1.6.1 Αποτελέσματα.....	251
10.1.7 Υπερφορτίσεις γραμμών.....	254
10.1.7.1 Αποτελέσματα.....	254

10.1.7.2	Πιθανές λύσεις.....	255
10.2	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΡΜΟΝΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ.....	255
10.2.1	Αποτελέσματα προσομοιώσεων με τον αρμονικό αλγόριθμο.....	255
10.2.2	Αποτελέσματα ενδιάμεσων προσομοιώσεων.....	257
10.2.3	Βελτιωμένος Αρμονικός αλγόριθμος .....	258
10.3	ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ.....	259
10.3.1	Ορθότητα στοχαστικού μοντέλου .....	259
10.3.2	Διάφορες δοκιμές με το στοχαστικό μοντέλο .....	260
10.3.3	Προσομοίωση στοχαστικού μοντέλου για ένα έτος.....	261
10.4	ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΟΥ CHP.....	261
10.5	ΜΕΛΕΤΗ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ ΔΙΑΦΟΡΑ ΜΕΓΕΘΗ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ.....	269
10.5.1	Τι και Πως θα εξεταστεί.....	269
10.5.2	Έλεγχος Τάσεων και Ρευμάτων.....	270
10.5.3	Μελέτη Κόστους Συνολικά ανά Μήνα – Πως τα EVs επηρεάζουν το κόστος.....	271
10.5.4	Μελέτη κόστους κατά τις ώρες φόρτισης των EVs και πως η παρουσία τους επηρεάζει το κόστος.....	277
10.5.5	Παρουσίαση γραφικών συνολικού κόστους.....	280
10.5.6	Μελέτη της καμπύλης ζήτησης φορτίου (παρουσία EVs) για την 8 <sup>η</sup> ημέρα του εκάστοτε μήνα και σύγκριση αυτής με την αντίστοιχη απουσία EVs.....	284
10.5.6.1	Καμπύλη για Μήνα Μάιο με φόρτιση EVs εντός 7h αντί 9h και παρατήρηση της κοιλάδας ζήτησης.....	286
10.5.7	Συγκεντρωτικοί πίνακες κόστους.....	288
10.5.8	Παρουσίαση ορισμένων συσχετίσεων μεγεθών.....	289
10.5.9	Πρόταση για περαιτέρω βελτίωση – Φαινόμενο του συντονισμού.....	292

**Παράρτημα: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΟΛΟ ΤΟ ΧΡΟΝΟ (ΟΤΣ 2008) ΧΩΡΙΣ/ΜΕ ΑΥΞΗΜΕΝΗ ΔΙΕΥΣΔΕΙΣΗ...293**

**Βιβλιογραφία.....330**

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΗΕ

#### 1.1.1 Σκοπός και απαιτήσεις

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) είναι το σύστημα των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης [6].

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.

#### 1.1.2 Δομή

Η τροφοδότηση των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια προϋποθέτει τρεις ξεχωριστές λειτουργίες του ΣΗΕ : την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή. Η ηλεκτρική ενέργεια από το σημείο που θα παραχθεί ως το σημείο που θα καταναλωθεί βρίσκεται σε μια συνεχή ροή και επειδή η ηλεκτρική ενέργεια δεν μπορεί να αποθηκευθεί, πρέπει να παράγεται τη στιγμή ακριβώς που χρειάζεται η κατανάλωσή της. Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται στους σταθμούς παραγωγής. Η σύγχρονη βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας έχει θεμελιωθεί σε μια σειρά εφευρέσεων και τεχνικών εξελίξεων στη μετατροπή της θερμικής ενέργειας των ορυκτών καυσίμων και της μηχανικής ενέργειας των υδάτινων ροών και των υδατοπτώσεων σε ηλεκτρική ενέργεια. Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες ποσότητες από τα εργοστάσια παραγωγής προς τις περιοχές κατανάλωσης γίνεται με τις γραμμές υψηλής και υπερυψηλής τάσης, οι οποίες μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια σε κεντρικά σημεία του δικτύου, τους υποσταθμούς, από όπου ξεκινούν τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης που διανέμουν την ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές δια μέσου των υποσταθμών διανομής και των γραμμών χαμηλής τάσης.

Από την άποψη της έκτασης τα ΣΗΕ μπορούν να διακριθούν σε «εθνικά συστήματα», «περιφερειακά συστήματα» και «ιδιωτικά συστήματα», εφόσον καλύπτουν αντίστοιχα το σύνολο μιας χώρας, μια γεωγραφικής περιοχής ή τις ανάγκες ενός μεμονωμένου ιδιωτικού συγκροτήματος.

Η δομή του συστήματος έχει πρωτεύουσα σημασία για τη γεωγραφική διαθεσιμότητα της ηλεκτρικής ενέργειας. Η δομή και η σύνθεση του ΣΗΕ εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από το μέγεθός του.

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.

Αν και το μέγεθος των ΣΗΕ διαφέρει, υπάρχουν μεταξύ τους κοινά χαρακτηριστικά. Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται είναι τριφασικά εναλλασσόμενου ρεύματος, συχνότητας 50 ή 60 Hz. Χρησιμοποιούνται όμως σε ειδικές περιπτώσεις και συστήματα συνεχούς ρεύματος για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας. Η τάση λειτουργίας παραμένει σταθερή. Οι γραμμές μεταφοράς και οι γραμμές διανομής μέσης τάσης έχουν τρεις αγωγούς φάσεων, ενώ οι γραμμές διανομής χαμηλής τάσης διαθέτουν επίσης και τον ουδέτερο αγωγό.

Στα τριφασικά συστήματα η ροή της ενέργειας είναι συνεχής και κάνει τη λειτουργία τους πολύ πιο ομαλή και αποδοτική απ' ό,τι θα ήταν αν η ροή ήταν παλλόμενη, όπως συμβαίνει στα μονοφασικά συστήματα.

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.

### **1.1.3 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, πετρέλαιο, 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 ατμοστροβίλου και τα θερμικά απόβλητα (καυσαέρια) του αεριοστροβίλου χρησιμοποιούνται στο ατμοηλεκτρικό μέρος του σταθμού.

Η θερμική παραγωγή χαρακτηρίζεται ως ένας έμμεσος τρόπος παραγωγής, γιατί προηγούνται δύο στάδια μετατροπών (πχ από χημική σε θερμική με την καύση των ορυκτών καυσίμων και από θερμική σε μηχανική με τον ατμοστρόβιλο). Μέθοδοι παραγωγής όπου παρακάμπτεται το στάδιο μετατροπής σε μηχανική ενέργεια χαρακτηρίζονται ως άμεσοι. Τέτοιοι είναι οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες, οι θερμοιονικές γεννήτριες, οι μαγνητουδροδυναμικές γεννήτριες και οι κυψέλες καυσίμων.



Στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς η κινητική και η δυναμική ενέργεια του νερού μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω των υδροστροβίλων και των γεννητριών. Διακρίνονται σε υδροηλεκτρικούς σταθμούς φυσικής ροής και ρυθμιζόμενης ροής, όπου είναι απαραίτητη η δημιουργία τεχνητών λιμνών. Στους αντλητικούς σταθμούς οι υδροστροβίλοι έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν ως αντλίες και οι γεννήτριες ως κινητήρες προκειμένου να αξιοποιούν χαμηλού κόστους ηλεκτρική ενέργεια κατά τις ώρες χαμηλού φορτίου, για να αποταμιεύσουν νερό που θα χρησιμοποιηθεί σε ώρες αιχμής για την παραγωγή ενέργειας με υψηλό εναλλακτικό κόστος παραγωγής από άλλες πηγές. Ως μικρά υδροηλεκτρικά έργα χαρακτηρίζονται οι σταθμοί με εγκατεστημένη ισχύ μέχρι 10 MW ενώ ως υδροηλεκτρικά έργα πολλαπλού σκοπού οι σταθμοί οι οποίοι παράλληλα καλύπτουν και άλλες χρήσεις όπως άρδευση, ύδρευση, κ.ά. [6].

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.

#### **1.1.4 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 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 αγωγικά 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.

### **1.1.5 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' ό,τι 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.

### 1.1.6 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.

### 1.1.7 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.

### 1.1.7.1 Ανάλυση ροών φορτίου

Με τον όρο ανάλυση ροών φορτίου εννοούμε τον υπολογισμό των τάσεων, των ρευμάτων και των ροών ενεργού και αέργου ισχύος στα διάφορα σημεία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας κάτω από πραγματικές ή υποτιθέμενες συνθήκες φόρτισης και λειτουργίας. Οι μελέτες αυτές είναι αναγκαίες τόσο κατά τη διάρκεια της καθημερινής λειτουργίας όσο και για τις μελέτες επέκτασης και ανάπτυξης του συστήματος. Η ανάλυση των ροών φορτίου χρειάζεται επίσης για να προσδιοριστούν οι επιπτώσεις από τις διασυνδέσεις με άλλα συστήματα, την εισαγωγή νέων φορτίων, την εγκατάσταση νέων μονάδων παραγωγής, την κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς, κλπ.

### 1.1.7.2 Οικονομική κατανομή φορτίου

Το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου αναφέρεται στη βελτιστοποίηση της κατανομής του συνολικού φορτίου του συστήματος ανάμεσα στις μονάδες παραγωγής. Το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιώντας τις απαιτήσεις τάσης και συχνότητας της ζήτησης με διάταξη ροών φορτίου κατά άπειρους τρόπους. Όμως, μόνο μία διάταξη θα δώσει την οικονομικότερη λειτουργία. Ένα σύστημα που λειτουργεί έτσι λέγεται ότι λειτουργεί με οικονομική κατανομή φορτίου. Η παραγωγή των γεννητριών του συστήματος καθορίζεται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται το ελάχιστο συνολικό κόστος λειτουργίας, λαμβάνοντας υπόψη τους τεχνικούς περιορισμούς του συστήματος. Οι περιορισμοί αυτοί περιλαμβάνουν τα θερμικά όρια των γραμμών μεταφοράς, τα επιθυμητά όρια τάσεων των υποσταθμών, τα όρια ενεργού και αέργου παραγωγής των μονάδων κ.ά.

### 1.1.8 Λειτουργία και έλεγχος ΣΗΕ

Η διαχείριση της ενέργειας ενός μεγάλου διασυνδεδεμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με κεντρικά συστήματα εποπτείας και αυτομάτου ελέγχου, με τα οποία εξασφαλίζεται οικονομική λειτουργία, υψηλός δείκτης ασφάλειας και μεγάλη αξιοπιστία λειτουργίας. Η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται στους καταναλωτές υπό ορισμένη τάση και συχνότητα, οι τιμές των οποίων πρέπει να διατηρούνται σταθερές μέσα σε προκαθορισμένα συμβατικά όρια και η τήρηση αυτών των συνθηκών καθορίζει την ποιότητα εξυπηρέτησης του καταναλωτή. Η σχεδίαση του συστήματος και η λειτουργία του πρέπει να εξισορροπούν μια καλή ποιότητα εξυπηρέτησης και ένα καλό δείκτη αξιοπιστίας με ικανοποιητικό κόστος κιλοβατώρας.

Ο έλεγχος της συχνότητας και της τάσης αποτελούν δύο από τις πιο βασικές διαδικασίες λειτουργίας ενός ΣΗΕ. Η συχνότητα είναι ενιαία σε όλο το διασυνδεδεμένο σύστημα και σχετίζεται με το ισοζύγιο της πραγματικής ισχύος. Η συνεχής εξισορρόπηση του ισοζυγίου αυτού έχει σαν αποτέλεσμα τη σταθερή τιμή της συχνότητας. Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε μεταβολή του φορτίου η παραγωγή των γεννητριών πρέπει να προσαρμόζεται άμεσα. Η ρύθμιση αυτή γίνεται από τους ρυθμιστές στροφών των στροβίλων, οι οποίοι αποτελούν συστήματα κλειστού βρόχου και ανταποκρίνονται αυτόματα στις αλλαγές του φορτίου. Στα σύγχρονα διασυνδεδεμένα συστήματα το πρόβλημα του ελέγχου συχνότητας είναι σύνθετο και περιλαμβάνει την κατανομή των μεταβολών της ζήτησης μεταξύ των διαφόρων μονάδων [15].

Το πρόβλημα της διατήρησης της τάσης μεταξύ των επιτρεπόμενων ορίων περιπλέκεται από το γεγονός ότι η τάση δεν είναι ενιαία σε όλο το σύστημα, όπως η συχνότητα, αλλά ποικίλει από θέση σε θέση και σχετίζεται με την άεργο ισχύ, η οποία διακινείται στο σύστημα. Επομένως η ρύθμιση της τάσης δεν μπορεί να γίνεται μόνο από τις γεννήτριες, που είναι φυσιολογικά οι πηγές άεργου ισχύος, αλλά γίνεται και με άλλα μέσα σε περισσότερες θέσεις του δικτύου και

συγκεκριμένα με τη ρύθμιση της σχέσης μεταφοράς των μετασχηματιστών, με τη σύνδεση και αποσύνδεση πυκνωτών, πηνίων καθώς και πιο εξειδικευμένων διατάξεων.

### **1.1.9 Μη διασυνδεδεμένα ΣΗΕ**

Στην Ελλάδα λόγω της γεωγραφικής της ιδιαιτερότητας (νησιωτική χώρα) υπάρχουν ηλεκτρικά συστήματα αποκομμένα από τον κύριο κορμό ηλεκτροδότησης που είναι το ηπειρωτικό ΣΗΕ. Κατά συνέπεια αναπτύχθηκε η φιλοσοφία της αυτόνομης ηλεκτροδότησης των μακρινότερων (από το ηπειρωτικό ΣΗΕ) κυρίως νησιών. Η βασική ενεργειακή κάλυψη σε αυτά γίνεται από θερμικές μονάδες (κυρίως νηξελογεννήτριες). Η αστάθεια αυτών των δικτύων όσον αφορά την τάση και τη συχνότητα, είναι χαρακτηριστική, ιδιαίτερα τους θερινούς μήνες τους οποίους και υπάρχει σημαντική αύξηση της ζήτηση ενέργειας οφειλόμενη στον τουρισμό. Μεγάλα αυτόνομα ΣΗΕ νησιών είναι αυτό της Κρήτης, της Ρόδου και της Μυτιλήνης.

Το αναδυόμενο πρόβλημα των μη διασυνδεδεμένων νησιών έγκειται στους περιορισμούς εγκατάστασης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, κάτι που έρχεται σε αντίθεση με το εξαιρετικό αιολικό και ηλιακό δυναμικό τους. Το πρόβλημα αυτό οφείλεται στο ότι τα δίκτυα είναι ασθενή και ασταθή. Παρόλα αυτά υπάρχουν προσπάθειες για σημαντική εγκατάσταση ΑΠΕ μέχρι το όριο ασφάλειας του δικτύου.

Η επίλυση στο πρόβλημα αυτό όπως και σε προβλήματα αξιοπιστίας του δικτύου είναι κατά μεγάλο βαθμό η σύνδεση των νησιών με το ηπειρωτικό ΣΗΕ. Σαφώς οι επενδύσεις αυτές είναι μεγάλες και πολλές φορές δυσβάστακτες ή και ουτοπικές. Παρόλα αυτά υπάρχουν περιπτώσεις νησιών (π.χ. Άνδρος) που συνδέονται για εκμεταλλευτούν αυτά τα πλεονεκτήματα που προσφέρει το ηπειρωτικό ΣΗΕ της Ελλάδας.

## **1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ**

Τα πρώτα ΣΗΕ εμφανίστηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1870, όταν χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε πελάτες για το φωτισμό τους από τον G. Lane-Fox και τον Thomas Edison. Ο πρώτος σταθμός παραγωγής λειτούργησε στο Λονδίνο στις 12 Ιανουαρίου 1882 και ο δεύτερος στις 4 Σεπτεμβρίου 1882 στη Νέα Υόρκη. Το ηλεκτρικό ρεύμα που χρησιμοποίησαν τα πρώτα ΣΗΕ ήταν συνεχές (ΣΡ), χαμηλής τάσης, και οι περιοχές που εξυπηρετούσαν οι πρώτοι κεντρικοί σταθμοί ήταν περιορισμένες, λόγω της μικρής απόστασης στην οποία μπορούσε να μεταφερθεί αποδοτικά το ρεύμα αυτό. Η τεράστια ωφέλεια του κοινωνικού συνόλου από τη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας αναγνωρίστηκε αμέσως και αυτό συνετέλεσε ταχύτατα στην εύρεση πιο αποδοτικών μεθόδων και στην εξέλιξη των ΣΗΕ προς τη σύγχρονη μορφή τους.

Επαναστατική αλλαγή στα ΣΗΕ αποτέλεσε η εισαγωγή του εναλλασσόμενου ρεύματος (ΕΡ) στις αρχές τις δεκαετίας του 1880, με την παράλληλη ανάπτυξη της γεννήτριας ΕΡ και του μετασχηματιστή. Οι αρχικές ευρεσιτεχνίες των A. Gaulard και G. Gibbs αγοράστηκαν το 1885 από τον G. Westinghouse και ακολούθησε η ανάπτυξη και οι εφαρμογές. Τα πρώτα πλεονεκτήματα του εναλλασσόμενου ρεύματος φάνηκαν από την πρώτη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε απόσταση 1200 m στη Μασαχουσέτη το 1886, όπου χρησιμοποιήθηκε ένας μετασχηματιστής στην αρχή της γραμμής για να ανυψώσει την τάση στα 3kV και ένας δεύτερος στο τέλος για να την υποβιβάσει στα 50V. Ακολούθησε η εφεύρεση των πολυφασικών συστημάτων ΕΡ και της πρώτης διφασικής γεννήτριας ΕΡ το 1893, στην ανάπτυξη των οποίων μεγάλη ήταν και η συμβολή του Nicola Tesla. Έκτοτε οι εξελίξεις ήταν ταχύτατες και η παγκόσμια εξάπλωση των ΣΗΕ ραγδαία. Το 1893 επίσης λειτούργησε και η πρώτη τριφασική γραμμή μήκους 21 km τάσης 2300V στην Καλιφόρνια.

Η συχνότητα δεν είχε τυποποιηθεί από την πρώτη περίοδο λειτουργίας των συστημάτων εναλλασσόμενου ρεύματος. Πολλές διαφορετικές συχνότητες είχαν χρησιμοποιηθεί, όπως 25, 50, 60, 125 και 133 Hz. Το γεγονός αυτό εμπόδιζε τη διασύνδεση των επιμέρους συστημάτων. Τελικά η συχνότητα των 60 Hz επικράτησε στη Β. Αμερική και αυτή των 50 Hz στην Ευρώπη.

Η ανάγκη μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας σε μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ κέντρων παραγωγής και κατανάλωσης οδήγησε στη χρησιμοποίηση υψηλότερων τάσεων 12, 44 και 60 kV. Από τη δεκαετία του 1920 είχαν κατασκευαστεί μεγάλα θερμικά και υδροηλεκτρικά εργοστάσια, καθώς και γραμμές μεταφοράς 220 kV σε πολλά μέρη του κόσμου και τα ΣΗΕ άρχισαν να παίρνουν τη σύγχρονη μορφή τους. Η τάση αυξήθηκε στα 287 kV το 1935, στα 300 kV το 1953 και στα 500kV το 1965. Το 1966 η ηλεκτρική επιχείρηση του Καναδά Hydro Quebec λειτούργησε την πρώτη γραμμή των 735 kV και το 1969 στις ΗΠΑ κατασκευάστηκε η πρώτη γραμμή των 765 kV.

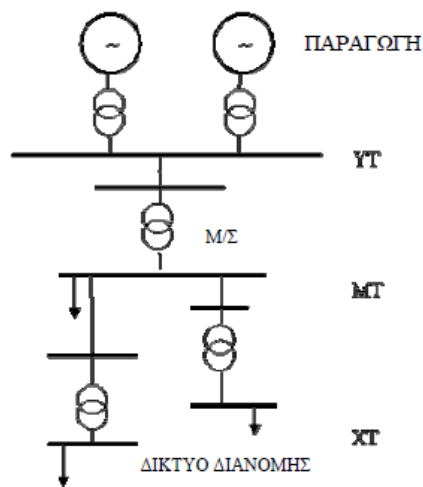
Για αποστάσεις μεγαλύτερες από 500 km για εναέρια δίκτυα και 50 km για υπόγεια και υποβρύχια καλώδια η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας με συνεχές ρεύμα από υψηλή τάση γίνεται ελκυστική. Η πρώτη γραμμή συνεχούς ρεύματος λειτούργησε στη Σουηδία το 1954 με τη διασύνδεση της νήσου Gotland με το υπόλοιπο σύστημα. Η εξέλιξη των μετατροπέων από εναλλασσόμενο σε συνεχές με τη χρησιμοποίηση των thyristor και η δυνατότητα που παρέχουν για διασύνδεση συστημάτων διαφορετικής συχνότητας ή με έντονα προβλήματα ευστάθειας, έχει αυξήσει το ενδιαφέρον της χρησιμοποίησης του συνεχούς ρεύματος.

Την τελευταία δεκαετία, οι τεχνολογικές καινοτομίες και οι αλλαγές στο οικονομικό και στο ρυθμιστικό περιβάλλον έφεραν στο προσκήνιο την κατανομημένη παραγωγή. Αυτό επιβεβαιώνεται από την ΙΕΑ (*International Energy Agency, 2003*) που παραθέτει τους πέντε βασικούς λόγους που συνετέλεσαν σ' αυτό:

- Ανάπτυξη των τεχνολογιών κατανεμημένης παραγωγής.
- Περιορισμοί στην κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς.
- Αυξημένη ζήτηση παροχής ηλεκτρισμού υψηλής αξιοπιστίας.
- Απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.
- Προβληματισμοί για τις κλιματικές αλλαγές.

Η διείδυση των διασκορπισμένων πηγών παραγωγής στα δίκτυα αυξάνεται συνεχώς, ως αποτέλεσμα των τεχνολογικών προόδων και των θεσμικών αλλαγών στη βιομηχανία ηλεκτρικής ισχύος, αν και συχνά μπορεί να σχετίζεται με δαπανηρές ενισχύσεις δικτύων ή νέες εξόδους ελέγχου για να επιτυγχάνεται η βέλτιστη λειτουργία.. Η σύνδεση των νέων εγκαταστάσεων εμποδίζεται συχνά από ποικίλους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των τεχνικών εκτιμήσεων και των απαιτήσεων, που επιλύονται συνήθως εις βάρος του επενδυτή. Δεδομένου ότι το ενδιαφέρον για τις εγκαταστάσεις νέας γενιάς κλιμακώνεται, η υιοθέτηση της διαφανούς και εύκολα εφαρμόσιμης τεχνολογίας γίνεται επιτακτικότερη. Τα ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν είναι η σταθερή λειτουργία και οι γρήγορες παραλλαγές τάσης, καθώς επίσης τα flickers και οι αρμονικές. Η διείδυση της διεσπαρμένης παραγωγής (ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά, κυψέλες καυσίμου, βιομάζα, γεωθερμία, μικρές υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις, κ.λπ., που κυμαίνονται από το λίγα kW ως και πολλά MW) στα δίκτυα διανομής αυξάνεται παγκοσμίως. Οι οικονομικές ευκαιρίες που παρουσιάζονται για τους ιδιωτικούς επενδυτές στο απορρυθμισμένο ηλεκτρικό περιβάλλον βιομηχανίας και τα σημαντικά πιθανά οφέλη για τις μονάδες (ικανότητες μεγάλης εγκατεστημένης ισχύος, μείωση των απωλειών) συμβάλλουν σ' αυτή την τάση.

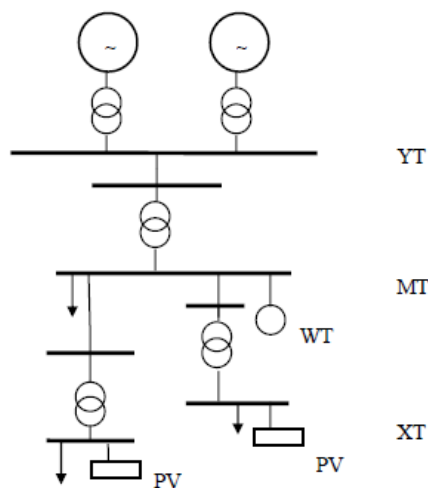
Η δομή του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πήρε τελικά τη μορφή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1 Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, όπως αυτό διαμορφώνεται από την παρουσία μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, φαίνεται στο Σχήμα 1.2.





Σχήμα 1.2 Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας με διεσπαρμένη παραγωγή

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 1.2, στην παραγωγή συμμετέχουν πλέον και μονάδες ανανεώσιμης ενέργειας.

Η δομή του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας θα παρέμενε όπως η δομή του Σχήματος 1.1, και δεν θα είχε αναπτυχθεί ενδιαφέρον για διεσπαρμένη παραγωγή αν δεν είχε προκύψει η ανάγκη για μείωση της χρήσης συμβατικών μορφών ενέργεια, για περιβαλλοντικούς λόγους. Η Διεσπαρμένη Παραγωγή μπορεί να πραγματοποιείται από διάφορες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τις πηγές δηλαδή που χρησιμοποιούν τους ανεξάντλητους φυσικούς πόρους, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ανάγκη για τη συμμετοχή τέτοιων εναλλακτικών, καθαρότερων μορφών ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρισμού οδήγησε στη διεσπαρμένη παραγωγή. Οι βασικότερες ΑΠΕ είναι οι [7] :

- Υδροηλεκτρικές πηγές (μικρές πηγές)
- Ενέργεια της Βιομάζας (καύση δασικών και γεωργικών προϊόντων και άλλων καταλοίπων σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς)
- Αιολική ενέργεια (ανεμογεννήτριες)
- Ηλιακή ενέργεια (φωτοβολταϊκά)
- Γεωθερμικές πηγές (παραγωγή ενέργειας από τη θερμότητα που είναι αποθηκευμένη κάτω από την επιφάνεια της γης)
- Κυψέλες καυσίμου, και
- Ενέργεια των Θαλασσίων κυμάτων

Οι περισσότερες ανανεώσιμες πηγές αποτελούν γενικά και συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής, αν και υπάρχουν και εξαιρέσεις, όπως είναι τα υδροηλεκτρικά μεγάλης κλίμακας και τα παράκτια αιολικά πάρκα. Εκτός όμως από τις ΑΠΕ, στη διεσπαρμένη παραγωγή εντάσσονται και άλλες τεχνολογίες, που η λειτουργία τους βασίζεται στη χρήση ορυκτών καυσίμων, όπως είναι οι τουρμπίνες και οι μικροτουρμπίνες αερίου, οι εμβολοφόρες μηχανές κ.α.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

#### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΟΡΙΣΜΟΣ

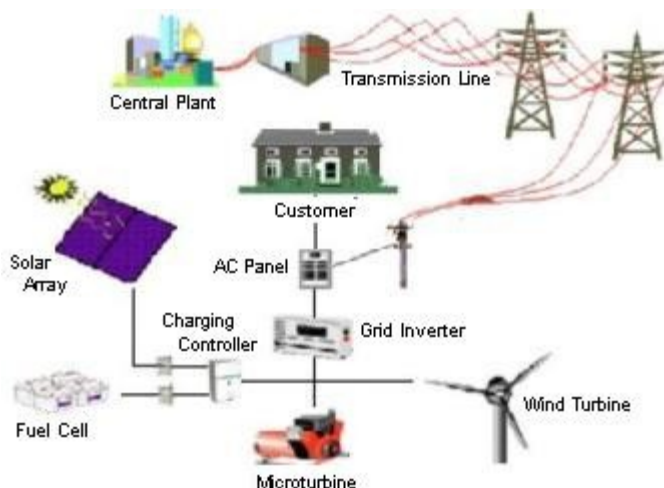
Ως διανεμημένη ή διεσπαρμένη ή κατανεμημένη παραγωγή (DG – Distributed Generation) [18] μπορεί να ορισθεί η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας, εντός ενός δικτύου διανομής ή στο ακραίο τμήμα αυτού στην πλευρά του καταναλωτή. Συνήθως στον ορισμό της συμπεριλαμβάνονται και κάποια βασικά χαρακτηριστικά, όπως η ύπαρξη και εκμετάλλευση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας κ.α. Οι βασικότερες ΑΠΕ είναι οι:

- υδροηλεκτρικές πηγές (μικρές πηγές)
- ενέργεια της βιομάζας (καύση δασικών και γεωργικών προϊόντων και άλλων καταλοίπων σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς)
- αιολική ενέργεια (ανεμογεννήτριες)
- ηλιακή ενέργεια (φωτοβολταϊκά)
- γεωθερμικές πηγές (παραγωγή ενέργειας από τη θερμότητα που είναι αποθηκευμένη κάτω από την επιφάνεια της γης)
- κυψέλες καυσίμου
- ενέργεια των Θαλασσίων κυμάτων

οι περισσότερες από τις οποίες αποτελούν γενικά και συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής, αν και υπάρχουν και εξαιρέσεις, όπως είναι τα υδροηλεκτρικά μεγάλης κλίμακας και τα παράκτια αιολικά πάρκα. Εκτός όμως από τις ΑΠΕ, στη διεσπαρμένη παραγωγή εντάσσονται και άλλες τεχνολογίες, που η λειτουργία τους βασίζεται στη χρήση ορυκτών καυσίμων, όπως είναι οι τουρμπίνες και οι μικροτουρμπίνες αερίου, οι εμβολοφόρες μηχανές κ.α.

Το Ινστιτούτο των Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (Institute of Electrical and Electronics Engineer Inc, IEEE), καθορίζει την κατανεμημένη παραγωγή, ως παραγωγή ηλεκτρισμού από εγκαταστάσεις οι οποίες είναι σαφώς μικρότερες από τα κεντρικά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, έτσι ώστε να είναι δυνατή η διασύνδεσή τους σχεδόν σε κάθε σημείο του συστήματος ισχύος.

Όσον αφορά στην κατάταξη των κατανεμημένων σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το EPRI (Electric Power Research Institute, Ινστιτούτο Έρευνας Ηλεκτρικής Ενέργειας) ορίζει την κατανεμημένη παραγωγή ως παραγωγή “από μερικά kW έως 50 MW”. Το Διεθνές Συμβούλιο Μεγάλων Ηλεκτρικών Συστημάτων (CIGRE International Council on Large Electric Systems), έχει δημιουργήσει μια ομάδα εργασίας στον τομέα της κατανεμημένης παραγωγής. Σύμφωνα με αυτή, μονάδες παραγωγής που (α) δεν υπερβαίνουν 100MW, (β) είναι συνήθως συνδεδεμένες στο δίκτυο διανομής και (γ) η κατανομή φορτίου στις εγκαταστάσεις παραγωγής δεν γίνεται κεντρικά (not centrally dispatched), συνιστούν κατανεμημένη παραγωγή.



Σχήμα 2.1 Διεσπαρμένη παραγωγή

Με την μέχρι τώρα βιβλιογραφική έρευνα, τα συμπεράσματα που βγαίνουν γύρω από το θέμα της διεσπαρμένης παραγωγής είναι ότι ο ορισμός της διαφέρει στις νομοθεσίες των διαφόρων κρατών. Ενδεικτικά αναφέρουμε τους ορισμούς που δίνονται [22] :

-Αυστραλία: Συνδεδεμένη παραγωγή στο δίκτυο διανομής (μέχρι 132 kV), όπου παρέχεται η δυνατότητα άμεσης παροχής στο φορτίο του πελάτη.

-Αυστρία: Παραγωγή συνήθως μέχρι 10 MW, συνδεδεμένη στο δίκτυο μέσης τάσης.

-Βέλγιο: Δε συμπεριλαμβάνεται στην εθνική συντονισμένη παραγωγή.

-Τσεχία: Συνδεδεμένη στο δίκτυο διανομής (μέχρι 110 kV) και μέχρι την ανώτερη επιτρεπτή κατάταξη ισχύος.

-Φιλανδία: Συνδεδεμένη στο επίπεδο τάσης από 0,4 kV έως 20 kV.

-Γαλλία: Συνδεδεμένη στο δίκτυο διανομής (μέχρι 132 kV), όπου παρέχεται η δυνατότητα άμεσης παροχής στο φορτίο του πελάτη. Παραγωγή που συνδέεται στα εξής επίπεδα τάσης (0.4 , 15 και 20 kV).

-Γερμανία: Δεν υπάρχει αυστηρός ορισμός. Οι κυριότερες τεχνολογίες είναι ήλιου, ανέμου και μικρών υδροηλεκτρικών (σύνδεση μέχρι 20 kV, ενώ για αιολικά πάρκα μέχρι 110 kV).

-Ελλάδα: Σύνδεση στο σύστημα διανομής, όχι κεντρικά σχεδιασμένο. Η κατανομή φορτίου στις εγκαταστάσεις παραγωγής δε γίνεται κεντρικά.

-Ινδία: Νέες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (σύνδεση μέχρι τα 11 kV).

-Ιταλία: Συνδεδεμένη στο σύστημα διανομής (από 0,4 έως 150 kV).

-Ολλανδία: Ανήκει στην επιχείρηση δημόσιας ωφέλειας, στη βιομηχανία ή σε συνδυασμό αυτών, αλλά δε μετέχει στη βελτιστοποίηση τη εθνικής παραγωγής (σύνδεση μέχρι τα 150 kV).

-Πολωνία: Δε γίνεται κεντρική κατανομή φορτίου και συνδέεται μέχρι τα 110 kV.

-Πορτογαλία: Όριο ισχύος τα 10 MW (εκτός από CHP). Οι τεχνολογίες είναι συμπαραγωγή ή ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η σύνδεση μπορεί να γίνει σε οποιοδήποτε επίπεδο τάσης.

-Ισπανία: Συνδεδεμένη στο σύστημα διανομής.

-Μ. Βρετανία: Συνδεδεμένη στο σύστημα διανομής (μέχρι τα 132 kV), ενδεχομένως να γίνεται κεντρική κατανομή φορτίου.

Συνοψίζοντας, λοιπόν, τα γενικότερα χαρακτηριστικά της διεσπαρμένης παραγωγής είναι:

- Όχι κεντρικά σχεδιαζόμενη και αναπτυσσόμενη (από την εταιρεία ηλεκτρισμού ή κάποιον διαχειριστή).
- Δεν υπάρχει κεντρικός προγραμματισμός λειτουργίας των μονάδων από το διαχειριστή του συστήματος.

- Η ισχύς των μονάδων που εγκαθίστανται δεν υπερβαίνει τα 50-100 MW αλλά συνήθως είναι της τάξης λίγων εκατοντάδων kW.
- Είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο διανομής ανάλογα με το πώς ορίζεται για κάθε υπό μελέτη σύστημα.

Οι λόγοι που οδήγησαν στη διεσπαρμένη παραγωγή έχουν να κάνουν με τις ανάγκες για [26] :Υπαρξη εγκατεστημένης ισχύος για παροχή εφεδρείας σε περίπτωση διακοπής τροφοδοσίας ή και για ψαλιδισμό αιχμών του καταναλωτή.

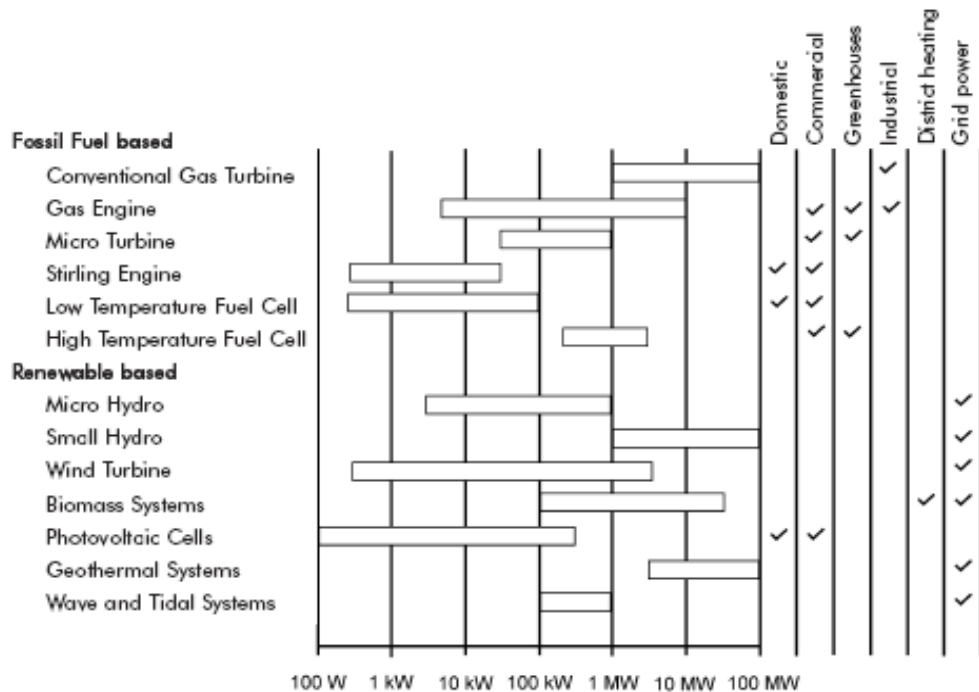
- Αυξημένη αξιοπιστία και βελτίωση της παρεχόμενης ποιότητας ισχύος σε τοπικό επίπεδο.
- Μείωση των απωλειών κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από ένα απομακρυσμένο κεντρικό σταθμό στο σημείο κατανάλωσης.
- Υποστήριξη δικτύου με βοηθητικές υπηρεσίες όπως είναι η παροχή άεργου ισχύος και υποστήριξης τάσης, η παροχή παραγωγής με γρήγορη απόκριση για αποφυγή διακοπής της κατανάλωσης και η δυνατότητα επανεκκίνησης μετά από διακοπή.
- Εκμετάλλευση συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού η οποία γίνεται σε τοπικό επίπεδο π.χ. σε βιομηχανικές διεργασίες κτλ.
- Αποτελεσματική χρήση των δυνατοτήτων για φτηνά τοπικά παραγόμενα καύσιμα και η επί τόπου αξιοποίησή τους όπως για παράδειγμα το τοπικά παραγόμενο βιοαέριο στους βιολογικούς καθαρισμούς.
- Εξοικονόμηση αρχικού κόστους κεφαλαίου και χρόνου από τη δημιουργία ενός κεντρικού σταθμού παραγωγής ή νέων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας
- Μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και εξευγενισμένων καυσίμων.

## 2.2 ΧΡΗΣΕΙΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Οι τυπικές χρήσεις [26] της διεσπαρμένης παραγωγής είναι οι εξής:

- Οικιακή (ηλεκτρισμός και θέρμανση)
- Εμπορική (ηλεκτρισμός και θέρμανση)
- Θερμικήπια
- Βιομηχανική (ηλεκτρισμός και ατμός)
- Περιφερειακή θέρμανση
- Ισχύς δικτύου (μόνο ηλεκτρισμός που παρέχεται στο δίκτυο)

Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζονται οι εφαρμογές των διαφόρων τεχνολογιών διανεμημένης παραγωγής, καθώς και το εύρος της ισχύος που παράγουν.



Σχήμα 2.2 Χρήσεις και εύρος ισχύος εξόδου των τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής

## 2.3 ΤΕΧΝΙΚΑ, ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΛΟΓΙΚΑ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

### 2.3.1 Πλεονεκτήματα

#### Οικονομικά:

- Η διεσπαρμένη παραγωγή καλύπτει μία ευρεία γκάμα τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένου πολλών ανανεώσιμων τεχνολογιών που παρέχουν ισχύ μικρής κλίμακας, σε τοποθεσία κοντά στους χρήστες. Όλες αυτές οι τεχνολογίες δημιουργούν νέες ευκαιρίες στην αγορά και αυξημένο βιομηχανικό ανταγωνισμό.
- Η παραγωγή της ενέργειας κοντά στην τοποθεσία στην οποία χρησιμοποιείται ελαχιστοποιεί τις απώλειες μεταφοράς, όπως επίσης και το κόστος μεταφοράς, που αποτελεί ένα σημαντικό μέρος (πάνω από το 30%) του συνολικού κόστους του ηλεκτρισμού.
- Ένα ακόμα οικονομικό όφελος είναι η αύξηση της σταθερότητας στην τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας και η μείωση της ζήτησης καυσίμου με μία επακόλουθη μείωση και στην τιμή τους και μια καθυστέρηση στις αυξήσεις των τιμών ενέργειας γενικότερα. Όλα αυτά οδηγούν σε μία γενική πτώση των τιμών, χάρη στο μικρότερο κόστος παραγωγής προϊόντων.
- Σχεδόν πάντα η διανεμημένη παραγωγή διασφαλίζει απτά οικονομικά οφέλη για τους καταναλωτές, όπως μικρότερο συνολικό ενεργειακό κόστος και αποφυγή υψηλών τιμολογίων κατά τη διάρκεια της αιχμής φορτίου.
- Χρησιμοποιώντας όλο και περισσότεροι καταναλωτές ανανεώσιμες πηγές διεσπαρμένης παραγωγής, μειώνεται το συνολικό φορτίο αιχμής της εταιρείας διανομής

ηλεκτρικής ενέργειας και έτσι δε χρειάζεται να γίνει καμία αναβάθμιση του δικτύου (το οποίο ωφελεί και τους άλλους καταναλωτές, οι οποίοι θα επιβαρύνονταν με το κόστος της αναβάθμισης της εταιρείας), αφού η διεσπαρμένη παραγωγή βοηθά στην αποσυμφόρηση των ήδη υπαρχόντων γραμμών.

- Η διεσπαρμένη παραγωγή παρέχει πολλά πλεονεκτήματα στους καταναλωτές θερμικών φορτίων, μέσω των εφαρμογών συμπαραγωγής (αυξάνοντας έτσι τη συνολική απόδοση του συστήματος), καθώς επίσης και σε εκείνους που έχουν πρόσβαση σε φτηνά καύσιμα, όπως για παράδειγμα στο φυσικό αέριο. Επιπλέον, προσφέρει πλεονεκτήματα στους καταναλωτές που ευνοούνται από τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής όπου ζουν και μπορούν έτσι να αξιοποιήσουν τις ανανεώσιμες πηγές.

- Από την επενδυτική σκοπιά του θέματος, είναι πρακτικά πιο εύκολο να βρεθούν τοποθεσίες για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και άλλες διεσπαρμένες παραγωγές από ότι για ένα μεγάλο, κεντρικό εργοστάσιο παραγωγής ισχύος, και μάλιστα οι μονάδες αυτές είναι πιο εύκολο και κυρίως πιο γρήγορο να συνδεθούν στο δίκτυο. Η έκθεση και το ρίσκο του κεφαλαίου μειώνονται, και αποφεύγονται οι περιττές δαπάνες.

#### Περιβαλλοντικά:

- Η εκτεταμένη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας βοηθά στη μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων και στη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου αλλά και άλλων επιβλαβών αερίων όπως είναι τα οξείδια του θείου και του αζώτου ( $SO_x$ ,  $NO_x$ ), συνεισφέροντας έτσι με ουσιαστικό τρόπο στην προστασία του περιβάλλοντος.

- Περιβαλλοντικά οφέλη που προκύπτουν από την μείωση των απωλειών στις γραμμές μεταφοράς, ένεκα της σωστής χωροθέτησης των σταθμών κατανεμημένης παραγωγής σε σχέση με την τοποθεσία και δυναμικότητα, μπορεί να βελτιώσουν ακόμη περισσότερο το περιβαλλοντικό ισοζύγιο της κατανεμημένης παραγωγής.

#### Τεχνικά:

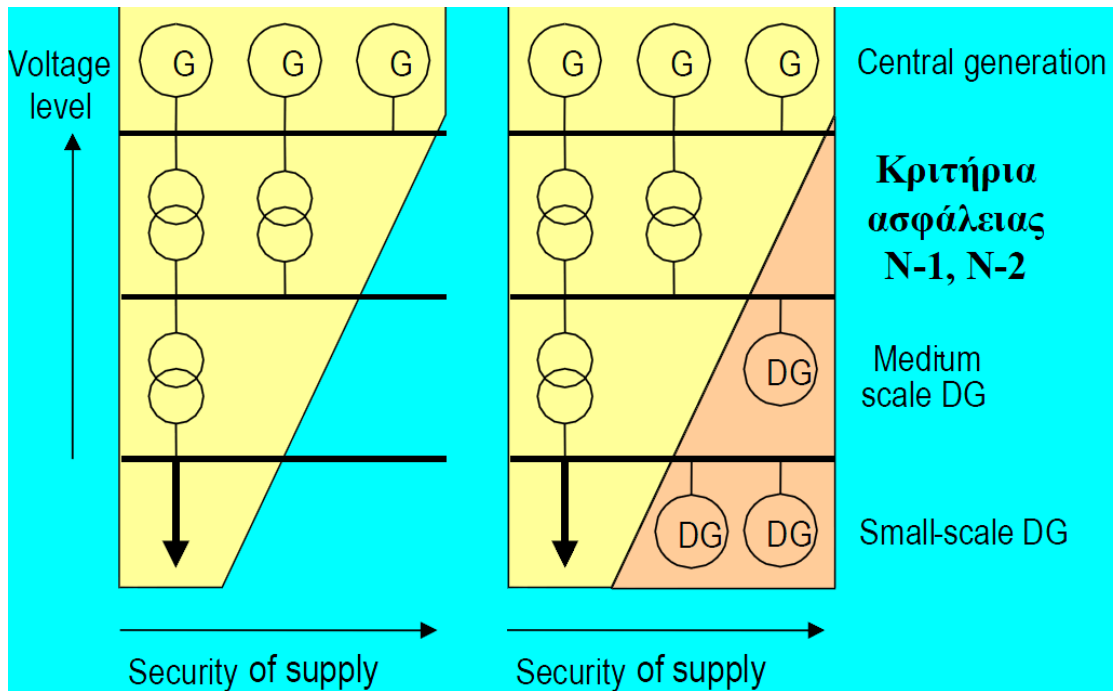
##### Ποιότητα ισχύος και αξιοπιστία

- Τα σημαντικότερα οφέλη αξιοπιστίας που προσφέρει η διεσπαρμένη παραγωγή είναι υποστήριξη και σταθερότητα στην παροχή τάσης, αξιοπιστία άεργου ισχύος, εφεδρεία για απρόβλεπτα φαινόμενα και δυνατότητα αυτόνομης εκκίνησης (black start). Κι αυτό γιατί υπό προϋποθέσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εφεδρική ισχύς σε περίπτωση διακοπής ρεύματος, καθώς και σε περιπτώσεις βύθισης τάσης, ώστε να ενισχυθεί η ποιότητα της ισχύος που παρέχεται τοπικά.

- Επιπροσθέτως πολλοί καταναλωτές, όπως νοσοκομεία, τηλεπικοινωνιακά κέντρα, βιομηχανίες ημιαγωγών, εγκαταστάσεις επεξεργασίας τροφίμων, κ.ά., απαιτούν υψηλότερη ποιότητα ενέργειας από τη συνηθισμένη που προμηθεύεται το μεγαλύτερο μέρος των καταναλωτών. Για τους καταναλωτές αυτούς η διακοπή ρεύματος ή η βύθιση τάσης μπορεί να έχει πολύ μεγάλες οικονομικές και όχι μόνο συνέπειες. Οι καταναλωτές αυτοί μπορούν με τη χρήση ανανεώσιμης διανεμημένης παραγωγής να ικανοποιήσουν τις αυξημένες ανάγκες τους για ποιότητα ισχύος.

- Η συνεχώς αυξανόμενη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών, αλλά και άλλων μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, εκτός από την υψηλότερη απόδοση ενέργειας, θα κάνει και πιο ασφαλή αυτή την παρεχόμενη ενέργεια, καθώς μειώνονται οι εισαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται ενδεικτικά η συμβολή της διεσπαρμένης παραγωγής στη αύξηση της αξιοπιστίας παροχής.



Σχήμα 2.3 Αύξηση της αξιοπιστίας παροχής από τη διεσπαρμένη παραγωγή

### 2.3.2 Μειονεκτήματα

Η εισαγωγή των αποκεντρωμένων μονάδων παραγωγής ενέργειας, σε ευρεία κλίμακα, είναι πιθανό να οδηγήσει σε αστάθεια του ενεργειακού προφίλ. Η αμφίδρομη ροή ισχύος και η σύνθετη διαχείριση ενέργειας που απαιτεί η διεσπαρμένη παραγωγή μπορούν να εμφανίσουν προβλήματα και να οδηγήσουν σε έντονη διακύμανση της τάσης. Επιπρόσθετα, τα πιθανά βραχυκυκλώματα και οι υπερφορτίσεις στο δίκτυο προέρχονται πλέον από πολλαπλές πηγές, κάθε μία από τις οποίες δεν μπορεί να εντοπίσει ανεξάρτητα τα εκάστοτε σφάλματα του δικτύου.

Πιο αναλυτικά, τα μειονεκτήματα της διεσπαρμένης παραγωγής είναι:

→ Το σχετικά υψηλό κόστος κεφαλαίου ανά kW εγκατεστημένης ισχύος, συγκριτικά με τα μεγάλα κεντρικά εργοστάσια παραγωγής. Επιπλέον, διαφορές υπάρχουν και στα κόστη κεφαλαίου για διαφορετικές τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής που μπορούν να ποικίλλουν από 1000 €/kW έως 20000 €/kW στις τουρμπίνες καύσης και τις κυψέλες καυσίμου αντίστοιχα.

→ Η αυξανόμενη συμμετοχή της διεσπαρμένης παραγωγής στην εγκατεστημένη παραγωγή θα επιφέρει μικρότερη επιλογή μεταξύ των βασικών καυσίμων. Αυτό θα μπορούσε να μειώσει τη διαφοροποίηση των πρωταρχικών αποθεμάτων ενέργειας. Δεδομένου ότι οι περισσότερες τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής βασίζονται πρωταρχικά στο αέριο, αναμένεται έντονα αυξημένη ζήτηση και εξάρτηση από αυτό.

→ Το κόστος για την πρωταρχική παροχή καυσίμου στη διεσπαρμένη παραγωγή, προβλέπεται να είναι αρκετά μεγαλύτερο σε σχέση με την κεντρική παραγωγή.

Πολλές φορές δεν μπορεί να υπάρξει ακριβής πρόβλεψη για την ικανότητα παραγωγής συγκεκριμένων εγκαταστάσεων παραγωγής. Πρέπει να γίνεται μετεωρολογική πρόβλεψη, που δεν μπορεί όμως να προβλέψει ακριβώς την ποσότητα ισχύος που θα είναι δυνατό να παραχθεί. Σε μικρά χρονικά διαστήματα μπορούν να υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις στη δυνατότητα παραγωγής

ή ακόμα και απώλεια της παραγωγής εξαιτίας της φύσης ορισμένων πηγών όπως είναι για παράδειγμα ο άνεμος ή ο ήλιος. Έτσι υπάρχει συγκεκριμένο ποσοστό της ζήτησης που μπορεί να καλυφθεί από ανανεώσιμες πηγές, η διείσδυση είναι δηλαδή περιορισμένη και πρέπει να υπάρχει πάντα εφεδρεία συμβατικών μονάδων παραγωγής. Αυτό το πρόβλημα αφορά κυρίως τα αυτόνομα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Καθώς η ισχύς εξόδου των πηγών διεσπαρμένης παραγωγής εμφανίζει αρκετές δυσκολίες, ως προς την πρόβλεψη της, προκύπτουν επιζήμιες και δυσμενείς συνέπειες στους μετέχοντες σε αυτήν.

→Ο μεγάλος αριθμός μονάδων παραγωγής μπορεί να προκαλέσει, εκτός από τη συνήθη ροή φορτίου από τη μέση τάση στη χαμηλή, επιπλέον ροή φορτίου, από την χαμηλή τάση στο δίκτυο μέσης τάσης. Αυτή η αμφίδρομη ροή φορτίου, απαιτεί διαφορετικά μέσα προστασίας και στα δύο επίπεδα τάσης. Επιπλέον, η σημαντική προσαρμοστικότητα που προσφέρουν οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής προϋποθέτει καλύτερη ανάλυση και μεγαλύτερη προσοχή όσον αφορά τη διαχείριση και λειτουργία του δικτύου.

→Επιπλέον, η συνεισφορά στο ρεύμα βραχυκύκλωσης από τις διεσπαρμένες γεννήτριες θα μπορούσε να προκαλέσει την αποσύνδεση υγιών γραμμών στις οποίες συνδέονται διεσπαρμένες γεννήτριες λόγω της γρήγορης αντίδρασης των υπέργειων γραμμών μέσης τάσης σε σφάλματα του δικτύου. Σε μερικές περιπτώσεις όπου οι διεσπαρμένες γεννήτριες παραμένουν συνδεδεμένες σε μια ελαττωματική γραμμή, θα μπορούσαν να διατηρήσουν τη γραμμή διεγερμένη και να αποτρέψουν την αυτό-απόσβεση σφαλμάτων με την μορφή τόξου. Αφετέρου, μπορεί όμως να γίνει αυτόματη επανάφωξη της γραμμής όταν οι γεννήτριες έχουν χάσει το συγχρονισμό τους με το δίκτυο, με ενδεχόμενες καταστρεπτικές συνέπειες για τις γεννήτριες. Η τροφοδοσία γραμμών αποσυνδεδεμένων από το δίκτυο λόγω σφαλμάτων μέσης και χαμηλής τάσης από διεσπαρμένες γεννήτριες, μπορεί να προκαλέσει πιθανή ζημιά στους καταναλωτές λόγω των μεγάλων αποκλίσεων της τάσης και της συχνότητας από τις ονομαστικές τιμές τους.

→Για κάθε τεχνολογία παραγωγής υπάρχουν έμμεσες και άμεσες εκπομπές ρύπων. Οι έμμεσες εκπομπές είναι εκπομπές ρύπων κατά τη διαδικασία κατασκευής της μονάδας, αναζήτησης και μεταφοράς των πηγών ενέργειας. Κάποιοι πιστεύουν πως η μεγάλη διείσδυση και χρήση σταθμών καταναλωμένης παραγωγής θα έχει ως αποτέλεσμα τη υπολειτουργία των μεγάλων κεντρικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με αποτέλεσμα να αυξηθούν οι εκπομπές ανά παραγόμενη κιλοβατώρα. Άλλα στοιχεία τα οποία κάνουν δύσκολη την ενιαία περιβαλλοντική εκτίμηση, είναι οι διαφορετικές απόψεις που διατυπώνονται σε διάφορα σχετικά θέματα όπως για παράδειγμα, την επικινδυνότητα των πυρηνικών σταθμών, ή την υψηλή στάθμη θορύβου και την οπτική ρύπανση που μπορεί να προκαλεί μια ανεμογεννήτρια.

## 2.4 Διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής

Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζεται η πρωτογενής παραγωγή στην Ε.Ε. από το 1989 έως το 2000, καθώς και η εξέλιξη που υπήρξε στη διείσδυση των ΑΠΕ στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.



ktoe	Average Annual Increase per period					
	1989	1995	2000	89-95	95-00	89-00
All Fuels	719 962	736 563	758 694	0.4%	0.6%	0.5%
Renewables	65 010	73 505	87 645	2%	4%	3%
WIND	45	350	1931	41%	41%	41%
SOLAR	127	242	364	11%	9%	10%
HYDRO	21 619	24 948	27 663	2%	2%	2%
GEOTHERMAL	2 216	2 517	3 335	2%	6%	4%
BIOMASS incl. BIOFUELS	41 002	45 450	54 352	2%	4%	3%
Total RES Electricity Generation (TWh)	271	321	388	3%	4%	3%

Πίνακας 2.1 Πρωτογενής παραγωγή στην ΕΕ, 1989-2000

Παρατηρείται μία μέση ετήσια αύξηση στην παραγωγή από ΑΠΕ της τάξης του 3% για την περίοδο που αναφέρθηκε. Τους μεγαλύτερους ρυθμούς ανάπτυξης παρουσιάζει η αιολική ενέργεια, η οποία αυξάνει τη συμμετοχή της στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατά μέσο όρο 41% ετησίως. Η ηλιακή ενέργεια ακολουθεί με ρυθμούς ανάπτυξης κοντά στο 10% ετησίως.

Στον Πίνακα 2.2 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η εξέλιξη στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές για την ίδια χρονική περίοδο. Επιπλέον παρουσιάζεται η συμμετοχή των πηγών αυτών στη συνολική κατανάλωση. Παρατηρείται μία σταθερή, σταδιακή αύξηση στο ποσοστό συμμετοχής των ΑΠΕ στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.

Electricity Generation from RES in EU-15			
Year	Electricity Generation from RES (TWh)	Gross Electricity Consumption (TWh)	Contribution of RES to Gross Electricity Consumption
1989	271	2 044	13.3%
1990	279	2 086	13.4%
1991	289	2 238	12.9%
1992	309	2 251	13.7%
1993	315	2 254	14.0%
1994	325	2 287	14.2%
1995	321	2 345	13.7%
1996	324	2 410	13.5%
1997	335	2 434	13.8%
1998	353	2 506	14.1%
1999	360	2 555	14.1%
2000	388	2 641	14.7%

Πίνακας 2.2 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ στην ΕΕ

Όσον αφορά την Ελλάδα, ο Πίνακας 2.3 παρουσιάζει τα στατιστικά δεδομένα για την παραγωγή ενέργειας από διάφορες μορφές ανανεώσιμων πηγών, καθώς και τα μέσα ετήσια ποσοστά μεταβολής στη συμμετοχή των πηγών αυτών. Από το 1995 έως το 2000 παρατηρείται μία μέση ετήσια αύξηση της αιολικής ενέργειας κατά 68%. Αντίθετα, η διεύδυση της ηλιακής ενέργειας στην παραγωγή αυξήθηκε μόνο κατά 4% ετησίως.

RES Primary Energy Production (ktoe)													Average Annual Change
	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	95-00
Hydroelectrical energy	163	152	266	189	196	223	303	374	334	320	416	318	1%
Wood in households	702	702	702	702	702	702	702	702	702	702	702	704	0%
Other wood and wood waste	183	191	195	196	197	191	195	206	208	205	209	241	4%
Wind energy	0	0	0	1	4	3	3	3	3	6	14	39	68%
Solar Energy	51	57	63	70	75	79	82	86	89	93	97	99	4%
Biogas	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	na
Municipal solid waste	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	na
Geothermal energy	3	3	3	3	3	4	3	3	2	3	2	2	na
Biofuels	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	na
<b>Total</b>	<b>1 102</b>	<b>1 104</b>	<b>1 230</b>	<b>1 161</b>	<b>1 178</b>	<b>1 205</b>	<b>1 289</b>	<b>1 374</b>	<b>1 339</b>	<b>1 329</b>	<b>1 442</b>	<b>1 405</b>	<b>2%</b>

Πίνακας 2.3 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ στην Ελλάδα, 1989-2000

Τέλος, στον Πίνακα 2.4 παρουσιάζονται τα ίδια στοιχεία έως το 2003 πιο αναλυτικά. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι η συμμετοχή των φωτοβολταϊκών στην πρωτογενή παραγωγή ήταν μηδαμινή έως το 2003.

ΑΠΕ-Τεχνολογία	1000 TWh														
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	
Υδροηλεκτρική Ενέργεια	172	273	206	219	245	325	388	353	333	416	354	235	298	459	
εκ των οποίων αντλητικά συστήματα	20	6	16	22	21	22	13	18	13	20	36	54	57	49	
ΥΗ < 1 MW*	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	2	3	5	7	
ΥΗ 1-10 MW*	5	6	4	7	8	8	10	12	12	14	12	8	8	15	
ΥΗ 10+MW*	147	260	185	189	215	295	363	321	307	381	304	169	228	389	
Βιομάζα	893	897	899	899	894	897	908	911	907	911	945	938	948	910	
στον Οικιακό τομέα	702	702	702	702	702	702	702	702	702	702	702	702	702	702	
στη Βιομηχανία κτλ	191	195	196	197	191	195	206	209	205	209	243	236	246	207	
Αιολική Ενέργεια	0	0	1	4	3	3	3	3	6	14	39	65	56	88	
Φωτοβολταϊκά	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	
Ηλιακή Ενέργεια	56	63	70	75	79	82	86	89	93	97	99	100	102	105	
Βιοαέριο	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	33	48	36	
Γεωθερμία	3	3	3	3	4	3	3	2	3	2	2	2	1	1	
<b>Σύνολο</b>	<b>1125</b>	<b>1236</b>	<b>1178</b>	<b>1201</b>	<b>1225</b>	<b>1311</b>	<b>1388</b>	<b>1359</b>	<b>1342</b>	<b>1440</b>	<b>1439</b>	<b>1373</b>	<b>1453</b>	<b>1598</b>	
<b>Σύνολο χωρίς ωλητικά</b>	<b>1105</b>	<b>1230</b>	<b>1162</b>	<b>1178</b>	<b>1204</b>	<b>1290</b>	<b>1375</b>	<b>1340</b>	<b>1329</b>	<b>1420</b>	<b>1403</b>	<b>1319</b>	<b>1396</b>	<b>1550</b>	

Πίνακας 2.4 Πρωτογενής παραγωγή από ΑΠΕ στην Ελλάδα, 1990-2003

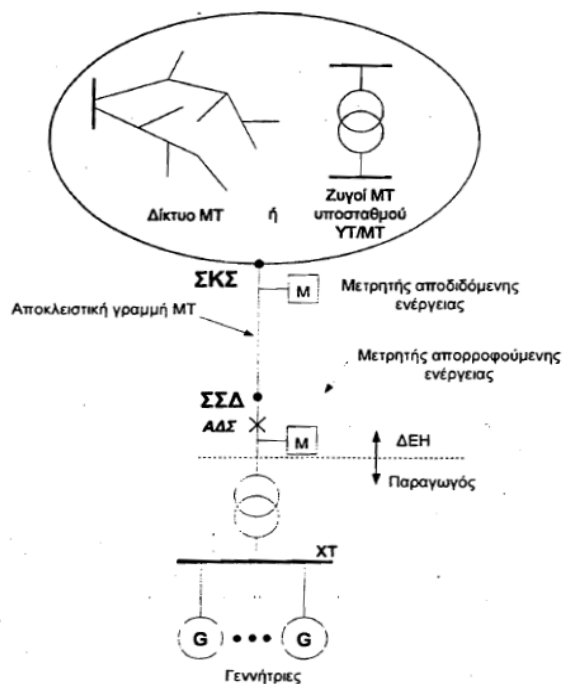
## 2.5 ΣΥΝΔΕΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ

### 2.5.1 Ορισμοί-βασικές έννοιες

Σημείο σύνδεσης στο δίκτυο (ΣΣΔ) είναι το σημείο του δικτύου χαμηλής ή μέσης τάσης όπου συνδέονται οι εγκαταστάσεις του παραγωγού και βρίσκεται πάντοτε στην έξοδο των εγκαταστάσεων αυτών. Στο ΣΔΔ εγκαθίσταται η διάταξη μέτρησης της ενέργειας τη οποία απορροφούν οι εγκαταστάσεις του παραγωγού από το δίκτυο της ΔΕΗ. Η ενέργεια που αποδίδει ο παραγωγός στο δίκτυο και αυτή που απορροφά από το δίκτυο ως καταναλωτής, μεταφέρεται πάντοτε μέσω της ίδιας παροχής.

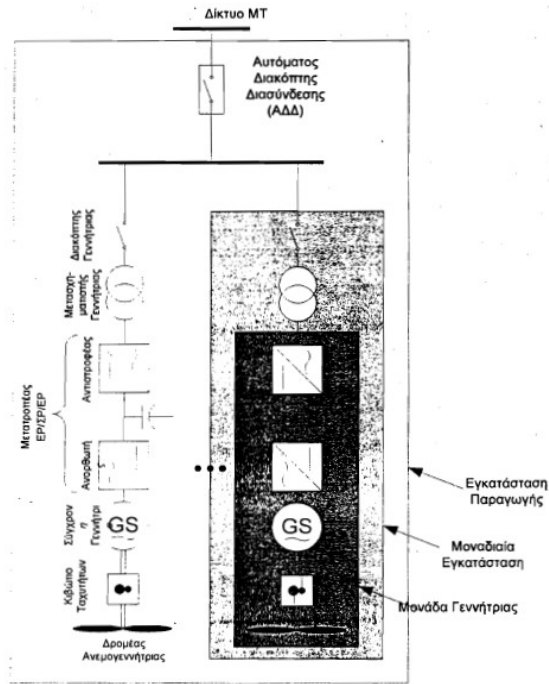
Σημείο κοινής σύνδεσης (ΣΚΣ) είναι το πλησιέστερο προς της εγκαταστάσεις του παραγωγού σημείο του δικτύου στο οποίο συνδέεται ή μπορεί να συνδεθεί μελλοντικά άλλος καταναλωτής ή παραγωγός. Το ΣΚΣ αποτελεί το σημείο αναφοράς για τον προσδιορισμό των προκαλούμενων επιπτώσεων στο δίκτυο από την εγκατάσταση παραγωγής.

Γενικά, το ΣΔΔ και το ΣΚΣ μπορεί να είναι διαφορετικά. Παραδείγματος χάριν στην περίπτωση των παραγωγών οι οποίοι συνδέονται μέσω αποκλειστικής γραμμής, το ΣΣΔ βρίσκεται στο πλησιέστερο προς τον παραγωγό άκρο της γραμμής, ενώ το ΣΚΣ μπορεί να ληφθεί στο άλλο άκρο της γραμμής.



Ορίζεται επίσης και το σημείο μεταβίβασης ευθύνης ως το σημείο του δικτύου που αποτελεί το όριο διαχωρισμού αρμοδιοτήτων και ευθύνης μεταξύ ΔΕΗ και παραγωγού και είναι συνήθως οι ακροδέκτες των μετασχηματιστών εντάσεως της μέτρησης προς την πλευρά του παραγωγού.

Αυτόματος διακόπτης διασύνδεσης είναι το στοιχείο εκείνο που επιτρέπει την απομόνωση των εγκαταστάσεων παραγωγής από το δίκτυο. Ο ΑΔΔ ελέγχεται μέσω κατάλληλου εξοπλισμού (ηλεκτρονόμενων προστασίας).



Ως εγκατάσταση παραγωγής ορίζεται ένα τμήμα εγκατάστασης στο οποίο υπάρχουν μία ή περισσότερες μονάδες γεννητριών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων και όλων των απαιτούμενων για την λειτουργία τους ηλεκτρικών διατάξεων και συσκευών. Μια εγκατάσταση είναι δυνατό να αποτελείται αποκλειστικά από μία εγκατάσταση παραγωγής ή να περιλαμβάνει και φορτία.

Μοναδιαία εγκατάσταση είναι το τμήμα της εγκατάστασης που περιλαμβάνει μία μονάδα γεννήτριας, συμπεριλαμβανομένων και όλων των απαιτούμενων για την λειτουργία της ηλεκτρικών διατάξεων και συσκευών. Όριο της μοναδιαίας εγκατάστασης είναι το σημείο στο οποίο είναι συνδεδεμένη με άλλη μοναδιαία εγκατάσταση, ή με την υπόλοιπη εγκατάσταση, ή με το δημόσιο δίκτυο. Η εγκατάσταση παραγωγής είναι δυνατό να αποτελείται αποκλειστικά από μία μοναδιαία εγκατάσταση.

Με τον όρο flicker ονομάζεται η προκαλούμενη οπτική ενόχληση από τις διακυμάνσεις της φωτεινότητας λαμπτήρων πυρακτώσεως, εξαιτίας των αντίστοιχων διακυμάνσεων της τάσης τροφοδοσίας τους. Η λειτουργία των εγκαταστάσεων παραγωγής προκαλεί μεταβολές της τάσης στο ΣΚΣ καθώς και σε άλλα σημεία του δικτύου, η οποίες μπορεί να δημιουργήσουν παρενόχληση λόγω flicker σε άλλους καταναλωτές. Μέτρο του προκαλούμενου από τις διακυμάνσεις της τάσης flicker είναι οι δείκτες flicker βραχείας διάρκειας και μακράς διάρκειας.

## 2.5.2 Γενικές αρχές και προϋποθέσεις σύνδεσης

Η σύνδεση των παραγωγών στο δίκτυο διανομής είναι αποδεκτή όταν δεν επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα ισχύος που παρέχεται στους άλλους συνδεδεμένους, δεν διαταράσσει την ορθή λειτουργία των μέσων ρύθμισης και προστασίας του δικτύου και δεν δημιουργεί προβλήματα ασφαλείας σε πρόσωπα και άλλες εγκαταστάσεις. Η εξασφάλιση των προϋποθέσεων αυτών επιτυγχάνεται με διαδικασίες τεχνικής αξιολόγησης όπως περιγράφουμε παρακάτω και με την

τήρηση των απαιτήσεων που τίθενται αναφορικά με τον εξοπλισμό της διασύνδεσης εγκαταστάσεων παραγωγής δικτύου και τις συνθήκες παραλληλισμού και ζεύξης.

➤ Πιστοποιητικά μετρήσεων και δεδομένων της εγκατάστασης

Για την εφαρμογή των μεθοδολογιών εξέτασης που περιγράφονται απαιτούνται αναλυτικά στοιχεία για το μέγεθος, τον τύπο και τα ειδικότερα χαρακτηριστικά των γεννητριών που πρόκειται να συνδεθούν στο δίκτυο, πολλά από τα οποία προαπαιτούν την διεξαγωγή εκτενών μετρήσεων. Για το σκοπό αυτό, κατά την φάση της έκδοσης της Άδειας Εγκατάστασης, οι παραγωγοί υποβάλλουν στις αρμόδιες υπηρεσίες καταστάσεις στοιχείων, παραμέτρων και πιστοποιητικών δοκιμών της εγκατάστασής τους. Εάν οι τιμές ορισμένων συντελεστών και δεικτών (πχ. μεταβολής της τάσης, ρεύματος ζεύξης και άλλα) δεν είναι διαθέσιμοι, τότε η εξέταση γίνεται με την χρήση τυπικών τιμών, οι οποίες βέβαια δίνουν αποτελέσματα από την ασφαλή πλευρά. Από την άλλη πλευρά, η ΔΕΗ παρέχει στους παραγωγούς πληροφορίες για την δυνατότητα παράλληλης λειτουργίας των μονάδων τους με το δίκτυο, για τις αναγκαίες ενισχύσεις/ επεκτάσεις του τελευταίου και για τον απαιτούμενο εξοπλισμό προστασίας και μετρητικές διατάξεις [7].

➤ Επάρκεια δικτύου

Είναι αυτονόητο ότι η βασικότερη προϋπόθεση για τη σύνδεση εγκαταστάσεων παραγωγής στο δίκτυο είναι η επάρκεια των στοιχείων του δικτύου (υποσταθμού, μετασχηματιστών και γραμμών). Εάν οι υφιστάμενες γραμμές δεν επαρκούν (ή εάν προκύπτουν ανεπίτρεπτες διαταραχές στην τάση του δικτύου), τότε εξετάζονται κατά σειρά οι ακόλουθες λύσεις:

1. Ενίσχυση του υφιστάμενου δικτύου Μέσης τάσης.
2. Απευθείας σύνδεση στους ζυγούς μέσης τάσης του υποσταθμού υψηλής τάσης ή μέσης τάσης μέσω αποκλειστικής γραμμής.
3. Προσθήκη νέου μετασχηματιστή υψηλής/ μέσης τάσης και
4. Κατασκευή ιδιαίτερου υποσταθμού υψηλής/ μέσης τάσης (οπότε η σύνδεση πραγματοποιείται απευθείας στο δίκτυο υψηλής τάσης).

Ο τρόπος σύνδεσης μίας δεδομένης εγκατάστασης παραγωγής δεν προκύπτει μονοσήμαντα από την ονομαστική ισχύ της. Δηλαδή οι σταθμοί παραγωγής ίδιας ισχύος μπορεί να συνδέονται στο δίκτυο κατά τελείως διαφορετικούς τρόπους, ανάλογα με τα ειδικά τεχνικά τους χαρακτηριστικά, την κατά περίπτωση υφιστάμενη κατάσταση δικτύων και την προβλεπόμενη ανάπτυξή τους. Παρόλα αυτά υπάρχουν οι ακόλουθοι δύο περιορισμοί ως προς το επίπεδο τάσης στο οποίο μπορεί να συνδεθεί μία εγκατάσταση παραγωγής, οι οποίοι εφαρμόζονται κατά την εξέταση, ασχέτως των λοιπών τεχνικών κριτηρίων:

- Εγκαταστάσεις συμφωνημένης ισχύος μεγαλύτερης των 100kW δεν μπορούν να συνδεθούν στο δίκτυο χαμηλής τάσης.

- Εγκαταστάσεις συμφωνημένης ισχύος μεγαλύτερης των 20MW δεν μπορούν να συνδεθούν στο δίκτυο μέσης τάσης.

-

Γενικά, η επιλογή του τρόπου σύνδεσης αποτελεί αντικείμενο τεχνοοικονομικής εξέτασης, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος κεφαλαίου των έργων ενίσχυσης και επέκτασης του δικτύου και αφετέρου τις απώλειες ενέργειας κάθε τρόπου διασύνδεσης καθ' όλη την διάρκεια ζωής της εγκατάστασης, αλλά και άλλους παράγοντες (χρόνος και δυνατότητα κατασκευής των έργων,

χρηματοδότησή τους κλπ). Στον παρακάτω πίνακα δίνεται ενδεικτικά και μόνο ο πιθανός ή προτιμητέος τρόπος διασύνδεσης ανάλογα με την ισχύ του σταθμού.

Ενδεικτική συμφωνημένη ισχύς (MW)	Πιθανός τρόπος σύνδεσης στο δίκτυο
έως 0.1	Δίκτυο ΧΤ
έως 4	Δίκτυο ΜΤ, σε υφιστάμενη γραμμή (με πιθανή ενίσχυσή της)
έως 6	Δίκτυο ΜΤ, μέσω αποκλειστικής γραμμής απλού κυκλώματος
έως 20	Δίκτυο ΜΤ, μέσω αποκλειστικής γραμμής διπλού κυκλώματος
άνω των 20	Δίκτυο ΥΤ, με κατασκευή ιδιαίτερου Υ/Σ ανύψωσης ΥΤ/ΜΤ

➤ Επιλογή του σημείου εξέτασης των επιπτώσεων στην ποιότητα τάσης του δικτύου

Όσον αφορά τις επιπτώσεις στην ποιότητα τάσης του δικτύου, κριτήρια και προϋποθέσεις που εξετάζονται προκειμένου να επιτραπεί η σύνδεση νέων εγκαταστάσεων είναι οι προκαλούμενες αργές και ταχείες διακυμάνσεις της τάσης, καθώς και εκπομπές flicker και αρμονικών. Η εξέταση πραγματοποιείται στο ΣΚΣ το οποίο δεν βρίσκεται κατ' ανάγκη στην έξοδο των εγκαταστάσεων (δηλαδή δεν συμπίπτει με το ΣΣΔ). Είναι συνεπώς δυνατό οι απαιτήσεις ποιότητας τάσης που τίθενται να μην ικανοποιούνται σε σημεία του δικτύου πλησιέστερα προς τις εγκαταστάσεις παραγωγής. Είναι πάντως σκόπιμο να τηρούνται τα όρια των κανονισμών ακόμη και στο ΣΣΔ προκειμένου να εξασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία των εγκαταστάσεων του παραγωγού, με επίπτωση βέβαια στο κόστος των έργων διασύνδεσης. Επίσης σημειώνεται ότι τα όρια του προτύπου EN50160 πρέπει υποχρεωτικώς να ικανοποιούνται σε κάθε σημείο του δικτύου, ακόμη και κατά μήκος της ιδιαίτερης γραμμής σύνδεσης των εγκαταστάσεων παραγωγής.

Εκτός από τις επιπτώσεις στην ποιότητα της τάσης, οι προς σύνδεση εγκαταστάσεις πρέπει να εξασφαλίζεται ότι δεν παρενοχλούν την λειτουργία των συστημάτων τηλεχειρισμού ακουστικής συχνότητας (ΤΑΣ) (ή άλλων ανάλογων συστημάτων) του δικτύου. Στην περίπτωση αυτή το σημείο εξέτασης είναι γενικά το ΣΣΔ των εγκαταστάσεων, δεδομένου ότι συστήματα ΤΑΣ μπορεί να χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο μετρητικών διατάξεων εγκατεστημένων στην έξοδο των εγκαταστάσεων παραγωγής.

Εάν οι απαιτήσεις που τίθενται δεν ικανοποιούνται πρέπει να επιλεγεί σημείο σύνδεσης με μεγαλύτερη ισχύ βραχυκυκλώσεως (σημείο πλησιέστερο προ στον υποσταθμό, επαύξηση της ικανότητας του δικτύου μέσω ενισχύσεων ή κατασκευή νέων γραμμών ή σύνδεση στους ζυγούς του υποσταθμού μέσω αποκλειστικής γραμμής). Στην περίπτωση μεγάλων εγκαταστάσεων παραγωγής μπορεί να είναι αναγκαία η σύνδεση στο σύστημα υψηλής τάσης μέσω ανεξάρτητου μετασχηματιστή υψηλής τάσης ή μέσης τάσης ή ιδιαίτερου υποσταθμού υψηλής/ μέσης τάσης. Ανάλογα πάντως με την προκαλούμενη διαταραχή, μπορεί να υπάρχουν και άλλες εναλλακτικές λύσεις, τεχνικά αρτιότερες και χαμηλότερου κόστους. Γενικά, πρέπει να ενθαρρύνεται η εφαρμογή νέων τεχνολογιών, οι οποίες μπορούν να συνεισφέρουν στην βελτίωση της ποιότητας ισχύος των δικτύων και στην αύξηση του βαθμού διεύθυνσης της διεσπαρμένης παραγωγής.

Εάν μετά την σύνδεση και θέση σε λειτουργία των μονάδων του παραγωγού διαπιστωθούν προβλήματα στην ομαλή λειτουργία διατάξεων του δικτύου ή ανεπίτρεπτες διαταραχές της τάσης

εξαιτίας των εγκαταστάσεων του, ο παραγωγός είναι γενικά υποχρεωμένος να πάρει τα απαραίτητα διορθωτικά μέτρα.

➤ Μέσα ζεύξης και προστασίας

Τα μέσα ζεύξης/ απόζευξης και προστασίας της διασύνδεσης παραγωγού- δικτύου έχουν ιδιαίτερη σημασία για την εξασφάλιση της συνεργασίας με τις διατάξεις προστασίας του δικτύου και την αποφυγή επικίνδυνων καταστάσεων. Συγκεκριμένα το σύστημα προστασίας του παραγωγού θα πρέπει να συνεργάζεται με το σύστημα προστασίας του δικτύου, ώστε σφάλματα σε οποιαδήποτε πλευρά να ανιχνεύονται σωστά και να εκκαθαρίζονται. Οι ρυθμίσεις των προστασιών θα πρέπει να εξασφαλίζουν την άμεση απόζευξη των γεννητριών σε περίπτωση σφάλματος, ώστε να μην υφίσταται κίνδυνος απομονωμένης λειτουργίας των εγκαταστάσεων (ενδεχομένως με τμήμα του δικτύου). Για την προστασία των εγκαταστάσεων παραγωγής από υψηλές υπερεντάσεις και μηχανικές καταπονήσεις, όταν στο δίκτυο χρησιμοποιούνται διατάξεις αυτόματου επανοπλισμού η απόζευξη θα πρέπει να επιτυγχάνεται πριν την λειτουργία επαναφοράς των διακοπών του δικτύου.

Προκειμένου να αποφευχθούν κίνδυνοι για το προσωπικό που μπορεί να εκτελεί εργασίες σε τμήμα του δικτύου κοντά στις εγκαταστάσεις παραγωγής, θα πρέπει να εξασφαλίζεται η αυτόματη ή χειροκίνητη απομόνωση των εγκαταστάσεων του παραγωγού, όποτε αυτό είναι αναγκαίο. Επίσης ζητείται η διασύνδεση να διαθέτει μέσο ορατής απόζευξης με ικανότητα διακοπής ρεύματος φορτίου προσιτό ανά πάσα στιγμή στο προσωπικό της ΔΕΗ.

Η ζεύξη περισσότερων γεννητριών σε ένα σημείο σύνδεσης είναι εφικτή και αποδεκτή, πρέπει όμως να λαμβάνεται πρόνοια ώστε να αποφεύγεται η ταυτόχρονη εκκίνηση τους. Στη περίπτωση εγκαταστάσεων με σύγχρονες γεννήτριες για την αποφυγή υπερεντάσεων και βυθίσεων της τάσης του δικτύου, οι γεννήτριες δεν παραλληλίζονται άμεσα στο δίκτυο αλλά εκκινούν μέσω ηλεκτρονικού εκκινητή. Εάν χρησιμοποιούνται σύγχρονες γεννήτριες ή μετατροπείς ελεγχόμενης τάσης εξόδου, τότε είναι αναγκαία η ύπαρξη διάταξης παραλληλισμού (κατά προτίμηση αυτόματου), η οποία επιτρέπει την ζεύξη των εγκαταστάσεων μόνο όταν οι συνθήκες φυσικής απόκλισης των διανυσμάτων των τάσεων εκατέρωθεν του διακόπτη διασύνδεσης (ΑΔΔ) το επιτρέπουν.

➤ Διατάξεις μέτρησης

Η μέτρηση της αποδιδόμενης στο δίκτυο ενέργειας πραγματοποιείται γενικά στο ΣΚΣ., όπου γίνεται και η εξέταση των επιπτώσεων από την λειτουργία των εγκαταστάσεων (πρακτικώς στο άκρο της ιδιαίτερης γραμμής του παραγωγού). Η μέτρηση της καταναλισκόμενης ενέργειας από φορτία των εγκαταστάσεων του παραγωγού γίνεται στο ΣΣΔ. Στην περίπτωση όπου η αποκλειστική γραμμή έχει πολύ μικρό μήκος, η θέση των δύο μετρητών μπορεί να είναι κοινή, στην έξοδο των εγκαταστάσεων του παραγωγού. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να χρησιμοποιούνται διαφορετικοί μετρητές για την αποδιδόμενη και την απορροφούμενη ενέργεια ακόμη και για συνδέσεις στο δίκτυο χαμηλής τάσης, παρότι για την τελευταία περίπτωση εξετάζεται το ενδεχόμενο να επιτραπεί η χρήση κοινού μετρητή (net metering). Η ενέργεια που αποδίδει ο παραγωγός στο δίκτυο και αυτή που απορροφά από το δίκτυο ως καταναλωτής μεταφέρεται μέσω της ίδιας παροχής.

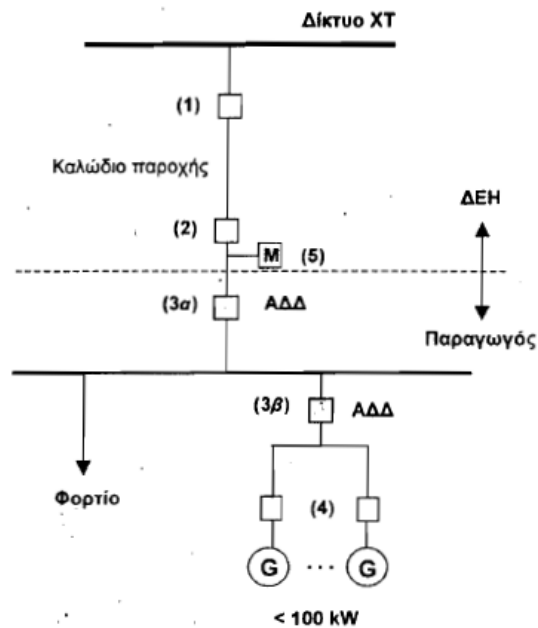
### 2.5.3 Σύνδεση παραγωγών στο δίκτυο χαμηλής τάσης

Η παρούσα εργασία αφορά μόνο σε συνδέσεις στο δίκτυο χαμηλής τάσης και προς αυτό αναφέρονται τα κάτωθι συγκεκριμένα στοιχεία για την σύνδεση παραγωγών στο δίκτυο χαμηλής τάσης.

#### 2.5.3.1 Γενικά - Διαμόρφωση της σύνδεσης

Η σύνδεση γεννητριών παραγωγών στο δίκτυο χαμηλής τάσης επιτρέπεται για εγκαταστάσεις συνολικής εγκατεστημένης ισχύος έως 100kW. Ανάλογα με τη ισχύ των γεννητριών που θα συνδεθούν στο δίκτυο χαμηλής τάσης, εξετάζεται εάν είναι δυνατή η σύνδεση χωρίς την επαύξηση της παροχής του παραγωγού. Αν απαιτείται επαύξηση της παροχής, γίνεται μελέτη επάρκειας του δικτύου, βάσει των όρων και των προϋποθέσεων που θα αναφερθούν στην συνέχεια.

Εγκαταστάσεις παραγωγής μπορούν να συνδέονται σε μία φάση μέχρι την ισχύ των 4.6 kVA ή 5 kWp για τις φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις. Στην περίπτωση εγκατάστασης παραγωγής με περισσότερες μοναδιαίες εγκαταστάσεις/ γεννήτριες, ο παραπάνω περιορισμός αφορά την κάθε μονάδα, υπό την προϋπόθεση ότι οι μονάδες κατανέμονται ομοιόμορφα στις τρεις φάσεις.



Στο παραπάνω σχήμα, φαίνεται μία τυπική διάταξη σύνδεσης παραγωγού στο δίκτυο χαμηλής τάσης. Βασική απαίτηση για λόγους ασφαλείας είναι η ύπαρξη μέσων διακοπής (με ικανότητα διακοπής ρεύματος φορτίου) και ορατής απόζευξης, προσιτών ανά πάσα στιγμή στο προσωπικό της ΔΕΗ, ώστε να εξασφαλίζεται η απομόνωση του παραγωγού από το δίκτυο όταν αυτό απαιτείται από την ΔΕΗ. Η απαίτηση ορατής απόζευξης ικανοποιείται τόσο από το κιβώτιο σύνδεσης (στοιχείο 1 στο παραπάνω σχήμα) όσο και από τις ασφάλειες παροχής (στοιχείο 2). Για εγκαταστάσεις μικρής ισχύος τα μέσα αυτά μπορούν σε έκτακτες περιπτώσεις να χρησιμοποιηθούν και για την διακοπή της εγκατάστασης. Σε εγκαταστάσεις μεγαλύτερης ισχύος είναι αναγκαία η



ύπαρξη διακόπτη φορτίου ή ισχύος. Το μέσο διακοπής (3) είναι ο αυτόματος διακόπτης της διασύνδεσης (ΑΔΔ) στον οποίο εφαρμόζεται το σύστημα προστασίας της επόμενης παραγράφου. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, μπορεί να τοποθετηθεί σε δύο θέσεις, ανάλογα με την επιθυμία του παραγωγού. Εάν επιλεγεί η θέση 3α, τότε είναι εφικτή η απομονωμένη λειτουργία της συνολικής εγκατάστασης (εγκατάσταση παραγωγής και φορτία). Ο παραγωγός θα πρέπει να παρέχει πρόσβαση στον ΑΔΔ και στο σχετικό σύστημα προστασίας στο αρμόδιο προσωπικό της ΔΕΗ. Είναι γενικά αποδεκτό αλλά απαιτεί προηγούμενη συμφωνία με την ΔΕΗ, οι λειτουργίες του ΑΔΔ να πραγματοποιούνται από τον διακόπτη και το σύστημα προστασίας των γεννητριών, όταν δεν προβλέπεται η απομονωμένη λειτουργία των εγκαταστάσεων.

Το είδος και ο αριθμός των απαιτούμενων μετρικών διατάξεων και συσκευών ρύθμισης (αλλαγής τιμολογίου) καθορίζονται σύμφωνα με τους όρους σύμβασης ΔΕΗ- Παραγωγού. Σε κάθε περίπτωση, πάντως, χρησιμοποιούνται μετρητικές διατάξεις χωρίς δυνατότητα αντίθετης περιστροφής και πραγματοποιείται ανεξάρτητη μέτρηση της παραγόμενης και καταναλισκόμενης ενέργειας στις εγκαταστάσεις του παραγωγού. Εάν η παροχή είναι τριφασική, ο μετρητής της παρεχόμενης στο δίκτυο ενέργειας πρέπει να είναι τριφασικός, ακόμη και για μονοφασικές εγκαταστάσεις παραγωγής.

### 2.5.3.2 Διατάξεις ζεύξης και παραλληλισμού - Προστασία της διασύνδεσης

- Διακόπτης ζεύξης (ΑΔΔ)

Για την σύνδεση και την παράλληλη λειτουργία εγκαταστάσεων παραγωγής με το δίκτυο απαιτείται η εγκατάσταση διακόπτη ζεύξης (ΑΔΔ) ο οποίος να διαθέτει τουλάχιστον ικανότητα διακοπής ρεύματος φορτίου. Εφόσον δεν προβλέπεται δυνατότητα απομονωμένης λειτουργίας των εγκαταστάσεων, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για τον σκοπό αυτό η διάταξη ζεύξης της εγκατάστασης παραγωγής (πχ. Ο διακόπτης της γεννήτριας, ο οποίος θα διαθέτει το σύστημα προστασίας που περιγράφεται στην συνέχεια). Για εγκαταστάσεις παραγωγής με αντιστροφείς ΣΡ/ΕΡ, ο διακόπτης ζεύξης πρέπει να εγκαθίσταται στην πλευρά ΕΡ του μετατροπέα. Σε κάθε περίπτωση ο διακόπτης πρέπει να εξασφαλίζει τον γαλβανικό διαχωρισμό των τριών φάσεων. Η διάταξη ζεύξης θα πρέπει να παρέχει προστασία έναντι βραχυκυκλώματος στο εσωτερικό της εγκατάστασης, είτε μέσω ασφαλειών είτε μέσω του διακόπτη ζεύξης, θα πρέπει δε να επιλέγεται με βάση το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης στο ΣΣΔ των εγκαταστάσεων. Εάν η συμβολή των εγκαταστάσεων παραγωγής αυξάνει την στάθμη βραχυκυκλώσεως του δικτύου πέρα από το προδιαγραφόμενο όριο του εξοπλισμού, ο παραγωγός λαμβάνει τα αναγκαία μέτρα για τον περιορισμό του ρεύματος βραχυκύκλωσης των εγκαταστάσεων του.

- Συνθήκες ζεύξης

Η ζεύξη των εγκαταστάσεων παραγωγής στο δίκτυο είναι δυνατή όταν η τάση και η συχνότητα του δικτύου είναι κοντά στις ονομαστικές τους τιμές και συγκεκριμένα διαφέρουν από αυτές λιγότερο από τα όρια ρύθμισης των σχετικών προστασιών τάσης και συχνότητας. Σε περίπτωση αποσύνδεσης της εγκατάστασης, συνίσταται να προβλέπεται καθυστέρηση της τάξης

των λεπτών της ώρας μεταξύ επανόδου της τάσης και επανόζευξης της εγκατάστασης, για λόγους προστασίας της τελευταίας, αλλά και αποφυγής παρενόχλησης άλλων συνδεδεμένων.

Ασύγχρονες γεννήτριες είναι επιθυμητό να συνδέονται στο δίκτυο χωρίς τάση, με αριθμό στροφών μεταξύ 95% και 105% των σύγχρονων, κατά προτίμηση μέσω διάταξης ομαλής εκκίνησης. Για σύγχρονες γεννήτριες απαιτείται διάταξη συγχρονισμού η οποία εξασφαλίζει κατ' ελάχιστο τις παρακάτω συνθήκες συγχρονισμού:

$$\text{Διαφορά τάσης: } \Delta U < \pm 10\%$$

$$\text{Διαφορά συχνότητας: } \Delta f < \pm 0.5 \text{ Hz}$$

$$\text{Διαφορά φασικής γωνίας: } \Delta \phi < \pm 10^\circ$$

Για εγκαταστάσεις παραγωγής με αντιστροφείς ΣΡ/ΕΡ, η ζεύξη πρέπει να γίνεται με την πλευρά ΕΡ του μετατροπέα χωρίς τάση.

Εάν προβλέπεται δυνατότητα απομονωμένης λειτουργίας της εγκατάστασης, τότε ο ΑΔΔ πρέπει να διαθέτει διάταξη συγχρονισμού αντίστοιχη αυτής των σύγχρονων γεννητριών.

Οι πυκνωτές αντιστάθμισης κάθε μοναδιαίας εγκατάστασης παραγωγής (εάν υπάρχουν) πρέπει να συνδέονται μετά τον παραλληλισμό της γεννήτριας και να τίθενται αυτόματα εκτός με το άνοιγμα του διακόπτη της γεννήτριας. Το ίδιο ισχύει και για τις διατάξεις κεντρικής αντιστάθμισης εγκαταστάσεων παραγωγής οι οποίες δεν διαθέτουν δυνατότητα απομονωμένης λειτουργίας.

- Προστασία απόζευξης

Η εγκατάσταση παραγωγής πρέπει να διαθέτει προστασία έναντι βραχυκυκλώματος, έναντι υπερφόρτισης και έναντι έμμεσης και άμεσης επαφής. Επιπλέον για την προστασίας της ίδιας της εγκατάστασης, αλλά και των άλλων εγκαταστάσεων του δικτύου απαιτείται η ύπαρξη συστήματος προστασίας απόζευξης το οποίο επενεργεί στον ΑΔΔ και εξασφαλίζει την αποσύνδεση της εγκατάστασης από το δίκτυο όταν εντοπιστούν αποκλίσεις τάσης ή/και συχνότητας άνω των προβλεπόμενων ορίων.

Για εγκαταστάσεις με σύγχρονες και ασύγχρονες γεννήτριες απαιτούνται κατ' ελάχιστον οι λειτουργίες προστασίας του παρακάτω πίνακα, οι οποίες αποσκοπούν στην ανίχνευση καταστάσεων σφαλμάτων του δικτύου και απομονωμένης λειτουργίας (δηλαδή αυτόνομης λειτουργίας της εγκατάστασης παραγωγής, τροφοδοτώντας ενδεχομένως μέρος του δικτύου το οποίο έχει αποκοπεί από το υπόλοιπο δίκτυο) και στην άμεση αποσύνδεση της. Πρόσθετες λειτουργίες προστασίας μπορούν βεβαίως να υφίστανται (πχ. ασυμμετρίας τάσεων).

Τύπος ηλεκτρονόμου	Περιοχή Ρυθμίσεων	Συνιστώμενη Ρύθμιση
Υπόταση (mV)	$0.70 \cdot U_n + 1.00 \cdot U_n$	$0.80 \cdot U_n$
Υπέρταση (MV)	$1.00 \cdot U_n + 1.15 \cdot U_n$	$1.10 \cdot U_n + 1.15 \cdot U_n$
Υποσυχνότητας (mf)	48 + 50 Hz	49.5 (48) Hz
Υπερσυχνότητας (Mf)	50 + 52 Hz	50.5 (51) Hz

$U_n$ : Ονομαστική τάση δικτύου ΧΤ (230/400 V) - Τιμές εντός παρενθέσεων αφορούν νησιωτικά συστήματα

Πίνακας 2.5 Λειτουργίες προστασίας

Η επιτήρηση τάσης γίνεται και στις τρεις φάσεις, ώστε ακόμη και μονοφασικές διακοπές ή βυθίσεις να αναγνωρίζονται ασφαλώς. Η χρονική καθυστέρηση διέγερσης των προστασιών υπότασης και υπέρτασης δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 3 δευτερόλεπτα. Γενικά συνίσταται η επιλογή ρυθμίσεων κάτω του ενός δευτερολέπτου, ώστε να διασφαλίζεται η αποσύνδεση της εγκατάστασης παραγωγής πριν από την ενδεχόμενη ταχεία επαναφορά της τάσης του δικτύου (πχ. λόγω λειτουργίας επαναφοράς διακόπτη ισχύος). Ταυτόχρονα, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι η επιλογή πολύ μικρών τιμών καθυστέρησης μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη συχνότητα αποσύνδεσης των εγκαταστάσεων παραγωγής. Η χρονική καθυστέρηση της προστασίας συχνότητας πρέπει επίσης να ρυθμίζεται σε μικρές τιμές (κάτω του ενός δευτερολέπτου). Οι συνιστώμενες στον Πίνακα 2.5 ρυθμίσεις είναι ενδεικτικές.

Σε εγκαταστάσεις παραγωγής με αντιστροφείς ΣΡ/ΕΡ, η επιτήρηση συχνότητας μπορεί να απουσιάζει, εάν ο αντιστροφέας δεν διαθέτει την δυνατότητα αυτή. Αντίθετα, η επιτήρηση της τάσης (προστασίας υπότασης και υπέρτασης) είναι πάντοτε αναγκαία, η δε συνιστώμενη ρύθμιση για την προστασία της υπέρτασης είναι  $1.1U_n$ .

Η ανίχνευση καταστάσεων απομονωμένης λειτουργίας μπορεί να υλοποιείται και μέσω άλλων διατάξεων προστασίας, όπως μέσω ηλεκτρονόμων απότομης μεταβολής διανύσματος ή ηλεκτρονόμων απότομης μεταβολής φορτίου. Επίσης ορισμένες εγκαταστάσεις παραγωγής με μετατροπείς ισχύος (κυρίως φωτοβολταϊκά) μπορεί να διαθέτουν πιο προηγμένες διατάξεις ανίχνευσης ενσωματωμένες στα κυκλώματα ελέγχου του μετατροπέα εξόδου.

### 2.5.3.3 Επιπτώσεις στην τάση του δικτύου

Η σύνδεση εγκαταστάσεων παραγωγής σε κάποιο σημείο του δικτύου χαμηλής τάσης είναι δυνατή, υπό την προϋπόθεση ότι η λειτουργία τους δεν προκαλεί υπέρβαση της επιτρεπόμενης στάθμης διαταραχών για δημόσια δίκτυα χαμηλής τάσης και άρα δεν παρενοχλεί άλλες εγκαταστάσεις και συσκευές του δικτύου. Διαταραχές οι οποίες εξετάζονται είναι οι προκαλούμενες μεταβολές της τάσης στο ΣΚΣ, το flicker και η αρμονική παραμόρφωση της τάσης εξαιτίας της λειτουργίας των εγκαταστάσεων. Η λειτουργία μίας εγκατάστασης παραγωγής είναι αποδεκτή όταν δεν γίνεται υπέρβαση των ορίων που καθορίζονται από τα πρότυπα IEC61000-3-2 και 61000-3-11 και τις τεχνικές εκθέσεις IEC61000-3-4 και 61000-3-5 (ή τους αντίστοιχους κανονισμούς EN και ΕΛΟΤ). Σε κάθε περίπτωση πρέπει οπωσδήποτε να τηρούνται τα όρια του προτύπου EN50160.

#### A. Μεταβολές της τάσης και flicker

Συσκευές οι οποίες είναι δοκιμασμένες και πιστοποιημένες σύμφωνα με τα παραπάνω πρότυπα μπορούν να συνδεθούν, είτε χωρίς άλλη εξέταση (αν πληρούν τα όρια του IEC61000-3-3) ή σύμφωνα με τις προϋποθέσεις που τίθενται (κατά IEC61000-3-11) ως προς την ισχύ βραχυκυκλώσεως του δικτύου στο ΣΚΣ ή το μέγεθος της παροχής. Όταν οι προς σύνδεση εγκαταστάσεις δεν είναι πιστοποιημένες κατά IEC, τότε ακολουθείται η διαδικασία εξέτασης που περιγράφεται στην συνέχεια.

Οι διαταραχές της τάσης που προκαλούνται στο ΣΚΣ από την λειτουργία των εγκαταστάσεων παραγωγής δεν πρέπει να υπερβαίνουν τα όρια του Πίνακα 2.6. Κατά την κανονική λειτουργία οι

προκαλούμενες μεταβολές της τάσης πρέπει να μην υπερβαίνουν το όριο της  $d_c$ . Τα όρια της  $d_{max}$  αφορούν χειρισμούς (συνήθως οι δυσμενέστερες μεταβολές της τάσης προκαλούνται από χειρισμούς ζεύξης) και εξαρτώνται από την συχνότητα αυτών. Απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή των ορίων (αλλά και για λόγους ασφαλείας) είναι οι εγκαταστάσεις παραγωγής μετά από διακοπή της λειτουργίας τους να επανεκκινούν είτε με εντολή του χειριστή είτε αυτόματα αλλά με χρονική καθυστέρηση (κατ' ελάχιστο κάποιων δεκάδων δευτερολέπτων και κατά προτίμηση λίγων λεπτών). Η αναμενόμενη συχνότητα χειρισμών πρέπει να προκύπτει από το πιστοποιητικό του κατασκευαστή ή από τις ρυθμίσεις του σχετικού συστήματος ελέγχου.

	Συχνότητα χειρισμών		
	Άνω της 1 ανά ώρα	Μεταξύ 1 ανά ώρα και 2 ανά ημέρα	Κάτω των 2 ανά ημέρα
Συντελεστής flicker βραχείας διάρκειας, $P_H$	$P_H \leq 1.0$		
Συντελεστής flicker μακράς διάρκειας, $P_H$	$P_H \leq 0.65$		
Σχετική μεταβολή τάσης μόνιμης κατάστασης, $d_c$	$d_c \leq 3\%$		
Μέγιστη σχετική μεταβολή τάσης, $d_{max}$	$d_{max} \leq 4\%$	$d_{max} \leq 5.5\%$	$d_{max} \leq 7\%$

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ: Τα όρια  $d_{max}$  μπορούν να περιορίζονται μέχρι και κατά 50% για εγκαταστάσεις παραγωγής που συνδέονται σε περιοχές με μεγάλη πυκνότητα φορτίου.

Πίνακας 2.6

Ο υπολογισμός των  $d_c$  και  $d_{max}$  που προκαλούνται από τις εγκαταστάσεις παραγωγής μπορεί να γίνει με την εφαρμογή των παρακάτω απλουστευμένων σχέσεων:  $d_c(\%) = 100 \cdot \frac{S_{0.2A}}{S_k}$  και

$$d_{max}(\%) = 100 \cdot k \cdot \frac{S_{nE}}{S_k}, \text{ όπου:}$$

- $S_k$  είναι η ισχύς βραχυκυκλώσεως του δικτύου στο σημείο κοινής σύνδεσης,
- $S_{nE}$  είναι η ονομαστική ισχύς της μονάδας εγκατάστασης για την οποία το γινόμενο  $k \cdot S_{nE}$  είναι μέγιστο (εάν η εγκατάσταση παραγωγής περιλαμβάνει μόνο μία μοναδιαία εγκατάσταση, προφανώς  $S_{nE} = S_{nA}$ )
- $S_{0.2A}$  είναι η φαινόμενη ισχύς που αντιστοιχεί στην μέγιστη στιγμιαία ενεργό ισχύ της συνολικής εγκατάστασης παραγωγής (για ανεμογεννήτριες τιμή ισχύος 0.2sec)
- $k$  είναι ο συντελεστής ο οποίος πρέπει να τίθεται ίσος με τον συντελεστή μεταβολής της τάσης  $k_U(\psi_k)$  της μοναδιαίας εγκατάστασης (δίνεται στο πιστοποιητικό δοκιμών). Εάν η τιμή του συντελεστή  $k_U(\psi_k)$  δεν είναι διαθέσιμη τότε χρησιμοποιείται ο συντελεστής μέγιστου ρεύματος ζεύξης  $k_{i,max}$  (επίσης από το πιστοποιητικό δοκιμών). Απουσία συγκεκριμένης τιμής και του  $k_{i,max}$  λαμβάνονται οι εξής τιμές:

- o  $k_{i,max} = 1$ : Σύγχρονες γεννήτριες με διάταξη συγχρονισμού

- $k_{i,\max} = 4$ : Ασύγχρονες γεννήτριες που συνδέονται μέσω της διάταξης περιορισμού του ρεύματος εκκίνησης (πχ. μέσω διάταξης ομαλής εκκίνησης και με ταχύτητα περιστροφής 95% έως 105% των ονομαστικών στροφών)
- $k_{i,\max} = 8$ : ασύγχρονες γεννήτριες που εκκινούν με απευθείας σύνδεση με το δίκτυο, καθώς και όταν δεν υπάρχουν πληροφορίες για το ρεύμα εκκίνησης.

Στην εφαρμογή της σχέσης για το  $d_{\max}$  λαμβάνεται υπόψη η μοναδιαία εγκατάσταση και όχι η συνολική εγκατάσταση παραγωγής, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει περισσότερες μοναδιαίες εγκαταστάσεις, εφόσον έχει ληφθεί πρόνοια ώστε να αποφεύγονται οι ταυτόχρονοι χειρισμοί. Αντίθετα για την σχέση για το  $d_c$  χρησιμοποιείται η στιγμιαία ισχύς της συνολικής εγκατάστασης παραγωγής, δεδομένου ότι η ταυτόχρονη αποσύνδεση της όλης εγκατάστασης παραγωγής είναι πιθανή.

Τα όρια του Πίνακα 2.6 αφορούν τις σχετικές μεταβολές της τάσης οι οποίες υπερτίθενται στα υφιστάμενα επίπεδα των τάσεων λόγω των υπόλοιπων καταναλωτών (ή και παραγωγών) που συνδέονται στο δίκτυο. Η τήρηση των τιθέμενων ορίων για τις σχετικές μεταβολές αναμένεται να εξασφαλίζει και ότι τα επίπεδα τάσης του δικτύου είναι αποδεκτά. Παρ' όλα αυτά, σε περιπτώσεις δικτύων όπου οι υφιστάμενες αποκλίσεις της τάσης από την ονομαστική τιμή είναι σημαντικές, πρέπει να ελέγχεται ότι η σύνδεση της εγκατάστασης δεν θα οδηγήσει σε υπέρβαση των ορίων διακύμανσης της τάσης. Για παράδειγμα γεννήτρια παραγωγού η οποία προκαλεί  $d_{\max} = 4\%$  δεν είναι σκόπιμο να συνδεθεί σε σημείο του δικτύου όπου η τάση είναι ήδη μειωμένη κατά 9% λόγω των υφιστάμενων φορτίων, δεδομένου ότι οι χειρισμοί στην εγκατάσταση θα προκαλούν βυθίσεις τάσης κάτω του 90% της ονομαστικής τιμής. Ως όρια διακύμανσης της τάσης στα δίκτυα χαμηλής τάσης λαμβάνονται οι τιμές σχεδιασμού, οι οποίες πρέπει σε κάθε περίπτωση να είναι μικρότερες ή ίσες των ορίων που θέτει το πρότυπο EN50160.

Ο συντελεστής flicker θα πρέπει να εξετάζεται τόσο για την κανονική λειτουργία της εγκατάστασης, όσο και για την πραγματοποίηση χειρισμών (εκκινήσεις, στάσεις). Η τιμή των δεικτών  $P_{st}$  και  $P_{lt}$  προκύπτει από πιστοποιητικό που προσκομίζει ο παραγωγός ή εκτιμώνται σύμφωνα με τις αρχές του προτύπου IEC61000-3-3. Για εγκαταστάσεις παραγωγής οι οποίες δεν εμφανίζουν αξιοσημείωτη διακύμανση της ισχύος τους κατά την κανονική λειτουργία (πχ. μικροί αεριοστρόβιλοι, κυσέλες καυσίμου) η εξέταση των εκπομπών flicker είναι αναγκαία μόνο για χειρισμούς.

Αν η τιμή των δεικτών flicker για χειρισμούς δεν προκύπτει από πιστοποιητικό δοκιμών της εγκατάστασης τότε τίθεται περιορισμός στη συχνότητα των χειρισμών εντός των εγκαταστάσεων παραγωγής σύμφωνα με την σχέση  $r \leq \frac{5}{d_{\max}^3}$  χειρισμοί ανά δευτερόλεπτο, όπου  $r$  ο μέγιστος αριθμός χειρισμών ανά λεπτό και  $d_{\max}$  η προκαλούμενη από κάθε χειρισμό εκατοστιαία μεταβολή της τάσης. Επιπλέον διαδοχικοί χειρισμοί είναι επιθυμητό να απέχουν τουλάχιστον ένα λεπτό. Στην περίπτωση σύνδεσης στο δίκτυο χαμηλής τάσης εγκαταστάσεων με ονομαστικό ρεύμα άνω των 75A, η εξέταση όσον αφορά το flicker είναι αντίστοιχη της διαδικασίας που εφαρμόζεται για σύνδεση εγκαταστάσεων στο δίκτυο μέσης τάσης [7].

### B. Εκπομπές αρμονικών

Η εκπομπή αρμονικών από τις εγκαταστάσεις παραγωγής (όπως και οποιαδήποτε άλλη εγκατάσταση η οποία συνδέεται στο δίκτυο) προκαλεί παραμόρφωση της τάσης και άρα ενδεχόμενη παρενόχληση της λειτουργίας άλλων συσκευών (φορτίων ή στοιχείων δικτύου).

Έλεγχος των εκπομπών αρμονικών απαιτείται γενικά όταν ο προς σύνδεση εξοπλισμός διαθέτει διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος (όπως συμβαίνει στις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών, στα φωτοβολταϊκά και άλλες διατάξεις οι οποίες περιλαμβάνουν μετατροπείς ισχύος). Στην περίπτωση της απευθείας σύνδεσης συμβατικών γεννητριών (σύγχρονων ή ασύγχρονων), χωρίς την παρεμβολή μετατροπέων ισχύος δεν αναμένονται προβλήματα εκπομπών αρμονικών, εφόσον η τάση διατηρείται εντός των προβλεπόμενων ορίων. Επίσης ενδιαφέρουν οι εκπομπές αρμονικών μόνο κατά την κανονική λειτουργία των εγκαταστάσεων και όχι για μεταβατικές περιόδους διάρκειας λίγων δευτερολέπτων (πχ. κατά τον παραλληλισμό με το δίκτυο).

Για την σύνδεση των συσκευών στα δίκτυα XT εφαρμόζονται κατ' αρχήν οι προϋποθέσεις των σχετικών προτύπων IEC61000-3-2 και IEC61000-3-4. Σε κάθε περίπτωση ο παραγωγός θα πρέπει να προσκομίσει είτε πιστοποιητικό συμβατότητας με τα παραπάνω πρότυπα, είτε πιστοποιητικό δοκιμών όπου θα καταγράφονται οι μέγιστες τιμές των αρμονικών συνιστωσών του ρεύματος εξόδου κατά την κανονική λειτουργία του εξοπλισμού. Η μέγιστη τάξη αρμονικών που λαμβάνεται υπόψη είναι η τεσσαρακοστή, με την εξαίρεση εξοπλισμού όπου χρησιμοποιούνται μετατροπείς ισχύος υψηλής διακοπτικής συχνότητας (άνω του 1kHz) και η μέτρηση αρμονικών είναι σκόπιμο να επεκτείνεται σε συχνότητες κάτω των 2kHz και συνήθως μέχρι τα 9kHz. Για διατάξεις οι οποίες γίνεται να παράγουν και ενδιάμεσες αρμονικές (ελεγκτής ρεύματος τύπου υστέρησης καθώς και πολλοί τύποι μετατροπέων ισχύος AC/DC/AC), το πιστοποιητικό μετρήσεων πρέπει να περιλαμβάνει και τις ενδιάμεσες αρμονικές. Οι μετρήσεις πρέπει να έχουν διεξαχθεί σύμφωνα με τα πρότυπα IEC61000-3-2, 61000-3-4 και 61000-4-7. Η εξέταση της δυνατότητας σύνδεσης πραγματοποιείται όπως περιγράφεται στη συνέχεια.

Για εξοπλισμό με ονομαστικό ρεύμα μικρότερο ή ίσο με 16A ανά φάση, πρέπει να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις των εκπομπών του προτύπου IEC61000-3-2 για συσκευές κλάσης A. Οι απαιτήσεις αυτές συνοψίζονται στον αμέσως παρακάτω Πίνακα 2.7, ο οποίος δίνει τις μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές των αρμονικών του ρεύματος εξόδου.

Περιττές αρμονικές		Άρτιες αρμονικές	
Τάξη $h$	Μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση (A)	Τάξη $h$	Μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση (A)
3	2.30	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.30
9	0.40	$8 \leq h \leq 40$	$0.23 \cdot \frac{8}{h}$
11	0.33		
13	0.21		
$15 \leq h \leq 39$	$0.15 \cdot \frac{15}{h}$		

Πίνακας 2.7

Για τον εξοπλισμό με ονομαστικό ρεύμα μεγαλύτερο των 16A και μικρότερο των 75A ανά φάση, για την σύνδεση τους σε σημεία του δικτύου όπου ο λόγος βραχυκύκλωσης είναι

μεγαλύτερος ή ίσος του 33 εξετάζεται κατ' αρχήν η συμμόρφωση με τα όρια του κάτωθι Πίνακα 2.8

Τάξη $h$	Μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση $I_h/I_{In}$ %	Τάξη $h$	Μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση $I_h/I_{In}$ %
3	21.6	21	$\leq 0.6$
5	10.7	23	0.9
7	7.2	25	0.8
9	3.8	27	$\leq 0.6$
11	3.1	29	0.7
13	2	31	0.7
15	0.7	$\geq 33$	$\leq 0.6$
17	1.2		
19	1.1	Άρτιες	$\leq 8/h$ ή $\leq 0.6$

$I_i$ : Θεμελιώδης συνιστώσα ονομαστικού ρεύματος  
 $I_h$ : Αρμονική συνιστώσα τάξης  $h$  του ρεύματος

Πίνακας 2.8

Για τριφασικό εξοπλισμό του οποίου οι εκπομπές υπερβαίνουν τα όρια του άνω πίνακα, η σύνδεση είναι δυνατή σε σημείο του δικτύου με υψηλότερο λόγο βραχυκύκλωσης, εφόσον τηρούνται τα όρια του Πίνακα 2.9.

Ελάχιστος λόγος $R_k$	Επιτρεπόμενη αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος (%)		Επιτρεπόμενες εντάσεις αρμονικών $I_h/I_{In}$ (%)			
	THD	PWHD	$I_5$	$I_7$	$I_{11}$	$I_{13}$
66	16	25	14	11	10	8
120	18	29	16	12	11	8
175	25	33	20	14	12	8
250	35	39	30	18	13	8
350	48	46	40	25	15	10
450	58	51	50	35	20	15
600	70	57	60	40	25	18

Άρτιες αρμονικές:  $I_h/I_{In} \leq 16/h$  (%)

Για ενδιάμεσες τιμές του λόγου  $R_k$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί γραμμική παρεμβολή

$I_i$ : Θεμελιώδης συνιστώσα ονομαστικού ρεύματος  
 $I_h$ : Αρμονική συνιστώσα τάξης  $h$  του ρεύματος

Πίνακας 2.9

Τέλος, εξοπλισμός με ονομαστικό ρεύμα μεγαλύτερο των 75A ανά φάση δεν αναμένεται να δημιουργήσει προβλήματα αρμονικής παραμόρφωσης στο δίκτυο εφόσον ικανοποιούνται οι εξής απαιτήσεις:

1. Η συνολική ισχύς εγκαταστάσεων παραγωγής που προκαλούν παραμόρφωση δεν υπερβαίνει το 25% της ισχύος του τοπικού μετασχηματιστή διανομής.

2. Οι αρμονικές συνιστώσες του ρεύματος εξόδου του εξοπλισμού, οι οποίες δίνονται στο πιστοποιητικό δοκιμής που τον συνοδεύει, ικανοποιούν την απαίτηση  $I_h \leq L_h \frac{S_K}{\psi_K}$ ,

όπου:

-  $I_h$  η μέγιστη τιμή κανονικής λειτουργίας της αρμονικής τάσεως  $h$  του ρεύματος εξόδου της υπό εξέταση εγκατάστασης σε Amperes.

-  $L_h$  το ανηγμένο όριο εκπομπών αρμονικών ρεύματος σε A/MVA το οποίο δίνεται στον επόμενο πίνακα.

- $S_k$  η ισχύς βραχυκυκλώσεως στο σημείο κοινής σύνδεσης και
- $\psi_k$  η γωνία της σύνθετης αντίστασης βραχυκυκλώσεως του δικτύου στο ΣΚΣ.

Τάξη $h$	Όριο αρμονικών του ρεύματος, $L_h$ (A/MVA)
5	2.6
7	1.6
11	1.0
13	0.7
17	0.4
19	0.25
23	0.2
25	0.18
$h$ άρτιος ή $h = 3 \cdot k$ ή $h > 25$	$1/h$

Πίνακας 2.10

Εάν οι παραπάνω προϋποθέσεις δεν ικανοποιούνται ή η ισχύς των εγκαταστάσεων οι οποίες προκαλούν αρμονική παραμόρφωση υπερβαίνει το 25% της ισχύος του τοπικού μετασχηματιστή διανομής, πρέπει να πραγματοποιείται ειδική εξέταση ώστε να εξασφαλίζεται ότι η προκαλούμενη αρμονική παραμόρφωση τάσης δεν υπερβαίνει τα τιθέμενα όρια. Για την εξέταση αυτή μπορούν να εφαρμόζονται προσεγγιστικοί υπολογισμοί. Σε ειδικές περιπτώσεις δικτύων όπου είναι αναγκαίοι οι ακριβείς υπολογισμοί, συνίσταται η εφαρμογή των αρχών των προτύπων IEC61000-2-6 και 61000-3-6 και η χρήση κατάλληλων προγραμμάτων αρμονικής ροής φορτίου.

#### Γ. Ενδιάμεσες και υψίσυχνες αρμονικές

Για τις εκπομπές ενδιάμεσων αρμονικών όπως επίσης και εκπομπές αρμονικών τάξης ανώτερης της τεσσαρακοστής, πρέπει να εξασφαλίζεται ότι η προκαλούμενη αρμονική παραμόρφωση του δικτύου είναι μικρότερη του 0.2% της ονομαστικής. Το όριο που τίθεται για τις άρτιες και υψηλής τάξης αρμονικές στον Πίνακα 2.10 γενικά επαρκεί αλλά είναι πολύ συντηρητικό για αρμονικές συχνότητας άνω των 2kHz.

#### **2.5.3.4 Επιπτώσεις σε συστήματα τηλεχειρισμών ακουστικής συχνότητας**

Για συστήματα τηλεχειρισμού ακουστικής συχνότητας (ΤΑΣ) της ΔΕΗ λειτουργούν στη συχνότητα των 175Hz και η τάση του συστήματος των ακουστικών παλμών κυμαίνεται κανονικά μεταξύ 1% έως 2% της ονομαστικής τάσης του δικτύου. Οι εγκαταστάσεις παραγωγών αλλά και καταναλωτών που συνδέονται στο δίκτυο είναι δυνατό να επηρεάζουν τη λειτουργία των συστημάτων ΤΑΣ κατά δύο τρόπους: είτε προκαλώντας αρμονική παραμόρφωση της τάσης στην ακουστική συχνότητα των 175Hz (η οποία υπερτίθεται αλλοιώνει το ακουστικό σήμα ελέγχου) είτε εξασθενώντας το σήμα ελέγχου (πχ. λόγω της χαμηλής σύνθετης αντίστασης των εγκαταστάσεων στη συχνότητα των 175Hz).



Οι απαιτήσεις οι οποίες πρέπει να πληρούνται κατά την σύνδεση των εγκαταστάσεων στο δίκτυο προκειμένου να μην παρενοχλείται η λειτουργία των ΤΑΣ είναι:

1. Η προκαλούμενη αρμονική παραμόρφωση της τάσης από τις συνδεόμενες εγκαταστάσεις σε συχνότητα παραπλήσια των 175Hz δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0.1% της ονομαστικής τάσης. Επίσης, σε παραμόρφωση της τάσης σε συχνότητες που απέχουν 100Hz εκατέρωθεν της ακουστικής συχνότητας δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0.3% της ονομαστικής τάσης.

2. Η εξασθένηση ή ενίσχυση του ακουστικού σήματος ελέγχου που προκαλείται από την σύνδεση των εγκαταστάσεων πρέπει να περιορίζεται έτσι ώστε το σήμα να διατηρείται μεταξύ του 85% και του 150% της κανονικής του τιμής.

Σε περίπτωση σύνδεσης περισσότερων εγκαταστάσεων, οι παραπάνω προϋποθέσεις αφορούν τη συνολική επίδραση όλων των εγκαταστάσεων.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

## ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ DER

### 3.1 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ

#### 3.1.1 Η ηλιακή ακτινοβολία

##### 3.1.1.1 Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

Η ηλεκτρομαγνητική (ΗΜ) ακτινοβολία αποτελεί διαδιδόμενη διαταραχή συνδυασμένου ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου. Εκπέμπεται από τους δομικούς λίθους της ύλης (άτομα, μόρια και ιόντα) και η εκπομπή της οφείλεται στη θερμοκρασία των σωμάτων και τις ηλεκτρονικές αποδιεγέρσεις διεγερμένων δομικών λίθων, που προκαλούνται από άλλη αιτία, εκτός της θερμοκρασίας.

Χαρακτηριστικά μεγέθη της ΗΜ ακτινοβολίας είναι:

#### 1. Ισχύς ή ροή ακτινοβολίας

P (Radiant Power ή Radiant Flux)

Ορίζεται ως το πηλίκο της ακτινοβολούμενης, σε χρόνο dt, ενέργειας dU, μέσα σε στερεά γωνία

$$d\Omega. \text{ Δηλαδή: } P = \frac{dU}{dt}$$

Η μονάδα μέτρησης της ισχύος ακτινοβολίας, στο SI, είναι το 1 W.

#### 2. Πυκνότητα ισχύος ΗΜ ακτινοβολίας

E (Irradiance, Emittance)

Το μέγεθος αυτό καθορίζεται από τη συνολική και από των διάφορων κατευθύνσεων ροή ακτινοβολίας, που εκπέμπεται από μία επιφάνεια ή προσπίπτει σε μία επιφάνεια ή διαπερνά τη μονάδα της επιφάνειας, ανεξάρτητα από τη γωνία των ακτινών ως προς την επιφάνεια αυτή.

Προσδιορίζεται από τη σχέση:  $E = \frac{dP}{dS}$ , όπου dS είναι η στοιχειώδης επιφάνεια, μέσα από την

οποία διέρχεται ή πάνω στην οποία προσπίπτει ή από την οποία εκπέμπεται η στοιχειώδης ισχύς ακτινοβολίας dP.

Η μονάδα μέτρησής της είναι το 1 W / m<sup>2</sup>.

#### 3. Ένταση ακτινοβολίας, J

Ως ένταση ακτινοβολίας ονομάζουμε την ισχύ που διαπερνά κάθετα την μονάδα επιφάνειας,

τοποθετημένη στη θέση προσδιορισμού και δίνεται από τη σχέση:  $J = \frac{dP}{dS_{\perp}}$  όπου dP η στοιχειώδης

ισχύς ακτινοβολίας, η οποία διαπερνά κάθετα τη στοιχειώδη επιφάνεια  $dS_{\perp}$ .

Μονάδα της έντασης ακτινοβολίας, είναι το  $1 \text{ W} / \text{m}^2$ .

#### 4. Γωνιακή κατανομή ροής ή ισχύος ΗΜ ακτινοβολίας

I (Radiant Intensity)

Καθορίζει το ποσό της ροής ακτινοβολίας  $dP$  ανά μονάδα στερεάς γωνίας και υπολογίζεται από τη

$$\text{σχέση: } I = \frac{dP}{d\Omega}$$

Η μονάδα μέτρησής της είναι το  $1 \text{ W} / \text{sr}$ , όπου το  $1 \text{ sr}$  είναι η μονάδα μέτρησης της στερεάς γωνίας.

#### 5. Γωνιακή αφετική ικανότητα

L (Radiance)

Το μέγεθος αυτό αφορά είτε την εκπομπή ακτινοβολίας από την επιφάνεια είτε τη δίοδο της ακτινοβολίας από επιφάνεια και ιδιαίτερα αναφέρεται σε εκτεταμένες πηγές ΗΜ ακτινοβολίας.

Ορίζεται ως η ισχύς ακτινοβολίας,  $dP$  ανά μονάδα φαινόμενης επιφάνειας και ανά μονάδα στερεάς γωνίας:

$$L = \frac{d^2P}{dS_{\perp} \cdot d\Omega} = \frac{d^2P}{dS \cdot \cos\theta \cdot d\Omega}$$

όπου  $dS_{\perp}$  (φαινόμενη επιφάνεια) η προβολή της στοιχειώδους επιφάνειας της πηγής  $dS$  σε επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση παρατήρησης ή μέτρησης της διαδιδόμενης ροής και  $\theta$  η γωνία της κατεύθυνσης παρατήρησης και της καθέτου στην επιφάνεια της πηγής .

Η μονάδα μέτρησής της είναι το  $1 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$ .

#### 6. Νόμος διάδοσης της έντασης της ακτινοβολίας από σημειακή πηγή και εξάρτηση της πυκνότητας από τη γωνία πρόσπτωσης σε επιφάνεια.

Ας θεωρήσουμε μια πηγή ακτινοβολίας,  $\Pi$ , η οποία ακτινοβολεί με ισχύ  $P$ , ισότροπα προς όλες τις κατευθύνσεις. Θέλουμε να εξάγουμε σχέση αναλυτικής έκφρασης της εξάρτησης της πυκνότητας ισχύος  $E(r,\theta)$ , από την απόσταση  $r$  του σημείου μέτρησης από την πηγή, καθώς επίσης και την επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης,  $\theta$  των ακτινών σε δεδομένη επιφάνεια. Η  $E(r,\theta)$  ισούται με το πηλίκο της ροής  $dP$  που περιέχεται στη στερεά γωνία  $d\Omega$ , δια της επιφάνειας  $dS$  πάνω στην οποία προσπίπτει.

Για την πυκνότητα ισχύος πάνω στην επιφάνεια προκύπτει:

Εξάρτηση από τη γωνία πρόσπτωσης:

$$E(r,\theta) = \frac{dP}{dS} = \frac{dP}{dS_{\wedge}} \times \frac{dS_{\wedge}}{dS} \Rightarrow E(r,\theta) = E(r,0) \cdot \cos\theta \quad \text{Νόμος Lambert}$$

Εξάρτηση από την απόσταση :

$$E(r, 0) = \frac{dP}{dS_{\wedge}} = \frac{dP}{d\Omega} \times \frac{d\Omega}{dS_{\wedge}} = I \times \frac{dS_{\wedge}}{r^2} \times \frac{1}{dS_{\wedge}} \Rightarrow E(r, 0) = \frac{I}{r^2}$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει η γενικότερη σχέση:

$$E(r, \theta) = \frac{I \times \cos\theta}{r^2}$$

Η τελευταία σχέση δίδει την αναλυτική εξάρτηση της πυκνότητας ισχύος σε σημείο που απέχει απόσταση  $r$  από τη σημειακή πηγή φωτοβολίας  $I$  και από την γωνία  $\theta$  με την οποία προσπίπτουν οι ακτίνες στην επιφάνεια.

### 3.1.1.2 Η ηλιακή σταθερά

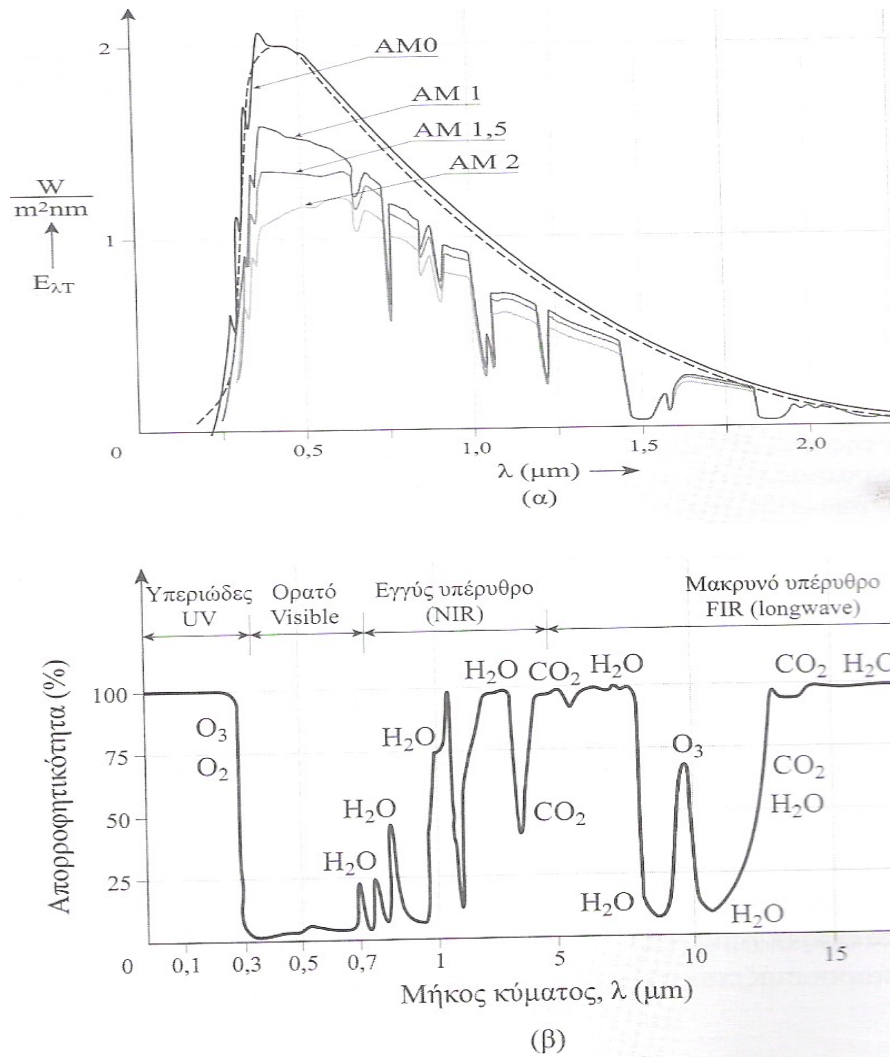
Η ένταση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στη μέση απόσταση πλανήτη-ήλιου ενός ηλιακού συστήματος ονομάζεται Ηλιακή Σταθερά του συγκεκριμένου πλανήτη. Στην περίπτωση του ηλιακού μας συστήματος, η ηλιακή σταθερά για τη γη ορίζεται σε απόσταση 1 AU από τον ήλιο. Το 1970 προτάθηκε ως πρότυπη τιμή της ηλιακής σταθεράς, η  $(1353 \pm 21) \text{ W/m}^2$  (Thekaekara et al). Μεταγενέστερες, περισσότερο ακριβείς, μετρήσεις από δορυφόρους έδωσαν τιμές για την ηλιακή σταθερά στην περιοχή  $1363\text{-}1375 \text{ W/m}^2$ . Η μέση τιμή τους,  $J_0=1367 \text{ W/m}^2$ , χρησιμοποιείται πλέον διεθνώς ως πρότυπη τιμή της ηλιακής σταθεράς για τη γη.

Η μετρούμενη τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ γης και ήλιου, η οποία αλλάζει κατά τη διάρκεια του έτους. Εξαρτάται επίσης από την περιοδική εμφάνιση των ηλιακών κηλίδων (ενδεκαετής κύκλος) και από την περιστροφή του ήλιου γύρω από τον άξονά του, η οποία προκαλεί περιοδική απόκρυψη των κηλίδων. Η ηλιακή σταθερά αυξάνει καθώς αυξάνει η ηλικία του ηλιακού μας συστήματος. Έχει παρατηρηθεί ελάττωση της ακτίνας του ήλιου, που έχει ως συνέπεια την αύξηση της θερμοκρασίας του.

Το φάσμα του ηλιακού φωτός στα όρια της ατμόσφαιρας χαρακτηρίζεται με τη συντεταγμένη έκφραση AM0 (Air Mass 0) [51].

### 3.1.1.3 Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας

Το φάσμα του ηλιακού φωτός φαίνεται στο Σχήμα 3.1 που ακολουθεί:



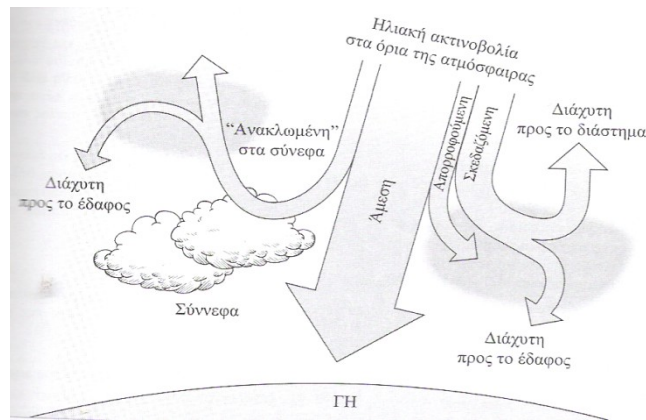
Σχήμα 3.1 (α) Φάσματα και (β) Φάσμα απορρόφησης των διαφόρων αερίων

Η διακεκομμένη γραμμή (Σχήμα 3.1.α), περιγράφει το φάσμα μέλανος σώματος θερμοκρασίας  $T=5800K$  με το οποίο προσεγγίζεται καλύτερα το φάσμα AM0, ενώ το Σχήμα 3.1.β περιγράφει το φάσμα απορρόφησης των διαφόρων αερίων της ατμόσφαιρας, στην περιοχή  $0.1 \mu m$  έως  $20 \mu m$ .

#### 3.1.1.4 Ολική, απευθείας, διάχυτη και διάχυτα ανακλώμενη ακτινοβολία

Σε κάθε τόπο της επιφάνεια της γης φτάνουν δύο συνιστώσες του ηλιακού φωτός: η απευθείας ή άμεση B (Beam) και η σκεδαζόμενη από τα μόρια του αέρα, η οποία ονομάζεται διάχυτη, D (Diffuse). Γενικά, η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε ένα συλλέκτη ή ένα αισθητήρα αποτελείται από την απευθείας, τη διάχυτη και τη διάχυτα ανακλώμενη από το έδαφος. Η συνολική αυτή ακτινοβολία αναφέρεται ως ολική ακτινοβολία σε κεκλιμένο ή οριζόντιο συλλέκτη και θα τη

συμβολίζουμε με  $G$  (Global Irradiation). Στο Σχήμα 3.2 φαίνονται τα είδη της ηλιακής ακτινοβολίας.



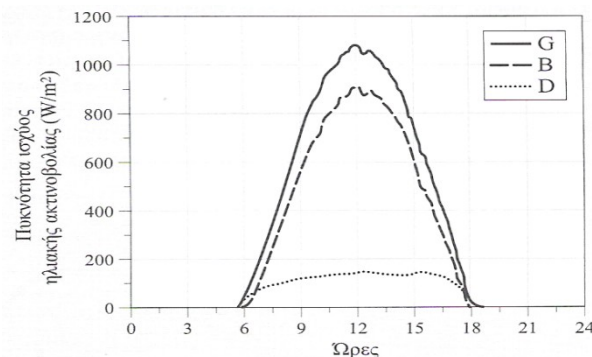
Σχήμα 3.2 Το ηλιακό φως που φτάνει στην επιφάνεια της γης

Μεταξύ της ολικής οριζόντιας ακτινοβολίας,  $G$ , που προσπίπτει σε συλλεκτική επιφάνεια ή που μετρείται σε αισθητήρα, της κάθετης ακτινοβολίας,  $B$ , και της διάχυτης  $D$ , ισχύει η σχέση:

$$G = B + D = B_n \cdot \sigma \nu z + D$$

όπου  $z$ , η ζενίθια γωνία του ήλιου.

Κατά την ανατολή του ήλιου, η ζενίθια γωνία είναι  $z=90^\circ$  και άρα η ολική οριζόντια πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας  $G$  καθορίζεται, κυρίως, από τη διάχυτη συνιστώσα,  $D$ . Καθώς το ύψος του ήλιου αυξάνει μέσα σε μία αίθρια ημέρα η απευθείας κάθετη ακτινοβολία, αυξάνει μέχρι το ηλιακό μεσημέρι, μετά το οποίο ελαττώνεται κατά συμμετρικό τρόπο όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.

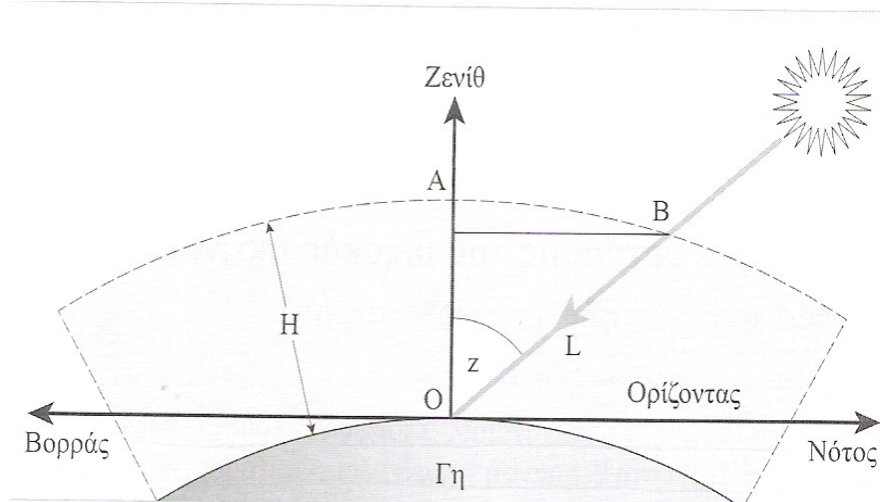


Σχήμα 3.3 Ημερήσια μεταβολή της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας

Η πυκνότητα ισχύος της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, κάθετα στην επιφάνεια συλλογής, που αντιστοιχεί σε AM1 (Air Mass 1), έχει τυπική τιμή  $\sim 950 \text{ W/m}^2$ . Η AM1 μπορεί να μετρηθεί σε τόπους με γ.π. μεταξύ των τιμών  $-23,5^\circ$  και  $23,5^\circ$ , διότι μόνο σ' αυτούς οι ηλιακές ακτίνες μπορούν να διαπεράσουν κάθετα την ατμόσφαιρα δύο φορές μέσα στο έτος. Καθώς το ύψος (EL, Elevation) του ήλιου, δηλαδή η γωνία των ακτινών του σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο του τόπου, αλλάζει, οι ακτίνες του διανύουν διαφορετικό μήκος μέσα στην ατμόσφαιρα.

Ο λόγος  $m=L/H$  του μήκους της διαδρομής των ηλιακών ακτινών μέσα στην ατμόσφαιρα σε σχέση με το πάχος της ατμόσφαιρας προσδιορίζει τον αριθμό που τίθεται μετά τα ακρωνύμια A, M. Καθορίζει ουσιαστικά την ελάττωση της έντασης του φωτός που προκαλείται από τον μεγαλύτερο δρόμο που διανύουν σ' αυτή την περίπτωση οι ακτίνες του ήλιου μέσα στην ατμόσφαιρα. Όπως είναι φανερό, ο λόγος  $m$  εξαρτάται από τη ζενίθια γωνία  $z$  μεταξύ των ηλιακών ακτινών και της διεύθυνσης του Ζενίθ του τόπου (βλ. Σχήμα 3.4) [51]. Με καλή σχετικά προσέγγιση, για μικρές ζενίθιες γωνίες ( $z < 60^\circ$ ), μπορούμε να υπολογίσουμε το λόγο  $m$  από τη σχέση:

$$m\left(=\frac{L}{H}\right)=\tau_{\text{αμ}}z\left(=\frac{1}{\cos z}\right)$$

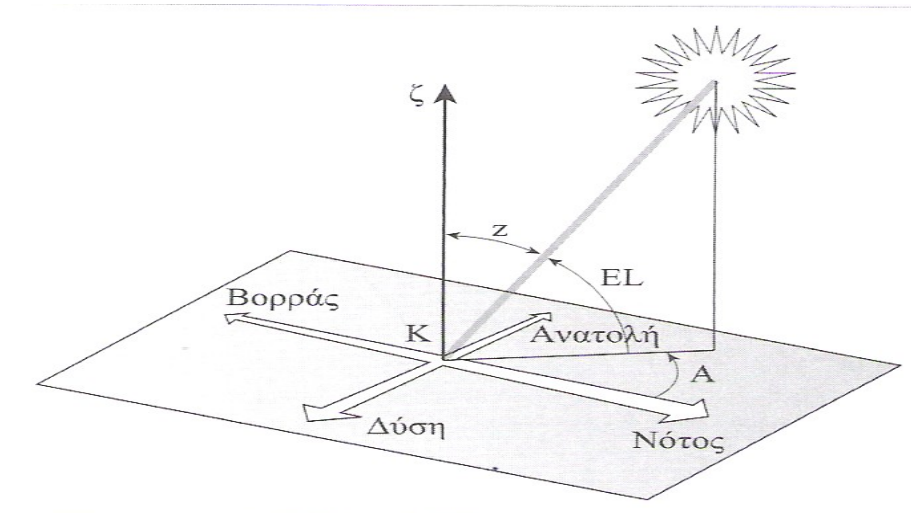


Σχήμα 3.4 Οι ηλιακές ακτίνες μέσα στην ατμόσφαιρα, πάχους  $H$

Για γωνία πρόσπτωσης των ακτινών ίση με  $48,19^\circ$  το φάσμα λέγεται AM1,5 και η αντίστοιχη πυκνότητα ισχύος της ολικής οριζόντιας ακτινοβολίας έχει τιμή περίπου  $830 \text{ W/m}^2$ . Για γωνία  $\theta = 60^\circ$  το φάσμα της καταγραφόμενης ηλιακής ακτινοβολίας είναι διαφορετικό απ' ότι για τη  $z = 48,19^\circ$ , αναφέρεται ως AM2 και η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας είναι περίπου  $\sim 700 \text{ W/m}^2$ . Η τιμή της ηλιακής σταθεράς αντιστοιχεί σε μηδενική μάζα αέρα (AM0), δηλαδή στα όρια της ατμόσφαιρας, όπου η πυκνότητα ισχύος της ολικής κάθετης ηλιακής ακτινοβολίας έχει την τιμή της ηλιακής σταθεράς,  $1367 \text{ W/m}^2$ .

### 3.1.1.5 Η κίνηση της γης γύρω από τον ήλιο

Η θέση του ήλιου στον ουράνιο θόλο μια δεδομένη στιγμή μπορεί να καθοριστεί ως προς το σύστημα του τοπικού παρατηρητή με βάση δύο συντεταγμένες γωνίες, που δείχνονται στο Σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5 Προσδιορισμός της θέσης του ήλιου στο σύστημα του τοπικού παρατηρητή

Οι γωνίες αυτές είναι το ύψος (Elevation) του ήλιου (EL), που είναι η γωνία μεταξύ της ευθείας από τον παρατηρητή ή τον τόπο προς τον ήλιο με το οριζόντιο επίπεδο, και το αζιμούθιο ή η αζιμουθιακή γωνία του ήλιου, που αφορά στην αντίστοιχη γωνία μεταξύ του κατακόρυφου επιπέδου που περιέχει τον ήλιο και του γεωγραφικού μεσημβρινού και συμβολίζεται συνήθως με A. Στα Φ/Β συστήματα, συνηθίζεται η αναφορά του αζιμούθιου του ήλιου, ως προς την κατεύθυνση του νότου, ανατολικά από 0-180° και δυτικά από 0=(-180°). Όπως γίνεται αντιληπτό, το άθροισμα των αζιμουθιακών γωνιών, ως προς τις κατευθύνσεις αναφοράς βορρά και νότου, είναι 180°. Αυτό εξηγεί την προσήμανση της αζιμουθιακής γωνίας ως προς τον νότο. Το ύψος και το αζιμούθιο του ήλιου προσδιορίζονται από τις επόμενες σχέσεις:

$$\eta\mu EL = \eta\mu\lambda \cdot \eta\mu\delta + \sigma\upsilon\nu\lambda \cdot \sigma\upsilon\nu\delta \cdot \sigma\upsilon\nu\omega$$

$$\eta\mu A = -\frac{\sigma\upsilon\nu\delta \cdot \eta\mu\omega}{\sigma\upsilon\nu EL}$$

όπου  $\lambda$  : το γ.π. του τόπου

$\delta$  : η απόκλιση του ήλιου τη δεδομένη ημέρα και

$\omega$  : η ωριαία γωνία του ήλιου τη χρονική στιγμή  $t_A$  (ηλιακός χρόνος), όταν το ύψος και το αζιμούθιο του είναι EL και A. Προσδιορίζεται από τη σχέση :

$$\omega = \frac{12 - t_A}{24} \cdot 360$$

Η γωνία που σχηματίζουν οι ακτίνες του ήλιου κατά τη μεσουράνησή του κάθε μέρα με το επίπεδο του ισημερινού ονομάζεται απόκλιση (Declination) του ήλιου την συγκεκριμένη μέρα και συμβολίζεται συνήθως με  $\delta$  [25]. Μεταβάλλεται ημιτονικά, μεταξύ των τιμών -23,5° και 23,5° με τον χρόνο, εκφρασμένο σε αριθμό ημερών κατά τη διάρκεια του έτους. Συγκεκριμένα, το  $\delta$  δίνεται από τη σχέση:



$$\delta = 23,45^0 \cdot \eta\mu\left(2\pi \frac{284+n}{365}\right) = 23,45^0 \cdot \eta\mu\left(2\pi \frac{n-81}{365}\right)$$

όπου n η μέρα του έτους, με n=1 την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου και n = 365 την 31<sup>η</sup> Δεκεμβρίου.

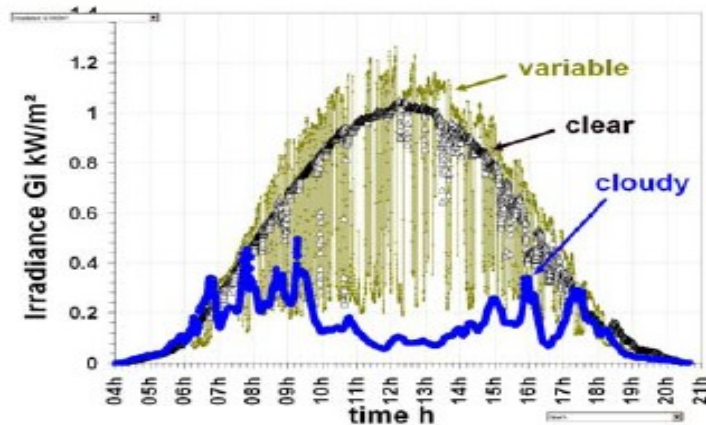
### 3.1.1.6 Ημερήσια ενεργειακή απολαβή

Η ενέργεια ανά m<sup>2</sup> που φτάνει στην επιφάνεια της γης μέσα σε μία μέρα εξαρτάται από την κλίση της συλλεκτικής επίπεδης επιφάνειας, το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, τη μέρα του χρόνου και από τις συγκεντρώσεις των διαφόρων αερίων, υγρών και στερεών συστατικών και αιωρημάτων της ατμόσφαιρας κατά την ημέρα εκείνη.

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μέσες ημερήσιες τιμές της πυκνότητας ισχύος και της πυκνότητας ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας, σε οριζόντια επιφάνεια, μέσα σε κάθε μήνα και μέσα στο έτος. Για να αξιοποιηθούν αυτά τα μετεωρολογικά στοιχεία σε πρακτικές εφαρμογές απαιτούνται μετρήσεις που να καλύπτουν περίοδο πολλών ετών. Σε περιπτώσεις που λείπουν στοιχεία μακράς περιόδου για κάποιο τόπο, μπορούν να αξιοποιούνται στοιχεία που έχουν συλλεχθεί σε μικρότερες χρονικές περιόδους, με την επιφύλαξη της μικρότερης αξιοπιστίας τους.

Τυπικές μορφές εξέλιξης μέσα στην ημέρα της πυκνότητας ισχύος της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο (G(W/m<sup>2</sup>)) απεικονίζονται στο Σχήμα 3.6. Σημειώνεται πάντως ότι κατά τη διάρκεια μερικής παρουσίας σύννεφων γύρω από την κατεύθυνση του ήλιου μπορεί να παρατηρηθούν τιμές της πυκνότητας ισχύος μεγαλύτερες των τιμών που θα καταγράφονταν χωρίς την παρουσία τους. Το παράξενο αυτό φαινόμενο οφείλεται στο ότι με την παρουσία συστάδων από σύννεφα, που δεν καλύπτουν τον ήλιο, πέφτουν στον αισθητήρα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός από τις απευθείας και διάχυτες ηλιακές ακτίνες, που αφορούν σε μία ηλιοφανή μέρα, και οι σχετικά ισχυρά σκεδαζόμενες στα σύννεφα.

Τα ολοκληρώματα κάτω από τις καμπύλες του σχήματος ισούνται με την αντίστοιχη ημερήσια ενέργεια που προσφέρει ο ήλιος στο συλλέκτη ανά μονάδα επιφάνειας. Η ημερήσια μέση πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας τη συγκεκριμένη ημέρα προκύπτει διαιρώντας το αντίστοιχο ολοκλήρωμα H δια των 24 h (G = H/T, όπου T=24 h). Η μέση τιμή της πυκνότητας ισχύος αντιπροσωπεύει την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας με την οποία αν ο τόπος φωτιζόταν όλο το εικοσιτετράωρο, η συνολική πυκνότητα ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας θα ήταν ίση με την πραγματικά αποδοθείσα κατά την συγκεκριμένη μέρα. Αποτελεί τυπικό συγκριτικό στοιχείο ηλιακής ακτινοβολίας για διαφορετικούς τόπους.



Σχήμα 3.6 Πυκνότητα Ισχύος καταγεγραμμένη, για δύο χαρακτηριστικές ημέρες

### 3.1.1.7 Ηλιοφάνεια

Εκτός από τη μέση ημερήσια ενέργεια από τον ήλιο σε μηνιαία και ετήσια βάση, σε οριζόντιο επίπεδο, χαρακτηριστικό στοιχείο μιας περιοχής είναι η ηλιοφάνεια της. Αυτή εξαρτάται βεβαίως από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου και από την θέση και την διαμόρφωση της περιοχής. Τα χαρακτηριστικά αυτά πιθανόν να εννοούν την ανάπτυξη νεφώσεων, με αποτέλεσμα την μείωση των ηλιόλουστων ημερών. Η ηλιοφάνεια εκφράζεται σε πλήθος ωρών ανά μήνα και ανά έτος, κατά τις οποίες ο ήλιος είναι ορατός στον ουρανό.

### 3.1.1.8 Εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας

Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας γίνεται κατά διάφορους τρόπους, που διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα συστήματα που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε εσωτερική ενέργεια δομικών καταστάσεων (Παθητικά ηλιακά συστήματα) και στη δεύτερη αυτά που προκαλούν μετατροπή της σε άλλης μορφής ενέργεια ή χρησιμοποιείται θερμικό ρευστό σε κίνηση (Ενεργά ηλιακά συστήματα). Στα ενεργά ηλιακά συστήματα συγκαταλέγονται αυτά που μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε εσωτερική ενέργεια θερμικού ρευστού (Θερμοσιφωνικά συστήματα) και αυτά που μετατρέπουν το ηλιακό φως απευθείας σε ηλεκτρισμό (Φωτοβολταϊκά συστήματα).

Στα θερμοσιφωνικά συστήματα περιλαμβάνονται τα κοινής χρήσεως θερμοσιφωνικά συστήματα, δηλαδή οι ευρέως χρησιμοποιούμενοι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες και οι λιγότερο διαδεδομένοι (τουλάχιστον στη χώρα μας) παραβολικοί ηλιακοί συλλέκτες. Μεγάλες εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που χρησιμοποιούν την ηλιακή ακτινοβολία προκειμένου να θερμάνουν το θερμικό ρευστό μιας θερμικής μηχανής, είναι τα ηλιακά θερμικά εργοστάσια [25].

Ένας διαφορετικός τρόπος εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας, ο οποίος αναπτύχθηκε μέσα στο δεύτερο ήμισυ του 20<sup>ο</sup> αιώνα, είναι η μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια με χρήση των φωτοβολταϊκών στοιχείων (photovoltaic cells).

### 3.1.1.9 Δυνατότητα αξιοποίησης της Φ/Β ενέργειας

Παρά τη γενικότερη αποδοχή της φωτοβολταϊκής ενέργειας ως εξαιρετικά φιλικής προς το περιβάλλον, υπάρχει αμφισβήτηση ως προς τη δυνατότητα αξιοποίησής της σε εφαρμογές που απαιτούν σημαντική ισχύ. Για την αντιμετώπιση της μειωμένης απόδοσης κατά τη διάρκεια συννεφιάς για μία ή περισσότερες μέρες επιλέγονται γενικά λύσεις που βασίζονται είτε σε χρησιμοποίηση συσσωρευτών μεγαλύτερης χωρητικότητας σε συνδυασμό με ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος, είτε υβριδικά συστήματα φωτοβολταϊκών – ανεμογεννήτριας με ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος.

Η μέση ημερήσια κατανάλωση ενός τυπικού ελληνικού σπιτιού ανέρχεται σε περίπου 15 kWh, από τις οποίες οι 7 kWh αφορούν στη λειτουργία του φούρνου της ηλεκτρικής κουζίνας. Η κατανάλωση αυτή μπορεί κάλλιστα να εξασφαλιστεί οικονομικότερα και με συνέπεια προς την εξευγενισμένη παραγωγή της φωτοβολταϊκής ενέργειας με χρήση φωταερίου, υγραερίου, φυσικού αερίου. Απομένουν 8 kWh για την κάλυψη των υπόλοιπων απαιτήσεων. Άρα μία συλλεκτική επιφάνεια φωτοβολταϊκών στοιχείων, περίπου ~20 m<sup>2</sup>, εξασφαλίζει την απαιτούμενη ημερήσια ηλεκτρική ενέργεια ενός τυπικού νοικοκυριού. Συμπερασματικά, η ημερήσια απολαβή από την απευθείας μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό φαίνεται να καλύπτει σχεδόν στο σύνολό τους τις αντίστοιχες απαιτήσεις οικιακής χρήσης ενέργειας, με εξαίρεση τις ενεργοβόρες καταναλώσεις.

Εξετάζοντας το θέμα από οικονομικής πλευράς, η δαπάνη παραγωγής 1 kWh από Φ/Β σύστημα βρίσκεται προς το παρόν σε υψηλά επίπεδα σε σύγκριση με την αντίστοιχη δαπάνη παραγωγής 1 kWh συμβατικής ηλεκτρικής ενέργειας. Η εκ του προχείρου, όμως, σύγκριση του κόστους παραγωγής φωτοβολταϊκής και συμβατικής ηλεκτρικής ενέργειας αποκρύπτει την πραγματική κατάσταση. Σύμφωνα μ' αυτήν, το ήδη επιβαρημένο περιβάλλον καθώς και η δυσοίωνα προοπτική για την εξέλιξη των κλιματικών συνθηκών έχουν τη ρίζα τους στην καταχρηστική εκμετάλλευση των συμβατικών καυσίμων. Ο καταλογισμός της πάσης φύσεως επιδράσεων στον πλανήτη μας από τη χρήση των συμβατικών καυσίμων, εκφρασμένος σε κόστος δαπανών υγείας και γενικότερης δαπάνης περιορισμού της περιβαλλοντικής υποβάθμισης, ανεβάζουν το πραγματικό κόστος της συμβατικής κιλοβατώρας, σύμφωνα με σχετικές μελέτες, μέχρι και 70% επιπλέον της τρέχουσας τιμής της.

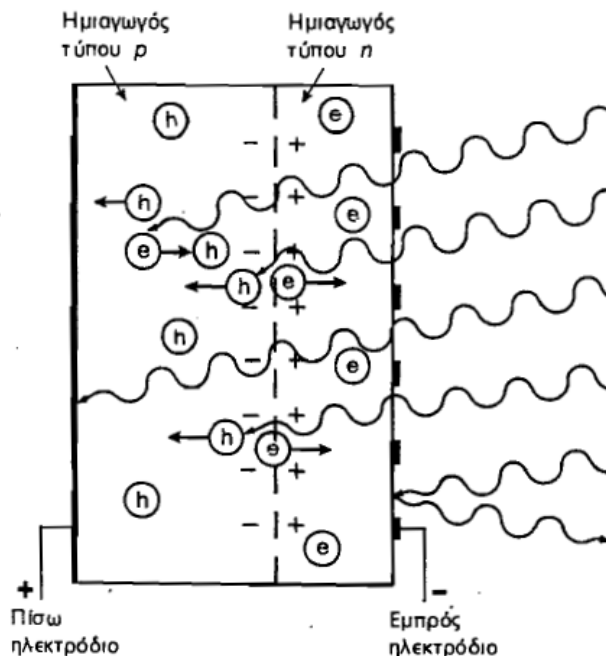
Τα παραπάνω ενισχύουν την άποψη ότι η εκμετάλλευση των δυνατοτήτων της ηλιακής ενέργειας είναι επαρκής για να καλύψει τμήμα των σημερινών ενεργειακών αναγκών. Φαίνεται ικανή να συμβάλλει ρεαλιστικά στην αντικατάσταση μέρους της ήδη χρησιμοποιούμενης ενέργειας από συμβατικά καύσιμα και βέβαια να αποτελέσει βασική συνιστώσα για τις μελλοντικές ενεργειακές ανάγκες μας. Ταυτόχρονα αποτελεί την περισσότερο οικολογική λύση στο οξυμένο ενεργειακό πρόβλημα, προκειμένου να αντιμετωπιστεί η συνεχώς αυξανόμενη ρύπανση του περιβάλλοντος από την καύση του πετρελαίου και των παραγωγών του [51].

### 3.1.2 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Τα ηλιακά στοιχεία είναι δίοδοι ημιαγωγού με την μορφή ενός δίσκου (δηλαδή η ένωση p-n εκτείνεται σε όλο το πλάτος του δίσκου) που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία. Κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει την δυνατότητα να απορροφηθεί σε εάν χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Δημιουργείται έτσι όσο διαρκεί η ακτινοβολία μία περίσσεια από ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές) πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας. Οι φορείς αυτοί καθώς κυκλοφορούν στο στερεό και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου πρόσημου, μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης p-n οπότε θα δεχτούν την επίδραση του ενσωματωμένου της ηλεκτροστατικού πεδίου.

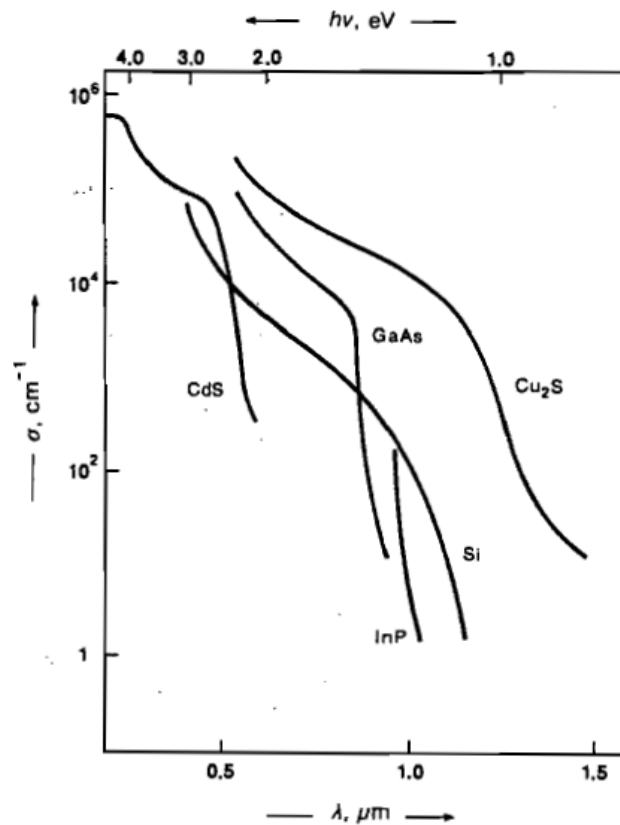
Έτσι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μία διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Δηλαδή, η διάταξη αποτελεί μία πηγή ηλεκτρικού ρεύματος που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση του ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου.

Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η αποδοτική λειτουργία των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται στην πρακτική εκμετάλλευση του παραπάνω φαινομένου. Εκτός από τις προσμίξεις των τμημάτων p και n μίας ομοένωσης, δηλαδή υλικού από τον ίδιο βασικά ημιαγωγό, το ενσωματωμένο ηλεκτροστατικό πεδίο, που είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την πραγματοποίηση ενός ηλιακού στοιχείου αλλά και κάθε φωτοβολταϊκής διάταξης μπορεί να προέρχεται επίσης και από διόδους άλλων ειδών, πχ. από διόδους ετεροενώσεων p-n διαφορετικών ημιαγωγών ή από διόδους Schottky που σχηματίζονται όταν έρθουν σε επαφή ένας ημιαγωγός με ένα μέταλλο.



Σχήμα 3.7

Στα φωτοβολταϊκά στοιχεία δεν είναι δυνατή η μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια του συνόλου της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται στην επιφάνειά τους. Ένα μέρος από την ακτινοβολία ανακλάται πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου και διαχέεται πάλι προς το περιβάλλον. Στην συνέχεια από την ακτινοβολία που διεισδύει στον ημιαγωγό, προφανώς δεν μπορεί να απορροφηθεί το μέρος εκείνο που αποτελείται από φωτόνια με ενέργεια μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού. Για τα φωτόνια αυτά ο ημιαγωγός συμπεριφέρεται σαν διαφανές σώμα. Έτσι η αντίστοιχη ακτινοβολία διαπερνά άθικτη το ημιαγωγικό υλικό του στοιχείου και απορροφάται τελικά στο μεταλλικό ηλεκτρόδιο που καλύπτει την πίσω όψη του με αποτέλεσμα να το θερμαίνει. Αλλά και από τα φωτόνια που απορροφά ο ημιαγωγός, μόνο το μέρος εκείνο της ενέργειάς τους που ισούται με το ενεργειακό διάκενο συμβάλλει στην εκδήλωση του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Το υπόλοιπο μεταφέρεται σαν κινητική ενέργεια στο ηλεκτρόνιο που ελευθερώθηκε από τον δεσμό και τελικά μετατρέπεται επίσης σε θερμότητα. Στο παρακάτω σχήμα, φαίνεται η μεταβολή του συντελεστή απορρόφησης σε συνάρτηση με το μήκος κύματος ή την ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας για τους κυριότερους ημιαγωγούς των φωτοβολταϊκών διατάξεων [51].



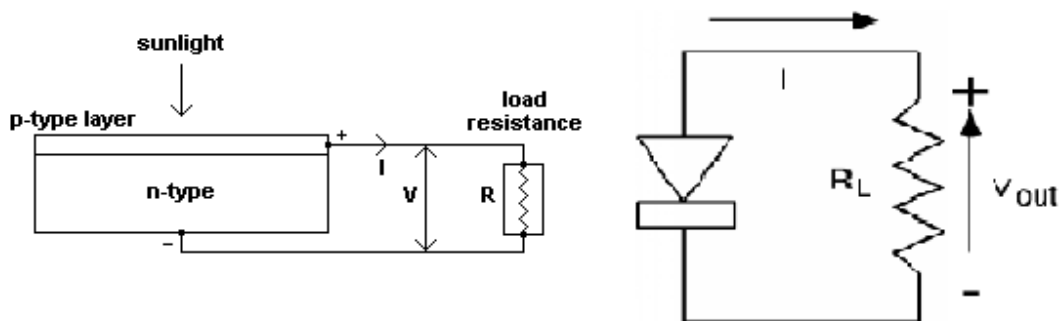
Σχήμα 3.8

Όταν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο δέχεται κατάλληλη ακτινοβολία διεγείρεται παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα, το φωτόρευμα, που η τιμή του θα είναι ανάλογη προς τα φωτόνια που απορροφά το στοιχείο. Το φωτόρευμα υπολογίζεται από τον τύπο  $I_{\phi} = e \cdot g \cdot (L_n + L_p)$ , όπου  $e$  το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο,  $g$  ο ρυθμός δημιουργίας ζευγών οπών και ηλεκτρονίων από τα φωτόνια της ακτινοβολίας (δηλαδή πλήθος ζευγών οπών- ηλεκτρονίων ανά μονάδα χρόνου και μονάδα όγκου του ημιαγωγού), και  $L_n, L_p$  τα μέσα μήκη διάχυσης των ηλεκτρονίων και των οπών αντίστοιχα.

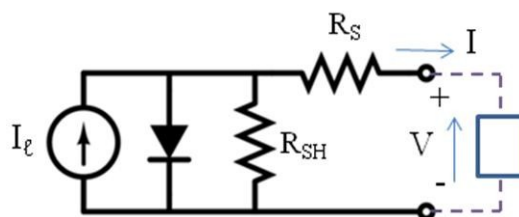
### 3.1.3 Η φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια

#### 3.1.3.1 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός Φ/Β στοιχείου

Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός Φ/Β στοιχείου δίνεται στο Σχήμα 3.9 (απλό) και στο Σχήμα 3.10 (πλήρες ισοδύναμο). Περιλαμβάνει μια πηγή σταθερού ρεύματος ( $I_L$ ) σε συνδυασμό με μια ιδανική δίοδο. Στη συνέχεια τοποθετείται το μη ιδανικό τμήμα του Φ/Β στοιχείου, το οποίο περιλαμβάνει αφενός την αντίσταση απωλειών διαρροής του ρεύματος μεταξύ των άκρων του Φ/Β στοιχείου, η οποία τίθεται παράλληλα συνδεδεμένη στα άκρα της διόδου, αφετέρου την αντίσταση απωλειών στο δρόμο ροής του ρεύματος της διόδου, που αντιπροσωπεύεται από αντίσταση συνδεδεμένη σε σειρά με τη δίοδο.



Σχήμα 3.9 Απλό ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός Φ/Β στοιχείου



Σχήμα 3.10 Πλήρες ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός Φ/Β στοιχείου

- Παράλληλα συνδεδεμένη αντίσταση διαρροής,  $R_{sh}$  (Shunt resistance)

Η αντίσταση αυτή συνδέεται με τη διαρροή ρεύματος μεταξύ των άκρων της επαφής p-n. Αφορά διαδρομές ρεύματος διαρροής στο εσωτερικό της επαφής p-n, μεταξύ σημείων που βρίσκονται σε διαφορά δυναμικού ίση με την τάση στα άκρα της διόδου. Η τιμή της σε πολύ καλής απόδοσης Φ/Β στοιχείων είναι μεγαλύτερη των  $10^3 \Omega$ .

- Σειριακή αντίσταση,  $R_s$  (Series resistance)

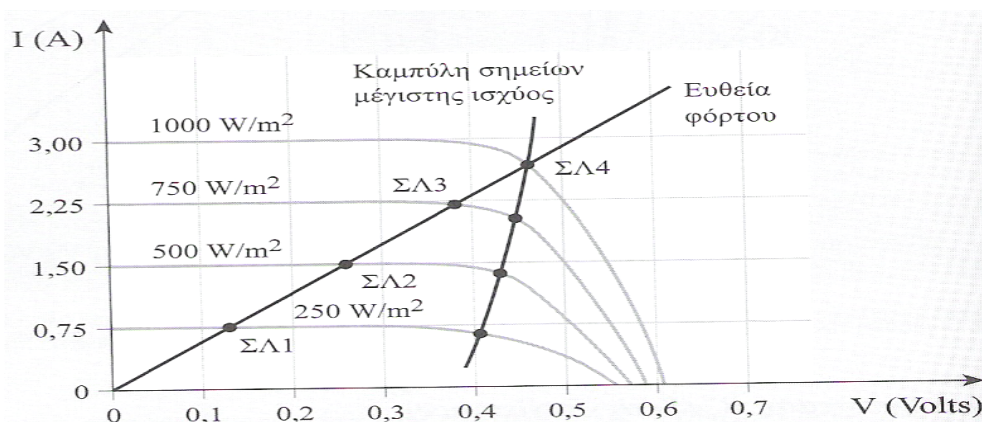
Η συγκεκριμένη αντίσταση αφορά στην αντίσταση που παρουσιάζει η επαφή κατά τη διόδο του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από το σώμα της διόδου και στις ωμικές αντιστάσεις των σημείων πρόσφυσης των ηλεκτροδίων της επαφής καθώς και κατά μήκος των μεταλλικών κλάδων τους. Άμεσο αποτέλεσμα της αύξησης της  $R_s$  είναι η δραστική ελάττωση της αντίστοιχης μέγιστης ισχύος που αποδίδει το στοιχείο. Τυπικές τιμές της  $R_s$ , για καλής ποιότητας Φ/Β στοιχεία, βρίσκονται στο εύρος 0,1 Ω έως 0,3 Ω.

### 3.1.3.2 Η καμπύλη I-V ενός Φ/Β στοιχείου

Για τον έλεγχο της αποδοτικής λειτουργίας ενός Φ/Β στοιχείου αλλά και για τον σχεδιασμό των ηλεκτρονικών που συνδυάζονται μ' αυτό πρέπει να προσδιορισθούν τα σημεία μέγιστης ισχύος, τα οποία αντιστοιχούν σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας του στοιχείου. Γενικότερη επιδίωξη είναι το σημείο λειτουργίας του στοιχείου σε κάθε διαφορετική κατάσταση, που θα προκύψει π.χ. από μεταβολή της πυκνότητας ισχύος ακτινοβολίας, να αποτελεί και το σημείο μέγιστης ισχύος,  $P_m$ , για τη δεδομένη κατάσταση (Σχήμα 3.11, για την καμπύλη I-V, με  $E = 1 \text{ kW/m}^2$ ).

Η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς αποδίδεται στην αντίσταση μόνο για ορισμένο επίπεδο ακτινοβολίας. Σε διαφορετικές τιμές αποδίδεται ισχύς μικρότερη από την αντίστοιχη μέγιστη ισχύ. Στην Εικόνα 3.11 τα σημεία ΣΛ1, ΣΛ2, ΣΛ3 και ΣΛ4 αποτελούν τα τέσσερα σημεία λειτουργίας αντίστοιχα των τεσσάρων τιμών έντασης της ακτινοβολίας. Μόνο το ΣΛ4 συμπίπτει με το ΣΜΙ της I-V, που αντιστοιχεί σε πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας  $E = 1 \text{ kW/m}^2$  όπως προαναφέρθηκε.

Στις υπόλοιπες καμπύλες I-V τα δύο σημεία δεν συμπίπτουν. Για να συμβεί κάτι τέτοιο πρέπει να αλλάξει η ωμική αντίσταση, έτσι ώστε η νέα ευθεία φόρτου να περνά από το αντίστοιχο σημείο μέγιστης ισχύος της νέας καμπύλης I-V. Οι τιμές ρεύματος-τάσης στο σημείο μέγιστης ισχύος συμβολίζονται με  $I_m$  και  $V_m$ . Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να δώσει το Φ/Β στοιχείο, υπό δεδομένη προσπίπτουσα πυκνότητα ακτινοβολίας  $E$ , ισούται με:  $P_m = I_m \cdot V_m$



Σχήμα 3.11 Η καμπύλη I-V ενός Φ/Β στοιχείου

### 3.1.3.3 Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του Φ/Β στοιχείου

Τα βασικά χαρακτηριστικά, τα οποία ελέγχονται σε ένα εργαστηριακά παρασκευασμένο Φ/Β στοιχείο, καθώς επίσης και στο τελικά διατιθέμενο βιομηχανικό προϊόν, είναι η ενεργειακή απόδοση  $\eta$ , ο παράγων πλήρωσης FF, το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  και η τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$  σε συγκεκριμένες συνθήκες φωτισμού, πυκνότητας ισχύος και φάσματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και θερμοκρασίας του στοιχείου. Η γνώση των χαρακτηριστικών αυτών μεγεθών επιτρέπει τον έλεγχο της αποδοτικότητας του Φ/Β στοιχείου κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες που να αντιπροσωπεύουν τυπικές καταστάσεις εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας.

Η τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$  καθορίζεται αφενός από τα χαρακτηριστικά της επαφής p-n, όπως το βασικό υλικό, τη συγκέντρωση των προσμείξεων και τη θερμοκρασία, και αφετέρου από την ένταση της προσπίπτουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Αρχικά αυξάνει καθώς αυξάνει και η πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας, παραμένοντας, στη συνέχεια για μεγαλύτερες τιμές της προσπίπτουσας ΗΜ ακτινοβολίας σχεδόν ανεξάρτητη αυτής.

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης,  $I_{sc}$ , του Φ/Β στοιχείου είναι ανάλογο της πυκνότητας ισχύος,  $E$ , της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην κυψελίδα.

Ο παράγων πλήρωσης FF (Fill Factor) περιγράφει την ιδανική συμπεριφορά του Φ/Β στοιχείου ως πηγή σταθερού ρεύματος, και οι τιμές του καθορίζονται από το υλικό του Φ/Β στοιχείου και τις συνθήκες. Κυμαίνονται μεταξύ 0 και 1. Όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι οι τιμές του FF, τόσο περισσότερο η λειτουργία του Φ/Β στοιχείου πλησιάζει την ιδανική συμπεριφορά της πηγής σταθερού ρεύματος στην περιοχή τάσεων 0 -  $V_{oc}$ . Τυπικές τιμές 0,7 έως 0,9 χαρακτηρίζουν Φ/β στοιχεία με αποδεκτή έως πολύ καλή ενεργειακή απόδοση αντίστοιχα. Δίνεται από τη σχέση:

$$FF = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{sc} \cdot V_{oc}}$$

Για την πραγματοποίηση αυξημένων αποδόσεων επιδιώκεται οι τιμές των FF,  $I_{sc}$  και  $V_{oc}$  να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερες.

### 3.1.3.4 Η απόδοση του Φ/Β στοιχείου

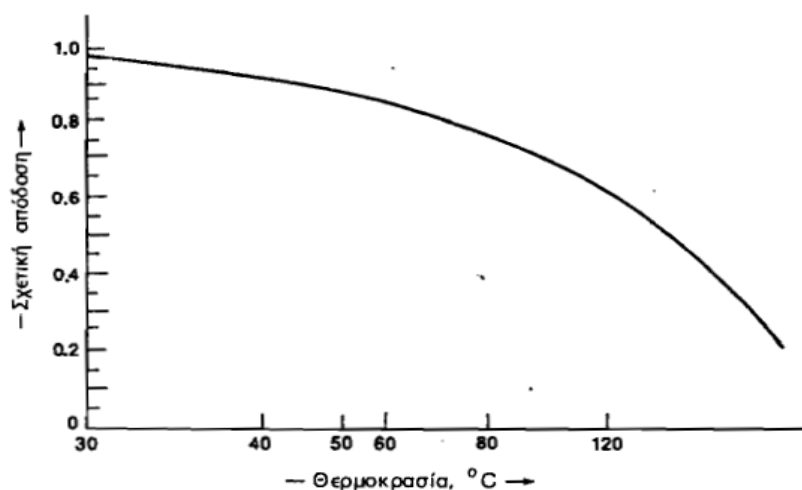
Πάνω στην επιφάνεια ενός Φ/Β στοιχείου εμβαδού  $S$  προσπίπτει ισχύς ΗΜ ακτινοβολίας:  $P_{in} = E \cdot S$ , όπου  $E$  η πυκνότητα ισχύος της.

Το πηλίκο της ηλεκτρικής ισχύος  $P_m$ , που αποδίδεται από το Φ/Β στοιχείο στο αντίστοιχο σημείο μέγιστης ισχύος, προς την προσπίπτουσα ισχύ ακτινοβολίας  $P_{in}$  καθορίζει την απόδοση ενεργειακής μετατροπής (energy conversion efficiency),  $\eta_c$ , του Φ/Β στοιχείου:

$$\eta_c = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{I_m \cdot V_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}}{P_{in}}$$

Η απόδοση του Φ/Β στοιχείου εξαρτάται από τον χρησιμοποιούμενο ημιαγωγό, αυξάνεται με αύξηση της πυκνότητας ισχύος της ακτινοβολίας και μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα με την αύξηση της θερμοκρασίας προκαλείται αντίστοιχη αύξηση της ενδογενούς συγκέντρωσης των φορέων του ημιαγωγού με αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται περισσότερες επανασυνδέσεις φορέων. Έτσι εκδηλώνεται ισχυρότερο ρεύμα διαρροής διαμέσου της διόδου που συνεπάγεται μείωση της τάσης ανοιχτοκύκλωσης και του συντελεστή πλήρωσης οπότε παράλληλα μειώνεται και η απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου [51].





Σχήμα 3.12 Σχετική απόδοση του φ/β στοιχείου συναρτήσει της θερμοκρασίας

Αυτό σημαίνει ότι η απόδοση του φωτοβολταϊκού θα πρέπει να πολλαπλασιάζεται με έναν θερμοκρασιακό διορθωτικό συντελεστή. Για τα συνηθισμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου του εμπορίου στην συμβατική θερμοκρασία ο συντελεστής αυτός είναι ίσος με την μονάδα και μειώνεται κατά 0.005 ανά βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας.

### 3.1.4 Φωτοβολταϊκή γεννήτρια

Το βασικό και χαρακτηριστικό στοιχείο κάθε φωτοβολταϊκής εγκατάστασης είναι η φωτοβολταϊκή γεννήτρια που αποτελείται από τους ηλιακούς συλλέκτες με τα φωτοβολταϊκά ηλιακά στοιχεία. Η τάση και η ισχύς των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι πολύ μικρή για να ανταποκριθεί στην τροφοδότηση των συνηθισμένων ηλεκτρικών φορτίων ή για την φόρτιση των συσσωρευτών. Ένα συνηθισμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου του εμπορίου σε κανονική ηλιακή ακτινοβολία είναι μόλις 0.5V και η ισχύς του φτάνει μέχρι τα 0.4W. Για αυτό τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που προορίζονται για την συγκρότηση των γεννητριών τοποθετούνται ανά 10 έως 50 περίπου σε ενιαίο πλαίσιο με κοινή ηλεκτρική έξοδο. Στο πλαίσιο, τα στοιχεία συνδέονται σε σειρά σε ομάδες κατάλληλου πλήθους για την απόκτηση της επιθυμητής τάσης. Τα πλαίσια είναι κατασκευασμένα σε μορφή sandwich. Δηλαδή, τα ηλιακά στοιχεία στερεώνονται με κολλητική ουσία πάνω σε ανθεκτικό φύλλο από μέταλλο (συνήθως αλουμίνιο) ή ενισχυμένο πλαστικό που αποτελεί την πλάτη του πλαισίου ενώ η εμπρός όψη τους καλύπτεται από ένα προστατευτικό φύλλο γυαλιού ή διαφανούς πλαστικού. Το εμπρός και πίσω φύλλο συγκρατούνται μεταξύ τους στεγανά και μόνιμα με τη βοήθεια μίας ταινίας από φυσικό ή συνθετικό ελαστικό και συσφίγγονται με ένα περιμετρικό μεταλλικό περίβλημα. Διαμορφώνεται έτσι το φωτοβολταϊκό πλαίσιο (module) που είναι η δομική μονάδα που κατασκευάζεται βιομηχανικά και κυκλοφορεί στο εμπόριο για να χρησιμοποιηθεί ως συλλέκτης στη συγκρότηση των φωτοβολταϊκών γεννητριών. Λόγω των απαιτούμενων υλικών και εργασιών για την κατασκευή του, το κόστος ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι πολύ μεγαλύτερο από το κόστος των ηλιακών στοιχείων που περιέχουν.

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια του εμπορίου δεν έχουν τυποποιημένες διαστάσεις και ισχύεις. Σε συμβατικές συνθήκες αιχμής έχουν συνήθως ανάλογα με τον τύπο και τον κατασκευαστή, τάση εξόδου από 4V μέχρι 22V και ένταση ρεύματος από 0.5A έως 2.5A.

Συνώνυμο σχεδόν με το φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι το φωτοβολταϊκό πανέλο (panel). Όπως και το πλαίσιο έχει συναρμολογηθεί και κατασκευαστεί στο εργοστάσιο και είναι έτοιμο για τοποθέτηση στη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση, αλλά με την διαφορά ότι ένα πανέλο μπορεί να αποτελείται από περισσότερα χωριστά πλαίσια, το ένα δίπλα στο άλλο, που είναι σε κοινή συσκευασία και κοινή ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ τους. Ο αριθμός των πλαισίων του πανέλου είναι τόσος ώστε οι διαστάσεις και το βάρος του να μην είναι εμπόδιο για την μεταφορά και την τοποθέτησή του στη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση.

Για την αύξηση της αξιοπιστίας ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι σκόπιμο οι συνδέσεις των φωτοβολταϊκών στοιχείων μέσα στα πλαίσια, αλλά και στα πανέλα, ή ανάμεσα στα γειτονικά πλαίσια και πανέλα, να μην είναι μόνο στην σειρά αλλά και παράλληλες. Έτσι, αν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο σκιαστεί (πχ. από ένα περαστικό πουλί ή από τις ακαθαρσίες που μπορεί να αφήσει) δεν θα μηδενιστεί η ισχύς που παράγει το σύστημα όπως θα συνέβαινε εάν όλα τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ήταν συνδεδεμένα σε σειρά.

Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια μίας μικρής φωτοβολταϊκής εγκατάστασης μπορεί να αποτελείται από ένα μόνο πλαίσιο ή πανέλο. Σε μεγαλύτερες όμως εγκαταστάσεις, ομάδες περισσότερων φωτοβολταϊκών πλαισίων ή πανέλων τοποθετούνται σε κοινή κατασκευή στήριξης πχ. ξύλινα ή μεταλλικά ικριώματα και ονομάζονται φωτοβολταϊκές συστοιχίες (arrays). Η σύνδεση των φωτοβολταϊκών πλαισίων στη σειρά ή παράλληλα γίνεται με τρόπο που η τάση εξόδου της συστοιχίας να αποκτά την επιθυμητή τιμή. Είναι φανερό ότι η διαφορετική συνδεσμολογία των πλαισίων μίας φωτοβολταϊκής γεννήτριας δεν μεταβάλλει την ισχύ της, αφού η όποια αύξηση της τάσης εξόδου της γεννήτριας συνεπάγεται ανάλογη μείωση της έντασης του ρεύματος που παράγει. Στο παρακάτω σχήμα δίνεται ένα παράδειγμα διαφόρων τρόπων σύνδεσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων για την παραγωγή διαφορετικών τάσεων εξόδου.

Στις μεγάλες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, πχ. συνολικής ισχύος αιχμής πάνω από 20kWp, πολλές φωτοβολταϊκές συστοιχίες σχηματίζουν ένα υποσυγκρότημα συστοιχιών (array subfield) και το σύνολο των υποσυστημάτων αποτελεί το συγκρότημα συστοιχιών ή το φωτοβολταϊκό πάρκο του φωτοβολταϊκού σταθμού.

### 3.1.5 Κατηγορίες φωτοβολταϊκών

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία χωρίζονται ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους σε τρεις βασικές κατηγορίες:

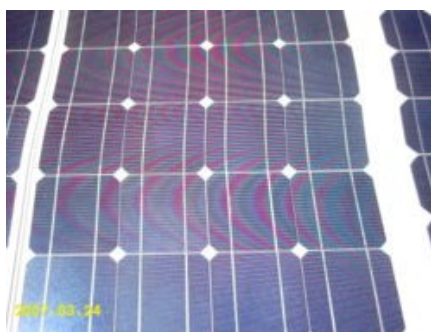
1. Φωτοβολταϊκά συστήματα πυριτίου «μεγάλου πάχους»:
  - Μονοκρυσταλλικού πυριτίου
  - Πολυκρυσταλλικού πυριτίου
  - Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου.
2. Φωτοβολταϊκά υλικά λεπτών επιστρώσεων, thin film:
  - Άμορφου Πυριτίου
  - Δισεληνοϊνδιούχου χαλκού ( $\text{CuInSe}_2$  ή CIS, με προσθήκη γαλλίου CIGS)
  - Τελουριούχου Κάδμιου ( $\text{CdTe}$ )

- Αρσενικούχου Γαλλίου (GaAs)
3. Υβριδικά Φωτοβολταϊκά στοιχεία και άλλες τεχνολογίες

### 3.1.5.1 Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου (Single Crystalline Silicon, sc-Si )

Τα πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου κατασκευάζονται από κρυσταλλικό πυρίτιο. Το κρυσταλλικό πυρίτιο μορφοποιείται σε μεγάλα φύλλα, τα οποία μπορούν να καταταμηθούν σε συγκεκριμένο μέγεθος και να χρησιμοποιηθούν σε ένα πλαίσιο. Τα πλαίσια αυτού του είδους είναι πιο ακριβά από τα πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου καθώς προέρχονται από πυρίτιο καλύτερης ποιότητας-καθαρότητας, ωστόσο χαρακτηρίζονται από υψηλότερη ικανότητα μετατροπής και συχνά, σε βάθος χρόνου, παρουσιάζουν καλύτερη σχέση κόστους-απόδοσης. Η ικανότητα μετατροπής τους είναι της τάξης του 15-18%, κάτι που σημαίνει ότι από την ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνειά τους, το παραπάνω ποσοστό μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερες αποδόσεις έως και 24,7% .

Το πάχος τους είναι γύρω στα 0,3mm. Το μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία χαρακτηρίζονται από το πλεονέκτημα της καλύτερης σχέσης απόδοσης/επιφάνειας ή "ενεργειακής πυκνότητας". Βασικές τεχνολογίες παραγωγής μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών είναι η μέθοδος CZ (Czochralski) και η μέθοδος FZ (float zone). Αμφότερες βασίζονται στην ανάπτυξη ράβδου πυριτίου. Το μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό με την υψηλότερη απόδοση στο εμπόριο σήμερα, είναι της SunPower με απόδοση πλαισίου 18,5%. Είναι μάλιστα το μοναδικό που έχει τις μεταλλικές επαφές στο πίσω μέρος του πάνελ αποκομίζοντας έτσι μεγαλύτερη επιφάνεια αλληλεπίδρασης με την ηλιακή ακτινοβολία.



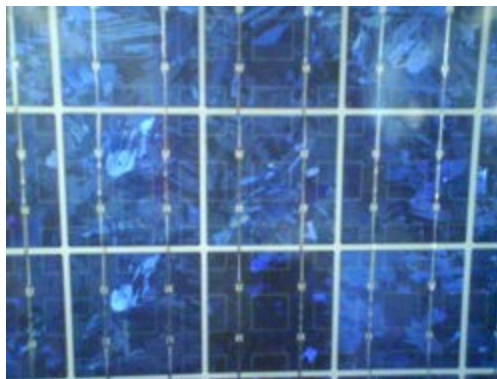
Σχήμα 3.13

### 3.1.5.2 Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου (Multi Crystalline Silicon, mc-Si)

Το πάχος τους είναι επίσης περίπου 0,3mm. Η μέθοδος παραγωγής τους είναι φθηνότερη από αυτήν των μονοκρυσταλλικών γι' αυτό και η τιμή τους είναι συνήθως λίγο χαμηλότερη. Οπτικά μπορεί κανείς να παρατηρήσει τις επιμέρους μονοκρυσταλλικές περιοχές. Όσο μεγαλύτερες είναι σε έκταση οι μονοκρυσταλλικές περιοχές τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση για τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά κελιά.

Σε εργαστηριακές εφαρμογές έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 20% ενώ στο εμπόριο τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία διατίθενται με αποδόσεις από 13 έως και 15% για τα φωτοβολταϊκά

πλαίσια (πάνελ). Βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι: η μέθοδος απ' ευθείας στερεοποίησης DS (directional solidification), η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου ("χύτευση") και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC.

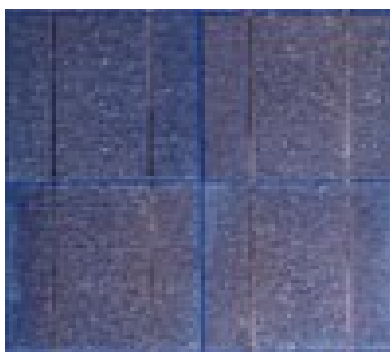


Σχήμα 3.14

### 3.1.5.3 Ταινία Πυριτίου (Ribbon Silicon)

Πρόκειται για μια σχετικά νέα τεχνολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων. Αναπτύσσεται από την Evergreen Solar. Προσφέρει έως και 50% μείωση στην χρήση του πυριτίου σε σχέση με τις "παραδοσιακές τεχνικές" κατασκευής μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών κυψελών πυριτίου.

Η απόδοση για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία του έχει φτάσει πλέον γύρω στο 12-13% ενώ το πάχος του είναι περίπου 0,3mm. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις της τάξης του 18%.

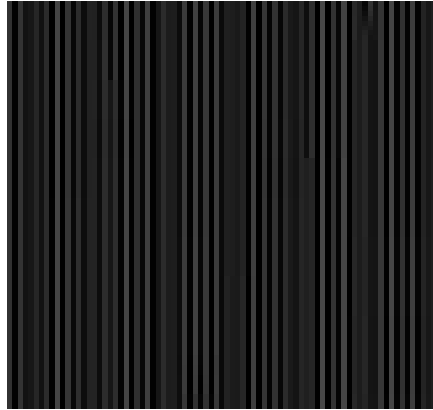


Σχήμα 3.15

### 3.1.5.4 Δισεληνοϊνδιούχος Χαλκός (CuInSe<sub>2</sub> ή CIS, με προσθήκη γάλλιου CIGS)

Ο Δισεληνοϊνδιούχος Χαλκός έχει εξαιρετική απορροφητικότητα στο προσπίπτον φως αλλά η απόδοση του με τις σύγχρονες τεχνικές κυμαίνεται στο 11% (πλαίσιο).

Εργαστηριακά έγινε εφικτή απόδοση στο επίπεδο του 18,8% η οποία είναι και η μεγαλύτερη που έχει επιτευχθεί μεταξύ των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών λεπτής επιστρώσεως. Με την πρόσμιξη γάλλιου CIGS η απόδοση του μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο. Το πρόβλημα που υπάρχει είναι ότι το ίδιο υπάρχει σε περιορισμένες ποσότητες στην φύση. Στα επόμενα χρόνια πάντως αναμένεται το κόστος του να είναι αρκετά χαμηλότερο.



Σχήμα 3.16

### 3.1.5.5 Άμορφο Πυρίτιο (Amorphous ή Thin film Silicon, a-Si)

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αυτά, έχουν αισθητά χαμηλότερες αποδόσεις σε σχέση με τις δύο προηγούμενες κατηγορίες. Πρόκειται για ταινίες λεπτών επιστρώσεων οι οποίες παράγονται με την εναπόθεση ημιαγωγού υλικού (πυρίτιο στην εν λόγω περίπτωση) πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης, χαμηλού κόστους όπως γυαλί ή αλουμίνιο. Λόγω της μικρότερης ποσότητας πυριτίου που χρησιμοποιείται, η τιμή τους είναι γενικότερα αρκετά χαμηλότερη.

Ο χαρακτηρισμός άμορφο φωτοβολταϊκό προέρχεται από τον τυχαίο τρόπο με τον οποίο είναι διατεταγμένα τα άτομα του πυριτίου. Οι επιδόσεις που επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκα thin films πυριτίου κυμαίνονται για το πλαίσιο από 6 έως 8% ενώ στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις ακόμα και 14%.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα για το φωτοβολταϊκό στοιχείο a-Si είναι το γεγονός ότι δεν επηρεάζεται σημαντικά από τις υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, πλεονεκτεί στην αξιοποίηση της απόδοσης του σε σχέση με τα κρυσταλλικά Φ/Β, όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία (συννεφιά).

Το μειονέκτημα των άμορφων πλαισίων είναι η χαμηλή τους ενεργειακή πυκνότητα κάτι που σημαίνει ότι για την παραγωγή ίδιας ποσότητας ενέργειας απαιτείται σχεδόν διπλάσια επιφάνεια σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Επίσης υπάρχουν αμφιβολίες όσον αφορά τη διάρκεια ζωής των άμορφων πλαισίων μιας και δεν υπάρχουν στοιχεία από παλιές εγκαταστάσεις αφού η τεχνολογία είναι σχετικά καινούρια. Παρόλα αυτά, οι κατασκευαστές πλέον δίνουν εγγυήσεις απόδοσης 20 ετών. Το πάχος του πυριτίου είναι περίπου 0,0001mm ενώ το υπόστρωμα μπορεί να έχει πάχος από 1 έως 3mm.



Σχήμα 3.17

### 3.1.5.6 Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe)

Το Τελουριούχο Κάδμιο έχει ενεργειακό διάκενο γύρω στο 1eV, το οποίο είναι πολύ κοντά στο ηλιακό φάσμα, κάτι που του δίνει σοβαρά πλεονεκτήματα όπως την δυνατότητα να απορροφά το 99% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι σύγχρονες τεχνικές όμως μας προσφέρουν αποδόσεις πλαισίου γύρω στο 6-8%. Στο εργαστήριο, η απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων έχει φθάσει το 16%.

Μελλοντικά αναμένεται το κόστος του να πέσει αρκετά. Σημαντικότερος κατασκευαστής φωτοβολταϊκών στοιχείων CdTe είναι η First Solar. Τροχοπέδη για την χρήση τους αποτελεί το γεγονός ότι το κάδμιο, σύμφωνα με έρευνες, είναι καρκινογόνο με αποτέλεσμα να προβληματίζει το ενδεχόμενο εκτεταμένης χρήσης του. Ήδη η Greenpeace έχει εναντιωθεί στην χρήση του. Επίσης προβληματίζει ή έλλειψη του Τελλουρίου. Σημαντικότερη χρήση του είναι ή ενθυλάκωση του στο γυαλί ως δομικό υλικό (BIPV Building Integrated Photovoltaic).

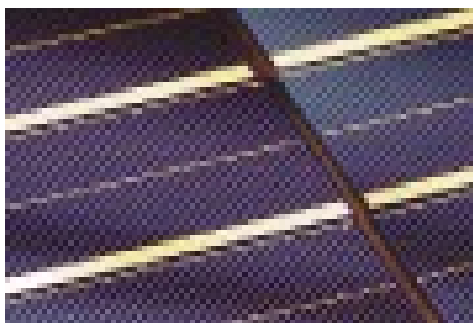


Σχήμα 3.18

### 3.1.5.7 Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)

Το Γάλλιο είναι ένα παραπροϊόν της ρευστοποίησης άλλων μετάλλων, όπως το αλουμίνιο και ο ψευδάργυρος. Είναι πιο σπάνιο ακόμα και από τον χρυσό. Το Αρσένιο δεν είναι σπάνιο άλλα έχει το μειονέκτημα ότι είναι δηλητηριώδες. Το αρσενικούχο γάλλιο έχει ενεργειακό διάκενο 1,43eV, που είναι ιδανικό για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Η απόδοση του, στην μορφή πολλαπλών συνενώσεων (multijunction), είναι η υψηλότερη που έχει επιτευχθεί και αγγίζει το 29%. Επίσης, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία GaAs είναι εξαιρετικά ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες, γεγονός που επιβάλλει σχεδόν την χρήση τους σε εφαρμογές ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων (solar concentrators). Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία GaAs έχουν το πλεονέκτημα ότι αντέχουν σε πολύ υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας. Για αυτό, αλλά και λόγω της πολύ υψηλής απόδοσης τους, ενδείκνυνται για διαστημικές εφαρμογές. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι το υπερβολικό κόστος του μονοκρυσταλλικού GaAs υποστρώματος.



Σχήμα 3.19

### 3.1.5.8 Υβριδικά Φωτοβολταϊκά Στοιχεία

Ένα υβριδικό φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελείται από στρώσεις υλικών διαφόρων τεχνολογιών με σημαντικότερο αντιπρόσωπο τα HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer). Τα πιο γνωστά εμπορικά υβριδικά φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούνται από δύο στρώσεις άμορφου πυριτίου (πάνω και κάτω) ενώ ενδιάμεσα υπάρχει μια στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου.

Κατασκευάζεται από την Sanyo Solar. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης του πλαισίου που φτάνει σε εμπορικές εφαρμογές στο 17,2% και το οποίο σημαίνει ότι χρειαζόμαστε μικρότερη επιφάνεια για να έχουμε την ίδια εγκατεστημένη ισχύ. Τα αντίστοιχα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν απόδοση 19,7%. Άλλα πλεονεκτήματα για τα υβριδικά φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι η υψηλή τους απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά και η μεγάλη τους απόδοση στην διαχεόμενη ακτινοβολία. Φυσικά, αφού προσφέρει τόσα πολλά, το υβριδικό φωτοβολταϊκό είναι και κάπως ακριβότερο σε σχέση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά πλαίσια.

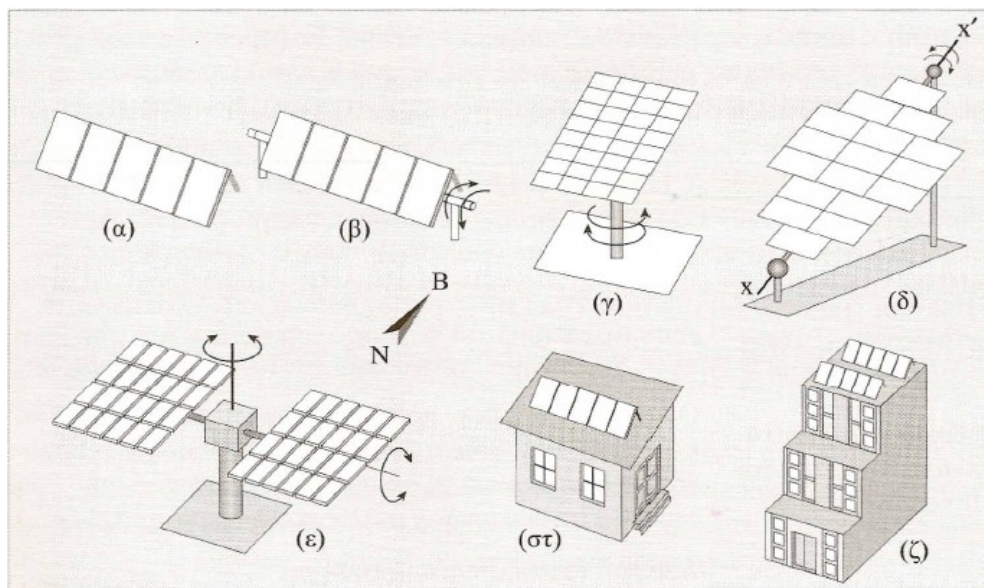
### 3.1.5.9 Άλλες Τεχνολογίες

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών εξελίσσεται με ραγδαίους ρυθμούς και διάφορα εργαστήρια στον κόσμο παρουσιάζουν νέες πατέντες. Κάποιες από τις τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων που φαίνεται να ξεχωρίζουν και μελλοντικά πιθανώς να γίνει ευρεία η χρήση τους είναι:

- Νανοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου (nc-Si)
- Οργανικά/Πολυμερή στοιχεία

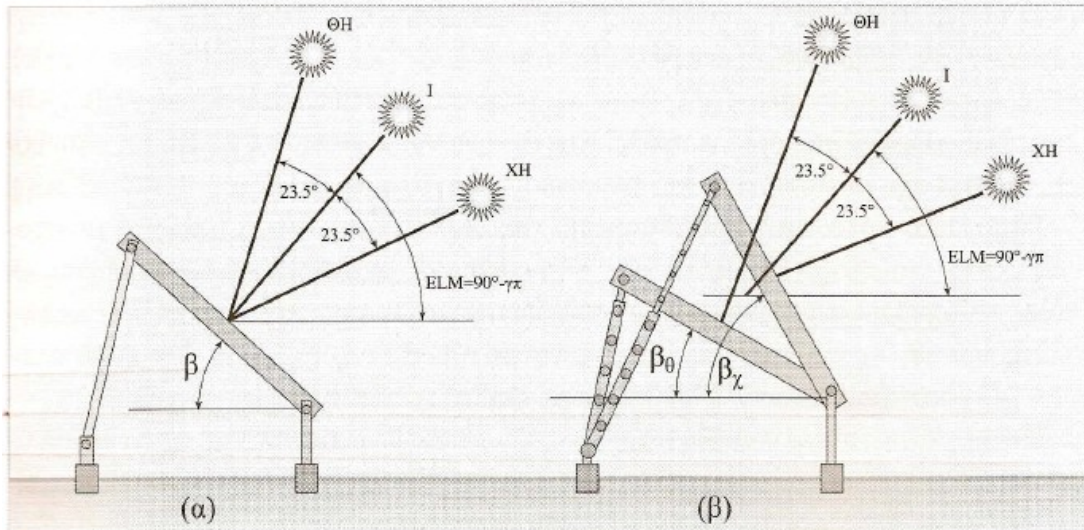
### 3.1.6 Τρόποι στήριξης συλλεκτών και προσανατολισμός τους

Διακρίνονται τρεις διαφορετικοί τρόποι στήριξης συλλεκτών. Σταθερής στήριξης, εποχιακά ρυθμιζόμενης στήριξης και συνεχούς παρακολούθησης της θέσης του ήλιου, με διάταξη που ονομάζεται ηλιοτρόπιο (Solar Tracker). Οι παρακάτω εικόνες δείχνουν σχηματικά μερικούς τρόπους στήριξης.



Σχήμα 3.20 (α) Τοποθέτηση Φ/Β συστοιχίας με σταθερή γωνία κλίσης, (β) συστοιχία με δυνατότητα στροφής γύρω από οριζόντιο άξονα (αλλαγή ζενιθίας γωνίας της συστοιχίας), (γ) συστοιχία σε ηλιοτρόπιο αξιμουθιακής στροφής με σταθερή γωνία κλίσης, (δ) συστοιχία με δυνατότητα στροφής ως προς τον άξονα  $XX'$ , που διατηρείται κεκλιμένος συνήθως υπό γωνία ίση του γεωγραφικού πλάτους του τόπου, (ε) τυπική διάταξη ηλιοτρόπιου (tracker) δύο αξόνων, (στ) Φ/Β συστοιχία στη στέγη κατοικίας, (ζ) Φ/Β πλαίσια σε διάφορες θέσεις σε μεγάλη οικοδομή (τοποθέτηση υπό κλίση στη στέγη και σε προβόλους και κατακόρυφα (facade) σε όψεις νότιου προσανατολισμού)





Σχήμα 3.21 (α) σταθερή στήριξη σε ετήσια βάση, με γωνία κλίσης  $\beta = \varphi - (10^\circ \text{ έως } 15^\circ)$ , (β) εποχική ρύθμιση της κλίσης του συλλέκτη δύο φορές μέσα στο έτος. ΘΗ: Θερινό Ηλιοστάσιο. ΧΗ: Χειμερινό Ηλιοστάσιο. Ι: Ισημερίες

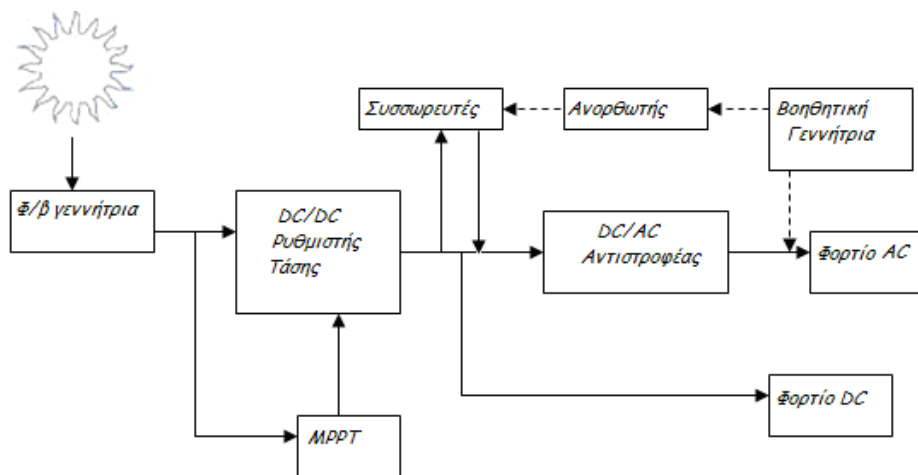
### 3.1.7 Σύνθεση φωτοβολταϊκών συστημάτων

Τα Φ/Β συστήματα διακρίνονται ανάλογα με την σύνδεση τους στο δίκτυο σε δύο βασικές κατηγορίες, τα απομονωμένα (Stand-alone) ή εκτός δικτύου (Off grid) συστήματα και τα συνδεδεμένα στο δίκτυο (Grid connected). Τα απομονωμένα Φ/Β συστήματα διακρίνονται επίσης σε αυτόνομα και υβριδικά.

Όσο αφορά στη λειτουργία τους, τα Φ/Β συστήματα διακρίνονται σε συστήματα με αποθήκευση και χωρίς αποθήκευση. Τέλος, χωρίζονται σε διάσπαρτα ή αποκεντρωμένα (Decentralized), κεντρικού σταθμού (Centralized) και κατανεμημένα (Distributed).

#### 3.1.7.1 Αυτόνομο Φωτοβολταϊκό Σύστημα (Stand Alone)

Οι αυτόνομες ηλεκτρικές εγκαταστάσεις αποτελούν τις συνηθέστερες εφαρμογές της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας. Είναι εγκαταστάσεις που λειτουργούν αυτοδύναμα για την τροφοδότηση καθορισμένων καταναλώσεων, χωρίς να συνδέονται με μεγάλα κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα διανομής, από τα οποία θα μπορούσαν να αντλούν συμπληρωματική ηλεκτρική ενέργεια ή να στέλνουν την περίσσεια της παραγόμενης φωτοβολταϊκής ηλεκτρικής ενέργειας. Αποτελούν την ιδανικότερη λύση για περιοχές που βρίσκονται μακριά από το κεντρικό δίκτυο και στις οποίες η διασύνδεσή τους με αυτό θα απαιτούσε τεράστια οικονομικά κεφάλαια. Ειδικότερα για τον ελλαδικό χώρο, ο οποίος έχει πολυάριθμα μικρά νησιά και μικρούς οικισμούς, τα αυτόνομα Φ/Β συστήματα έχουν βρει πολλές εφαρμογές, ενώ υπάρχουν ακόμα πολλές δυνατότητες ανάπτυξης.

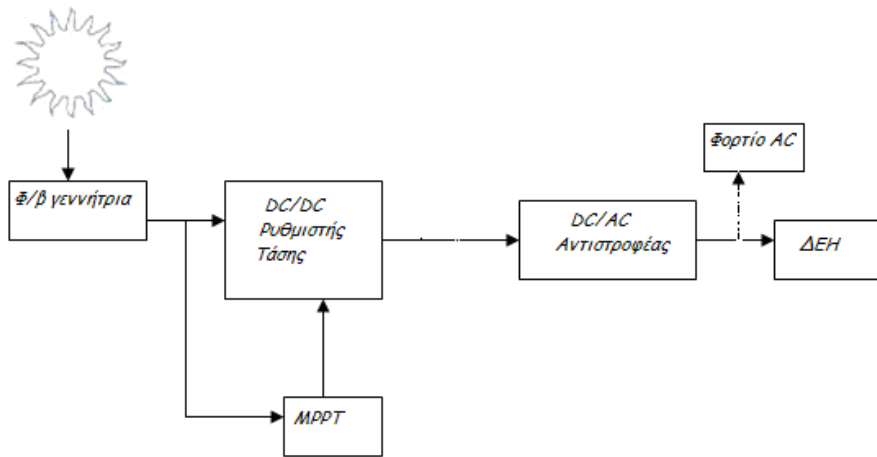


Σχήμα 3.22

Το βασικότερο συστατικό του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος είναι η φωτοβολταϊκή γεννήτρια, στους ηλιακούς συλλέκτες της οποίας γίνεται η μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Έπειτα το αυτόνομο σύστημα περιλαμβάνει, ανάλογα με το είδος της κατανάλωσης και τον βαθμό της απαιτούμενης αξιοπιστίας, συσσωρευτές για την αποθήκευση της περίσσειας της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να χρησιμοποιηθεί όταν η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ανεπαρκής ή μηδενική, διατάξεις για την ρύθμιση και την μετατροπή της τάσης και τη ρύθμιση της ισχύος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να αυξηθεί η απόδοση του συστήματος, άλλες διατάξεις προστασίας και ελέγχου και συχνά μία βοηθητική γεννήτρια, συνήθως ένα ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος που να λειτουργεί με καύση βενζίνης ή πετρελαίου diesel για την αντιμετώπιση έκτακτων περιστάσεων (συντήρηση ή βλάβη του συστήματος, τροφοδότηση πρόσθετων φορτίων, επικουρική λειτουργία σε απρόβλεπτα μεγάλες περιόδους χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας).

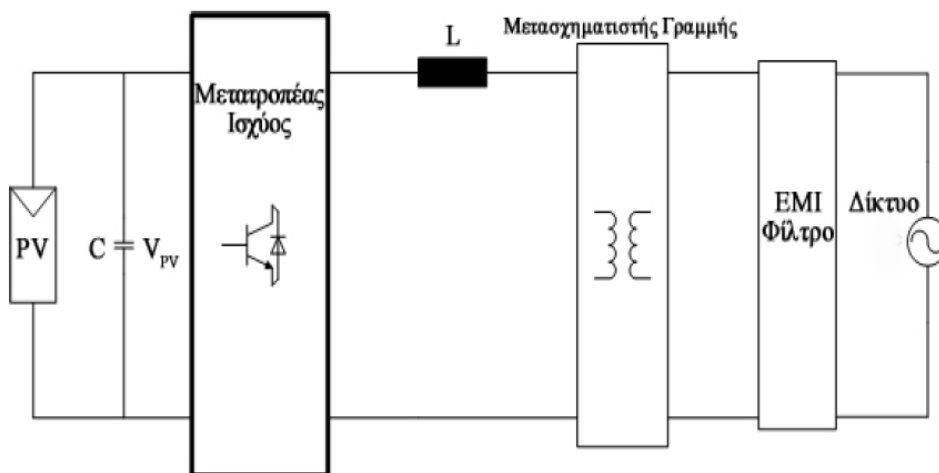
### 3.1.7.2 Διασυνδεδεμένο Φωτοβολταϊκό Σύστημα (Grid-Connected)

Μια διαφορετική προσέγγιση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας είναι η εφαρμογή των διασυνδεδεμένων Φ/Β συστημάτων, στα οποία η ηλεκτρική ενέργεια τροφοδοτείται στο δίκτυο. Υπάρχουν δύο διαφορετικές υλοποιήσεις, ανάλογα με το αν τροφοδοτείται κάποιο φορτίο απευθείας από το σύστημα ή όχι (Σχήμα 23). Σε ένα διασυνδεδεμένο σύστημα το δίκτυο ενεργεί όπως μια μπαταρία με απεριόριστη ικανότητα αποθήκευσης. Επομένως, η συνολική αποδοτικότητα ενός διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος, θα είναι καλύτερη από την αποδοτικότητα ενός αυτόνομου συστήματος, αφού το δίκτυο έχει πρακτικά απεριόριστη ικανότητα αποθήκευσης και επομένως η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί πάντοτε να αποθηκεύεται. Αντιθέτως, στις αυτόνομες εφαρμογές, οι συσσωρευτές θα είναι ενίοτε πλήρως φορτισμένοι, όποτε η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια θα πρέπει με κάποιο τρόπο να αποβάλλεται.



Σχήμα 3.23

Ακολούθως φαίνεται ένα τυπικό μοντέλο φωτοβολταϊκού συστήματος συνδεδεμένου στο δίκτυο.



Σχήμα 3.24

Το συνδεδεμένο στο δίκτυο φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται βασικά από μια φωτοβολταϊκή γεννήτρια (σύνολο πλαισίων) (στοιχείο PV) και μια μονάδα μετατροπής ισχύος (αντιστροφέας). Η παραπάνω παρουσιάζει ένα τυπικό φωτοβολταϊκό σύστημα που είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο. Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει έναν πυκνωτή C , ένα πηνίο L , έναν μετασχηματιστή, ένα φίλτρο EMI και το δίκτυο.

Μετά τον αντιστροφέα παρατηρείται το πηνίο γραμμής L, που απαιτείται για τον έλεγχο του ρεύματος που εγχέεται στο δίκτυο.

Ο αντιστροφέας περιλαμβάνει επίσης το μετασχηματιστή και το φίλτρο EMI. Τα πρώτα Φ/Β συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν για οικιακή χρήση περιελάμβαναν έναν μονοφασικό αντιστροφέα με έναν μετασχηματιστή χαμηλής συχνότητας (Low Frequency - LF) που τοποθετείται μεταξύ του αντιστροφέα και του δικτύου. Αυτός ο μετασχηματιστής απαιτείται από όλους σχεδόν τους εθνικούς κανονισμούς και εγγυάται τη γαλβανική απομόνωση μεταξύ του

δικτύου και των φωτοβολταϊκών συστημάτων, παρέχοντας προστασία. Επιπλέον, παρέχει απομόνωση μεταξύ του φωτοβολταϊκού συστήματος και του εδάφους. Επίσης, εξασφαλίζει δεν εγγέεται συνεχές ρεύμα στο δίκτυο, γεγονός που θα μπορούσε να προκαλέσει κορεσμό στον μετασχηματιστή διανομής. Τέλος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αύξηση της τάσης εξόδου των αντιστροφών. Εντούτοις, οι μετασχηματιστές LF αυξάνουν το βάρος, το μέγεθος και το κόστος του φωτοβολταϊκού συστήματος και μειώνουν την απόδοσή του.

Η εναλλακτική λύση είναι να αντικατασταθούν οι LF μετασχηματιστές με υψηλής συχνότητας (High Frequency- HF) μετασχηματιστές τοποθετημένους στο συνεχές τμήμα του αντιστροφέα. Με αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται πάλι γαλβανική απομόνωση μεταξύ της Φ/Β γεννήτριας και του δικτύου. Οι μετασχηματιστές υψηλής συχνότητας έχουν μικρότερο βάρος, μέγεθος και κόστος. Εντούτοις, είναι πιο πολύπλοκοι και καμιά ουσιαστική βελτίωση δεν παρατηρείται στη γενική απόδοση του συστήματος.

Η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει καταστήσει πιθανό να παραληφθεί ο μετασχηματιστής χωρίς αντίκτυπο στα χαρακτηριστικά των συστημάτων όσον αφορά την ασφάλεια. Μερικές χώρες, όπως η Γερμανία, επιτρέπουν τη χρήση αντιστροφών χωρίς μετασχηματιστή (transformerless) και άλλες σκέφτονται σοβαρά να αλλάξουν τους κανονισμούς προς αυτή την κατεύθυνση. Επομένως, είναι αρκετά πιθανό ότι πολλά από τα μελλοντικά φωτοβολταϊκά συστήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο να μην περιλαμβάνουν μετασχηματιστή.

Τέλος, παρατηρείται το EMI φίλτρο, το οποίο μειώνει την ανισορροπία μεταξύ των παρασιτικών χωρητικοτήτων του συστήματος, την ανισορροπία μεταξύ των τιμών των σύνθετων αντιστάσεων γραμμής, την έλλειψη συγχρονισμού στη διακοπτική λειτουργία των δύο σκελών της γέφυρας πλήρους κύματος του αντιστροφέα, την ανισορροπία στη συμπεριφορά των διακοπών και τις καθυστερήσεις στους οδηγούς διακοπών. Τα φαινόμενα αυτά κάνουν απαραίτητη τη χρήση φίλτρου EMI. Στην πραγματικότητα θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή στο φάσμα υψηλής συχνότητας.

## **3.2 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ**

### **3.2.1 Εισαγωγή**

Η αιολική ενέργεια αποτελεί το στυλοβάτη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας τουλάχιστον στην Ευρώπη. Το 70% περίπου της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος που προέρχεται από ανεμογεννήτριες βρίσκεται στην Ευρώπη, ενώ περισσότερο από 80% των ανεμογεννητριών που εγκαθίστανται παγκοσμίως, κατασκευάζονται σε αυτή.

Στη χώρα μας οι επικρατούσες συνθήκες στο Αιγαίο, στο Κρητικό και στο Καρπάθιο πέλαγος, στις ανατολικές ακτές της κεντρικής και νότιας Χώρας, στη Βόρεια Κρήτη και στα Δωδεκάνησα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους ευνοούν την εμφάνιση ανέμων σημαντικής εντάσεως, ικανής να διατηρεί σε λειτουργία ανεμογεννήτριες για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Έτσι, ευνοείται η εγκατάσταση αιολικών πάρκων που συνήθως συνδέονται σε δίκτυα μέσης και υψηλής τάσης ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ τους. Παρόμοιες συνθήκες ισχύουν και στο εσωτερικό της

χώρας και ιδιαίτερα στις ορεινές περιοχές. Οι συνθήκες στις περιοχές αυτές είναι αρκετά ευνοϊκές διότι υπάρχει συνεχής πνοή καλής ποιότητας ανέμου, ελάχιστες μέρες άπνοιας και ανυπαρξία τυφώνων.

Ο τύπος και τα μεγέθη των ανεμογεννητριών που εγκαθίστανται στην Ελλάδα, ακολουθούν μέχρι στιγμής τις διεθνείς εξελίξεις και είναι κυρίως εισαγωγής από άλλες ευρωπαϊκές χώρες. Ωστόσο, υπάρχει μία σημαντική προστιθέμενη αξία από ελληνικές κατασκευαστικές επιχειρήσεις τόσο για την κατασκευή επιμέρους τμημάτων των ανεμογεννητριών όσο και για την εγκατάσταση και τη δημιουργία της κατάλληλης υποδομής για τη λειτουργία τους. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι η ελληνική βιομηχανία είναι αναγκαίο να συνεισφέρει και να δημιουργήσει νέες τεχνολογίες ώστε η ελληνική προστιθέμενη αξία να γίνει ακόμα μεγαλύτερη.

Τα πλεονεκτήματα της εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρισμού συνοπτικά είναι [7]:

- Η αιολική ενέργεια είναι μια καθαρή πηγή ενέργειας.
- Οι ανεμογεννήτριες δεν εκλύουν χημικές ουσίες στο περιβάλλον οι οποίες προκαλούν όξινη βροχή ή αέρια του θερμοκηπίου.
- Η τεχνολογία που αναπτύσσεται είναι μια από τις πιο οικονομικές στον χώρο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (χαμηλό κόστος ανά kWh).
- Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να στηθούν σε αγροκτήματα ή ράντσα, όπου βρίσκονται οι περισσότερες από τις καλύτερες τοποθεσίες από την άποψη του ανέμου.

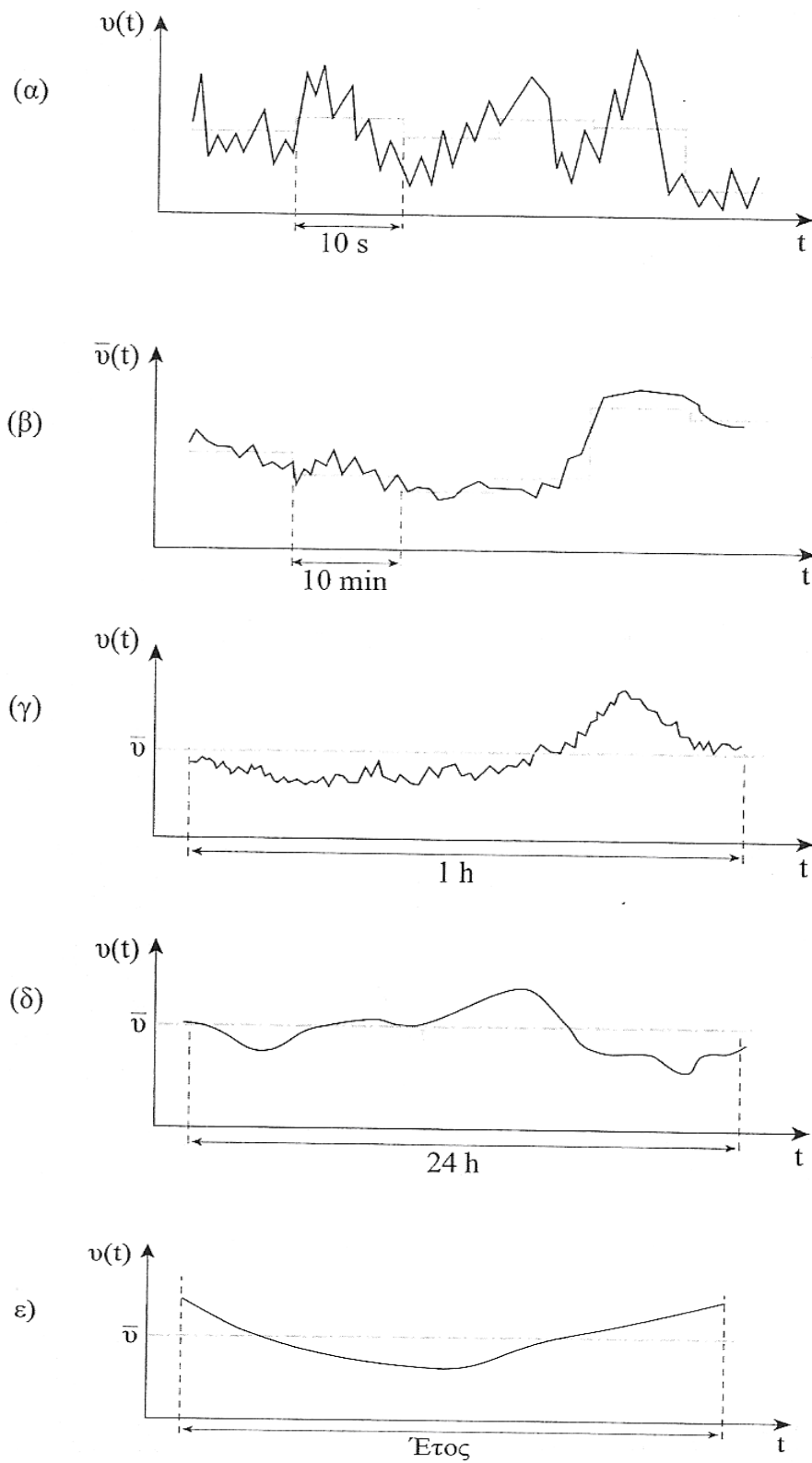
Τα μειονεκτήματα αντίστοιχα είναι:

- Η αιολική ενέργεια πρέπει να ανταγωνιστεί τις συμβατικές πηγές ενέργειας σε επίπεδο κόστους.
- Δεν μπορούν όλοι οι άνεμοι να τιθασευτούν.
- Τα κατάλληλα σημεία για αιολικά πάρκα είναι σε απομακρυσμένες περιοχές.
- Υπάρχει προβληματισμός για τον θόρυβο που παράγεται από τα πτερύγια του ηλεκτρικού κινητήρα (ρότορα), και τις δυσμενείς επιδράσεις στο οικοσύστημα της περιοχής (πολλές φορές έχουν σκοτωθεί πουλιά που πετούσαν κοντά στις ανεμογεννήτριες).

### **3.2.2 χαρακτηριστικά του ανέμου**

#### **3.2.2.1 Ταχύτητα ανέμου**

Η ταχύτητα του ανέμου σε ένα τόπο καθορίζεται από τις διαφορές πίεσης στην ατμόσφαιρα σε μεγάλη κλίμακα και διαμορφώνεται από το ανάγλυφο της περιοχής και την τραχύτητα της επιφάνειας του εδάφους. Το μέτρο και η κατεύθυνσή της εμφανίζουν συχνές μεταβολές. Εμφανίζονται διακυμάνσεις της μέσης ημερήσιας ταχύτητας από μέρα σε μέρα μέσα στο έτος και της μέσης ετήσιας ταχύτητας του ανέμου, από έτος σε έτος, Σχήμα 3.26. Παρόλα αυτά, η άμεση σχέση του ανέμου και της περιοδικής εμφάνισης του ήλιου σε ένα τόπο, έχει ως αποτέλεσμα την εποχική και ετήσια περιοδικότητα της εμφάνισης της μέσης ταχύτητάς του. Συνεπώς για την μελέτη και τον υπολογισμό των κατάλληλων σε κάθε περίπτωση αιολικών συστημάτων, ενδιαφέρον παρουσιάζει η γνώση της περιοδικής εμφάνισης της μέσης ταχύτητας του ανέμου, σε χαρακτηριστικές χρονικές περιόδους π.χ. μέσα στο μήνα ή το έτος.



Σχήμα 3.26 Τυπική χρονική μεταβολή των στιγμιαίων και μέσων τιμών ταχύτητας ανέμου

Η στιγμιαία ταχύτητα,  $u$ , μετρείται με τα ανεμόμετρα και η κατεύθυνση με ειδικό αισθητήρα (ανεμοδείκτη). Δίνεται από τον τύπο:  $u(t) = \bar{u} + v(t)$ , όπου  $\bar{u}$  η μέση ταχύτητα για το χρονικό διάστημα που εξετάζουμε και  $v(t)$  η τυρβώδης συνιστώσα.

- Η μέση τιμή  $\bar{u}$  του μέτρου της ταχύτητας μέσα σε ένα χρονικό διάστημα  $T$ , δίνεται εξ ορισμού από την σχέση:  $\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u dt$ . Η μέση ταχύτητα καθορίζει την ενεργειακή απόδοση της ανεμογεννήτριας και ακολουθεί την κατανομή Weibull:  $f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$  όπου  $k$  η παράμετρος μορφής, που παίρνει συνήθως τιμές από 1,5 έως 2,5, και  $c$  η παράμετρος κλίμακας. Όταν  $k=1$  η κατανομή γίνεται εκθετική και όταν  $k>3$  η κατανομή γίνεται κανονική. Για την τυπική τιμή  $k=2$  η κατανομή γίνεται Rayleigh.

Η μέγιστη ημερήσια ταχύτητα ανέμου και η συχνότητα εμφάνισης ριπών του ανέμου, που είναι έντονες αυξήσεις της ταχύτητάς του βραχείας διάρκειας, συνήθως μικρότερης των 20sec, αποτελούν στοιχεία του αιολικού δυναμικού ενός τόπου. Μέσες τιμές ταχυτήτων μεγαλύτερων διαστημάτων π.χ. λεπτού ή πεντάλεπτου, χρησιμεύουν για τη συσχέτιση της αποδιδόμενης στο διάστημα αυτό μέσης ηλεκτρικής ισχύος με τη μέση ταχύτητα του διαστήματος αυτού.

- Η τυρβώδης συνιστώσα  $v(t)$  αντιπροσωπεύει τις ταχείες διακυμάνσεις του ανέμου και επηρεάζει την ποιότητα ισχύος και τα κοπωτικά φορτία. Περιγράφεται από φάσμα

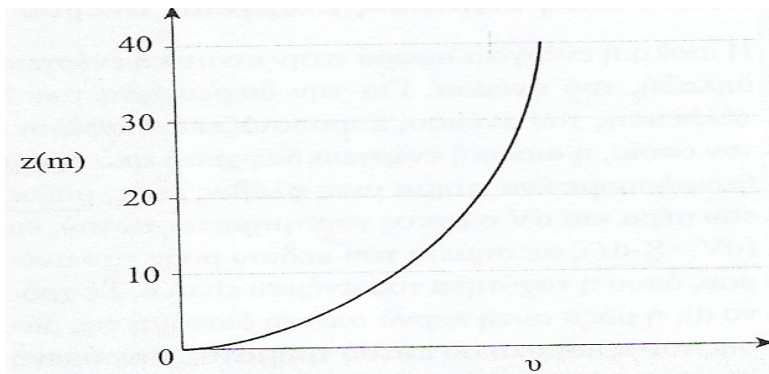
τύπου Von Karman:  $S_v = \frac{\sigma_v}{f} \frac{4\tilde{n}}{(1 + 70,8 \cdot \tilde{n}^2)^{5/6}}$ , όπου  $\sigma_v = \frac{\bar{u}}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}$  η διασπορά τύρβης και  $\tilde{n} = f \cdot {}^xL_v / \bar{u}$  με  ${}^xL_v = 25 \frac{z^{0,35}}{z_0^{0,063}}$  τη διαμήκη κλίμακα τύρβης.

### 3.2.2.2 Μεταβολή ταχύτητας ανέμου με το ύψος

Η ταχύτητα  $u$ , του ανέμου, σε ύψος  $z$  πάνω από το έδαφος, το οποίο θεωρούμε επίπεδο, απείρου εκτάσεως, με ομοιογενώς διασπαρμένες διαταραχές, προσεγγίζεται από τη σχέση:

$$u = u_{ref} \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)}$$

όπου  $z_{ref}$ , το ύψος αναφοράς, που είναι το ύψος όπου γνωρίζουμε πειραματικά την ταχύτητα του ανέμου  $u_{ref}$ . Το ύψος  $z_0$ , αφορά στο μέσο ύψος του διαταραγμένου στρώματος του αέρα, εξ' αιτίας των ανωμαλιών του εδάφους, και ονομάζεται μήκος τραχύτητας. Στο Σχήμα 3.27 δίνεται η τυπική μορφή της μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει του ύψους από το έδαφος.



Σχήμα 3.27 Τυπική μορφή μεταβολής της ταχύτητας ανέμου συναρτήσει του ύψους

### 3.2.2.3 Ενεργειακό περιεχόμενο και ισχύς ανέμου

Η αιολική ενέργεια αφορά στην κινητική ενέργεια των κινούμενων αερίων μαζών, δηλαδή του ανέμου. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ο ρυθμός με τον οποίο η αιολική ενέργεια διέρχεται από ορισμένη διατομή. Έστω λοιπόν μια ποσότητα ανέμου μάζας  $dm = \rho \cdot dV$ , όπου  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα και  $dV$  ο όγκος του τμήματος αυτού, εμβαδού διατομής  $S$  και μήκους  $dl$  ( $dV = S \cdot dl$ ), σε σημείο του πεδίου ροής του ανέμου όπου η ταχύτητα του ανέμου είναι  $u$ .

Σε χρόνο  $dt$ , η μάζα αυτή περνά από τη διατομή της βάσης του πρισματικού αυτού τμήματος κινούμενη σε μήκος  $dl = u \cdot dt$ . Άρα, η κινητική ενέργεια του τμήματος αυτού είναι:

$$dE_k = \frac{1}{2} dm \cdot u^2 = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot dl \cdot u^2 = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot u \cdot dt \cdot u^2 = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot u^3 \cdot dt$$

Συνεπώς, η ισχύς κινητικής ενέργειας της ποσότητας αυτής του ανέμου, εμβαδού  $S$ ,  $P_a = dE_k / dt$ , προκύπτει ίση με



$$P_a = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot u^3$$

Η πυκνότητα του αέρα,  $\rho$ , εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την πίεση, σύμφωνα με τη σχέση

$$\rho = 348,8 \cdot 10^3 \frac{P_a}{\Theta} \cong 1,2 \div 1,3 \text{ Kg}/m^3$$

όπου  $P_a$  η ατμοσφαιρική πίεση σε mbar και  $\Theta$  η θερμοκρασία σε °C.

Τελικά, η ισχύς κινητικής ενέργειας του ανέμου εξαρτάται από τη θερμοκρασία του αέρα καθώς και από την ατμοσφαιρική πίεση στο συγκεκριμένο τόπο.

### 3.2.3 Κατασκευαστική διαμόρφωση ανεμογεννητριών

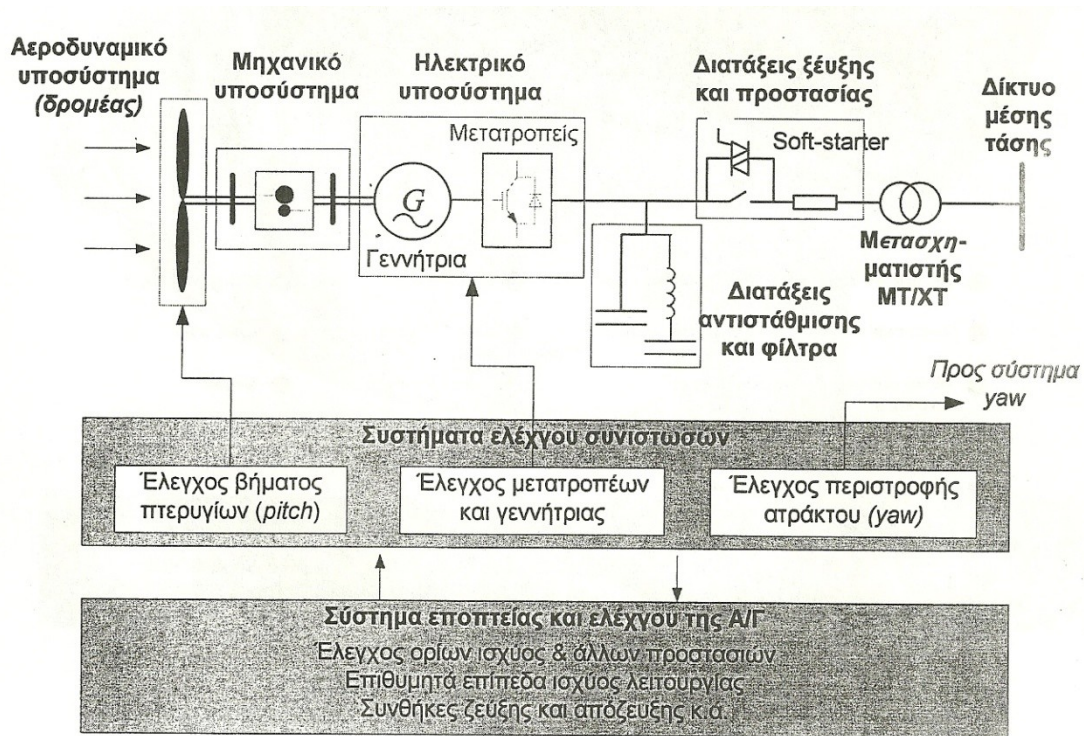
#### 3.2.3.1 Βασικά υποσυστήματα και άλλα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά

Τα τρία βασικά υποσυστήματα μιας ανεμογεννήτριας είναι το μηχανικό, το ηλεκτρικό και το σύστημα ελέγχου.

- Το μηχανικό σύστημα περιλαμβάνει κυρίως τον ανεμοκινητήρα, αποτελεί δηλαδή το σύστημα μετατροπής της ενέργειας του ανέμου σε μηχανική. Συνήθως μεταξύ του ανεμοκινητήρα και της γεννήτριας μεσολαβεί μία διάταξη μεταφοράς της κίνησης, η οποία περιλαμβάνει έναν πολλαπλασιαστή στροφών καθώς και συνδέσμους προς τον ανεμοκινητήρα ή και τη γεννήτρια.
- Το ηλεκτρικό σύστημα περιλαμβάνει τη γεννήτρια και ενδεχομένως ένα μετατροπέα ισχύος, που παρεμβάλλεται μεταξύ της γεννήτριας και του δικτύου ή του φορτίου, όπως π.χ. ένα μετατροπέα AC-DC-AC για τον έλεγχο της ροής ισχύος. Η γεννήτρια μπορεί να είναι σύγχρονη, οπότε η συχνότητα της παραγόμενης τάσης είναι ακριβώς ανάλογη των στροφών, ή ασύγχρονη, οπότε η συχνότητα της παραγόμενης τάσης δεν είναι μεν ακριβώς ανάλογη των στροφών αλλά αυξάνεται πολύ λίγο με το φορτίο (μέχρι 3%) ώστε και πάλι να μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά σταθερή. Μία εναλλακτική επιλογή είναι η χρησιμοποίηση γεννήτριας Συνεχούς Ρεύματος με παρεμβολή αντιστροφέα.
- Το σύστημα ελέγχου της Α/Γ είναι το συνολικό σύστημα εποπτείας (supervision and management) και περιλαμβάνει και επιμέρους συστήματα ελέγχου, όπως της κλίσης των πτερυγίων (pitch control), των μετατροπέων ισχύος, της γεννήτριας και της περιστροφής της ατράκτου (yaw control). Αυτό το σύστημα προσαρμόζει τη λειτουργία της Α/Γ στις εκάστοτε συνθήκες ανέμου, επιτηρεί την ασφάλεια και μεγιστοποιεί την απόδοσή της. Η πολυπλοκότητα των συστημάτων ελέγχου παρουσιάζει συνεχή αύξηση κατά τα τελευταία χρόνια και αποτελεί βασικό κριτήριο εξέλιξης των Α/Γ.

Για τη σύνδεση της Α/Γ στο δίκτυο μέσης τάσης υπάρχουν ακόμα διατάξεις αντιστάθμισης και φίλτρα, διατάξεις ζεύξης και προστασίας (πχ διακόπτης ισχύος, ηλεκτρονόμος προστασίας, σύστημα ομαλής εκκίνησης soft-starter, κ.ά.) καθώς και μετασχηματιστής XT/MT.

Το Σχήμα 3.28 παρουσιάζει όλα αυτά τα συστήματα.



Σχήμα 3.28

Πριν αναλύσουμε τα τρία βασικά υποσυστήματα μιας ανεμογεννήτριας, θα πρέπει να γίνει αναφορά και σε κάποια ακόμα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, όπως ο πύργος, η έλικα και τα πτερύγια.

→Πύργος:

Ο πύργος της ανεμογεννήτριας στηρίζει την έλικα και την άτρακτο, η οποία περιέχει το μηχανικό φρένο, το κιβώτιο ταχυτήτων, τη γεννήτρια και το μηχανισμό περιστροφής. Το ύψος του πύργου κατά το παρελθόν κυμαινόταν στο εύρος των 25-55m. Την τελευταία δεκαετία όμως το ύψος αυτό έχει φτάσει να ανέρχεται ακόμα και στα 115m. Για ανεμογεννήτριες μεσαίου και μεγάλου μεγέθους μάλιστα ο πύργος είναι συνήθως ελαφρά ψηλότερος από τη διάμετρο της έλικας. Για ανεμογεννήτριες μικρού μεγέθους όμως ο πύργος είναι λίγες φορές μεγαλύτερος από τη διάμετρο της έλικας, για να αποφεύγεται το φτωχό αιολικό περιεχόμενο σε μικρά ύψη πάνω από το έδαφος.

Οι πύργοι που χρησιμοποιούνται στις μέρες μας μπορεί να είναι μεταλλικοί (δικτυωτοί ή συνηθέστερα σωληνωτοί), αλλά και από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Το κύριο μελέτημα στην κατασκευή του πύργου είναι η δυναμική του συμπεριφορά. Βασικής σημασίας για την επιλογή του πύργου είναι ο προβλεπόμενος τρόπος μεταφοράς και εγκατάστασής του σε συνδυασμό με την όλη συναρμολόγηση και της ανεμογεννήτριας και την

επίδρασή της. Ο πύργος υπολογίζεται ως πακτωμένη δοκός, η οποία υφίσταται σύνθετη στατική και κυρίως δυναμική καταπόνηση. Ο σχεδιασμός του πύργου ώστε να αποφεύγονται συνθήκες συντονισμού έχει βασική σημασία.

#### →Ελικά και πτερύγια:

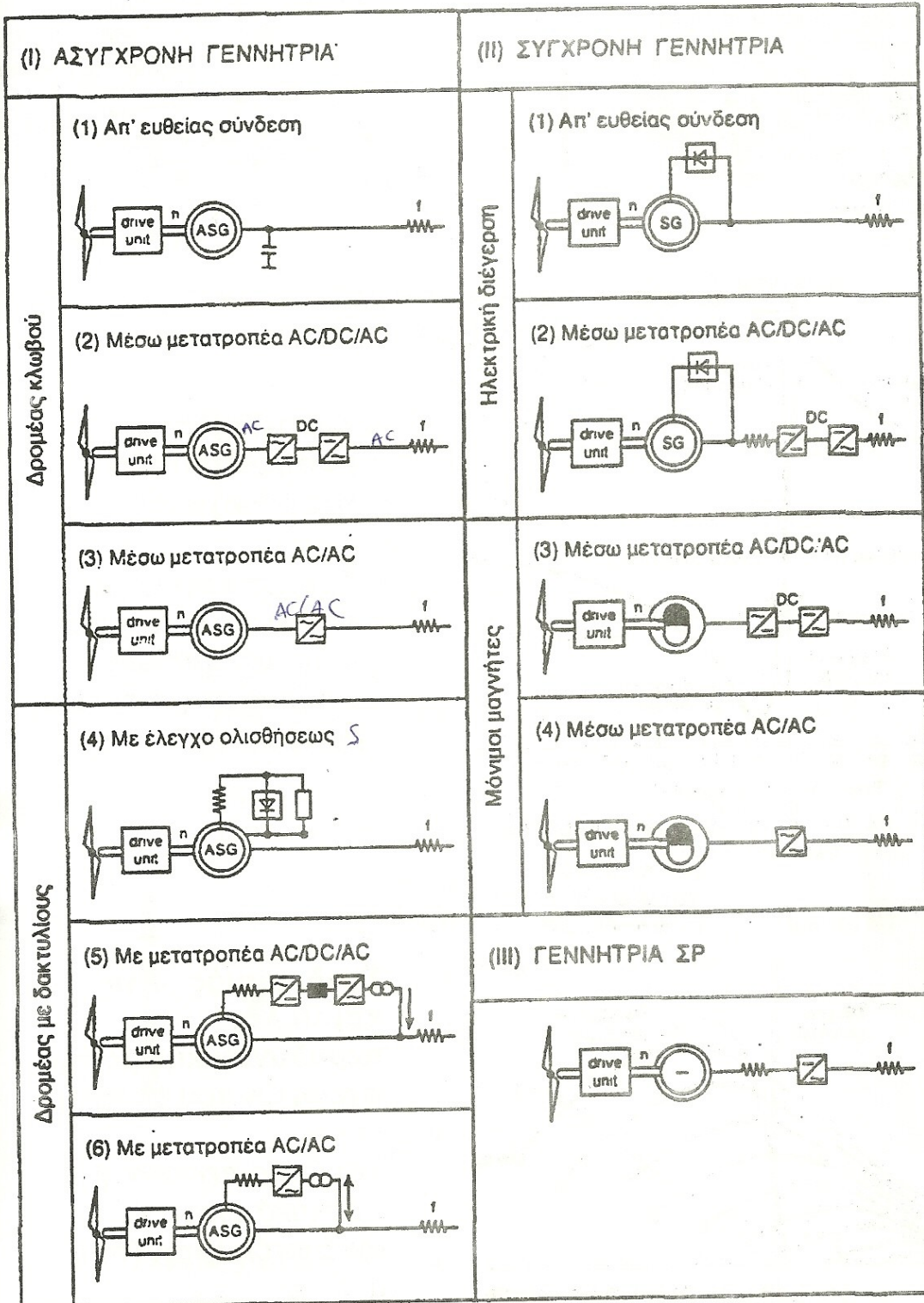
Ο δρομέας (ή έλικα) αποτελείται στους σύγχρονους ανεμοκινητήρες από 2 ή 3 πτερύγια, τα οποία έχουν την αεροδυναμική μορφή των ελίκων αεροπλάνων με αρκετή συστροφή και συνεχή μείωση της διατομής τους από την βάση προς τα άκρα.

Η τεχνολογία κατασκευής των πτερυγίων βρίσκεται σε συνεχή εξέλιξη και πολλά είδη υλικών έχουν χρησιμοποιηθεί: για τους μικρούς ανεμοκινητήρες χρησιμοποιούνται πολυουρεθάνη, υαλόνημα και ξύλο, για τους μεσαίου μεγέθους υαλονήματα σε πολλαπλές στρώσεις και εναλλαγή κατευθύνσεων και για τους μεγάλους ανεμοκινητήρες χρησιμοποιούνται τεχνολογίες ελίκων αεροπλάνων (ανθρακονήματα κλπ).

Η στήριξη των πτερυγίων της έλικας στον άξονα του δρομέα μπορεί να είναι σταθερή (πτερύγιο σταθερού βήματος) ή μεταβλητή, δηλαδή να είναι δυνατή η περιστροφή του στο σημείο έδρασης (πτερύγιο μεταβλητού βήματος). Επίσης, το πτερύγιο μπορεί να αποτελείται από δύο τμήματα, ένα τμήμα σταθερό στηριζόμενο στον άξονα και ένα επιπλέον ρυθμιζόμενο ακροπτερύγιο. Οι παραπάνω παραλλαγές είναι βασικής σημασίας για τον έλεγχο ισχύος- στροφών του ανεμοκινητήρα καθώς και για την ασφάλεια της λειτουργίας του.

### 3.2.3.2 Ηλεκτρικό σύστημα

Το Σχήμα 3.29 παρουσιάζει όλες τις δυνατές διαμορφώσεις του ηλεκτρικού συστήματος μιας Α/Γ [7]:



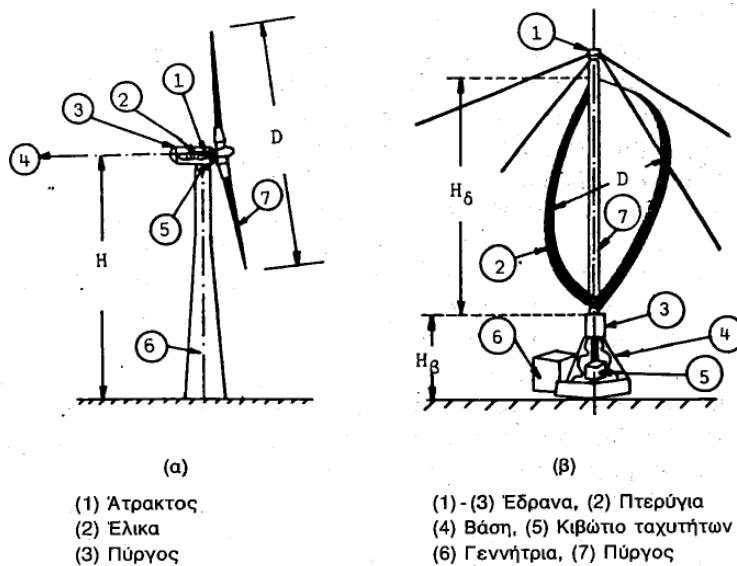
Σχήμα 3.29

Οι συνηθέστερες χρησιμοποιούμενες διαμορφώσεις είναι οι εξής:

1. Η ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα, μεταβλητής αντίστασης, απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο
2. Η σύγχρονη γεννήτρια με τύλιγμα διεγέρσεως
3. Η σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών
4. Και πολύ σπάνια η ασύγχρονη γεννήτρια με δρομέα κλωβού, απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο

### 3.2.3.3 Μηχανικό σύστημα

Το μηχανικό σύστημα, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αποτελείται κυρίως από τον ανεμοκινητήρα, το σύστημα μετάδοσης της κίνησης δηλαδή. Υπάρχουν δύο κυρίως τύποι ανεμοκινητήρα, άρα και ανεμογεννητριών: οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα και οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα.



Σχ. 2.2. (α) Α/Κ οριζοντίου άξονα  
(β) Α/Κ κατακόρυφου άξονα

Σχήμα 3.30

#### 3.2.3.3.1 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα

Παραθέτουμε κάποια τυπικά μεγέθη εμπορικών ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα:

Ισχύς: 500-5000 kW

Διάμετρος δρομέα: 40-120m

Δρομείς 3 πτερυγίων

Ύψος: 50-120m

Εύρος ταχυτήτων ανέμου: 3-30 m/s

Ονομαστική ταχύτητα ανέμου: 12-16 m/s

Ονομαστική ταχύτητα δρομέα: 12-40 rpm

Εύρος ταχυτήτων δρομέα: 8-40 rpm

Κόστος: ~1000 ευρώ/kW

### 3.2.3.3.2 Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα

Ο κυριότερος τύπος ανεμοκινητήρα κατακόρυφου άξονα είναι ο Darrieus. Ο άξονας περιστροφής του δρομέα αποτελεί και τον πύργο στήριξης, ο οποίος συχνά προσδένεται με επιτόνους. Έχουν 2 ή 3 πτερύγια, των οποίων η διατομή είναι παρόμοια με του οριζόντιου άξονα, αλλά παραμένει σταθερή καθ' όλο το μήκος τους.

Ένας άλλος τύπος ανεμοκινητήρα κατακόρυφου άξονα είναι ο μεταβαλλόμενης γεωμετρίας. Με την μεταβολή της γεωμετρίας του πτερυγίου επιτυγχάνεται ο έλεγχος στροφών.

Πρακτικά μειονεκτήματα της ανεμογεννήτριας κατακόρυφου άξονα είναι ότι το κάτω μέρος του δρομέα είναι πολύ κοντά στο έδαφος, έχει μέτρια συνολική απόδοση, καταλαμβάνει σχετικά μεγάλη επιφάνεια λόγω των καλωδίων στήριξης, παρουσιάζει δυσκολία στη μηχανική της συντήρηση (πχ αλλαγή των εδράνων στήριξης απαιτεί διάλυση όλης της μηχανής), δίνει αεροδυναμική ισχύ εξόδου με μεγάλες ταλαντώσεις (λόγω της συνεχούς αλλαγής του βήματος των πτερυγίων κατά την περιστροφή τους) και έχει πολύ χαμηλή ροπή εκκίνησης οπότε η εκκίνηση πρέπει να γίνεται με άλλα μέσα.

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα παρουσιάζουν το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτούν σύστημα αυτοματισμού δρομέα προς την διεύθυνση του ανέμου καθώς επίσης και ότι η εγκατάσταση του συστήματος μετατροπής σε ηλεκτρική ενέργεια (πολλαπλασιαστής στροφών, γεννήτρια) βρίσκεται στο επίπεδο του εδάφους στην βάση του ανεμοκινητήρα. Γενικότερα οι ανεμοκινητήρες κατακόρυφου άξονα είναι κατασκευαστικά απλούστεροι του οριζόντιου άξονα πράγμα που αντισταθμίζει μερικά το μικρότερο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος.

### 3.2.3.4 Σύστημα ελέγχου

#### ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ:

Να σημειωθεί αρχικά ότι η ταχύτητα του δρομέα πρέπει να ελέγχεται για τρεις λόγους:

- Για μέγιστη απόληψη ισχύος από τον άνεμο

- Για προστασία του δρομέα, της γεννήτριας και των ηλεκτρονικών ισχύος από υπερφόρτιση σε συνθήκες υψηλού ανέμου
- Για προστασία του δρομέα από υπερταχύτητα κατά τη διάρκεια αποσύνδεσης ή άλλου φαινομένου

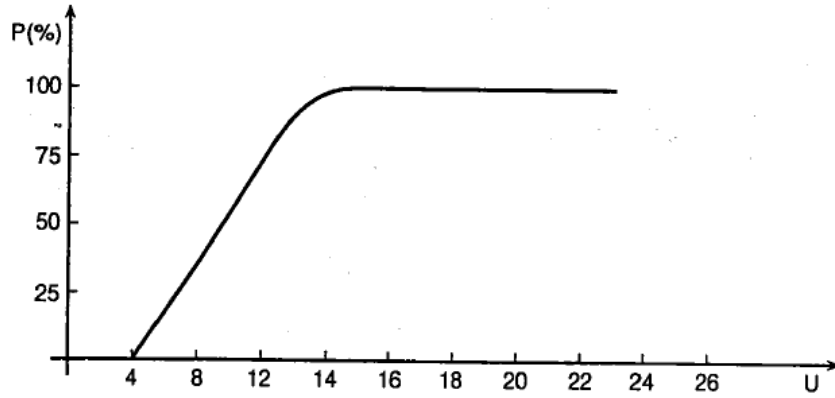
Μπορούν να διακριθούν οι εξής περιοχές για τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου :

- Την ταχύτητα σύνδεσης της ανεμογεννήτριας (cut-in speed), στην οποία αρχίζει η ανεμογεννήτρια να παράγει ισχύ
- Την περιοχή βέλτιστου αεροδυναμικού συντελεστή (constant maximum  $C_p$  region), όπου η ταχύτητα περιστροφής μεταβάλλεται (για ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών πάντα) ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου έτσι ώστε η απόληψη ισχύος από τον άνεμο να βελτιστοποιείται
- Την περιοχή σταθερής ισχύος εξόδου (constant power output region)
- Την ταχύτητα αποσύνδεσης (cut-out speed)

Κατά τα πρώτα χρόνια ανάπτυξης των ανεμογεννητριών, ο έλεγχος περιοριζόταν στο μηχανικό σύστημα και κάλυπτε τις βασικές απαιτήσεις (εκκίνηση, οριακή ισχύς, διακοπή λειτουργίας για λόγους ασφαλείας) συνήθως με μηχανικές μόνο διατάξεις. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των μετατροπέων συχνότητας με ηλεκτρονικά ισχύος δίδεται σήμερα η δυνατότητα πραγματοποίησης μεγάλου μέρους του ελέγχου της ανεμογεννήτριας μέσω του ηλεκτρικού συστήματος, οπότε ο έλεγχος της ανεμογεννήτριας γίνεται τελικά πιο ευέλικτος και αξιόπιστος.

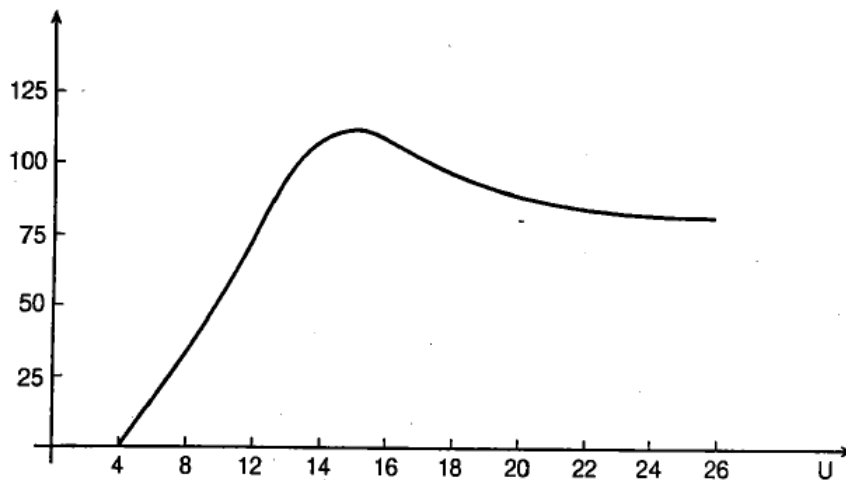
Σήμερα οι βασικές λειτουργίες ελέγχου είναι οι ακόλουθες:

1. Οι λειτουργίες που αφορούν στην εκκίνηση της ανεμογεννήτριας, όταν η ταχύτητα του ανέμου σταθεροποιηθεί πάνω από ένα όριο, και αντίστοιχα το σταμάτημά της, όταν η ταχύτητα του ανέμου μειωθεί κάτω από ένα όριο.
2. Οι λειτουργίες ελέγχου που αποσκοπούν στον προσανατολισμό της ανεμογεννήτριας ώστε το επίπεδο περιστροφής της έλικας να βρίσκεται συνεχώς κάθετα προς την διεύθυνση του ανέμου. Ο έλεγχος αυτός δεν αφορά τις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα, οι οποίες δεν απαιτούν κανένα σύστημα προσανατολισμού, πράγμα που αποτελεί και ένα από τα πλεονεκτήματά τους σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα.
3. Οι λειτουργίες και τα αντίστοιχα τμήματα ασφάλειας με τα οποία επιτυγχάνεται το σταμάτημα της περιστροφής (πέδηση) της ανεμογεννήτριας και η στροφή των πτερυγίων της έλικας, ώστε να παρουσιάζουν την ελάχιστη αντίσταση όταν η ταχύτητα του ανέμου φτάσει το όριο αντοχής της σε μηχανική καταπόνηση.
4. Οι λειτουργίες ελέγχου στροφών της ανεμογεννήτριας, όταν πρόκειται για ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών.
5. Οι λειτουργίες ελέγχου για τη μη υπέρβαση της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας, όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί μία ορισμένη τιμή. Ο έλεγχος αυτός γίνεται συνήθως στον ανεμοκινητήρα. Έτσι προκύπτουν δύο κατηγορίες ανεμοκινητήρων:
  - I. Οι ανεμοκινητήρες με έλεγχο του βήματος της έλικας (pitch control). Σε αυτούς επιτυγχάνεται πλήρης σταθερότητα της παραγόμενης ισχύος (ίση με την ονομαστική) για ταχύτητες ανέμου πάνω από ένα όριο.



Σχήμα 1.31

- II. Οι ανεμοκινητήρες με έλεγχο της αεροδυναμικής ανυψώσεως ή αεροδυναμικό έλεγχο (stall control). Η σταθεροποίηση της παραγόμενης ισχύος πραγματοποιείται λόγω αεροδυναμικών φαινομένων και έτσι εμφανίζεται μείωση της παραγόμενης ισχύος για πολύ μεγάλες ταχύτητες του ανέμου. Έναντι του μειονεκτήματος αυτού, παρουσιάζουν το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτούν μηχανισμό μεταβολής του βήματος της έλικας και συνεπώς είναι απλούστερες και στιβαρότερες. Όμως τα πτερύγια υφίστανται μεγαλύτερες δυναμικές καταπονήσεις.



Σχήμα 3.32

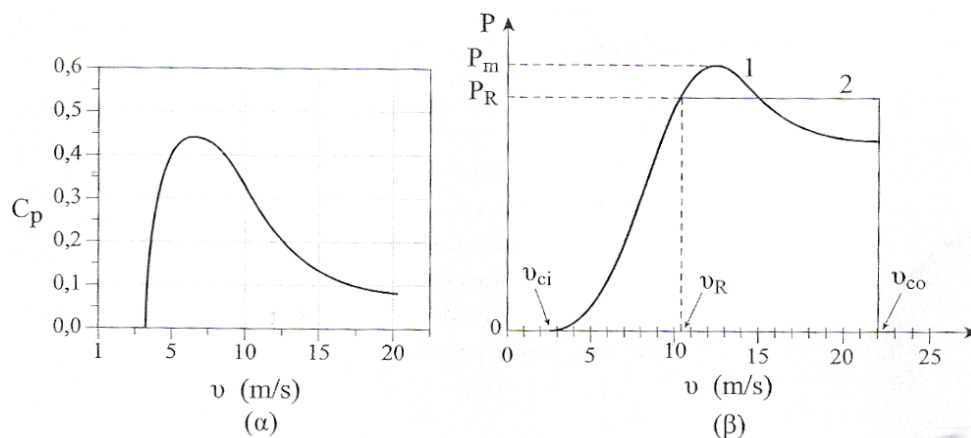
Εκτός από τις δύο αυτές μεθόδους ελέγχου μη υπερβάσεως της ονομαστικής ισχύος, οι οποίες πραγματοποιούνται δια του μηχανικού μέρους, το αντίστοιχο μπορεί να γίνει και μέσω του ηλεκτρικού μέρους όταν εγκαθίσταται μετατροπέας, αν και ο έλεγχος αφορά κυρίως την βελτίωση των χαρακτηριστικών της λειτουργίας (ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών)



### 3.2.4 Μετατροπή αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική

#### 3.2.4.1 Αεροδυναμική ισχύς

Για τη μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ενέργεια περιστρεφόμενης μηχανής χρησιμοποιείται ειδικά διαμορφωμένη κατασκευή, η οποία τίθεται σε περιστροφή από τον άνεμο και ονομάζεται πτερωτή. Στην πτερωτή η κινητική ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται, με ορισμένο ρυθμό, σε περιστροφική ενέργεια. Η ισχύς  $P_M$ , με την οποία αποδίδεται έργο στην αιολική μηχανή, χαρακτηρίζει τη δυνατότητά της για παραγωγή περαιτέρω μηχανικού έργου. Επειδή, όμως, ένα τμήμα της μάζας του αέρα που προσπίπτει στη πτερωτή τη διαπερνά χωρίς να αποδίδει σε αυτήν κατ' ανάγκη όλη την ενέργειά του, η μέγιστη μηχανική ισχύς,  $P_{M,max}$ , που θα μπορούσε να αποδώσει θεωρητικά ο άνεμος στην πτερωτή της αιολικής μηχανής είναι μικρότερη της  $P_a$  και είναι ίση με:  $P_{M,max} = C_{p,max} \cdot P_a$ , όπου  $C_{p,max}$  ο ιδανικός συντελεστής (μηχανικής) απόδοσης της πτερωτής. Η τιμή του, όπως αποδεικνύεται, ισούται με 0,593 και ονομάζεται όριο Betz. Δηλαδή, ιδανικά, μόνο το 59,3% της  $P_a$  θα μπορούσε να αξιοποιηθεί από μια πτερωτή. Στην πράξη, ο συντελεστής απόδοσης πτέρυγας ή αιολικής μηχανής,  $C_p = P_M / P_a$ , είναι μικρότερος του ορίου Betz και εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου (Σχήμα 3.33.α) και τη διαμόρφωση των πτερυγίων της αιολικής μηχανής.



Σχήμα 3.33 Συντελεστής απόδοσης και ηλεκτρική ισχύς συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου

Στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου  $u_R$ , αντιστοιχεί η ονομαστική ισχύς  $P_R$  της Α/Γ. Η ταχύτητα έναρξης λειτουργίας της Α/Γ είναι  $u_{ci}$ , ενώ η ταχύτητα ανέμου στην οποία η Α/Γ τίθεται εκτός λειτουργίας συμβολίζεται  $u_{co}$ . Στο Σχήμα 3.33.β η καμπύλη 2 αποδίδει τη θεωρητική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας, κατά την οποία η αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς στις υψηλές ταχύτητες διατηρείται σταθερή μέχρι την ταχύτητα αποκοπής  $u_{co}$ .

Αν η πτερωτή συνδυάζεται με ηλεκτρογεννήτρια, τότε έχουμε μια ανεμογεννήτρια (Α/Γ). Συνεπώς, η αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς από μια Α/Γ δίνεται από τη σχέση:

$$P_{A/G} = \eta_{μ\eta\zeta} \cdot \eta_{\eta\lambda} \cdot P_M = C_p \cdot \eta_{μ\eta\zeta} \cdot \eta_{\eta\lambda} \cdot P_a \Rightarrow P_{A/G} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot C_p \cdot \eta_{μ\eta\zeta} \cdot \eta_{\eta\lambda} \cdot u^3$$

όπου:

$C_p$ : ο συντελεστής απόδοσης της αιολικής μηχανής και αφορά στο ποσοστό μετατροπής της, ανά μονάδα χρόνου, κινητικής ενέργειας της ποσότητας του ανέμου, που προσπίπτει στα πτερύγια της ανεμογεννήτριας, σε περιστροφική ενέργεια

$\eta_{μηχ}$ : ο συντελεστής απόδοσης μηχανικών μερών της Α/Γ στην είσοδο της ηλεκτρογεννήτριας. Η μεταβιβαζόμενη ενέργεια προς την ηλεκτρογεννήτρια μειώνεται εξ αιτίας των τριβών στα σημεία έδρασης του άξονα περιστροφής των πτερυγίων και στα γρανάζια του κιβωτίου μετατροπής στροφών, με τιμή μέχρι 95%

$\eta_{ηλ}$ : ο συντελεστής απόδοσης της ηλεκτρογεννήτριας, με τιμή μέχρι 80%

Στο Σχήμα 3.33.β αποδίδεται η τυπική μορφή της εξάρτησης της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος από μία Α/Γ, σε διάφορες ταχύτητες ανέμου. Από το σχήμα αυτό γίνεται εμφανής η ισχυρή εξάρτηση της ισχύος από την ταχύτητα του ανέμου. Είναι λοιπόν σημαντικό να επιλέγονται θέσεις εγκατάστασης των ανεμογεννητριών με κύριο κριτήριο το υψηλό αιολικό δυναμικό καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Αυτό σημαίνει ότι οι θέσεις που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για εγκατάσταση ανεμογεννητριών είναι θέσεις με υψηλή μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου και μικρές διακυμάνσεις της ταχύτητάς του, για όλους τους μήνες του έτους.

Τυπικό χαρακτηριστικό κάθε ανεμογεννήτριας αποτελεί η ονομαστική ηλεκτρική ισχύς της,  $P_R$ , η οποία αφορά στην αποδιδόμενη ισχύ όταν λειτουργεί σε αιολικό πεδίο ονομαστικής ταχύτητας ανέμου  $u_R$ . Ένα σχετικά αυστηρό κριτήριο καθορισμού της είναι η επιλογή εκείνης της ταχύτητας ανέμου στην οποία ο λόγος  $P_{A/G}/P_a$  παίρνει μέγιστη τιμή. Στο ίδιο σχήμα παρατηρείται επίσης ότι σε πολύ χαμηλές ταχύτητες ανέμου, μέχρι την ορισμένη χαρακτηριστική τιμή  $u_{ci}$  (ταχύτητα έναρξης λειτουργίας, cut-in wind speed), η αποδιδόμενη ισχύς είναι μηδενική, δηλαδή η Α/Γ δε λειτουργεί. Ομοίως, σε πολύ υψηλές ταχύτητες, μεγαλύτερες ενός ορίου  $u_{co}$  (ταχύτητα εξόδου, cut-out wind speed), η Α/Γ ακινητοποιείται για λόγους προστασίας της.

Σε ορισμένη ταχύτητα ανέμου  $u_F$  (Furling wind speed), λίγο πάνω από την  $u_R$ , τίθεται σε λειτουργία κατάλληλη μηχανική διάταξη μείωσης του ρυθμού περιστροφής της Α/Γ, παρά την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Μια συνήθης τεχνική περιορισμού των στροφών της Α/Γ, που αφορά στη χρήση μηχανισμού αυτόματης απόκλισης του ουραίου πτερυγίου της από τη διεύθυνση του άξονά της, είναι οι ανεμογεννήτριες με ουραίο πτερύγιο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου, τόσο το επίπεδο της πτερωτής τείνει να προσανατολιστεί παράλληλα προς την κατεύθυνση ροής του ανέμου, ώστε τελικά ο ρυθμός περιστροφής της Α/Γ να μειώνεται ισχυρά.. Υπάρχουν και άλλοι τρόποι που οδηγούν σε παρόμοιο αποτέλεσμα, π.χ. με κατακόρυφη κλίση ολόκληρης της Α/Γ προς τα πίσω ή με στροφή των πτερυγίων περί τον άξονά τους.

Μετά την ταχύτητα  $u_F$  και πολύ κοντά σε αυτήν, η αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς παίρνει τη μέγιστη τιμή της  $P_{max}$  ή  $P_p$  (Peak Power). Συχνά, όσο αφορά στη χαρακτηριστική καμπύλη της Α/Γ, το πέραν της  $u_R$  τμήμα της σχεδιάζεται ως ευθύγραμμο, παράλληλο στον άξονα των ταχυτήτων, σε ισχύ  $P_R$ , μέχρι την ταχύτητα αποκοπής  $u_{co}$ , (Σχήμα 3.33.β, καμπύλη 2).

### 3.2.4.2 Λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου, $\lambda$

Το πλήθος των πτερυγίων και η συχνότητα περιστροφής τους αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για την αποδιδόμενη μηχανική ισχύ από την πτερωτή. Πυκνή διάταξη των πτερυγίων σε συνδυασμό με μεγάλη συχνότητα περιστροφής ή αραιά διατεταγμένα πτερύγια σε συνδυασμό με χαμηλή συχνότητα περιστροφής, οδηγούν σε μείωση του συντελεστή μηχανικής απόδοσης της αιολικής μηχανής.

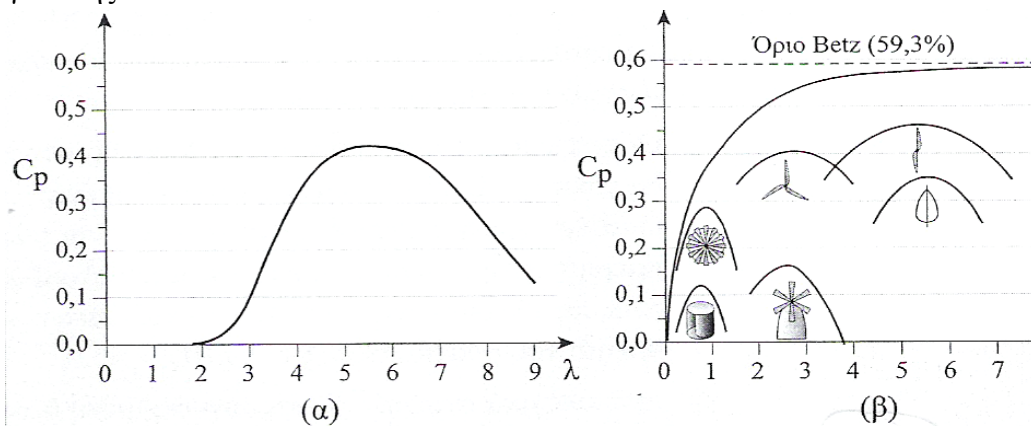
Για τη μελέτη της απόδοσης της  $C_p$  ορίζεται μια παράμετρος  $\lambda$ , ως το πηλίκο της γραμμικής ταχύτητας περιστροφής του άκρου του πτερυγίου  $u_{ακρ} = \omega \cdot R$ , προς την ταχύτητα του ανέμου  $u$ , στο σημείο εκείνο, αν δεν υπήρχε η διατάραξη ροής που προκαλείται από την πτερωτή. Δηλαδή:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{u}$$

Η απόδοση της αιολικής μηχανής,  $C_p$ , δηλαδή, εξαρτάται από την παράμετρο  $\lambda$  και την γωνία προσβολής του πτερυγίου από τον άνεμο. Μάλιστα, ο συντελεστής  $C_p$ , ως συνάρτηση του  $\lambda$ , εμφανίζει μέγιστο εξαρτώμενο από το πλήθος των πτερυγίων της  $A/\Gamma$ . Με απλούς συλλογισμούς αποδεικνύεται ότι:

$\lambda \approx \frac{4 \cdot \pi}{n}$ . Η μέγιστη τιμή  $\lambda_0$ , εξαρτάται, κατά κύριο λόγο, από το πλήθος  $n$

των πτερυγίων της πτερωτής. Ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίων  $\lambda$  αποτελεί σημαντικότερη παράμετρο για τη μελέτη και το σχεδιασμό της πτερωτής μιας ανεμογεννήτριας. Εξαρτάται από την ακτίνα του κύκλου των πτερυγίων, την ταχύτητα του ανέμου και τη συχνότητα περιστροφής του κινητήρα της ανεμογεννήτριας. Το Σχήμα 3.34.α δίνει την τυπική μορφή της εξάρτησης του  $C_p$  από τις τιμές του  $\lambda$ . Στο Σχήμα 3.34.β, δίνονται οι γραφικές παραστάσεις της εξάρτησης της μηχανικής απόδοσης της αιολικής μηχανής, ανάλογα με τον τύπο, το πλήθος και τη διαμόρφωση των πτερυγίων της.



Σχήμα 3.34

### 3.2.5 Καθορισμός της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας

Για να υπολογιστεί η ονομαστική ισχύς της καταλληλότερης Α/Γ, για μια συγκεκριμένη εφαρμογή, απαιτούνται:

- Οι ενεργειακές απαιτήσεις της εφαρμογής, στη συγκεκριμένη χρονική περίοδο χρήσης. Λαμβάνεται υπόψη ένας συντελεστής περιθωρίου ενεργειακών καταναλώσεων, που καλύπτει και τη διαθεσιμότητα του συστήματος.
- Ανεμολογικά στοιχεία για τη συγκεκριμένη θέση εγκατάστασης, με βάση το τυπικό μετεωρολογικό έτος του τόπου.
- Χαρακτηριστικές καμπύλες ισχύος Α/Γ, που παρέχονται από τους κατασκευαστές. Απαιτούνται στοιχεία για τους τύπους και τα μεγέθη ανεμογεννητριών, που μπορούν να λειτουργήσουν αποδοτικότερα στην πιθανότερη περιοχή ταχυτήτων της θέσης εγκατάστασης.

Γενικά, ο προσδιορισμός της ονομαστικής ισχύος της καταλληλότερης ανεμογεννήτριας, για μια συγκεκριμένη εφαρμογή, βασίζεται στην απαίτηση η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια να καλύπτει μερικώς ή ολικώς την ενέργεια ζήτησης στο ίδιο χρονικό διάστημα.

Στα συνδεδεμένα στο δίκτυο αιολικά συστήματα η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται στο δίκτυο, που παίζει το ρόλο μιας τεράστιας ενεργειακής δεξαμενής, της οποίας η στάθμη παραμένει σε αντιστοιχία με την ισχύ ζήτησης, με ρύθμιση της ισχύος των εργοστασιακών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στα αυτόνομα αιολικά συστήματα, η μερική κάλυψη του φορτίου ζήτησης σχετίζεται οπωσδήποτε με την παρουσία Η/Ζ (ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους). Ο συνδυασμός Α/Γ με Φ/Β και Η/Ζ (Υβριδικά Συστήματα), οδηγεί σε οικονομικότερο σύστημα, με πιο αξιόπιστη ενεργειακή συμπεριφορά.

### 3.2.6 Συντελεστής ισχύος ανεμογεννήτριας

Η μέση ημερήσια (μηνιαία ή ετήσια) ηλεκτρική ισχύς που παρέχεται από μια ανεμογεννήτρια προκύπτει, με βάση τον ορισμό της, από τη σχέση:  $\overline{P_{A/\Gamma}} = \frac{E_{A/\Gamma}}{T} = \frac{1}{T} \int_0^T P_{A/\Gamma} dt$ , όπου

$E_{A/\Gamma}$  η παραγόμενη στην αντίστοιχη χρονική περίοδο  $T$  ηλεκτρική ενέργεια και  $P_{A/\Gamma}$  η στιγμιαία ηλεκτρική ισχύς από την Α/Γ σε ταχύτητα ανέμου  $u$ . Διαιρώντας τη στιγμιαία ισχύ  $P_{A/\Gamma}$  δια της ονομαστικής  $P_R$  προκύπτει η ποσότητα  $n_{A/\Gamma}(u) = P_{A/\Gamma} / P_R$  που αποτελεί την ανηγμένη ισχύ της Α/Γ. Οι τιμές της μπορεί να προσδιοριστούν άμεσα, είτε από πειραματικές τιμές της αποδιδόμενης από την Α/Γ ηλεκτρικής ισχύος, για ορισμένη χρονική περίοδο, είτε από τη χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος της Α/Γ (Σχήμα 3.33.β).

Επιπλέον, η μέση ημερήσια ηλεκτρική ισχύς από μια Α/Γ μπορεί να προσδιοριστεί έμμεσα, με βάση το στατιστικό προσδιορισμό της μέσης τιμής ενός χρονικά μεταβαλλόμενου μεγέθους. Από την παραπάνω σχέση, προκύπτει:

$$\overline{P_{A/\Gamma}} = \frac{E_{A/\Gamma}}{T} = \left( \frac{1}{T} \int_0^T \frac{P_{A/\Gamma}(u)}{P_R} \right) \cdot P_R = \left( \int_0^\infty \frac{P_{A/\Gamma}(u)}{P_R} f(u) dt \right) \cdot P_R = n_{A/\Gamma} \cdot P_R$$

όπου  $f(u)$  η πυκνότητα πιθανότητας εμφάνισης ανέμου ταχύτητας  $u$  στον τόπο εγκατάστασης της Α/Γ και  $n_{Α/Γ}$  ο συντελεστής ισχύος της Α/Γ. Ορίζεται ως ο λόγος της μέσης ηλεκτρικής ισχύος  $P_{Α/Γ}$  της Α/Γ, στο χρονικό διάστημα  $T$ , προς την ονομαστική της ισχύ.

Από πλευράς φυσικής σημασίας, ο συντελεστής ισχύος παρέχει την αποδιδόμενη από την Α/Γ μέση ηλεκτρική ισχύ ανά μονάδα ονομαστικής ισχύος της. Κατά μία άλλη έκφραση, παρέχει την αποδιδόμενη από την Α/Γ μέση ηλεκτρική ισχύ ως κλάσμα ή ποσοστό της ονομαστικής ισχύος της. Ουσιαστικά, προσδιορίζει την ισχύ με την οποία θα απέδιδε ηλεκτρική ενέργεια η Α/Γ, λειτουργώντας συνεχώς μέσα στη χρονική περίοδο αναφοράς.

### 3.2.7 Σύνδεση ανεμογεννήτριας στο ηλεκτρικό δίκτυο

Οι διαταραχές που προκαλούν οι Α/Γ είναι ανάλογες εκείνων που προκαλούνται από τα συνήθη φορτία και αναφέρονται στο σημείο σύνδεσης τους στο δίκτυο διανομής (ΧΤ ή ΜΤ). Ανεξάρτητα, ωστόσο, από το σημείο σύνδεσής τους, οι διαταραχές αυτές διακρίνονται ως εξής:

- Στις διαταραχές που συμβαίνουν κατά την κανονική λειτουργία και έχουν επίπτωση στην σταθερότητα της τάσης του δικτύου. Οι διαταραχές αυτές μπορούν να διακριθούν ως εξής:
  - Αργές μεταβολές της τάσης, οι οποίες προκαλούνται λόγω της αλλαγής στην ροή των φορτίων κατά την λειτουργία των Α/Γ.
  - Ταχείες μεταβολές της τάσης, οι οποίες διατηρούνται για μικρό σχετικά χρονικό διάστημα.
  - Διακυμάνσεις της τάσης, λόγω των συνεχών ταχέων μεταβολών της παραγόμενης ισχύος, οι οποίες οφείλονται στις αντίστοιχες μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου ή και σε συνεχείς ταλαντώσεις.
- Στις επιπτώσεις που έχει η ύπαρξη των Α/Γ κατά τη διάρκεια μη ομαλής λειτουργίας του δικτύου, οπότε η ύπαρξη τους είναι ενδεχόμενο να προκαλέσει:
  - Ανωμαλίες στην ορθή λειτουργία των προστασιών του δικτύου.
  - Απαράδεκτες καταπονήσεις των στοιχείων του δικτύου.
  - Επικίνδυνες καταστάσεις λόγω «απομονωμένης λειτουργίας» τμήματος του δικτύου, το οποίο απομονώνεται από την κύρια τροφοδότηση του, αλλά παραμένει τροφοδοτούμενο από τις Α/Γ με τάση και συχνότητα που μπορεί να απέχουν σημαντικά από τις ονομαστικές τους τιμές.

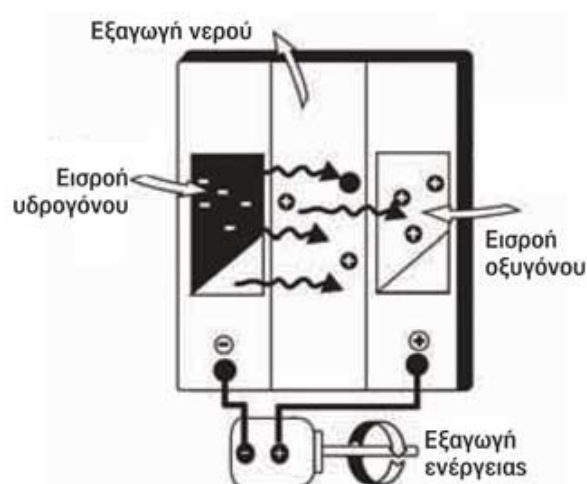
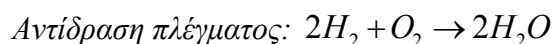
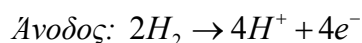
### 3.3 ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Οι κυψέλες καυσίμου είναι σχετικά μια νέα τεχνολογία παραγωγής ενέργειας καθώς η ηλικία της είναι περίπου 15 χρόνια (διάστημα κατά το οποίο σημειώθηκαν οι πρώτες εφαρμογές). Τα τελευταία χρόνια η εξέλιξη τους είναι ραγδαία και συνεχώς η χρήση τους διευρύνεται.

Αποτελούν την πιο αποδοτική και 'καθαρή' τεχνολογία για τη μετατροπή της χημικής ενέργειας που είναι αποθηκευμένη σε ένα καύσιμο σε άμεσα χρησιμοποιήσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Τα πλεονεκτήματά της την καθιστούν ιδανική πηγή για αρκετές εφαρμογές και αναμένεται να έχει σημαντικό ρόλο στα συστήματα καταναμημένης παραγωγής και στα μικροδίκτυα στο άμεσο μέλλον.

Η αρχή λειτουργίας των κυψελών καυσίμου βασίζεται στην πολύ απλή σκέψη ότι αντιστρέφοντας τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης του νερού θα μπορούσαμε να παράγουμε ρεύμα, με τη λογική ότι για την ηλεκτρόλυση χρειάζεται παροχή ρεύματος. Η πρώτη εξέταση του θέματος έγινε το 1938 από τον William Grove ο οποίος με ένα απλό πείραμα απέδειξε ότι η αντίστροφη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης του νερού συνοδεύεται από τη ροή ρεύματος [66].

Η κυψέλη καυσίμου, λοιπόν, είναι μια ηλεκτροχημική συσκευή που καταναλώνει υδρογόνο και οξυγόνο και παράγει ηλεκτρική ενέργεια, θερμότητα και νερό. Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούνται από δυο ηλεκτρόδια (την άνοδο- αρνητικό ηλεκτρόδιο και την κάθοδο- θετικό ηλεκτρόδιο), τα οποία διαχωρίζονται από έναν ηλεκτρολύτη, ο οποίος λέγεται αλλιώς και μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (proton exchange membrane, PEM). Ο ηλεκτρολύτης είναι από πολυμερές ή άλλο υλικό, το οποίο επιτρέπει την διέλευση ιόντων, αλλά όχι τη διέλευση των ηλεκτρονίων. Ένα καύσιμο που περιέχει υδρογόνο (π.χ. φυσικό αέριο) εισάγεται από την πλευρά της ανόδου, όπου τα ηλεκτρόνια του υδρογόνου ελευθερώνονται και κινούνται σε ένα εξωτερικό κύκλωμα δίδοντας ηλεκτρικό ρεύμα. Τα θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου διαπερνούν τον ηλεκτρολύτη και φτάνουν στην κάθοδο, όπου ενώνονται με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και το οξυγόνο, παράγοντας νερό. Αυτό αποδεικνύεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:



Σχήμα 3.35 Λειτουργία κυψέλης καυσίμου υδρογόνου

Για να επιταχυνθεί η διαδικασία του ιονισμού του υδρογόνου χρησιμοποιείται ένας καταλύτης υψηλής αγωγιμότητας στα ηλεκτρόδια (π.χ. πλατίνα), χωρίς να επηρεάζει την άνοδο ή την κάθοδο. Ο καταλύτης είναι συνήθως μια σκληρή και πορώδης σκόνη που καλύπτεται από χαρτί άνθρακα ή ύφασμα έτσι ώστε η μέγιστη δυνατή επιφάνεια να είναι εκτεθειμένη στο υδρογόνο ή το οξυγόνο.

Όταν το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι καθαρό υδρογόνο, τα μόνα παράγωγα της διεργασίας αυτής είναι ηλεκτρικό ρεύμα, καθαρό νερό και θερμότητα. Αν το υδρογόνο παράγεται με ηλεκτρόλυση νερού με τη βοήθεια ΑΠΕ τότε η εγκατάσταση μπορεί να θεωρηθεί ως εγκατάσταση ΑΠΕ.



Σχήμα 3.36 Συστήματα κυψελών καυσίμου μικρής ισχύος

Οι κυψέλες καυσίμου βρίσκουν σήμερα εφαρμογές και στις μεταφορές:



Σχήμα 3.37 Εφαρμογή κυψελών καυσίμου στις μεταφορές

Αν και το καταλληλότερο καύσιμο για τη λειτουργία των κυψελών καυσίμου είναι το καθαρό υδρογόνο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα άλλα καύσιμα.

Η απόδοση των συστημάτων των κυψελών καυσίμου είναι συνάρτηση του τύπου της κυψέλης και της δυναμικότητάς της. Η ηλεκτρική απόδοση μιας κυψέλης, καθορίζεται από τις αντίστοιχες αποδόσεις των επί μέρους υποσυστημάτων που τη συνθέτουν. Γενικά, παρουσιάζουν υψηλότερο βαθμό απόδοσης κατά 1/6 έως 1/3 από τις μονάδες εσωτερικής καύσης (ηλεκτρική

απόδοση μέχρι και 45% αλλά μικρή απόδοση συμπαραγωγής) με σαφώς μικρότερες εκπομπές ρύπων και πιο αθόρυβη λειτουργία. Η επισκευή τους όμως απαιτεί περισσότερο εξειδικευμένο προσωπικό από εκείνο των παραδοσιακών τεχνολογιών και υπάρχει μεγαλύτερη ευαισθησία στην ποιότητα καυσίμου.

Ανάλογα με τον τύπο ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται υπάρχουν διάφορα είδη κυψελών καυσίμου: μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM) , φωσφορικού οξέος (PAFC), λιωμένου ανθρακικού άλατος (MCFC), στερεού οξειδίου (SOFC), άμεσης μεθανόλης (DMFC), αλκαλικά (AFC). Οι τεχνολογίες αυτές είναι σε διαρκή εξέλιξη για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών τους, τη μείωση του κόστους τους, αλλά και την ασφαλή αποθήκευση και μεταφορά του υδρογόνου που χρησιμοποιούν, με τις τέσσερις πρώτες να έχουν περισσότερες εφαρμογές στον τομέα της διανεμημένης παραγωγής.

Τα γενικά τυπικά χαρακτηριστικά αυτών των μονάδων φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Ηλεκτρολύτης	Υδροξείδιο του καλίου	Πολυμερές	Πολυμερές	Φωσφορικό Οξύ	Μίγμα Ανθρακικών Αλκαλίων	Σταθεροποιημένο ζirkόνιο
Θερμοκρασία Λειτουργίας (°C)	60-90	70-100	90	150-220	600-700	650-1000
Θερμότητα από Συμπαραγωγή	Καθόλου	Χαμηλής ποιότητας	Καθόλου	Αποδεκτή για πολλές εφαρμογές	Υψηλή	Υψηλή
Βαθμός Απόδοσης	50 - 70%	40 - 50%	25 - 40%	40 - 45%	50 - 60%	50 - 60%
Καύσιμο	H <sub>2</sub> . Απαραίτητη απομάκρυνση του CO <sub>2</sub> από τα αέρια της ανόδου και της καθόδου.	H <sub>2</sub> . Αν αυτό προέρχεται από αναμόρφωση, η περιεκτικότητά σε CO να είναι CO<10ppm.	Διάλυμα νερού/μεθανόλης.	H <sub>2</sub> . Και από αναμόρφωση.	H <sub>2</sub> , CO, φυσικό αέριο	H <sub>2</sub> , CO, φυσικό αέριο
Ισχύς	Μέχρι 20kW	Μέχρι 250kW	<10kW	>50kW	>1MW	>200kW
Εφαρμογές	Μικρές μονάδες. Χρήση σε	Οικιακή και εμπορική παραγωγή	Φορητές συσκευές	Εμπορική παραγωγή. Μεγάλα	Εμπορική και βιομηχανική	Οικιακή, εμπορική και βιομηχανική



	διαστημικές εφαρμογές	Συστήματα κίνησης οχημάτων		οχήματα (λεωφορεία)	ή παραγωγή. Μονάδες μεγάλης ισχύος (MW)	παραγωγή (μεγάλη ισχύς).
Χρόνος Εκκίνησης (h)	<0.1	<0.1	<0.2	1-4	>10	5-10

### 3.4 ΜΙΚΡΟΤΟΥΡΜΠΙΝΕΣ

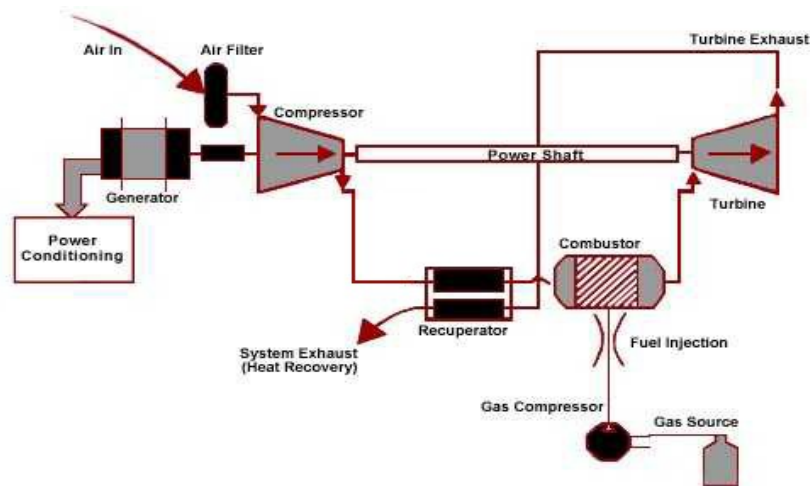
Οι γεννήτριες μικροτουρμπίνων αερίου (MTGs) είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία και θεωρείται πολύ σημαντική για εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος υψηλής πυκνότητας. Οι μονάδες αυτές είναι μικρού μεγέθους, πολύ υψηλής ταχύτητας και συνήθως συμπεριλαμβάνουν την τουρμπίνα αερίου (gas turbine), το συμπιεστή (compressor), τη γεννήτρια και τα ηλεκτρονικά ισχύος για τη σύνδεση τους στο δίκτυο. Τυπικά, λειτουργούν με φυσικό αέριο, αλλά δέχονται για τη λειτουργία τους και πολλά άλλα βιομηχανικά καύσιμα, όπως προπάνιο, diesel και κηροζίνη. Είναι επίσης ικανές να παράγουν ανανεώσιμη ενέργεια όταν τροφοδοτούνται με βιοαέριο.

Οι μικροτουρμπίνες είναι περιστροφικές μηχανές που παράγουν ενέργεια από τη ροή αερίου υπό πίεση. Αποτελούνται από έναν συμπιεστή που συνδέεται με μια τουρμπίνα αερίου μεγάλης ταχύτητας, η οποία οδηγεί μια ενσωματωμένη ηλεκτρική γεννήτρια, που λειτουργεί σε υψηλή ταχύτητα, μέσω ενός θαλάμου καύσης. Οι μικροτουρμπίνες μπορούν να λειτουργήσουν με τη μέθοδο του απλού κύκλου ή της ανάκτησης θερμότητας.

Σε έναν στρόβιλο απλού κύκλου, χωρίς ανάκτηση, μέσα στον καυστήρα (ignitor) προστίθεται ενέργεια στο ρεύμα αερίου, αέρας αναμιγνύεται με καύσιμο και αναφλέγεται. Η καύση αυξάνει την θερμοκρασία, την πτητικότητα και τον όγκο του αερίου. Αυτό κατευθύνεται προς τις λεπίδες της τουρμπίνας, περιστρέφοντάς τη και ενεργοποιώντας το συμπιεστή. Οι μικροτουρμπίνες απλού κύκλου έχουν χαμηλότερο κόστος, υψηλότερη αξιοπιστία και περισσότερη θερμότητα διαθέσιμη για τις εφαρμογές συμπαραγωγής, από ότι οι μονάδες ανάκτησης θερμότητας.

Οι μονάδες ανάκτησης θερμότητας χρησιμοποιούν έναν εναλλάκτη θερμότητας (recuperator) από φύλλα μετάλλου, που ανακτά τμήμα της θερμότητας από το ρεύμα αέρα που κατευθύνεται προς την εξάτμιση και το μεταβιβάζει στο εισερχόμενο κρύο ρεύμα αέρα. Ο προθερμασμένος αέρας στη συνέχεια, περνάει στον καυστήρα (combustor), όπου αναμιγνύεται με καύσιμο, αναφλέγεται και καίγεται. Η προθέρμανση του αέρα, μειώνει την ποσότητα των απαιτούμενων

καυσίμων για την αύξηση της θερμοκρασίας του στο απαραίτητο επίπεδο στην είσοδο του στροβίλου. Ο αναφλεκτήρας (ignitor) χρησιμοποιείται μόνο κατά τη διάρκεια της εκκίνησης και από εκεί και πέρα η φλόγα είναι αυτοσυντηρούμενη. Το αέριο από τον καυστήρα περνάει από το στόμιο της τουρμπίνας και από τον τροχό της τουρμπίνας, μετατρέποντας τη θερμική ενέργεια των καυτών διεσταλμένων αερίων σε στρεφόμενη μηχανική ενέργεια της τουρμπίνας. Η τουρμπίνα οδηγεί το συμπιεστή και τη γεννήτρια. Τα αέρια που εξέρχονται από την τουρμπίνα κατευθύνονται πάλι πίσω μέσω του εναλλάκτη θερμότητας, έξω στη θερμοαντική στήλη, για την παραγωγή θερμότητας για τους χρήστες.



Σχήμα 3.38 Δομή γεννήτριας με μικροτουρμπίνα αερίου

Ο λόγος της ηλεκτρικής προς τη θερμική ενέργεια στις μονάδες ανάκτησης θερμότητας έχει υψηλότερη τιμή από τις μονάδες χωρίς ανάκτηση και, επιπλέον, οι πρώτες μπορούν να κάνουν εξοικονόμηση καυσίμων σε ποσοστό 30 με 40%, από τη διαδικασία της προθέρμανσης.

Τα πλεονεκτήματα των μικροτουρμπίνων είναι πολλά. Έχουν σχεδόν αθόρυβη λειτουργία με λίγες δονήσεις, έχουν σχετικά μικρό κόστος αρχικής εγκατάστασης, χαμηλά επίπεδα εκπομπής καυσαερίων, θερμικές αποδοτικότητες κυμαινόμενες στο 5-30%, βαθμό ηλεκτρικής απόδοσης της τάξης του 28-30%, υψηλές ταχύτητες της τάξης των 60.000 rpm, μικρές ανάγκες συντήρησης και ταυτόχρονα υψηλή αξιοπιστία. Σε περιπτώσεις όπου τα τιμολόγια του αερίου είναι χαμηλά – που είναι και το σύνηθες – ενώ η ηλεκτρική ενέργεια σχετικά ακριβή, καθίσταται πιο οικονομική η χρησιμοποίηση μονάδων μικροτουρμπίνων αντί της ηλεκτρικής ενέργειας του δικτύου. Αντίθετα από τις παραδοσιακές πηγές ενέργειας, οι μικροτουρμπίνες μπορούν να χρησιμοποιούνται από ιδιώτες αφού εγκαθίστανται εύκολα, έχουν χαμηλές εκπομπές ρύπων και βρίσκονται ακριβώς δίπλα στη ζήτηση της ενέργειας – οικία ή επιχείρηση. Καταλαμβάνουν όγκο όχι μεγαλύτερο από έναν τηλεφωνικό θάλαμο και παράγουν ισχύ εύρους συνήθως από 25 ως 300kW. Έχοντας ως μέτρο σύγκρισης τους μεγάλους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που είναι ολόκληρα κτίρια με παραγόμενη ισχύ από 600MW ως 1.000MW, το μικρό μέγεθος των μικροτουρμπίνων είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα, που επιτρέπει την τοποθέτησή τους ακριβώς δίπλα στο φορτίο. Το γεγονός αυτό αποβάλλει τις ενεργειακές απώλειες που εμφανίζονται συνήθως κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στα σημεία της ζήτησης. Αυτές οι απώλειες μεταφοράς είναι αρκετά σημαντικές και ανέρχονται συχνά στο 7% της παραγόμενης ισχύος.

Μερικές μικροτουρμπίνες δίνουν τη δυνατότητα να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια από τη θερμότητα των αερίων εξάτμισης. Η θερμότητα χρησιμοποιείται για την παραγωγή υδρατμών που διαφεύγουν μέσω ενός δεύτερου συνόλου λεπίδων στροβίλου, που περιστρέφουν μια δεύτερη ηλεκτρική γεννήτρια. Αυτά τα συστήματα είναι πολύ μεγαλύτερα και ακριβότερα, αλλά λειτουργούν αποτελεσματικότερα.

Οι μικροτουρμπίνες έχουν περίπλοκα ηλεκτρονικά συστήματα, τα οποία τους επιτρέπουν να παρέχουν ασφαλή και αποδοτική λειτουργία με διαρκή έλεγχο της κατάστασης τους.



Σχήμα 3.39 Μικροτουρμπίνες

Όταν το καύσιμο που θα χρησιμοποιηθεί είναι αέριο όπως φυσικό αέριο, προπάνιο ή αέριο αναερόβιας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων πρέπει να συμπιεστεί. Η συνήθης συμπίεση ανέρχεται στο ύψος των 5-6 bar. Η ανάγκη συμπίεσης του αερίου καυσίμου αποτελεί το μεγαλύτερο παρασιτικό φορτίο αυτής της μονάδας. Μονάδες ΜΤ έχουν εγκατασταθεί σε εφαρμογές σε βιολογικούς καθαρισμούς και σε μία τέτοια περίπτωση μπορούν να θεωρηθούν μονάδες ΑΠΕ.

Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται τα κύρια χαρακτηριστικά μιας μικροτουρμπίνας ως προς την λειτουργία και το κόστος της [67].

Εύρος ισχύος	25- 250kW
Καύσιμα	Φυσικό αέριο, υδρογόνο, LPG, diesel
Ηλεκτρική απόδοση	20- 30% (με προθέρμανση)
Απόδοση συμπαραγωγής	Μέχρι και 90%
Περιβαλλοντική Επίδοση	Χαμηλές εκπομπές (<9- 50ppm) NOx
Ποιότητα παραγόμενης θερμότητας	Παραγωγή ζεστού νερού προς υψηλή θερμοκρασία (50-80°C)
Εμπορική διαθεσιμότητα	Διαθέσιμες και σε μικρά μεγέθη συμπαραγωγής, σχετικά όμως περιορισμένη
<b>Κόστη Μικροτουρμπίνας</b>	
Κόστος Επένδυσης (μόνο μηχανής)	700- 1.100€/kW
Ο&Μ Κόστος	0,005- 0,016€/kW
Χρόνος Μεταξύ Συντηρήσεων	5.000- 8.000hrs

Πίνακας 3.1 Κύρια χαρακτηριστικά μικροτουρμπίνας ως προς τη λειτουργία και το κόστος

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ, ΜΙΚΡΟΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ

#### 4.1 ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ

##### 4.1.1 Εισαγωγή

##### 4.1.1.1 Ορισμός

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 Συμπααραγωγή.

*Συμπααραγωγή (στα αγγλικά Cogeneration ή Combined Heat and Power, CHP) ονομάζεται η συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρικής (ή ενίοτε μηχανικής) και εκμεταλλεύσιμης ή αξιοποιήσιμης θερμικής ενέργειας από την ίδια πηγή. Αναφέρεται ως Συμπααραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΣΗΘ).*

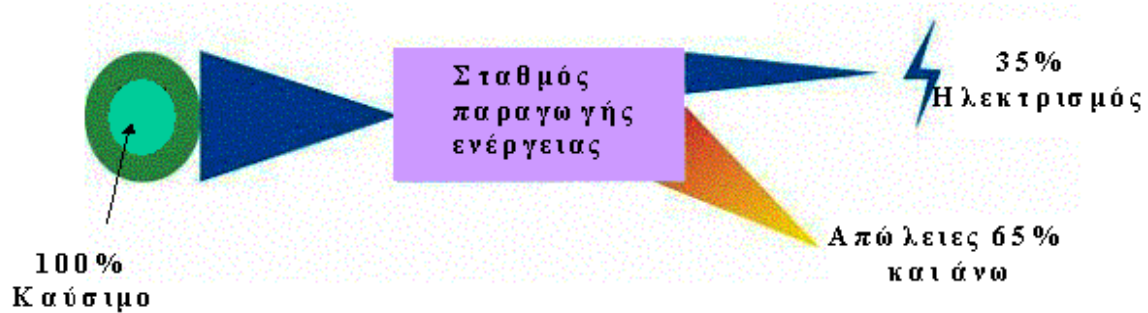
Με την συμπααραγωγή, η ενέργεια που παρέχεται σε ένα σταθμό για την παραγωγή ηλεκτρισμού χρησιμοποιείται πιο αποδοτικά για την παραγωγή ηλεκτρισμού και ωφέλιμης θερμότητας. Ο υψηλός βαθμός απόδοσης της συμπααραγωγής δεν εξαρτάται από την κλίμακα του σταθμού κι έτσι μπορεί να εφαρμοστεί σε τοπική κλίμακα, για να καλύψει τις ανάγκες συγκεκριμένων φορτίων. Η κεντρική και πλέον βασική αρχή της συμπααραγωγής είναι ότι, προκειμένου να μεγιστοποιηθούν τα πολλά οφέλη που προκύπτουν από αυτή, τα συστήματα συμπααραγωγής πρέπει να βασίζονται στη ζήτηση θερμότητας της εφαρμογής. Θεωρείται ως μία μέθοδος παραγωγής ενέργειας ελκυστική τόσο από περιβαλλοντική όσο και από οικονομική άποψη [23].

Ένα σύστημα συμπααραγωγής αποτελείται κυρίως από τέσσερα στοιχεία :

- Τον κινητήρα (prime mover), ο ρόλος του οποίου είναι να κινεί τη γεννήτρια και μπορεί να είναι αμοστρόβιλος, αεριοστρόβιλος, παλινδρομική μηχανή εσωτερικής καύσης, συνδυασμένου κύκλου, κυψέλες καυσίμου, μηχανή Stirling ή microturbine.
- Το σύστημα ανάκτησης θερμότητας, το οποίο αποτελεί σύστημα που ανακτά την απορριπτόμενη θερμότητα από τα ρευστά που έχουν σχέση με τη λειτουργία της μηχανής (με εναλλάκτες ανάκτησης θερμότητας) και από τα καυσαέρια (με λέβητα ανάκτησης θερμότητας που αποκαλείται και λέβητας καυσαερίων).
- Τη γεννήτρια, που μπορεί να είναι σύγχρονη, ασύγχρονη ή αυτοδιεγειρόμενη ασύγχρονη, και παράγει την ηλεκτρική ενέργεια.
- Το σύστημα ελέγχου μέσου του οποίου διασφαλίζεται η ασφαλής και ικανοποιητική λειτουργία του συστήματος συμπααραγωγής.

#### 4.1.1.2 Σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρισμού

Οι συμβατικές πηγές ενέργειας, όπως στο Σχήμα 4.1, 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 4.1 Τυπικό συμβατικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

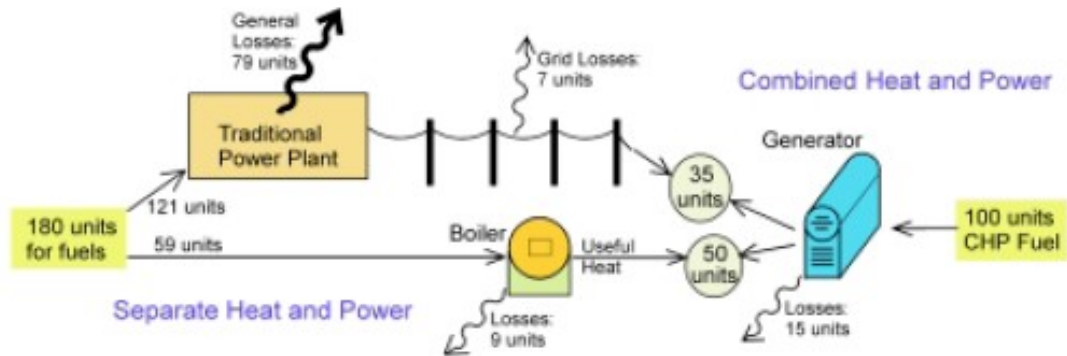
Με την αξιοποίηση της θερμικής ενέργειας, η απόδοση μιας εγκατάστασης συμπαραγωγής μπορεί να φθάσει ή και να ξεπεράσει το 90%, Σχήμα 4.2. Ως εκ τούτου η συμπαραγωγή προσφέρει εξοικονόμηση ενέργειας που κυμαίνεται μεταξύ 15 έως 40%, σε σύγκριση με τη διάθεση ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας από συμβατικούς 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 4.2 Τυπικό σύστημα Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας

Το Σχήμα 4.3 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 4.3 Σύγκριση συστήματος CHP και ξεχωριστών μονάδων παραγωγής

#### 4.1.1.3 Τομείς εφαρμογής

Υπάρχουν δύο γενικοί τομείς χρήσης της συμπαραγωγής:

- Ο τομέας των βιομηχανικών εφαρμογών και του τριτογενή τομέα - νοσοκομεία, ξενοδοχεία, μεγάλα κτίρια, αθλητικά κέντρα, κλπ. - (CHP for industry – CHP/BIO), όπου οι παραπάνω τιμές θερμοκρασίας καλύπτονται μέσω εκτονούμενου ατμού ή απομαστεύσεων ατμοστρόβιλων (ή από ατμό παρεχόμενο από λέβητα που χρησιμοποιεί τα καυσαέρια ενός αεριοστρόβιλου για τη θέρμανση του ύδατος).
- Ο τομέας της τηλεθέρμανσης (CHP for district heating - CHP/TΘ – CHP/DH) που περιλαμβάνει την κατασκευή δικτύων μεταφοράς και παροχής ύδατος, σε θερμοκρασίες 80 – 150°, για τη κάλυψη των θερμικών αναγκών μιας αστικής περιοχής, ενώ συγχρόνως καλύπτεται και το ηλεκτρικό φορτίο. όπως γίνεται στην Κοζάνη, στην Πτολεμαΐδα και αλλού, και πρόσφατα αποφασίστηκε να λειτουργήσει και στη Φλώρινα.

#### ΤΗΛΕΘΕΡΜΑΝΣΗ

Τηλεθέρμανση είναι η εφαρμογή μεθόδων κεντρικής παραγωγής θερμότητας, από ένα κεντρικό καυστήρα, και η διανομή της (συνήθως με την μορφή ζεστού νερού) για θέρμανση σε κατοικίες ή άλλες εφαρμογές που ανήκουν στο δίκτυο αυτό. Η θέρμανση του νερού γίνεται με την καύση αερίου, πετρελαίου ή γαιανθράκων (λιγνιτών) σε ένα εργοστάσιο παραγωγής κυρίως ηλεκτρικής ενέργειας και συμπληρωματικά θερμικής ή αντίστροφα.

Η οικονομική κλίμακα για ένα δίκτυο CHP/DH είναι σημαντικό να είναι βιώσιμη. Οι μικρές διατάξεις CHP/DH είναι «φτωχοί» μετατροπείς του εισερχόμενου καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι μεγάλες μονάδες CHP/DH είναι περισσότερο ελκυστικές γιατί μπορούν να χρησιμοποιήσουν μεγάλους σταθμούς ισχύος, οι οποίοι αποδίδουν σημαντικά ενεργειακά αποθέματα και παράγουν τόσο θερμότητα όσο και ηλεκτρική ενέργεια με μεγαλύτερη οικονομία. Οι μονάδες μεγάλης

κλίμακας μπορούν να παράγουν θερμότητα στο χώρο του σταθμού ισχύος με κόστος που μπορεί να είναι και το μισό του κόστους μιας κοινής μονάδας. Το κόστος μεταφοράς και διανομής αποτελούν τελικά τους παράγοντες που αυξάνουν το κόστος της θέρμανσης για τον καταναλωτή, και καθιστούν ακόμα και τις μεγάλες διατάξεις CHP/DH οριακά οικονομικές σε πολλές περιπτώσεις.

Μια μονάδα CHP/DH για εφαρμογές στο εσωτερικό μιας μεγάλης πόλης, με τη χρήση μεσαίων/μεγάλων αεριοστροβίλων είναι μια ελκυστική οικονομική πρόταση για τους εθνικούς φυσικούς πόρους σε σύγκριση με εναλλακτικούς τρόπους θέρμανσης, αν ληφθούν υπόψη τα χαμηλότερα προεξοφλητικά επιτόκια (π.χ. 5%) και οι υψηλότερες τιμές καυσίμου. Οι μεσαίες/μεγάλες μονάδες (200 – 600MW) είναι περισσότερο οικονομικές και εξοικονομούν περισσότερη ενέργεια από ότι οι μικρές μονάδες [23] παρόλο που μπορεί να είναι οικονομική η θέρμανση μικρών εγκαταστάσεων από τοπικούς σταθμούς ισχύος σε ορισμένες συνθήκες.

Η εγκατάσταση μιας μεσαίας/μεγάλης μονάδας CHP/DH που εξυπηρετεί περιοχές με υψηλή πυκνότητα φορτίου θέρμανσης σε πόλεις φαίνεται μια ελκυστική εναλλακτική λύση από άποψη οικονομίας και εξοικονόμησης ενέργειας σε σύγκριση με άλλες αναπτυγμένες μορφές θέρμανσης. Στην απουσία του φυσικού αερίου και του πετρελαίου σε μια μακροπρόθεσμη μελέτη άλλες λύσεις θέρμανσης όπως ηλεκτρική ενέργεια (εκτός αιχμής) ή υποκατάστατο φυσικού αερίου θα κυριαρχούσαν σε μία μεγάλη αγορά εκτός των περιοχών με υψηλή πυκνότητα φορτίου θέρμανσης .

Οι κρίσιμοι παράγοντες που καθορίζουν την επιτυχία και βιωσιμότητα ενός δικτύου τηλεθέρμανσης με συμπαραγωγή είναι η πυκνότητα δόμησης, το προεξοφλητικό επιτόκιο, η τιμή του καυσίμου και το μέγεθος του δικτύου. Επιπλέον, οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του νερού ενός δικτύου τηλεθέρμανσης εμφανίστηκαν ως επιπρόσθετες καίριες παράμετροι με την πάροδο του χρόνου.

Η τηλεθέρμανση χρησιμοποιείται ευρύτατα στις χώρες της βόρειας Ευρώπης καθώς οι περισσότερες μονάδες παραγωγής ηλεκτρισμού είναι πλέον συμπαραγωγικές. Για παράδειγμα, στη Δανία σχεδόν το 25% του συνολικού θερμικού φορτίου καλύπτεται μέσω τηλεθέρμανσης, από το οποίο το 1/3 (8%) προέρχεται από συμπαραγωγή. Σχεδόν το 20% του αντίστοιχου φορτίου στη Σουηδία καλύπτεται επίσης από τηλεθέρμανση, από το οποίο τα 3/5 (12%) προέρχονται από εγκαταστάσεις συμπαραγωγής ενώ το 0.7% περίπου του σχετικού γερμανικού φορτίου καλύπτεται από τη συμπαραγωγή. Τέλος στην Φιλανδία μόνο μία σημαντική πόλη δεν διαθέτει τηλεθέρμανση ενώ στα τέλη του '70 το 17% του φορτίου καλυπτόταν από τις εγκαταστάσεις αυτές (με σχεδιαζόμενη αύξηση στο 40% στη δεκαετία του '80), με το 50% αυτής να παρέχεται από σταθμούς συμπαραγωγής. Επίσης, στον τομέα των βιομηχανικών, αγροτικών και εμπορικών εφαρμογών μονάδες συμπαραγωγής μικρής σχετικά ισχύος (μερικών kW) χρησιμοποιούνται για να καλύψουν τις ανάγκες σε ηλεκτρική και θερμική ισχύ (βιομηχανικές περιοχές, νοσοκομεία, ξενοδοχεία, μεγάλα κτίρια, αθλητικά κέντρα, κλπ.)

### ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΑΛΛΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Η τοποθέτηση μιας μονάδας CHP/BIO δεν είναι τόσο σαφής όσο στην περίπτωση της CHP/DH. Είναι δύσκολο να γενικευθεί, αφού η κατάλληλη επιλογή της εγκατάστασης ποικίλει ανάλογα με την εφαρμογή. Γενικά, όμως, η περίπτωση της CHP/BIO είναι συνηθέστερη.

Όσον αφορά στις αρχές της Θερμοδυναμικής, η επιλογή του τύπου εγκατάστασης CHP/BIO εξαρτάται κατά πολύ, όχι μόνο από το λόγο ηλεκτρισμού – θερμότητας, αλλά και από το μέγεθος των απαιτήσεων σε θερμότητα και ηλεκτρική ενέργεια ξεχωριστά. Η διακύμανση στη ζήτηση, καθημερινά και εποχιακά, είναι επίσης σημαντική, αλλά θα πρέπει να σημειωθεί ότι, η παράλληλη

εγκατάσταση όμοιων μηχανών επιτρέπει στη συνολική εγκατάσταση να ακολουθήσει τη μείωση στη ζήτηση του φορτίου, θέτοντας εκτός λειτουργίας μία ή περισσότερες μηχανές.

Οι κρίσιμες παράμετροι επιλογής και σχεδιασμού μιας μονάδας CHP/BIO δεν είναι μόνο θερμοδυναμικές. Η πυκνότητα της δόμησης, προφανώς, δεν είναι σχετική, αλλά το προεξοφλητικό επιτόκιο, η διάρκεια ζωής της εγκατάστασης και η κλιμάκωση των τιμών καυσίμων είναι σημαντικές, όπως και για την περίπτωση των μονάδων CHP/DH. Σημαντικές επίσης θεωρούνται και οι τιμές πώλησης (ή επαναγοράς) της ηλεκτρικής ενέργειας όπως επίσης οποιεσδήποτε τροποποιήσεις που πραγματοποιούνται στις τιμές των καυσίμων.

### ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ

Οι εφαρμογές της γεωθερμικής ενέργειας, τόσο σε Ευρωπαϊκό, όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο, ομαδοποιούνται σε τρεις κύριες κατηγορίες:

1. Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας
2. Χρήση της Θερμότητας
3. Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας

Όσον αφορά την ηλεκτροπαραγωγή από γεωθερμία, η εγκατεστημένη ισχύς στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η οποία ανήλθε σε 883 MW(e) το έτος 2002, αντιστοιχεί στο 10% περίπου της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος.

Στην Ελλάδα, οι γεωθερμικές εφαρμογές εστιάζονται σε θερμικές χρήσεις με 69 MW(th), με κύριες εφαρμογές τα θερμά και ιαματικά λουτρά ( 50%), και τη θέρμανση θερμοκηπίων και εδαφών (50%). Στην Ευρωπαϊκή ένωση οι θερμικές χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας περιλαμβάνουν θέρμανση κτηρίων ( 600 MWth), θερμοκηπίων ( 350 MW(th)), θερμά λουτρά ( 350 MW(th)) και άλλες εφαρμογές ( 100 MW(th)). Σε παγκόσμιο επίπεδο, οι αντίστοιχες εφαρμογές αντιστοιχούν σε πολλαπλάσια εγκατεστημένη ισχύ ( 9.400 MW(th)).

Οι ερευνητικές δραστηριότητες στην Ελλάδα περιλαμβάνουν κυρίως αναζήτηση γεωθερμικών ρευστών θερμοκρασίας 75-100 °C, καθώς και εφαρμογές γεωθερμικών αντλιών θερμότητας. Ενδεικτικά ερευνητικά έργα αποτελούν η εγκατάσταση γεωθερμικών αντλιών θερμότητας στο δημαρχείο Πυλαίας Θεσσαλονίκης, στο Ευρωπαϊκό Κέντρο Δημοσίου Δικαίου στα Λεγραινά Αττικής, στα γραφεία του ΚΑΠΕ στο Πικέρμι Αττικής και στο κτίριο των Μεταλλειολόγων στην Πολυτεχνειούπολη του ΕΜΠ στην Αθήνα, η αξιοποίηση γεωθερμικού νερού >40 °C στο αεροδρόμιο «Μακεδονία», η τηλεθέρμανση δημοτικών κτιρίων στον Λαγκαδά με νερό από τα Λουτρά και αντλίες θερμότητας και η αφαλάτωση θαλασσινού νερού με γεωθερμική ενέργεια χαμηλής ενθαλπίας στη Ν. Κίμωλο και στη Ν. Μήλο.

#### **4.1.1.4 Τεχνικές συμπαραγωγής**

Τα περισσότερα συστήματα συμπαραγωγής μπορούν να χαρακτηριστούν είτε ως συστήματα «κορυφής» (topping systems), είτε ως συστήματα «βάσεως» (bottoming systems). Στα συστήματα κορυφής, ρευστό υψηλής θερμοκρασίας χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρισμού, ενώ η αποβαλλόμενη θερμότητα χαμηλής θερμοκρασίας χρησιμοποιείται σε θερμικές διεργασίες, θέρμανση χώρων, ή ακόμη και για παραγωγή πρόσθετης ηλεκτρικής ενέργειας. Στα συστήματα βάσεως, παράγεται πρωτίστως θερμική ενέργεια υψηλής θερμοκρασίας (όπως, π.χ., σε καμίνους χαλυβουργείων, υαλουργείων και εργοστασίων σκυροδέματος), κατόπιν τα θερμά αέρια διοχετεύονται συνήθως σε λέβητα ανάκτησης θερμότητας, όπου παράγεται ατμός ο οποίος θέτει σε λειτουργία έναν ατμοστρόβιλο και εν συνεχεία μία γεννήτρια. Είναι ακόμη δυνατόν τα θερμά αέρια



να διοχετευθούν σε αεριοστρόβιλο, που δίνει κίνηση σε μία ηλεκτρογεννήτρια, χωρίς την παρεμβολή λέβητα.

Οι κυριότεροι τρόποι λειτουργίας ενός συστήματος συμπαραγωγής, δηλαδή οι τρόποι ρυθμίσεως της ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος σε κάθε χρονική στιγμή, είναι οι ακόλουθοι [26]:

*I. Παραγωγή θερμότητας ίσης με το θερμικό φορτίο (“heat match”).*

Έχουμε παραγωγή περισσότερης (ή λιγότερης) ηλεκτρικής ενέργειας από το φορτίο, η περίσσεια (ή το έλλειμμα) πωλείται (ή αγοράζεται) στο (από το) εθνικό δίκτυο.

*II. Παραγωγή ηλεκτρισμού ίσου με το ηλεκτρικό φορτίο (“electricity match”).*

Εάν προκύψει ανάγκη βοηθητικός λέβητας συμπληρώνει τις πρόσθετες ανάγκες σε θερμότητα, ενώ η περίσσεια θερμότητα αποβάλλεται σε ψυγεία.

*III. Μικτός τρόπος*

Έχουμε δηλαδή την εμφάνιση είτε της I περιπτώσεως είτε της II.

*IV. Πλήρης κάλυψη του θερμικού και του ηλεκτρικού φορτίου σε κάθε χρονική στιγμή.*

Απαιτείται μεγάλη επάρκεια εφεδρικής ισχύος και επομένως περίπλοκο σύστημα συμπαραγωγής, με αποτέλεσμα την αύξηση του αρχικού κόστους καθιστώντας τον τρόπο αυτό ως τον πιο ακριβό.

Κατά κανόνα, ο πρώτος τρόπος προσφέρει την υψηλότερη ενεργειακή και οικονομική απόδοση για συστήματα στο βιομηχανικό και τον εμπορικό τομέα. Η τελική, όμως, επιλογή του τρόπου λειτουργίας εξαρτάται από τις ανάγκες του δικτύου, τις διαθέσιμες μονάδες καθώς και τις υποχρεώσεις απέναντι στους καταναλωτές.

Οι βασικότερες τεχνολογίες συμπαραγωγής είναι οι ακόλουθες:

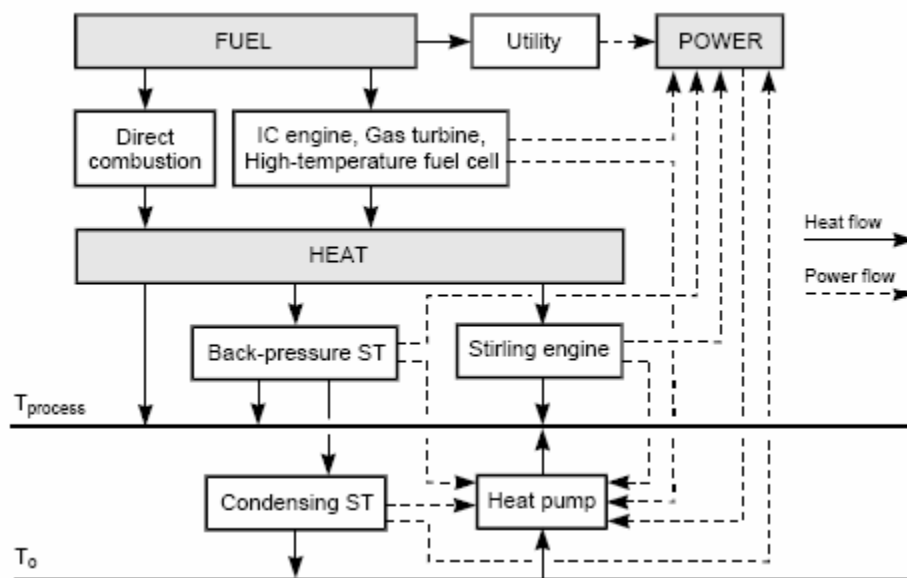
- Ατμοστρόβιλοι
  - o Ατμοστρόβιλοι αντιθλίψεως
  - o Ατμοστρόβιλοι απομάστευσης
  - o Ατμοστρόβιλοι σε κύκλο βάσεως
- Αεριοστρόβιλοι
  - o Αεριοστρόβιλοι ανοιχτού κύκλου
  - o Αεριοστρόβιλοι κλειστού κύκλου
- Συστήματα με μηχανή εσωτερικής καύσης (M.E.K.)
- Κινητήρες Diesel
- Συστήματα συνδυασμένου κύκλου
- Συστήματα συμπαραγωγής μικρής κλίμακας (μικρού «πακέτου»)
- Κυψέλες καυσίμου
- Μηχανές Stirling

Στον Πίνακα 4.1 δίνονται τα χαρακτηριστικά των βασικότερων συστημάτων συμπαραγωγής [23] [26] [27].

Σύστημα	Ηλεκτρική ισχύς (MW)	Μέση ετήσια διαθεσιμότητα (%)	Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης (%)		Ολικός βαθμός απόδοσης (%)	Λόγος ηλεκτρισμού / θερμότητας
			Πλήρες φορτίο	Φορτίο 50%		
<i>Ατμοστρόβιλος</i>	0,5 – 100	90 – 95	14 – 30	12 – 25	60 – 85	0,1 – 0,3
<i>Αεριοστρόβιλος ανοιχτού κύκλου</i>	0,1 – 100	90 – 95	20 – 35	15 – 29	60 – 80	0,5 – 0,8
<i>Αεριοστρόβιλος κλειστού κύκλου</i>	0,5 -100	90 – 95	30 – 35	30 – 35	60 – 80	0,5 – 0,8
<i>Συνδυασμένου κύκλου</i>	4 – 100	77 – 85	35 – 45	25 – 35	70 – 88	0,6 – 1,1
<i>Κινητήρας Diesel</i>	0,07 – 40	80 – 90	35 – 45	32 – 40	60 – 80	1,2 – 2,4
<i>Μικρό «πακέτο» με Μ.Ε.Κ.</i>	0,015 – 2	80 – 85	27 – 35	25 – 32	60 – 80	0,5 – 0,7
<i>Κυψέλες καυσίμου</i>	0,04 – 50	90 – 92	37 – 45	37 – 45	85 – 90	0,8 – 1
<i>Μηχανές Stirling</i>	0,003 – 1,5	85 – 90	35 – 50	34 – 49	60 – 80	1,2 – 1,7

Πίνακας 4.1

Πιθανοί συνδυασμοί των μηχανών αυτών παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4

#### 4.1.2 Ιστορική αναδρομή

Η Συμπαράγωγή πρωτοεμφανίστηκε στην Ευρώπη και στις Η.Π.Α. γύρω στα 1890. Κατά τις πρώτες δεκαετίες του 20ού αιώνα, οι περισσότερες βιομηχανίες είχαν δικές τους μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με ατμολέβητα-στρόβιλο, που λειτουργούσαν με άνθρακα. Πολλές από τις μονάδες αυτές ήταν μονάδες συμπαράγωγής. Αναφέρεται χαρακτηριστικά ότι περίπου το 58% του ηλεκτρισμού, που παραγόταν σε βιομηχανίες των Η.Π.Α. στις αρχές του αιώνα, προερχόταν από μονάδες συμπαράγωγής.

Κατόπιν ακολούθησε κάμψη στη χρήση των συστημάτων συμπαράγωγής γιατί η ανάπτυξη των δικτύων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρισμού οδήγησε σε σχετικά φθηνή και αξιόπιστη ηλεκτρική ενέργεια καθώς και η διαθεσιμότητα υγρών καυσίμων και φυσικού αερίου σε χαμηλές τιμές έκανε τη λειτουργία λεβήτων οικονομικά συμφέρουσα.

Συνεχίζοντας με το παράδειγμα των Η.Π.Α., η βιομηχανική συμπαράγωγή μειώθηκε στο 15% του όλου δυναμικού ηλεκτροπαραγωγής μέχρι το 1950 και έπεσε στο 5% μέχρι το 1974 [26].

Η πορεία αυτή έχει πλέον αντιστραφεί όχι μόνον στις Η.Π.Α. αλλά και σε χώρες της Ευρώπης, στην Ιαπωνία κ.α., γεγονός το οποίο οφείλεται κυρίως στην απότομη αύξηση των τιμών των καυσίμων, από το 1973 και μετά. Η ανοδική πορεία στη διάδοση της συμπαράγωγής συνοδεύτηκε και από αξιοσημείωτη πρόοδο της σχετικής τεχνολογίας. Οι βελτιώσεις και εξελίξεις συνεχίζονται και νέες τεχνικές αναπτύσσονται και δοκιμάζονται, αλλά ήδη η συμπαράγωγή έχει φθάσει σε επίπεδο ωριμότητας με αποδεδειγμένη αποδοτικότητα και αξιοπιστία. Μια μεγάλη ποικιλία συστημάτων, από πλευράς είδους, μεγέθους και λειτουργικών χαρακτηριστικών, είναι διαθέσιμη.

### 4.1.3 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα

Η συμπαραγωγή μπορεί να έχει τόσο θετικές όσο και αρνητικές επιπτώσεις στην εξάντληση καυσίμων, στο σύστημα ηλεκτρισμού της χώρας, στο περιβάλλον, στην κοινωνία και την οικονομία. Οι πιθανές αρνητικές επιπτώσεις μπορούν να μετριασθούν ή και να εξαλειφθούν με σωστή επιλογή του είδους και της θέσης του συστήματος συμπαραγωγής, την προσεκτική ένταξή του στο ευρύτερο ενεργειακό σύστημα της περιοχής ή της χώρας και με την επιμελημένη συντήρηση κατά τη διάρκεια της ζωής του.

#### 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' ό,τι 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.).

#### Επιπτώσεις στο σύστημα ηλεκτρισμού

Προκειμένου να αντιμετωπισθεί η μελλοντική αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας, απαιτείται η κατασκευή νέων σταθμών ηλεκτροπαραγωγής. Η διάδοση της συμπαραγωγής αυξάνει το δυναμικό ηλεκτροπαραγωγής και περιορίζει τις ανάγκες κατασκευής νέων κεντρικών σταθμών, προσφέροντας έτσι σημαντική εξοικονόμηση κεφαλαίων της εταιρείας ηλεκτρισμού (ΔΕΗ).

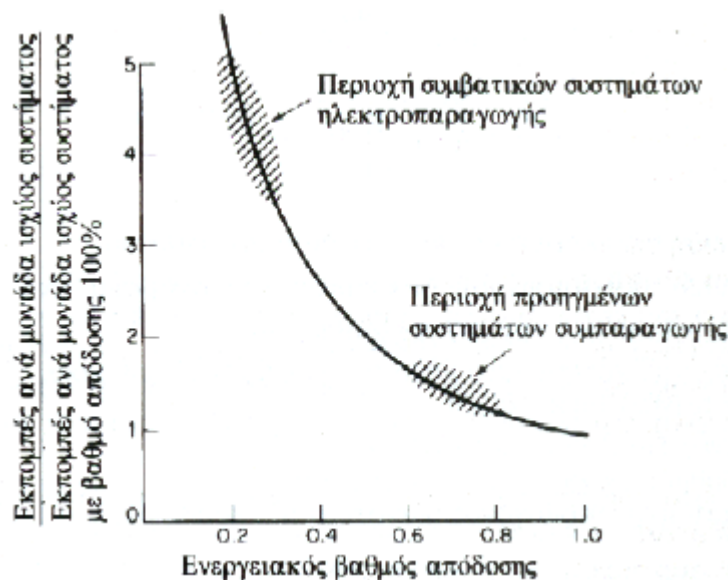
Καθώς τα συστήματα συμπαραγωγής έχουν μικρότερο μέγεθος και βραχύτερο χρόνο εγκατάστασης από τους μεγάλους κεντρικούς σταθμούς, προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία και προσαρμοστικότητα σε απρόβλεπτες μελλοντικές μεταβολές της ζήτησης ηλεκτρισμού. Ο μικρός χρόνος εγκατάστασης των συστημάτων συμπαραγωγής συντελεί επίσης σε περιορισμό του χρηματοοικονομικού κόστους που συμβάλλει με τη σειρά του στη μείωση του μοναδιαίου κόστους παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας [23].

Πολλές μικρές μονάδες συμπαραγωγής, που λειτουργούν παράλληλα με τους κεντρικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, αυξάνουν την αξιοπιστία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά είναι ενδεχόμενο να δημιουργήσουν προβλήματα ευστάθειας του δικτύου. Τα προβλήματα αυτά περιορίζονται ή και αποφεύγονται, όταν το σύστημα συμπαραγωγής και η σύνδεσή του με το δίκτυο πληρούν ορισμένες προδιαγραφές. Η συνεννόηση με τις αρμόδιες υπηρεσίες της ΔΕΗ είναι απαραίτητη για το σκοπό αυτόν.

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.

### Επιπτώσεις στο περιβάλλον

Χάρη στην αποδοτικότερη εκμετάλλευση του καυσίμου, η συμπαραγωγή συντελεί σε άμεση μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων με την προϋπόθεση ότι το καύσιμο που χρησιμοποιεί δεν είναι κατώτερης ποιότητας από εκείνο της χωριστή συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας. Η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου συνοδεύεται επίσης και από μια 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, κ.λπ. Χαρακτηριστικά φαίνεται στο Σχήμα 4.5 η διαφορά των εκπομπών για τα συστήματα συμπαραγωγής και τις συμβατικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής.



Σχήμα 4.5 Παραδείγματα σύγκρισης εκπομπών μεταξύ συστημάτων συμπαραγωγής και συμβατικών τρόπων παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (ανά 100kWh παραγωγής)

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:

$\Delta MX$ : η διαφορά εκπομπών του ρύπου X

*ΜΧΣΣ*: η εκπομπή ρύπου X του συστήματος συμπαραγωγής

*ΜΧΗ*: η εκπομπή ρύπου X του συστήματος παραγωγής ηλεκτρισμού, το οποίο αντικαθίσταται από το σύστημα συμπαραγωγής

*ΜΧΘ*: η εκπομπή ρύπου X του συστήματος παραγωγής θερμότητας, το οποίο αντικαθίσταται από το σύστημα συμπαραγωγής (π.χ. ατμολέβητας).

Μερικά παραδείγματα σύγκρισης παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.6.

Ρύπος	Συνδυασμοί συστήματος συμπαραγωγής - συστημάτων χωριστής παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας											
	1 - Α		1 - Β		2 - Α		2 - Β		3 - Α		3 - Β	
	gr	%	gr	%	gr	%	gr	%	gr	%	gr	%
CO <sub>2</sub>	- 51024	- 46,2	- 88458	- 59,9	- 62454	- 52,0	- 99888	- 63,4	- 70791	- 46,7	- 108225	- 57,2
NO <sub>x</sub>	+ 812	+255,3	+ 802	+244,5	- 290	- 85,3	- 300	- 85,7	- 283	- 68,7	- 293	- 69,4
CO	+ 320	+524,6	+ 357	+ 1487	- 33	- 52,4	+ 4	+ 15,4	- 68	-100,0	- 31	-100,0
HC	+ 375	+ 1875	+ 388	+ 5543	- 15	- 75,0	- 2	- 28,6	+ 4	+ 18,2	+ 17	+188,9
SO <sub>x</sub>	- 208	- 95,9	- 794	- 98,9	- 273	- 99,3	- 859	- 99,8	- 415	- 90,0	- 1001	- 95,6
Στοιχεία	- 44	- 91,7	- 40	- 90,9	- 51	- 91,1	- 47	- 90,4	- 77	- 91,7	- 73	- 91,3

**Στοιχεία συμπαραγωγής**

1. Κινητήρας Diesel διπλού καυσίμου (90% της ενέργειας από φυσικό αέριο, 10% από καύσιμο Diesel) με  $\eta_e = \eta_h = 0,35$  (PHR = 1).
2. Νέος ατμοστρόβιλος φυσικού αερίου με  $\eta_e = 0,35$ ,  $\eta_h = 0,45$ . (PHR = 0,778).
3. Νέος ατμοστρόβιλος φυσικού αερίου με  $\eta_e = 0,25$ ,  $\eta_h = 0,55$ . (PHR = 0,455).

**Στοιχεία χωριστής παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας**

A. Ατμοστρόβιλος με καύσιμο Diesel και βιομηχανικός ατμολέβητας με καύσιμο μαζούτ.  
B. Νέος ατμοστρόβιλος με καύσιμο άνθρακα και βιομηχανικός ατμολέβητας με καύσιμο μαζούτ.

Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει μείωση εκπομπών με τη συμπαραγωγή.  
Τα ποσοστά προσδιορίζονται με βάση αναγωγή τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας.

Εντυπωσιακή είναι η μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub>: 50–100kg ανά 100 kWh ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή 50 kg ανά 100 kWh, τότε σε κάθε TWh ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται με συμπαραγωγή αντιστοιχεί μείωση 500000 τόνων CO<sub>2</sub>. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την εξοικονόμηση καυσίμου δικαιολογεί τη θέσπιση κινήτρων για τη διάδοση της συμπαραγωγής.

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 NO<sub>x</sub> που επιτυγχάνεται με κυψέλες καυσίμου [45].

Όταν πολλές μικρές και διεσπαρμένες μονάδες συμπαραγωγής αντικαθιστούν μεγάλους κεντρικούς σταθμούς με υψηλές καπνοδόχους, τότε δεν είναι εξασφαλισμένη η βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος. Οι κεντρικοί σταθμοί βρίσκονται κατά κανόνα έξω από τα αστικά κέντρα και οι υψηλές καπνοδόχοι συντελούν σε ικανοποιητικό διασκορπισμό των ρύπων. Αντίθετα, οι μικρές μονάδες συμπαραγωγής, που έχουν και σχετικά χαμηλότερες καπνοδόχους, είναι εγκατεστημένες κοντά ή και μέσα στις κατοικημένες περιοχές επιβαρύνοντας το περιβάλλον τους.

Από τις διαθέσιμες τεχνολογίες συμπαραγωγής, οι κινητήρες Diesel και Otto έχουν τις υψηλότερες εκπομπές ρύπων. Καθώς οι κινητήρες αυτοί είναι οι πιο κατάλληλοι, λόγω μεγέθους, για εφαρμογές συμπαραγωγής στον εμπορικό – κτιριακό τομέα, ο κίνδυνος από τις εκπομπές τους είναι αυξημένος διότι στις κατοικημένες περιοχές οι κάτοικοι είναι άμεσα εκτεθειμένοι στους ρύπους του αέρα, και η διασπορά των ρύπων εμποδίζεται από τα μεγάλα κτίρια. Οι κυψέλες καυσίμου είναι καταλληλότερες από τους κινητήρες Diesel ή Otto για τέτοιου είδους εφαρμογές, διότι έχουν σημαντικά μικρότερες εκπομπές ρύπων.

Η διακίνηση των καυσίμων και η απομάκρυνση των στερεών καταλοίπων της καύσης μπορεί να προκαλέσει ρύπανση του εδάφους και των υδάτων της περιοχής. Τέλος, ο θόρυβος τόσο από τη λειτουργία του ίδιου του συστήματος συμπαραγωγής όσο και από την κίνηση, που αναπτύσσεται

για την εξυπηρέτησή του, αυξάνει την ηχητική ρύπανση. Έτσι η εγκατάσταση συστήματος συμπαραγωγής σε κατοικημένες περιοχές προϋποθέτει την:

- Επιλογή τεχνολογίας με χαμηλές εκπομπές ρύπων,
- προσεκτική επιλογή του τόπου εγκατάστασης,
- τοποθέτηση εξοπλισμού ελέγχου και περιορισμού των εκπεμπόμενων ρύπων,
- ελαστική τοποθέτηση και ηχητική μόνωση του συστήματος,
- κατασκευή καπνοδόχου υψηλότερης των γειτονικών κτιρίων,
- εγκατάσταση μέσων συλλογής και αποκομιδής των στερεών και υγρών καταλοίπων.

Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση ενός συστήματος συμπαραγωγής στην ποιότητα του αέρα του περιβάλλοντος, πρέπει να υπολογισθούν οι εκπομπές ρύπων του συστήματος συμπαραγωγής και οι εκπομπές των συμβατικών συστημάτων χωριστής παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας παίρνοντας υπόψη το είδος του καυσίμου που χρησιμοποιεί το καθένα από τα συστήματα αυτά.

#### Επιπτώσεις στην κοινωνία και την οικονομία

Οι οικονομικές επιπτώσεις της συμπαραγωγής στο σύστημα ηλεκτρισμού και θερμότητας της χώρας έχουν αναφερθεί προηγούμενα. Μια πρόσθετη ευνοϊκή επίδραση στην εθνική οικονομία προκύπτει όταν η συμπαραγωγή μειώνει το σύνολο των δαπανών για εισαγόμενα καύσιμα.

Είναι γνωστό ότι οι κεντρικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής κατασκευάζονται σε μεγάλα μεγέθη και εγκαθίστανται σε απομακρυσμένες περιοχές. Η κατασκευή και λειτουργία των σταθμών προκαλεί τη μετακίνηση προς τις περιοχές αυτές μεγάλου αριθμού εργαζομένων. Αντίθετα, οι μονάδες συμπαραγωγής συνήθως είναι μικρότερου μεγέθους και εγκαθίστανται πιο κοντά σε κατοικημένες περιοχές. Η διασπορά τους σε διάφορες πόλεις της χώρας δημιουργεί νέες θέσεις εργασίας στην κάθε περιοχή, συγκρατεί εκεί το εργατικό δυναμικό και συμβάλλει στην οικονομική ανάπτυξη του τόπου με την ανάπτυξη νέων δραστηριοτήτων, που σχετίζονται με την κατασκευή, συντήρηση και λειτουργία των μονάδων.

Η συμπαραγωγή αυξάνει την αξιοπιστία ηλεκτροδότησης των καταναλωτών. Επίσης, προκαλεί συγκέντρωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με επακόλουθο την αποκέντρωση της λήψεως σχετικών αποφάσεων και την ενδυνάμωση του ρόλου της τοπικής αυτοδιοίκησης.

#### 4.1.4 Η συμπαραγωγή στην Ελλάδα

##### 4.1.4.1 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.

##### 4.1.4.2 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 αερίου 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.

## 4.2 ΜΙΚΡΟΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ

### 4.2.1 Δυνατότητες για μικροσυμπαγωγή

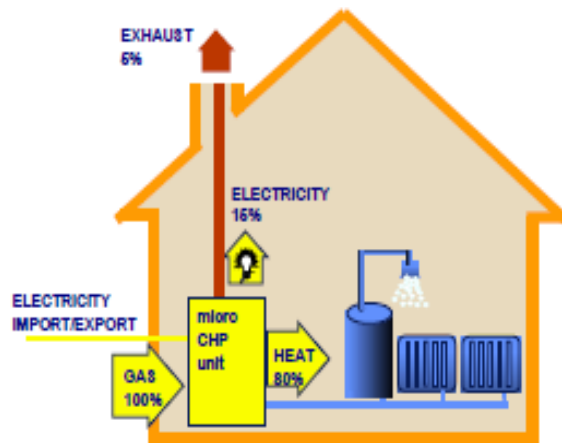
Με δεδομένες τις δεινές τρέχουσες συνθήκες της αγοράς για τη συμπαγωγή στην απελευθερωμένη ευρωπαϊκή αγορά ενέργειας, η αισιόδοξη πρόγνωση για τη μικροσυμπαγωγή μπορεί να έρθει ως ένα είδος αιφνιδιασμού. Ακόμη και προτού το πρώτο αληθινό συστήματα μικροσυμπαγωγής αποκτήσει εμπορική λειτουργία, η κυβέρνηση 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 μικροσυμπαγωγή 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.

### 4.2.2 Ορισμός

Ο όρος μικροσυμπαγωγή αναφέρεται στις τεχνολογίες ταυτόχρονης παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας από την ίδια πηγή (δηλαδή ακριβώς όπως και η συμπαγωγή που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4.1), 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 4.6. 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 4.6

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.

Ένα τυπικό οικιακό σύστημα αναμένεται να έχει τη δυνατότητα να παράγει έως και 1 kW ηλεκτρικής ενέργειας ανά ώρα μόλις ενεργοποιηθεί. Αυτό θα ήταν αρκετό για να τροφοδοτήσει το φωτισμό και τις υπόλοιπες ηλεκτρικές συσκευές του σπιτιού. Η ποσότητα του ηλεκτρισμού που παράγεται τελικά εξαρτάται από τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος [12].

Τα περισσότερα οικιακά συστήματα μικροσυμπαγωγής σήμερα χρησιμοποιούν αέριο ή LPG για καύσιμο θέρμανσης. Ωστόσο μπορούν να τροφοδοτηθούν και με πετρέλαιο ή βιοκαύσιμα. Καθώς το πετρέλαιο και το αέριο δεν είναι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (είναι στερεά καύσιμα), η τεχνολογία ακόμα θεωρείται «low carbon technology» επειδή είναι πιο αποδοτική από το να καίει απλά το στερεό καύσιμο για θέρμανση και να παίρνει ηλεκτρική ενέργεια από το εθνικό δίκτυο.

Τα συστήματα μικροσυμπαγωγής είναι συγκρίσιμα σε μέγεθος και σχήμα με ένα συνηθισμένο, σύγχρονο, οικιακό boiler και μπορούν να αναρτηθούν στον τοίχο όπως τα περισσότερα Boilers, ή να στέκονται στο έδαφος. Τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης υπολογίζονται ότι είναι όμοια με αυτά ενός τυπικού λέβητα. Η μόνη διαφορά με έναν τυπικό

λέβητα είναι ότι αυτά τα συστήματα μπορούν να παράγουν και ηλεκτρισμό ενώ παράλληλα θερμαίνουν νερό.

#### 4.2.3 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 αγορά 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 συμπίκνωσης 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 CO<sub>2</sub> κατά 1,7-9 τόνους. Με βάση τα αναμενόμενα τελικά επίπεδα διεύθυνσης στην αγορά, αυτό θα μπορούσε να

αντιπροσωπεύει μια μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> 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 παράγοντας για αυτούς που παίρνουν "ορθολογικές" αποφάσεις).

Σύμφωνα με τις PIU όχι μόνο είναι οι μονάδες μικροσυμπαγωγής οικονομικά βιώσιμες για τον τελικό χρήστη, χωρίς καμία μορφή επιδότησης, αλλά αντιπροσωπεύουν επίσης την πιο οικονομικά αποδοτική στρατηγική μετριασμού του διοξειδίου από όλες τις τεχνολογίες σε ή κοντά στην αγορά. Από πλευράς μετριασμού του άνθρακα, οι μονάδες μικροσυμπαγωγής έχουν αρνητικό κόστος -£600 ανά τόνο διοξειδίου του άνθρακα, σε σύγκριση με τα +£1200 για την παραγωγή φωτοβολταϊκών, με βάση τις τρέχουσες συνθήκες του Ηνωμένου Βασιλείου [68].

Σε στρατηγικό επίπεδο, στη συνέχεια, η μικροσυμπαγωγή είναι ένα ισχυρό οικονομικό εργαλείο, αλλά δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις αγορές, και υπάρχουν μια σειρά θεμελιωδών κλιματικών, τεχνικών και άλλων παραμέτρων που πρέπει να ικανοποιηθούν για μια βιώσιμη αγορά μικροσυμπαγωγής.

Οι κυριότερες αγορές είναι αυτές όπου υπάρχει σημαντική θερμική ζήτηση (θέρμανσης χώρου και ζεστού νερού) για ένα σημαντικό μέρος του έτους, όπως είναι γενικά αποδεκτό ότι η πρωταρχική εφαρμογή των μονάδων μικροσυμπαγωγής θα είναι ως υποκατάστατο για τους λέβητες κεντρικής θέρμανσης. Περαιτέρω, σχετικά υψηλές τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας και η διαθεσιμότητα του δικτύου παροχής φυσικού αερίου είναι μεγάλης σημασίας για την επίτευξη οικονομικής βιωσιμότητας. Γι' αυτούς τους λόγους, η Σκανδιναβία δεν θεωρείται μια βιώσιμη αγορά, ενώ οι σχετικά χαμηλές θερμικές απαιτήσεις της Νότιας Ευρώπης περιορίζουν τις εφαρμογές σε αυτή την περιοχή. Οι βασικές ευρωπαϊκές αγορές, συνεπώς, είναι η Γερμανία, το Ηνωμένο Βασίλειο και η Ολλανδία, με περαιτέρω δυνατότητες στην Ιταλία και την Ισπανία. Σε παγκόσμιο επίπεδο, πολλά τμήματα της Ιαπωνίας και των ΗΠΑ αποτελούν επίσης σημαντικές δυναμικές αγορές, αν και είναι πολύ νωρίς για να τον προσδιορισμό του δυναμικού για την FIS και τις προσχωρούσες χώρες, λόγω του εξαιρετικά πολύπλοκου πολιτικού και κοινωνικοοικονομικού περιβάλλοντος.

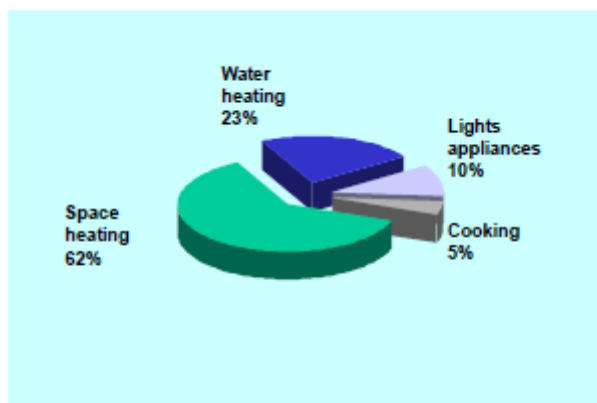
Ακόμη και εντός των βασικών εθνικών αγορών, δεν είναι όλα τα σπίτια κατάλληλα για τις πολύ μικρές μονάδες συμπαγωγής, για λόγους είτε πρακτικότητας ή οικονομικούς. Για παράδειγμα, μικρότερα (ή καλύτερα μονωμένα) σπίτια μπορεί να έχουν ζήτηση θερμότητας ανεπαρκή για την εξοικονόμηση ενέργειας που απαιτείται για την ανάκτηση του κόστους επένδυσης, και άλλα σπίτια μπορεί να μην έχουν επαρκή χώρο για τις μονάδες που είναι σήμερα μεγαλύτερες από τους συμβατικούς λέβητες. Ωστόσο, καθώς οι νέες τεχνολογίες, όπως οι κυψέλες καυσίμου, αναδύονται, είναι πιθανό ότι τα θερμικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους μπορεί να είναι καλύτερα προσαρμοσμένα στα μικρότερα σπίτια.

Η λειτουργία της μικροσυμπαγωγής οδηγείται από τη θερμική ζήτηση του σπιτιού και παράγει ενέργεια ουσιαστικά παράλληλα με την αιχμή της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας του δικτύου (το οποίο ακολουθεί τα θερμικά φορτία το χειμώνα εντός των καθορισμένων αγορών). Η μέγιστη χωρητικότητα παρέχεται γενικά από τις κεντρικούς σταθμούς φυσικού αερίου και, ως εκ τούτου η ικανότητα αυτή είναι που θα εκτοπιστεί. Επιπλέον, η συνολική κεντρική ικανότητα (συμπεριλαμβανομένων των αεριοστροβίλων συνδυασμένου κύκλου) μπορεί να μειωθεί από την έξοδο των μονάδων συμπαγωγής άλλες φορές. Έτσι, μεγαλύτερο μέρος της κατανάλωσης φυσικού αερίου σε κεντρικές μονάδες παραγωγής ενέργειας είναι πιθανό να μειωθεί. Ωστόσο, εάν μικρές μονάδες CHP εισάγονται για να αντικαταστήσουν τους υφιστάμενους λέβητες

συμπύκνωσης, θα υπάρξει μια οριακή αύξηση της κατανάλωσης φυσικού αερίου (περίπου 10%) σε οικιακό επίπεδο. (Για αντικατάσταση των παλαιότερων μη αποδοτικών λεβήτων, η κατανάλωση φυσικού αερίου μπορεί στην πραγματικότητα να πέσει). Εκεί μπορεί να υπάρξει, κατά συνέπεια, μια αυξητική μετάβαση από μεγάλο μέρος προμήθειας φυσικού αερίου προς την εγχώρια προσφορά, αν και είναι απίθανο περισσότερα από 1 εκατομμύριο συστήματα να εγκατασταθούν μέχρι το 2010, οπότε αυτές οι επιπτώσεις θα είναι με σχετικά αργό ρυθμό.

#### 4.2.4 Η μικροσυμπαγωγή σαν ένα μέτρο ενεργειακής αποδοτικότητας μέσα στο σπίτι

Ο Βρετανικός οικιακός τομέα αντιπροσωπεύει περίπου το 30% της πρωτογενούς κατανάλωσης ενέργειας της χώρας και αποτελεί έτσι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της νέας ενεργειακής πολιτικής, και μια πηγή δυναμικού ενεργειακού κέρδους. Στο πλαίσιο αυτό, μικρές μονάδες CHP μπορούν να θεωρηθούν ως ένα οικονομικά αποδοτικό μέτρο ενεργειακής απόδοσης, και ως εκ τούτου, πρέπει να αντέξουν στη δοκιμασία της σύγκρισης με τα άλλα μέτρα. Με ένα κόστος επένδυσης της τάξης του 1.6p/kWh να εξοικονομείται, η μικροσυμπαγωγή μετρά περισσότερο σε σχέση με τη μόνωση τοίχων και ουσιωδώς είναι καλύτερη από τα διπλά τζάμια. Ωστόσο, είναι λιγότερο αποτελεσματική από τη μόνωση σοφίτας ή τη μόνωση των τοίχων που γίνεται κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Το λογικό συμπέρασμα λοιπόν είναι ότι η μικροσυμπαγωγή είναι ένα αποτελεσματικό μέτρο για τις υφιστάμενες κατοικίες, ιδιαίτερα όταν για παράδειγμα δεν υπάρχει κοιλότητα για μόνωση.



Σχήμα 4.7 Οικιακή κατανάλωση ενέργειας ανάλογα με το μέσο

Δεδομένου ότι η πλειοψηφία των εγκαταστάσεων είναι σε υφιστάμενα σπίτια, είναι σημαντικό το γεγονός ότι πάνω από 60% της ενέργειας σε ένα τυπικό βρετανικό σπίτι χρησιμοποιείται για θέρμανση χώρου, με ένα επιπλέον 23% για θέρμανση νερού. Μόνο ένα 15% συνολικά είναι για φωτισμό και για άλλες συσκευές που μπορεί να απαιτούν ηλεκτρισμό. Αυτά τα ποσοστά είναι παρόμοια και για άλλες ευρωπαϊκές χώρες (π.χ. Γαλλία με 60% θέρμανση χώρων, 19% νερό, 21% άλλα). Συνεπώς, είναι πιο αποτελεσματικό να επενδύσει κάποιος στο να στοχεύσει στο 85% θερμικής ενεργειακής ζήτηση παρά στο σχετικά μικρό δυναμικό ηλεκτρικής ενέργειας, λαμβανομένου ιδίως υπόψη του υψηλού κόστους και των φτωχών προφίλ των εναλλακτικών λύσεις που παράγουν μόνο ηλεκτρισμό, όπως είναι η φωτοβολταϊκή παραγωγή [68].

Σε πιο μακροπρόθεσμη βάση, αξίζει να σημειωθεί ότι ορισμένες τεχνολογίες μικροσυμπαγωγής (π.χ. Stirling κινητήρες) είναι ευέλικτες στα καύσιμα, και, εφόσον μπορούν

να κάνουν χρήση της υπάρχουσας υποδομής φυσικού αερίου, θα μπορούσαν στο μέλλον να κάνουν χρήση του βιοαερίου ή του υδρογόνου, όταν αυτά τα καύσιμα γίνουν ευρέως διαθέσιμα. Αποτελούν, επομένως, τόσο μια μεταβατική τεχνολογία όσο και ένα δυνητικό μετατροπέα ανανεώσιμης ενέργειας.

#### 4.2.5 Εμπόδια στην αγορά

Περιβαλλοντικοί και οικονομικοί παράγοντες σίγουρα φαίνεται να κάνουν τη μικροσυμπαγωγή μια ελκυστική πρόταση. Ωστόσο, οι σκεπτικιστές επισημαίνουν ότι η μικροσυμπαγωγή είναι "κοντά στην εμπορευματοποίηση" για αρκετά χρόνια.

Ενώ είναι αλήθεια ότι μια σειρά από αρχικές τεχνολογίες-ανταγωνιστές έχουν αποτύχει να εκπληρώσουν την υπόσχεσή τους, αυτό είναι ένα κοινό χαρακτηριστικό της ανάπτυξης της τεχνολογίας. Αυτό που είναι ίσως περίεργο είναι ότι τόσες πολλές τεχνολογίες έχουν καταφέρει να ξεπεράσουν τις σοβαρές τεχνικές προκλήσεις με μικροσκοπικούς προϋπολογισμούς. Η BG Group και Rinnai ανακοίνωσαν την από κοινού επένδυση \$40 εκατομμυρίων, φέρνοντας την 1kWe μονάδα τους στην αγορά. Από την πλευρά της ανάπτυξης των κινητήρων Stirling, είναι μια εντυπωσιακή επένδυση και μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από ό, τι πολλοί από τους ανταγωνιστές τους. Ωστόσο, σε σύγκριση με τα δισεκατομμύρια που έχουν επενδυθεί σε κυψέλες καύσιμου, οι οποίες παραμένουν πολύ μακριά από την αγορά, η πρόοδός τους και αυτή των μικρότερων παικτών οι οποίοι προωθούν προϊόντα εντός 12 μηνών, είναι αξιοσημείωτη.

Παρά το γεγονός ότι ορισμένοι κατασκευαστές έχουν ξεπεράσει με επιτυχία τις τεχνικές προκλήσεις, εξακολουθούν να υπάρχουν πολυάριθμα διοικητικά, κανονιστικά και οικονομικά εμπόδια για την ευρεία απορρόφηση των μονάδων μικροσυμπαγωγής.

Μέχρι πρόσφατα, ήταν απαραίτητο στο Ηνωμένο Βασίλειο να συμμορφωθεί με τον τοπικό DNO (Distribution Network Operator) για μια συμφωνία σύνδεσης πριν από τη σύνδεση οποιαδήποτε γεννήτριας. Αυτή η διαδικασία και τα τεχνικά πρότυπα που σχετίζονται με αυτήν ήταν ίδια για όλους τους παραγωγούς μέχρι 5MWe. Σαφώς θα ήταν ακατάλληλο, σε διοικητικό επίπεδο, αν μερικά εκατομμύρια μεμονωμένες τεχνικές αξιολογήσεις και δοκιμές επικύρωσης χώρου ήταν απαραίτητες. Ωστόσο, η συνεργασία μεταξύ των developers της μικροσυμπαγωγής και των αντιπροσώπων του DNO έχει οδηγήσει στην εισαγωγή τυποποιημένων διαδικασιών που επιτρέπουν προϊόντα εγκεκριμένου τύπου να εγκαθίστανται από πιστοποιημένους εγκαταστάτες χωρίς προηγούμενη συμφωνία, με την προϋπόθεση ότι η θέση και ο τύπος της γεννήτριας κοινοποιείται στον DNO αμέσως μετά την σύνδεση. Παρόμοιο συμβουλευτικό πρότυπο εκπονήθηκε από την CEN για την Ευρώπη, αλλά αυτό μπορεί να διαρκέσει αρκετά χρόνια για να γίνει υποχρεωτικό. Ωστόσο, λίγα έχουν ακόμη γίνει για να αναπτυχθεί μια μέθοδος για τη διευκόλυνση του DNO να ανακτήσει το κόστος της σύνδεσης μεγάλων αριθμών μικρών γεννητριών και, μάλιστα, ακόμα και το κόστος από μόνα τους είναι δύσκολα κατανοητά μέσα στη μπερδεμένη παραγωγή και τα σενάρια της ζήτησης που συναντούν μέσα στα δίκτυα χαμηλής τάσης.

Ο άλλος τομέας ανησυχίας είναι η απόδοση οικονομικής αξίας στην μικροσυμπαγωγή ηλεκτρισμού-θερμότητας που εξάγεται στο δίκτυο. Παραμένει ένα σημαντικό έργο για την αναγνώριση της πραγματικής αξίας αυτής της παραγωγής, για την αποτελεσματική μέτρησή της και για να συμφωνηθεί μια μεθοδολογία εγκατάστασης. Ένας αριθμός επιδοτούμενων προγραμμάτων λειτουργούν, για παράδειγμα στη Γερμανία, τα οποία είτε λειτουργούν με καθαρή μέτρηση (όπου η

εξαγωγή αποτιμάται στην ίδια τιμή με την εισαγωγή και μέτρα απλά τρέχουν προς τα πίσω, καθώς και προς τα εμπρός) ή σε ένα προκαθορισμένο επίπεδο σχεδιασμένο για τη στήριξη της εισαγωγής συγκεκριμένων τεχνολογιών (που απαιτούν ξεχωριστή μέτρηση των εξαγόμενων ισχύων). Ωστόσο, καμία από αυτές τις προσεγγίσεις δεν είναι βιώσιμη μέσα σε ανταγωνιστικές αγορές. Δραστηριότητες βρίσκονται σε εξέλιξη για την αντιμετώπιση θεμάτων μέτρησης και εγκατάστασης, αλλά στο μεταξύ, η εξαγωγή δεν πιστώνεται στο πλαίσιο της ανταγωνιστικής αγοράς και «χύνεται» μέσα στο δίκτυο.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

## ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ

### 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ηλεκτρικά οχήματα (Electric Vehicles) ονομάζονται τα οχήματα που για την κίνηση τους χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια αντί για συμβατικά καύσιμα όπως για παράδειγμα πετρέλαιο ή βενζίνη. Όταν μιλάμε για ηλεκτρικά οχήματα αναφερόμαστε σε ηλεκτρικά αυτοκίνητα κατά κύριο λόγο, χωρίς όμως να απορρίπτουμε το γεγονός πως γίνονται μελέτες και προσπάθειες έτσι ώστε να δημιουργηθούν και εμπορικά επαγγελματικά οχήματα που θα εξοπλίζουν τους μεταφορικούς στόλους εταιρειών στο προσεχές μέλλον [42].

Τα τελευταία χρόνια γίνεται μία έντονη προσπάθεια ανά τον κόσμο για εξάπλωση και ανάπτυξη των ηλεκτρικών αυτοκινήτων με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας και την μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Έτσι παρατηρούμε εταιρείες κατασκευής αυτοκινήτων όπως για παράδειγμα Toyota, BMW, Mercedes να κάνουν προσπάθειες για κατασκευή ενός εμπορικού αλλά και ελκυστικού ηλεκτρικού αυτοκινήτου αλλά παρατηρούμε και διάφορες πολιτικές οι οποίες ευνοούν την κατοχή ηλεκτρικών αυτοκινήτων από ιδιώτες. Παρ' όλα αυτά όμως τα προβλήματα που απομένουν να λυθούν είναι αρκετά και θα χρειαστεί αρκετή προσπάθεια από τα ανά τον κόσμο εργαστήρια προτού μπορούμε να συγκρίνουμε ένα αυτοκίνητο με συμβατικά καύσιμα με ένα όμοιο του που χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια. Γι' αυτό τον λόγο τα περισσότερα αυτοκίνητα που κυκλοφορούν αυτή την στιγμή στην αγορά είναι κυρίως υβριδικά (δηλαδή χρησιμοποιούν ως πηγή ενέργειας τον ηλεκτρισμό αλλά ο ηλεκτρισμός αυτός παράγεται από έναν κινητήρα εσωτερικής καύσεως που παράγει ηλεκτρισμό και/ή κινεί το όχημα. Συνοπτικά τα προβλήματα που υπάρχουν και εμποδίζουν την ευρεία εξάπλωση των EVs είναι τα ακόλουθα :

1. Αυτονομία μπαταρίας EV και πυκνότητα ισχύος
2. Χρόνος φόρτισης μπαταρίας
3. Χρόνος ζωής της μπαταρίας και κύκλοι ζωής
4. Κόστος μπαταρίας
5. Σύνδεση στο δίκτυο για φόρτιση και πως αυτό επηρεάζεται

Τα παραπάνω προβλήματα αναλύονται παρακάτω στα αντίστοιχα υποκεφάλαια.

Εδώ να αναφέρουμε πως τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα χρησιμοποιούν ηλεκτρικούς κινητήρες (συνήθως επαγωγικούς κινητήρες τύπου κλωβού) [42] ενώ σε πρωτότυπα οχήματα έχουν χρησιμοποιηθεί και άλλοι τύποι κινητήρων όπως για παράδειγμα επαγωγικοί κλασματικού βήματος εμφανίζοντας έτσι πιο sport χαρακτηριστικά αλλά παρουσιάζοντας και μεγαλύτερη κατανάλωση. Μία μικρή και σύντομη αναφορά στους κινητήρες και πως αυτοί καθορίζουν την συμπεριφορά και τα χαρακτηριστικά του οχήματος γίνεται στο αντίστοιχο υποκεφάλαιο παρακάτω. Τέλος να σημειωθεί πως διάφορες ενεργειακές πολιτικές έχουν αναπτυχθεί με σκοπό την εξομάλυνση των προβλημάτων που προκύπτουν από την σύνδεση μεγάλου αριθμού ηλεκτρικών αυτοκινήτων για φόρτιση στο δίκτυο, ενώ παράλληλα εξετάζονται και τεχνικές κατά τις οποίες τα ηλεκτρικά

αυτοκίνητα θα μπορούσαν να συνεισφέρουν ενέργεια στο δίκτυο (V2G – Vehicle to Grid). Αναφορικά με το τελευταίο σενάριο γίνεται μία εκτενής παρουσίαση του παρακάτω μιας και χρησιμοποιείται στα προγράμματα του μικροδικτύου που εξετάζουμε δίνοντας την δυνατότητα στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα να συνεισφέρουν ενέργεια στο μικροδίκτυο.

## 5.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Σε αυτό το υποκεφάλαιο γίνεται μία αναφορά στις κατηγορίες ηλεκτρικών οχημάτων που κυκλοφορούν ανά τον κόσμο καθώς και τις διατάξεις που αυτά διαθέτουν. Όπως αναφέραμε και παραπάνω τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα είναι μία ευρεία οικογένεια αυτοκινήτων τα οποία χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια για την κίνηση τους, την οποία κίνηση την δίνει ένας ή περισσότεροι ηλεκτρικοί κινητήρες. Ως ηλεκτρικά αυτοκίνητα ορίζονται όλα τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα που χρησιμοποιούν ηλεκτρικούς κινητήρες για την κίνηση τους είτε αυτή η ηλεκτρική ενέργεια που χρειάζεται για τους συγκεκριμένους κινητήρες προέρχεται από μπαταρίες, κυψέλες υδρογόνου, συμβατικά καύσιμα όπως για παράδειγμα πετρέλαιο ή βενζίνη ή ακόμα και φωτοβολταϊκές κυψέλες σε πρότυπα οχήματα που συλλέγουν ηλιακή ενέργεια και την μετατρέπουν σε ηλεκτρική. Έτσι έχουμε τις παρακάτω κατηγορίες ηλεκτρικών αυτοκινήτων :

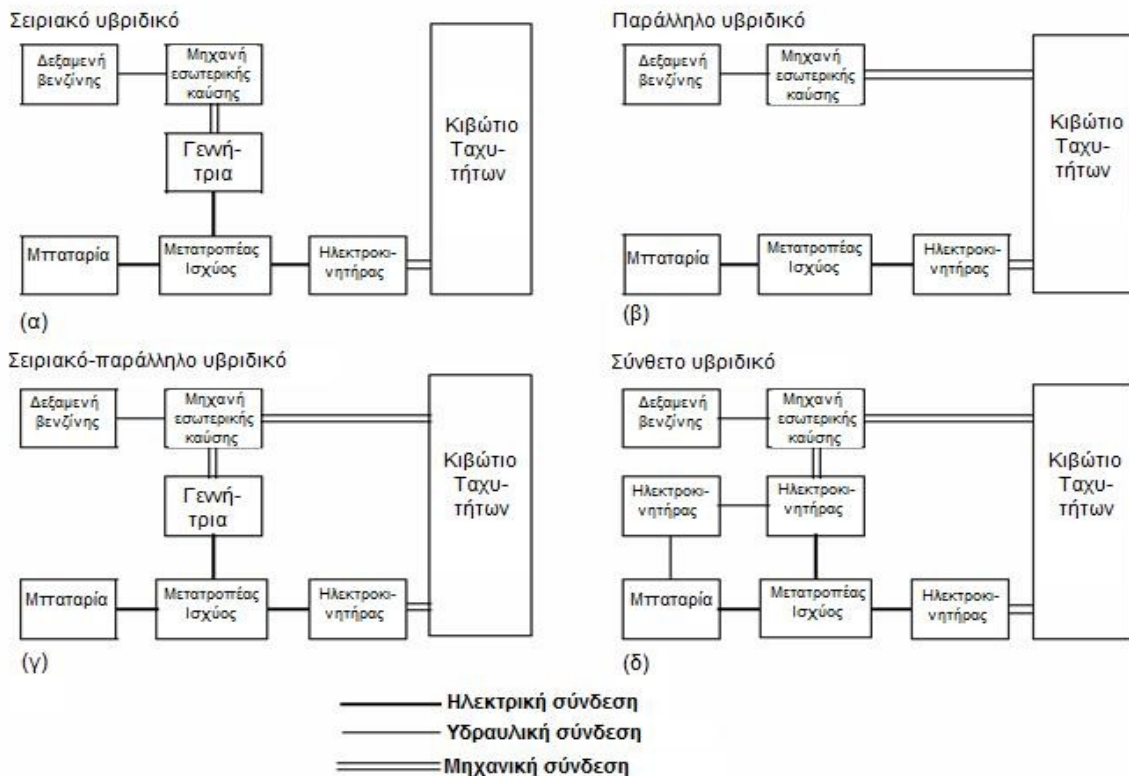
### ➤ Ηλεκτρικά Οχήματα Μπαταρίας :

Ηλεκτρικά Οχήματα Μπαταρίας ονομάζουμε τα οχήματα τα οποία για την κίνηση τους χρησιμοποιούν την ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται στις μπαταρίες που φέρουν. Έχουν μηδενικούς ρύπους ως συνέπεια του γεγονότος ότι δεν χρησιμοποιούν κάποιο συμβατικό καύσιμο ενώ διάφορες τεχνικές επαναφόρτισης της μπαταρίας κατά την κίνηση τους έχουν εφευρεθεί. Για παράδειγμα η αναγεννητική πέδηση κατά την οποία η θερμική ενέργεια που παράγεται από τα φρένα κατά το φρενάρισμα μέσω αντιστροφών και κατάλληλων ηλεκτρονικών ισχύος φορτίζει την μπαταρία. Ακόμα μία τεχνολογία που παρουσιάστηκε πρόσφατα από την Tesla Inc. και αναμένεται να χρησιμοποιηθεί στο άμεσο μέλλον είναι η ασύρματη φόρτιση των συγκεκριμένων αυτοκινήτων [52] σε κατάλληλα διαμορφωμένες θέσεις στάθμευσης μικρής διάρκειας. Τα συγκεκριμένα οχήματα είναι αθόρυβα, συνήθως με χαμηλή υψηλή ταχύτητα και μικρή αυτονομία. Προσπάθειες γίνονται ώστε τέτοια οχήματα να αποκτήσουν πιο sport χαρακτήρα με συγκεκριμένο εκφραστή αυτής της ιδέας την Tesla Inc . Τέλος τέτοιου είδους οχήματα χρησιμοποιούνται από διάφορους φορείς για τοπικές εξυπηρετήσεις όπως για παράδειγμα σε αεροδρόμια, λιμάνια, γήπεδα golf και άλλα αντίστοιχα μέρη.

### ➤ Υβριδικά Οχήματα :

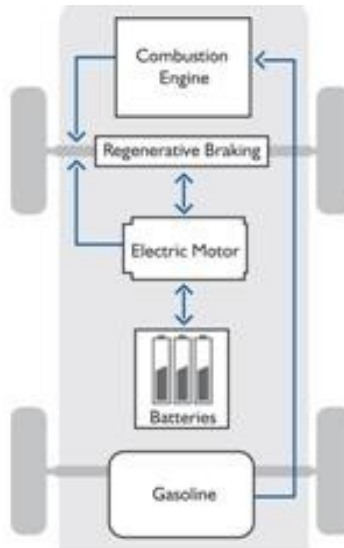
Τα οχήματα αυτά είναι και κατά κόρον αυτά που επικρατούν στην αγορά των ηλεκτρικών αυτοκινήτων για πολλούς λόγους ο κυριότερος εκ των οποίων είναι ότι για την τροφοδοσία της μπαταρίας τους χρησιμοποιούν κινητήρα εσωτερικής καύσης που καίει συμβατικά καύσιμα όπως βενζίνη ή πετρέλαιο. Αυτό επιτρέπει στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα να έχουν μεγάλη αυτονομία

αντίστοιχη των συμβατικών αυτοκινήτων ή ακόμα και μεγαλύτερη σε ορισμένες περιπτώσεις. Και αυτά τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα (όπως και κάθε κατηγορία ηλεκτρικών αυτοκινήτων) χρησιμοποιούν αναγεννητική πέδηση. Εδώ μπορεί να γίνει μία διάκριση μεταξύ των υβριδικών σειριακής λειτουργίας ή παράλληλης λειτουργίας. Με τον όρο σειριακή λειτουργία εννοούμε ότι η μηχανή εσωτερικής καύσης φορτίζει την μπαταρία η οποία με την σειρά της τροφοδοτεί τον ηλεκτρικό κινητήρα που κινεί το όχημα. Με τον όρο παράλληλη λειτουργία εννοούμε ότι μπορεί να γίνει επιλογή μεταξύ της κίνησης από τον ηλεκτροκινητήρα ή από τον συμβατικό κινητήρα εσωτερικής καύσης. Παρακάτω φαίνεται ένα σχήμα στο οποίο απεικονίζονται όλες οι δυνατές διατάξεις υβριδικών οχημάτων :



Σχήμα 5.1: Δυνατές διατάξεις υβριδικών οχημάτων

Σε κάθε περίπτωση όμως λόγω μικρότερης ενέργειας που αποθηκεύεται στην μπαταρία στα υβριδικά οχήματα κάποια στιγμή ο κινητήρας εσωτερικής καύσης θα χρειαστεί να τροφοδοτήσει με ενέργεια την μπαταρία. Οι μπαταρίες των υβριδικών οχημάτων είναι συνήθως μικρής χωρητικότητας και δεν έχουν την δυνατότητα σύνδεσης τους στο δίκτυο για φόρτιση. Ακόμα στα μοντέλα υβριδικών οχημάτων που κυκλοφορούν στην αγορά συνήθως επιλέγεται η διάταξη του σύνθετου υβριδικού (βλέπε Σχήμα 5.1) ενώ σε αρκετά δίνεται η επιλογή για σειριακή λειτουργία, παράλληλη ή σύνθετη όπως για παράδειγμα στο μοντέλο Prius της Toyota.



Σχήμα 5.2 Τυπική Διάταξη λειτουργίας υβριδικού οχήματος

➤ Οχήματα κυψελών καυσίμου (Fuel Cell Vehicles)

Τα ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου χρησιμοποιούν την χημική ενέργεια που παράγεται στις κυψέλες καυσίμου που περιέχουν αποθηκευμένη ενέργεια υπό την μορφή του υδρογόνου  $H_2$  το οποίο όταν ενώνεται με το οξυγόνο  $O_2$  δημιουργεί μία χημική αντίδραση με αποτέλεσμα να παράγεται θερμότητα και νερό. Η χημική αντίδραση που λαμβάνει χώρα είναι η ακόλουθη :  $O_2 + H_2 \rightarrow H_2O + \uparrow$  ,όπου το  $\uparrow$  υποδηλώνει θερμότητα με μορφή διαφοράς στην ενθαλπία των στοιχείων. Επακόλουθο είναι πως αυτής της κατηγορίας τα αυτοκίνητα δεν παράγουν οποιασδήποτε μορφή ρύπων. Για την παραγωγή του  $H_2$  εξετάζονται διάφοροι τρόποι όπως για παράδειγμα η συμπίεση του αλλά το μεγάλο πρόβλημα είναι η αυτονομία που μπορεί να παρέχει το  $H_2$  καθώς χρειάζονται μεγάλες ποσότητες του συγκεκριμένου αερίου για μία ικανοποιητική αυτονομία. Ένας ακόμη λόγος που δυσχεραίνει την εξέλιξη των συγκεκριμένων οχημάτων είναι τα μέρη διανομής  $H_2$  που πρέπει να πληρούν ειδικά κριτήρια ασφαλείας καθώς ως γνωστόν το  $H_2$  είναι ένα εξαιρετικά εύφλεκτο υλικό και η επεξεργασία του πρέπει να λαμβάνει χώρα κάτω υπό ειδικές συνθήκες. Ούτε αυτά τα οχήματα έχουν την δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο όπως συμβαίνει και με τα υβριδικά καθώς ο τρόπος λειτουργίας τους θυμίζει στην διάταξη τα υβριδικά οχήματα με την διαφορά ότι σε αντίθεση με τα υβριδικά οχήματα δεν χρησιμοποιούν συμβατικά καύσιμα όπως βενζίνη, πετρέλαιο ή και φυσικό αέριο, αλλά  $H_2$  με αποτέλεσμα την απουσία ρύπων. Λίγα αυτοκίνητα χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου ανά τον κόσμο θέτοντας ερωτηματικά για την αποδοτικότητα και τα περιθώρια εξέλιξης των συγκεκριμένων οχημάτων στα επόμενα χρόνια.

Εδώ να σημειωθεί πως όλα τα παραπάνω ηλεκτρικά οχήματα μπορούν με κατάλληλες διατάξεις και τον κατάλληλο εξοπλισμό να συνδεθούν στο δίκτυο εφόσον περιέχουν μπαταρίες. Αυτά τα οχήματα ονομάζονται Plug-in EVs λόγω της δυνατότητας τους να συνδέονται στο δίκτυο ανταλλάσσοντας ενέργεια με αυτό. Συγκεκριμένα τα ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας έχουν από κατασκευής τους τον εξοπλισμό που απαιτείται για σύνδεση στο δίκτυο καθώς με την βοήθεια αυτού του εξοπλισμού φορτίζουν τις μπαταρίες τους. Κάτω από συγκεκριμένες ενεργειακές

πολιτικές και συνθήκες μπαταρίας, για τις οποίες θα μιλήσουμε σε παρακάτω υποκεφάλαια μπορούν και να τις εκφορτίζουν εφόσον το δίκτυο χρειάζεται την ενέργεια που περιέχουν οι μπαταρίες τους. Γενικότερα το σενάριο ανταλλαγής ενέργειας με το δίκτυο εξετάζεται κυρίως για τα ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας καθώς είναι αυτά τα οχήματα που έχουν την μεγαλύτερη μπαταρία από τα υπόλοιπα με αποτέλεσμα να μπορούν να αποθηκεύσουν (αλλά και να δώσουν) ένα σημαντικό ποσό ενέργειας. Τα υβριδικά και τα Fuel Cell οχήματα έχουν μπαταρίες αλλά είναι συνήθως μικρής αποθηκευτικής ικανότητας και η ενέργεια τους χρησιμοποιείται, κυρίως, για μικρές διαδρομές εντός αστικών περιοχών ή για μεγαλύτερη εξοικονόμηση συμβατικών καυσίμων. Όταν στην συνέχεια αδειάσουν οι μπαταρίες δεν χρειάζεται να συνδεθεί το όχημα στο δίκτυο καθώς αντλεί ενέργεια για να φορτίσει τις μπαταρίες του από τις κυψέλες καυσίμου ή από τον συμβατικό κινητήρα εσωτερικής καύσης.

## 5.3 ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ

### 5.3.1 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 [51]. 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 ρεξερβουάρ 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.

### 5.3.2 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 [42].
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) [42][52][53].

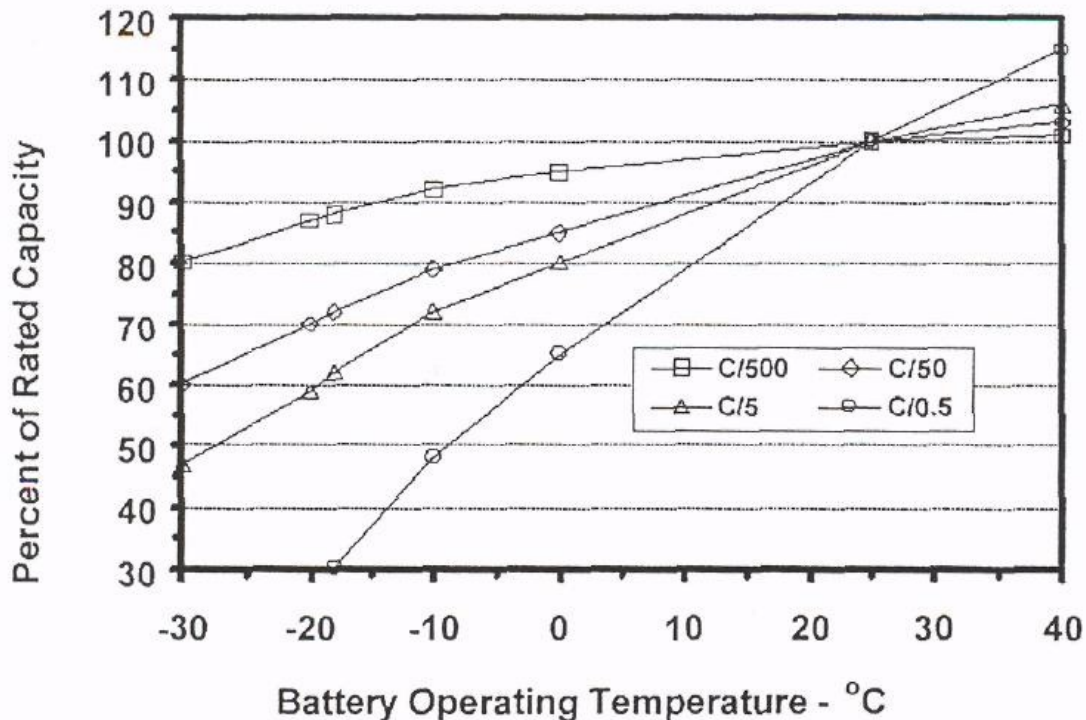
Παρακάτω εμφανίζεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τεχνολογίες μπαταριών και συγκεντρωμένα κάποια πλεονεκτήματα και κάποια μειονεκτήματα τους :

Τύπος συσσωρευτή	Pb-Acid	Ni-Cd	NiMH	NiFe	Na-S	Li-Polymer
Κόστος (US\$/kWh) για αναμενόμενη ποσότητα	70	600	600	200	600	1200
Πυκνότητα Ενέργειας (Wh/kg)	34	55	55	50	100	85
Πυκνότητα Ισχύος (W/kg)	280	180	180	100	140	90
Κύκλοι ζωής (80% DOD)	300	800	500	900	800	800
Απόδοση φόρτισης	80%	65%	65%	60%	88%	?
Διαθεσιμότητα	Αριστη	Καλή	Καθόλου	Μικρή	Μέτρια	Καθόλου
Ασφάλεια	Αριστη	Αριστη	Αριστη	?	Μέτρια	?
Περιβαλλοντική Συμπεριφορά	Μέτρια	Κακή	Καλή	Καλή	Αριστη	Καλή
Ανακυκλωσιμότητα	Αριστη	Κακή	Μέτρια	Καλή	Υποσχόμενη	Μέτρια
Διάρκεια	Καλή	Αριστη	Αριστη	Καλή	Καλή	Αριστη
Συντήρηση	Αριστη	Καλή	Αριστη	Κακή	Καλή	Αριστη

Σχήμα 5.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα διαφόρων τεχνολογιών μπαταρίας

Όπου υπάρχει ερωτηματικό στον παραπάνω πίνακα τότε υποδηλώνεται πως δεν υπάρχει μία σαφής απάντηση και το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό είναι υπό έρευνα ή αδύνατον να προσδιοριστεί με ακρίβεια/συνέπεια.

Τέλος θα πρέπει να αναφέρουμε πως οι μπαταρίες είναι αρκετά ευαίσθητες στην μεταβολή της θερμοκρασίας και συνεπώς υπάρχει και μία ακόμα παράμετρος προς εξέταση καθώς μία μπαταρία σε ένα ηλεκτρικό όχημα θα λειτουργούσε βέλτιστα σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος από  $20^{\circ}C$  έως  $25^{\circ}C$  όπως φαίνεται και από το παρακάτω διάγραμμα σχηματικά.



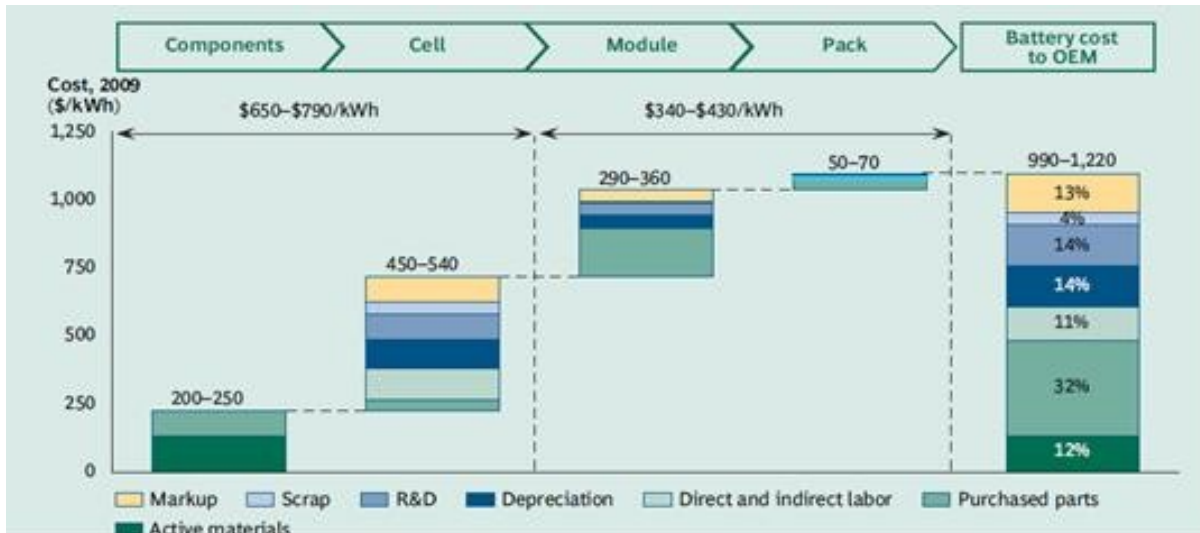
Σχήμα 5.4 Εξάρτηση χωρητικότητας μπαταρίας από θερμοκρασία

### 5.3.3 Σημερινές τιμές και πρόβλεψη τιμών

Λόγω της πολυπλοκότητας των χαρακτηριστικών μίας μπαταρίας που προορίζεται για κίνηση αλλά και της πληθώρας των τύπων μπαταριών καθίσταται δύσκολος ο υπολογισμός ακριβής τιμής των μπαταριών που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά οχήματα. Αυτή η τιμή εξαρτάται από τον τύπο του ηλεκτρικού οχήματος (αν είναι υβριδικό για παράδειγμα και φέρει μικρότερες μπαταρίες ή αν είναι αποκλειστικά όχημα μπαταρίας και φέρει μεγαλύτερες μπαταρίες σε χωρητικότητα) καθώς και από την τεχνολογία των μπαταριών που επιλέγεται αλλά και από τα εκάστοτε μέτρα ασφαλείας που παίρνονται για να προστατεύσουν αυτές τις μπαταρίες σε διάφορες δυσμενείς καταστάσεις γι' αυτές (όπως για παράδειγμα σε περίπτωση φωτιάς ή μιας υπερέντασης ή σε περίπτωση εξαιρετικά υψηλής θερμοκρασίας). Οι περισσότερες πηγές εκτιμούν το τρέχον κόστος μιας μπαταρίας αυτοκινήτου λιθίου-ιόντων, ως OEM, μεταξύ 1.000\$/ kWh και 1.200\$/ kWh. Σύμφωνα με την εταιρεία Gartner, το τρέχον κόστος είναι 900\$/kWh, με τάση να μειωθεί περίπου κατά 10-15% κάθε χρόνο, και έτσι το 2015 θα είναι γύρω στα 375 \$/kWh [54]. Στόχος είναι να φτάσει το κόστος στην τιμή 250 \$/kWh έως το 2020, έτσι ώστε να μπορούμε να μιλάμε για οικονομικά αποδοτικά ηλεκτρικά οχήματα καθώς και για μαζική παραγωγή αυτών από



αυτοκινητοβιομηχανίες. Στόχος αρκετά δύσκολος και απ' ότι διαφαίνεται μέχρι στιγμής ανέφικτος μέχρι το 2020.



Σχήμα 5.5 Τρέχουσα κατανομή κόστους τυπικής μπαταρίας EV

Από το παραπάνω σχήμα παρατηρούμε πως μόνο ένα 12% του συνολικού κόστους αποτελούν τα ενεργά στοιχεία με το μεγαλύτερο ποσοστό κόστους να πηγαίνει στα συμπληρωματικά αντικείμενα. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα διάγραμμα της BCG (Boston Consulting Group) κατά το οποίο αξιολογεί πως θα κυμανθεί το κόστος της μπαταρίας προοριζόμενης για ηλεκτρικά αυτοκίνητα κατά τα έτη 2009-2020 [69].

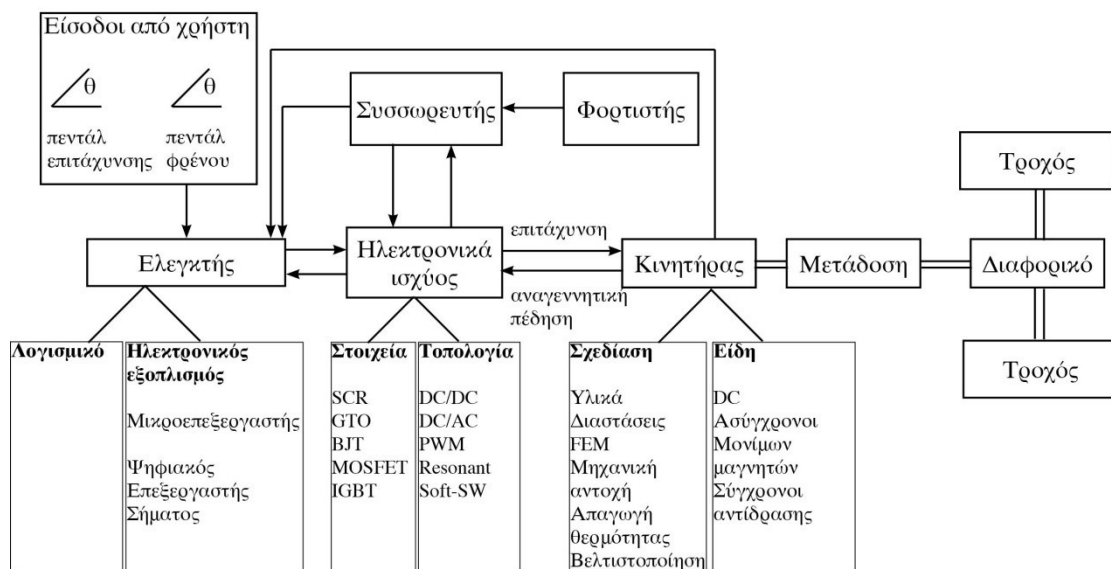


Σχήμα 5.6 Πρόβλεψη Τιμών για τα έτη 2009-2020 (BCG)

Όπως αναφέραμε και παραπάνω ο στόχος για τα 250 \$/kWh έως το 2020 μοιάζει ανέφικτος με τα μέχρι στιγμής δεδομένα χωρίς να αποκλείεται το γεγονός πως περισσότερη έρευνα από τα R&D τμήματα εταιρειών και εργαστηρίων μπορεί να προτείνει κάτι ρηξικέλευθο που θα καταφέρει να πιάσει τον ζητούμενο στόχο ως το έτος 2020.

## 5.4 ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

Τα ηλεκτρικά οχήματα για να κινηθούν χρειάζεται να αξιοποιούν την ηλεκτρική ενέργεια που διαθέτουν και να την μετατρέπουν σε κινητική ενέργεια. Εδώ έρχονται οι ηλεκτρικοί κινητήρες ηλεκτρικών οχημάτων που προσφέρουν αυτή την δυνατότητα. Οι ηλεκτρικοί κινητήρες που προορίζονται για ηλεκτρικά οχήματα διαφέρουν αρκετά από τους βιομηχανικούς ηλεκτρικούς κινητήρες καθώς δίνεται βάσει σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που ενδιαφέρουν με σκοπό την ορθή και συγκεκριμένη οδήγηση ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Δηλαδή μαζί με τον ηλεκτρικό κινητήρα έρχονται και μία ευρεία ομάδα ηλεκτρονικών ισχύος, και όχι μόνο, που οδηγούν τους αντίστοιχους κινητήρες, αναλόγως με τις ανάγκες και τους σκοπούς που επιδιώκει να πετύχει ο εκάστοτε κατασκευαστής για το ηλεκτρικό αυτοκίνητο που κατασκευάζει. Ο κινητήρας του ηλεκτρικού αυτοκινήτου είναι το κύριο υποσύστημα του συστήματος κίνησης και είναι αναγκαίο να πληρεί κάποιες συγκεκριμένες προδιαγραφές, μεγέθους, βάρους, κόστους, ακουστικού θορύβου (dB), θερμοκρασιακής και μηχανικής αντοχής. Οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται συνήθως σε ηλεκτρικά οχήματα είναι κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC), ασύγχρονοι κινητήρες και κινητήρες μονίμων μαγνητών (permanent magnet electrical machines). Παρακάτω παρουσιάζεται ένα σχηματικό διάγραμμα με τα συστατικά μέρη ενός συστήματος κίνησης ώστε να γίνει κατανοητό σχηματικά πως συνδέεται ο κινητήρας με το υπόλοιπο σύστημα καθώς και οι διαθέσιμες επιλογές που υπάρχουν για τα εκάστοτε υποσυστήματα.



Σχήμα 5.7 Διάγραμμα συστατικών μερών κίνησης

Κάθε κινητήρας ηλεκτρικού οχήματος σχεδιάζεται ανάλογα με τους στόχους που επιθυμεί να πετύχει ο σχεδιαστής του. Για παράδειγμα τα συμβατικά ηλεκτρικά οχήματα χρειάζονται από το σύστημα κίνησης και συνεπώς τον κινητήρα υψηλή ροπή σε μικρές ταχύτητες, ευρεία περιοχή ταχυτήτων λειτουργίας υπό σταθερή ισχύς, υψηλή πυκνότητα ισχύος, υψηλή απόδοση που θα συνδυάζεται με μικρό βάρος και όσο δυνατόν μικρότερο κόστος ώστε το όχημα να είναι εμπορικά ελκυστικό. Ακόμα θα πρέπει να δοθεί έμφαση στην αξιοπιστία και στην διάρκεια ζωής του κινητήρα με την ελάχιστη δυνατή ανάγκη για συντήρηση [56].

Μέχρι πρόσφατα η επιλογή ηλεκτρικών κινητήρων για ηλεκτρικά οχήματα ήταν ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος (DC). Το γεγονός πως ο κινητήρας ήταν γνωστός για αρκετές δεκαετίες σε συνδυασμό με την τον απλό έλεγχο του τον καθιστούσαν μία αξιόπιστη επιλογή παρ' όλο της ανάγκης για τακτική συντήρηση τους λόγω των εξαρτημάτων τριβής που περιέχουν όπως οι ψήκτρες. Όμως, με τις τεχνολογικές εξελίξεις στα ψηφιακά συστήματα οδήγησης, και την ανάγκη για μείωση του κόστους συντήρησης των ηλεκτρικών κινητήρων, περάσαμε από τους κινητήρες DC στους επαγωγικούς κινητήρες. Οι συγκεκριμένοι κινητήρες με τα παρακάτω πλεονεκτήματα ως αιτία κυριαρχούν πλέον ως ηλεκτρικοί κινητήρες ηλεκτρικών οχημάτων :

- Χρειάζονται σημαντικά λιγότερη συντήρηση μίας και δεν έχουν εξαρτήματα που υπόκεινται σε άμεση φθορά όπως οι ψήκτρες στους DC κινητήρες.
- Έχουν μεγαλύτερη απόδοση κατά 10% ή και περισσότερο αναλόγως με τα συστήματα οδήγησης τους και την τεχνολογική κατασκευή τους (για παράδειγμα πλήρους βήματος ή κλασματικού βήματος κτλ)
- Έχουν μεγαλύτερη αντοχή.
- Έχουν τέσσερις φορές μικρότερο κόστος αν και το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό κυμαίνεται αναλόγως τα χαρακτηριστικά που θα ζητηθούν από τον αντίστοιχο επαγωγικό κινητήρα.
- Έχουν μικρότερο βάρος.

Μια ακόμα εναλλακτική επιλογή που έχουν οι κατασκευαστές ηλεκτρικών αυτοκινήτων είναι ο σύγχρονος κινητήρας με μόνιμους μαγνήτες στο δρομέα. Με την αντικατάσταση του τυλίγματος πεδίου από μόνιμους μαγνήτες επιτυγχάνεται μείωση των απωλειών χαλκού ενώ ταυτοχρόνως η έλλειψη ψηκτρών (που έχουν οι DC κινητήρες) αυξάνει την αξιοπιστία. Οι κινητήρες αυτοί είναι σύγχρονοι και τροφοδοτούνται από ημιτονοειδή τάση, έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής με αποτέλεσμα να προσφέρονται για χρήση ως κινητήρες συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης. Ένα ερώτημα που τίθεται προς ερώτηση είναι οι αντοχές των συγκεκριμένων κινητήρων σε απότομες μεταβολές των αξόνων κίνησης των ηλεκτρικών οχημάτων κάτι που θα μπορούσε να αχρηστεύσει τους συγκεκριμένους κινητήρες με αποσυγχρονισμό του μαγνητικού πεδίου, κάτι όμως λίγο δύσκολο σε ένα τυπικό, συμβατικό αυτοκίνητο πόλης.

Το συγκριτικό πλεονέκτημα των σύγχρονων κινητήρων που αναφέρθηκαν παραπάνω σε σχέση με τους επαγωγικούς (όπως για παράδειγμα τον επαγωγικό τύπου κλωβού) είναι ότι οι πρώτοι προσφέρουν μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος και υψηλότερη απόδοση σε σχέση με τους δεύτερους. Εδώ να σημειωθεί πως σε όλους τους ηλεκτρικούς κινητήρες η τάση τροφοδοσίας είναι μικρότερη απ' αυτήν του ηλεκτρικού δικτύου ώστε να μειωθούν σε αποδεκτό αριθμό οι

απαραίτητοι συσσωρευτές. Ακόμα η θεμελιώδης συχνότητα δεν ξεπερνά σημαντικά την τυπική τιμή των 50Hz ούτως ώστε τα μαγνητικά κυκλώματα να μπορούν να κατασκευασθούν από συμβατική μαγνητική λαμαρίνα και να εμφανίζουν αποδεκτές απώλειες σιδήρου.

Υπάρχει η δυνατότητα να αποφευχθεί το συμβατικό κιβώτιο ταχυτήτων με την κατάλληλη επιλογή των πόλων του ηλεκτρικού κινητήρα μέσω του τύπου  $\Sigma\Lambda\Lambda = \frac{120 \cdot f}{P}$ , όπου f η συχνότητα και P τα ζεύγη πόλων του κινητήρα αλλά κάτι τέτοιο, όπως έχει δείξει και η πράξη ενέχει αρκετούς κινδύνους και μπορεί να εφαρμοστεί μόνο στα ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας που δεν έχουν κάποια συμβατική πηγή ενέργειας. Ακόμα και εκεί όμως θα χρειαστεί ένα σύστημα ηλεκτρονικών ισχύος ακριβείας που θα λαμβάνει υπόψη του παραμέτρους όπως την ολίσθηση του κινητήρα, τα ρεύματα και την τάση που υπάρχουν στον κινητήρα κάθε στιγμή καθώς και άλλα στοιχεία. Παρακάτω παρουσιάζεται ένας πίνακας με ένα σύστημα βαθμολόγησης που αξιολογεί έξι χαρακτηριστικά των κινητήρων ανάλογα με την εκάστοτε τεχνολογία, με την κλίματα βαθμολόγησης να εντείνεται από το ένα (1) ως το πέντε (5) [60].

	<b>Κινητήρας DC</b>	<b>Κινητήρας επαγωγής</b>	<b>Κινητήρας μονίμων μαγνητών</b>	<b>Κινητήρας μαγνητικής αντίδρασης</b>	<b>Υβριδικοί κινητήρες μονίμων μαγνητών</b>
Πυκνότητα Ισχύος	2.5	3.5	5	3.5	4
Απόδοση	2.5	3.5	5	3.5	5
Έλεγχος	5	4	4	3	4
Αξιοπιστία	3	5	4	5	4
Τεχνολογική ωριμότητα	5	5	4	4	3
Κόστος	4	5	3	4	3
<b>Σύνολο</b>	<b>22</b>	<b>26</b>	<b>25</b>	<b>23</b>	<b>23</b>

## Πίνακας 5.1 Αξιολόγηση έξι χαρακτηριστικών κινητήρων διαφόρων τεχνολογιών

Εδώ να σημειωθεί πως τοποθετώντας τους μόνιμους μαγνήτες στο εσωτερικό ενός δακτυλίου υστέρησης, δημιουργείται ένας υβριδικός κινητήρας μονίμων μαγνητών και υστέρησης με υψηλή ροπή εκκίνησης και δυνατότητα ομαλής λειτουργίας για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης αλλά περαιτέρω ανάλυση του συγκεκριμένου κινητήρα και γενικότερα των ηλεκτροκινητήρων που χρησιμοποιούνται ως κινητήρια συστήματα σε ηλεκτρικά οχήματα ξεφεύγει από τους σκοπούς αυτής της διπλωματικής.

Συνολικά λοιπόν, οι κινητήρες μονίμων μαγνητών είναι μια λύση, η οποία γίνεται ολοένα και περισσότερο βιώσιμη οικονομολογικά καθώς το κόστος των μονίμων μαγνητών μειώνεται σταδιακά τα τελευταία έτη. Μια σημαντική ανακάλυψη που επέφερε τη μείωση του κόστους των μονίμων μαγνητών είναι αυτή του κράματος Νεοδυμίου – Σιδήρου- Βορίου το 1982, η οποία έδωσε στην αγορά φθηνότερους μαγνήτες ενώ παράλληλα οι μαγνήτες Νεοδυμίου είναι μέχρι σήμερα οι πιο ισχυροί που κυκλοφορούν [62]. Τέλος οι κινητήρες μονίμων μαγνητών μπορούν να εμφανίσουν υψηλή απόδοση λειτουργίας και μεγάλη πυκνότητα ισχύος, προσφέρονται επομένως για χρήση σε όχημα χαμηλών απωλειών εν συγκρίσει με άλλα είδη κινητήρων όπως οι επαγωγής [63] [64] [65].

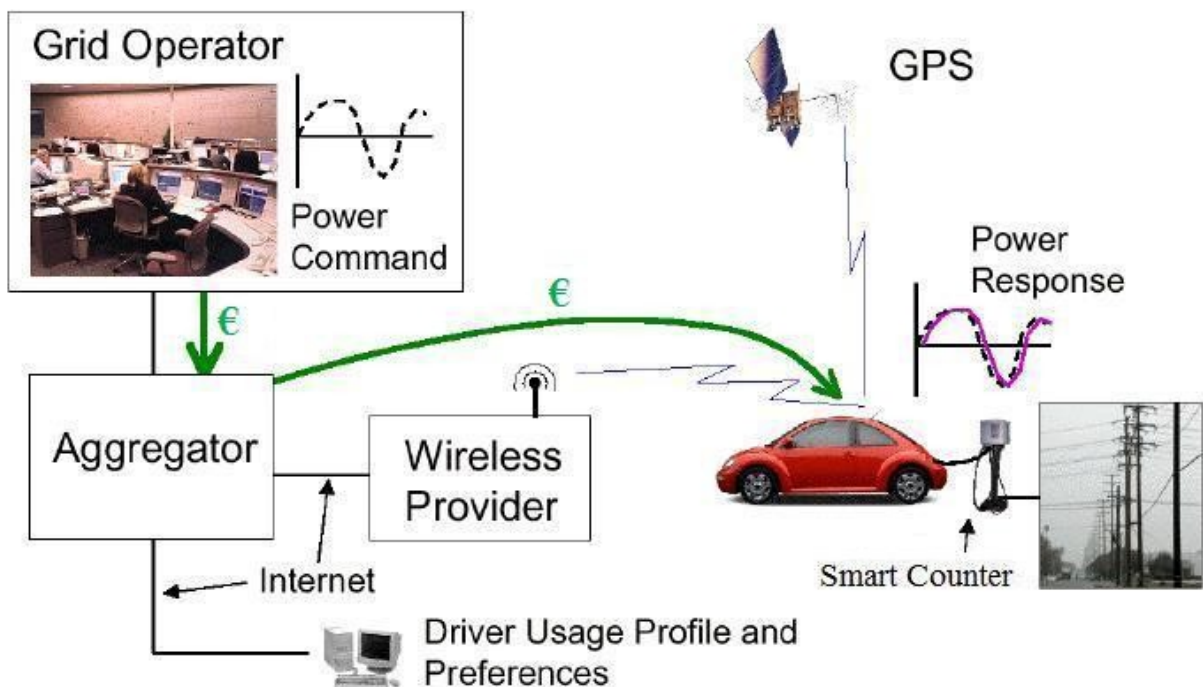
## 5.5 VEHICLE TO GRID CONCEPT (V2G)

### 5.5.1 Ορισμός

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 δικτύου. Εδώ να διευκρινίσουμε πως θα μιλήσουμε κυρίως για ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας, καθώς μόνον αυτά έχουν ικανοποιητική χωρητικότητα μπαταρίας 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 επιτρέπει 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) [42]. Εδώ να σημειώσουμε πως το concept V2G είναι θεωρητικό καθώς δεν έχει βρει εφαρμογή μέχρι στιγμής σε κανένα σημείο του κόσμου.

### 5.5.2 Η εγκατάσταση ενός V2G προγράμματος

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. Ένα σχηματικό διάγραμμα του Aggregator παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.8. 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. Η σχηματική αναπαράσταση μιας τέτοιας εφαρμογής θα μπορούσε να είναι αυτή που δίνεται στο σχήμα 5.8.



Σχήμα 5.8 Σχηματική Διασύνδεση V2G Concept με Aggregator

Στην συνέχεια μία ομαδοποίηση των χαρακτηριστικών των επιμέρους προφίλ των χρηστών αυτού του προγράμματος είναι απαραίτητη να γίνει από τον Aggregator έχοντας κάποια στοιχεία διαθέσιμα όπως :

- ✓ Ικανότητα διαθέσιμης ισχύος ανά κάθε συγκεκριμένη και διακριτή στιγμή
- ✓ Βεβαιότητα αυτής της διαθεσιμότητας ισχύος βάσει των προφίλ των χρηστών
- ✓ Ετοιμότητα έτσι ώστε ανά πάσα στιγμή εφόσον ζητηθεί το πρόγραμμα να είναι έτοιμο να προσφέρει αυτή την ισχύ ενεργοποιώντας όλους τους μετρητές και τους μηχανισμούς επίβλεψης
- ✓ Και τέλος να είναι σε θέση να προσδιορίσει τις θέσεις των συνδεδεμένων χρηστών και τις αντίστοιχες χρονικές στιγμές που κάθε θέση μπορεί να προσφέρει ισχύς και πόση.

Οι Aggregators θα υπογράψουν συμβάσεις με τον TSO για παροχή υπηρεσιών και κατά συνέπεια όταν τα EVs ενεργοποιούνται, ο TSO επικοινωνεί με τον Aggregator μέσω του ίδιου είδους ασφαλούς σύνδεσης δεδομένων που χρησιμοποιείται για την επικοινωνία με τους σταθμούς ηλεκτρικής ενέργειας. Ο Aggregator διαβιβάζει τα αιτήματα από το TSO σε κατάλληλο αριθμό των οχημάτων που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο. Η οικονομική συναλλαγή που αφορά την 'αγορά ηλεκτρικής ενέργειας για τη φόρτιση της μπαταρίας διεξάγεται μέσω κανονικής παροχής ρεύματος προς το αυτοκίνητο μέσω ρευματοδότη, ενώ η συναλλαγή που αφορά τους κανονισμούς πώλησης είναι χωριστός χειρισμός από τον Aggregator αναλόγως με τις συμφωνίες που έχουν δημιουργηθεί. Η δημιουργία ελκυστικών τιμολογιακών πολιτικών και η εξέταση ιδιάζουσων προσφορών προς τους χρήστες ηλεκτρικών αυτοκινήτων που θα θελήσουν να συμμετέχουν στον V2G πρόγραμμα είναι ένας τομέας προς μελέτη. Σκοπός αυτών των μελετών είναι η συνάθροιση αρκετών χρηστών έτσι ώστε να είναι διαθέσιμη μία ικανοποιητική ισχύς καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας. Αυτό όμως προϋποθέτει πως τα ηλεκτρικά οχήματα θα αυξηθούν και θα γίνουν μέρος της καθημερινότητας της πλειοψηφίας των οδηγών αυτοκινήτων κάτι αρκετά αισιόδοξο για τα επόμενα 5-10 χρόνια.

Στην συνέχεια καλό θα ήταν να σημειωθεί πως για την σύνδεση του οχήματος στο δίκτυο είναι απαραίτητη η παρουσία συγκεκριμένου εξοπλισμού, ο οποίος εξοπλισμός συνίσταται στην προσθήκη κυκλωμάτων για το συγχρονισμό με το δίκτυο, για ελέγχους και για την προστασία από την ενεργοποίηση μιας νεκρής γραμμής, καθώς και μετρητές για τις αρμονικές που θα δημιουργούν τα ηλεκτρονικά ισχύος του οχήματος (και πιθανόν τα όποια ηλεκτρονικά ισχύος υπάρξουν κατά την διασύνδεση). Το κόστος για την δυνατότητα V2G ανέρχεται στα περίπου 400€ - 500€ ανα όχημα με την προοπτική όμως πως αυτό το ποσό θα κυμανθεί ανάλογα με το σημείο σύνδεσης του οχήματος καθώς και πιθανό εξοπλισμό που θα ελέγχει την ποιότητα ισχύος που θα παρέχουν τα ηλεκτρικά οχήματα.



Σχήμα 5.9 Σχηματική απεικόνιση ενός έξυπνου μετρητή για V2G concept

### 5.5.3 Φόρτιση και εκφόρτιση

Αναφορικά με την φόρτιση και την εκφόρτιση και τους χρόνους που αφορούν αυτές τις διαδικασίες έχουμε πως ανάλογα με τον τρόπο φόρτισης έχουμε και αντίστοιχους χρόνους. Δηλαδή αναλόγως με την τάση και τον ρευματοδότη έχουμε μία εκτίμηση του πόση ώρα θα διαρκέσει μία φόρτιση της μπαταρίας του ηλεκτρικού οχήματος γνωρίζοντας την χωρητικότητα της. Ότι αφορά για την φόρτιση θα μπορούσε υπό προϋποθέσεις να ισχύσει και για την εκφόρτιση. Προϋποθέσεις όπως ότι το δίκτυο μπορεί να δεχθεί μία αντίστοιχη έγχυση ισχύος στο συγκεκριμένο σημείο χωρίς μεγάλες διακυμάνσεις στις τάσεις για παράδειγμα ή σε άλλα ζωτικά χαρακτηριστικά του δικτύου. Επομένως μία τυπική τιμή για ένα δημόσιο σταθμό φόρτισης θα ήταν  $208V \cdot 16A = 3.3 \text{ kW}$ , ενώ για τάση  $240V$  η ισχύς αυτή γίνεται  $3.8 \text{ kW}$ . Για χρήσεις των οχημάτων που απαιτούν μεγαλύτερη ισχύ όπως είναι για παράδειγμα οι υπηρεσίες ρύθμισης, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί τριφασικός σταθμός φόρτισης που θα έδινε ισχύ  $80A \cdot 208V = 16.6 \text{ kW}$  ή  $80A \cdot 240V = 19.2 \text{ kW}$ . Επίσης, είναι δυνατή και η σύνδεση με παροχή DC ρεύματος όπου η φόρτιση μπορεί να φτάσει και τα  $35 \text{ kW}$  [42].

Όλες οι παραπάνω τιμές είναι ενδεικτικές και σε καμία περίπτωση δεν αντιπροσωπεύουν τιμές οι οποίες έχουν μετρηθεί στην πράξη έστω και για φόρτιση. Ενδέχεται να διαφέρουν επηρεαζόμενες από τυχόν διακυμάνσεις του δικτύου ή από περιορισμούς που ενδέχεται να επιβάλλουν οι μπαταρίες κατά την φόρτιση/εκφόρτιση τους. Παρακάτω παρουσιάζεται ένας πίνακας με τους τρόπους φόρτισης και τους αντίστοιχους χρόνους [48].



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

Πίνακας 5.2 Είδη φόρτισης και αντίστοιχοι χρόνοι φόρτισης

Αναλόγως του τύπου του ηλεκτρικού οχήματος μπορεί να γίνει και μία θεώρηση του ποιος τύπος θα είναι προτιμότερος για φόρτιση από ποιο είδος αλλά κάτι τέτοιο ξεφεύγει από τους σκοπούς αυτής της διπλωματικής ενώ περισσότερες πληροφορίες μπορούν να αντληθούν από το [48].

Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας ο οποίος δείχνει χρόνους φόρτισης (αναλόγως την τροφοδοσία) για μία συστοιχία μπαταριών ηλεκτρικού οχήματος χωρητικότητας 3,3kW [55].

Χρόνος Φόρτισης	Τροφοδοσία - Ισχύς	Τάση	Μέγιστο ρεύμα
6-8 hours	μονοφασική - 3,3kW	230 VAC	16 A
2-3 hours	τριφασική - 10kW	400 VAC	16 A
3-4 hours	μονοφασική - 7kW	230 VAC	32 A
1-2 hours	τριφασική - 24kW	400 VAC	32 A
20-30 minutes	τριφασική - 43kW	400 VAC	63 A
20-30 minutes	συνεχής - 50kW	400 - 500 VDC	100 - 125 A

Πίνακας 5.3 Χρόνοι φόρτισης συστοιχίας μπαταριών ηλεκτρικού οχήματος χωρητικότητας 3,3kW

#### 5.5.4 Επιτρεπόμενη ανταλλαγή ισχύος και περιορισμοί

Η ισχύς που θα ανταλλάσσεται με το δίκτυο έχει ορισμένους περιορισμούς αναλόγως και με το σημείο σύνδεσης. Γενικά οι περιορισμοί που υπάρχουν είναι οι παρακάτω :

1. Πρωτίστως η αποθηκευμένη ενέργεια που μπορεί να παρέχει το όχημα βάσει της κατάστασης της μπαταρίας του αλλά και τις επιθυμίας του κατόχου για συγκεκριμένη κατάσταση της μπαταρίας μετά την ανταλλαγή ισχύος

2. Το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να μεταφερθεί μέσω των καλωδίων και των υπόλοιπων κυκλωμάτων που συνδέουν το όχημα με το δίκτυο αναλόγως με τον εξοπλισμό της διασύνδεσης
3. Τα όρια ισχύος που μπορούν να διαχειριστούν τα ηλεκτρονικά ισχύος του ηλεκτρικού οχήματος
4. Πιθανοί περιορισμοί ποιότητας ισχύος, περίπτωση όμως που είναι και αυτή αλληλένδετη με τα ηλεκτρονικά ισχύος καθώς και τον εξοπλισμό της διασύνδεσης

Όποιος από τους παραπάνω περιορισμούς έχει την μικρότερη επιτρεπόμενη τιμή ανταλλαγής ισχύος είναι και αυτός που ορίζει το ποσό της ανταλλαγής ισχύος. Γίνεται δηλαδή μία συναλήθευση των μεγεθών και η ανταλλαγή ισχύος καθορίζεται βάσει του κάτω ορίου του διαστήματος που προκύπτει από την συναλήθευση.

Όσο αναφορά τους περιορισμούς που αφορούν τα ηλεκτρονικά ισχύος δεν μπορούμε να κάνουμε περαιτέρω ανάλυση. Αυτό διότι σε μία υποθετική εγκατάσταση υπάρχουν πολλά μεγέθη τα οποία είναι απροσδιόριστα αναλόγως με τις επιλογές που θα χρειαστεί να γίνουν και αναλόγως τον εξοπλισμό του οχήματος.

Όσο αναφορά τον περιορισμό λόγω της πρότερης κατάστασης της μπαταρίας υπάρχει ένας προσεγγιστικός τύπος ο οποίος μπορεί να μας δώσει την ισχύ που μπορεί να αποδώσει το ηλεκτρικό όχημα στο δίκτυο. Παρ' όλα αυτά η ισχύς ενδέχεται να έχει σημαντικές αποκλίσεις αναλόγως με τον τύπο της μπαταρίας και την αντίστοιχη διαχείριση που δέχεται από τα ηλεκτρονικά κυκλώματα οδήγησης. Ο τύπος παρουσιάζεται παρακάτω :

$$P_{vehicle} = \frac{(E_s - \frac{d_d + d_{rb}}{n_{veh}})n_{inv}}{t_{disp}}$$

- ✓  $P_{vehicle}$  : η ισχύς που μπορεί να δοθεί
- ✓  $E_s$  : η αποθηκευμένη ενέργεια στο όχημα σε kWh
- ✓  $d_d$  : είναι η απόσταση που έχει διανυθεί σε km από τη στιγμή που η μπαταρία του οχήματος ήταν γεμάτη
- ✓  $d_{rb}$  : η ελάχιστη απόσταση σε miles που απαιτείται από τον οδηγό για την κάλυψη των αναγκών του
- ✓  $n_{veh}$  : είναι η απόδοση του οχήματος σε miles/kWh
- ✓  $n_{inv}$  : είναι η απόδοση του αντιστροφέα DC σε AC κατά τη μετατροπή του ηλεκτρικού ρεύματος
- ✓  $t_{disp}$  : είναι ο χρόνος που η αποθηκευμένη ενέργεια του οχήματος μεταφέρεται στο δίκτυο σε ώρες

Όσο αναφορά τον περιορισμό λόγω της γραμμής σύνδεσης και του ρεύματος που μπορεί να διαχειριστεί από τον γνωστό τύπο  $P_{line} = V \cdot I$ , όπου V η τάση ενώ I το ρεύμα της γραμμής, είναι εφικτός ο υπολογισμός της μέγιστης δυνατής μεταφερόμενης ισχύος ώστε να μην υπάρξει υπερένταση στην γραμμή.

## 5.6 ΠΑΡΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΑΓΟΡΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

### 5.6.1 Εισαγωγή

Στην σημερινή εποχή η ηλεκτροκίνηση έχει κάνει σημαντικά βήματα προόδου εξελίσσοντας ορισμένα εμπορικά οχήματα με πρωτότυπες καινοτομίες όμως από την μαζική παραγωγή ηλεκτρικών οχημάτων και την διασύνδεση τους στο δίκτυο μέσω του προγράμματος V2G απέχουμε αρκετά ακόμα. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω της έλλειψης σημαντικού αριθμού οχημάτων αλλά και της έλλειψης κατάλληλης υποδομής από το δίκτυο ώστε με τοποθέτηση έξυπνων μετρητών και Aggregator να μπορεί να επιβλέπει την κατάσταση στις θέσεις σύνδεσης ηλεκτρικών οχημάτων. Τέλος ένα ακόμα πρόβλημα είναι οι μπαταρίες και το γεγονός πως οι περιορισμένοι κύκλοι λειτουργίας των μπαταριών περιορίζουν τον χρήστη να πάρει την απόφαση για προσφορά ισχύος στο δίκτυο με τον φόβο της γρήγορης φθοράς της μπαταρίας και της ανάγκης για αντικατάσταση. Το κόστος αντικατάστασης των μπαταριών σε ένα ηλεκτρικό όχημα είναι διόλου αμελητέο την σημερινή εποχή και κυμαίνεται από 8000€ (για τον Nissan Leaf για παράδειγμα) έως και 10000€ αναλόγως τον τύπο των μπαταριών και την τεχνολογία τους, όπως επίσης και τον αριθμό των συστοιχιών τους.

Σε κάθε περίπτωση όμως ως συνέχεια των μελετών πάνω στο V2G concept παρουσιάζονται εδώ κάποιες αγορές ηλεκτρικής ενέργειας που θα μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν την ισχύ από τα ηλεκτρικά οχήματα ενώ στην συνέχεια γίνεται και μία παρουσίαση ορισμένων σύγχρονων ηλεκτρικών οχημάτων μπαταρίας και υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων.

### 5.6.2 Αγορές ηλεκτρικής ισχύος

Η ισχύς βασικού φορτίου (baseload power), η ισχύς αιχμής (peak power), και οι επικουρικές υπηρεσίες (ancillary services) που διακρίνονται στην στρεφόμενη εφεδρεία (spinning reserves), και τη ρύθμιση (regulation), (ή αλλιώς ρύθμιση συχνότητας) είναι οι αγορές στις οποίες η ισχύς των ηλεκτρικών οχημάτων θα μπορούσε να αξιοποιηθεί σε κάθε μία περίπτωση με ξεχωριστό έλεγχο. Μία ακόμα αγορά που είναι υπό έρευνα και εξέλιξη θα μπορούσε να ήταν η αποθήκευση ισχύος από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ώστε να είναι διαθέσιμη όποτε το δίκτυο την χρειαστεί. Όλες οι παραπάνω αγορές διαφέρουν ως προς τον χρόνο απόκρισης, την κοστολόγηση της ισχύος αναλόγως την αγορά, καθώς και την τιμή όντας ορισμένες πιο ακριβές από κάποιες άλλες όπως θα δούμε παρακάτω.

➤ Ισχύς Βασικού Φορτίου (baseload power) :

Είναι η απαραίτητη ισχύς για την τροφοδοσία των καταναλωτών και παρέχεται προς τους καταναλωτές όλο το εικοσιτετράωρο με συμβόλαια μακροχρόνιας διάρκειας και τιμές οι οποίες καθορίζονται ανά kW. Έχει αποδειχθεί πως αυτή η ισχύς δεν είναι οικονομικά συμφέρουσα να προέρχεται μέσω του προγράμματος V2G αλλά από μεγάλες ηλεκτροπαραγωγές μονάδες άνθρακα, πυρηνικές, βιομάζας κ. ά. Αυτό διότι η περιορισμένη αποθήκευση ενέργειας σε συνδυασμό με τον μικρό χρόνο ζωής των μπαταριών και το υψηλό κόστος ενέργειας ανά kWh προσφέρει μία διόλου ανταγωνιστική τιμή την στιγμή που οι μεγάλες ηλεκτροπαραγωγές μονάδες παρέχουν πολύ χαμηλότερο κόστος ενέργειας ανά kWh.

➤ Ισχύς αιχμής (peak power) :

Είναι η ισχύς που παράγεται ή αγοράζεται σε στιγμές της ημέρας όπου αναμένονται υψηλά επίπεδα κατανάλωσης ισχύος μέσω της πρόβλεψης φορτίου όπως για παράδειγμα σε ζεστά

μεσημέρια καλοκαιριού. Εφόσον η ισχύς αυτή χρειάζεται μόνο λίγες εκατοντάδες ώρες το χρόνο, είναι συμφέρον από οικονομικής απόψεως να χρησιμοποιηθούν μονάδες με χαμηλό κόστος κεφαλαίου ακόμα και αν η κάθε kWh που παράγεται είναι πιο ακριβή. Κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις το πρόγραμμα V2G θα μπορούσε να είναι συμφέρον για την συγκεκριμένη αγορά.

➤ Επικουρικές υπηρεσίες (ancillary services) :

Σκοπός των επικουρικών υπηρεσιών δεν είναι η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των καταναλωτών εν αντιθέσει με τις δύο προηγούμενες αγορές αλλά ή διατήρηση της αξιοπιστίας και της ευστάθειας του συστήματος. Αποτελούν ηλεκτρική ισχύ που βρίσκεται σε αναμονή, έτοιμη να προσφερθεί στο σύστημα όταν αυτό τη χρειάζεται όπως για παράδειγμα σε περιπτώσεις ρύθμισης της τάσης ή της συχνότητας εάν αυτό είναι απαραίτητο. Η παραγωγή και η κατανάλωση ενέργειας δεν είναι πάντα σε πλήρη ισορροπία με αποτέλεσμα οι επικουρικές υπηρεσίες να είναι απαραίτητες για την διατήρηση των χαρακτηριστικών του δικτύου βάσει των οποίων λειτουργούν όλοι οι καταναλωτές (Ελληνικό Σύστημα  $f=50\text{Hz}$  με τάση στην χαμηλή τάση 380V). Έτσι οι επικουρικές υπηρεσίες χρησιμοποιούνται για να εξισορροπήσουν την παραγωγή και τη ζήτηση ενέργειας, και να εξασφαλίσουν τη ρύθμιση και την ποιότητα ισχύος. Οι επικουρικές υπηρεσίες ευθύνονται για το 5-10% του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας με το 80% αυτού να οφείλεται στη ρύθμιση. Οι επικουρικές υπηρεσίες συνεπώς χωρίζονται στην στρεφόμενη εφεδρεία (spinning reserves), και τη ρύθμιση (regulation).

- Στρεφόμενη Εφεδρεία: Στρεφόμενη Εφεδρεία ονομάζουμε την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που είναι σε λειτουργία αλλά δεν τροφοδοτεί κάποιο φορτίο, όντας σε αναμονή έτοιμη να προσφέρει ισχύς όποτε το ζητήσει ο διαχειριστής του δικτύου. Ο χρόνος απόκρισης κυμαίνεται ανάλογα με την μονάδα και συνήθως είναι στα 10 λεπτά περίπου. Οι γεννήτριες που παρέχουν στρεφόμενη εφεδρεία στρέφονται με ταχύτητα χαμηλότερη της ονομαστικής τους κι έτσι είναι ήδη συγχρονισμένες στο δίκτυο. Η στρεφόμενη εφεδρεία πληρώνεται με βάση το χρόνο που είναι διαθέσιμη για χρήση. Για παράδειγμα, μια γεννήτρια 1MW που κρατείται σε εφεδρεία για ένα 24ωρο πωλείται ως 1MW-day, παρότι καθόλου ενέργεια δεν παράχθηκε στην πραγματικότητα [42]. Ένα επιπλέον κόστος πληρώνεται στην περίπτωση που όντως χρησιμοποιηθεί αυτή η ενέργεια. Οι παραπάνω διακανονισμοί είναι κατάλληλοι και αρκετά θετικοί για τα ηλεκτρικά οχήματα καθώς τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να πληρώνονται ως στρεφόμενη εφεδρεία για πολλές ώρες, απλά με το να παραμένουν συνδεδεμένα στο δίκτυο, ενώ στην ουσία είναι πολύ περιορισμένο το διάστημα κατά το οποίο παράγουν ενέργεια. Αυτό σημαίνει πως πληρώνονται απλά για να είναι έτοιμα να προσφέρουν ενέργεια όποτε αυτό χρειαστεί κάτι το οποίο σε σωστά διαμορφωμένα δίκτυα δεν είναι συχνό φαινόμενο. Έτσι υπάρχει και ακόμα ένας ελκυστικός παράγοντας για τους ιδιοκτήτες των ηλεκτρικών οχημάτων, καθώς η φθορά της μπαταρίας των EVs είναι περιορισμένη λόγω της σπάνιας χρήσης αυτής της υπηρεσίας. Τα συμβόλαια σχετικά με τη στρεφόμενη εφεδρεία περιορίζουν τον αριθμό των κλήσεων σε 20 το χρόνο και τη διάρκειά τους σε 1 ώρα ανα κλήση το μέγιστο.

- Ρύθμιση ή αλλιώς Ρύθμιση Συχνότητας: Η ρύθμιση ή αλλιώς ρύθμιση συχνότητας χρησιμοποιείται για να διατηρεί στα σωστά επίπεδα τη συχνότητα (για την Ελλάδα και

την Ευρώπη είναι 50Hz) και την τάση του δικτύου (1p.u. ιδανικά σε κάθε σημείο του δικτύου) ισοσταθμίζοντας την παραγωγή ενέργειας με τη ζήτηση. Η ρύθμιση πρέπει να είναι υπό τον άμεσο έλεγχο σε πραγματικό χρόνο του διαχειριστή του δικτύου, με τη εκάστοτε μονάδα παραγωγής που λειτουργεί ως μονάδα ρύθμισης να είναι ικανή να δέχεται τα σήματα από τον υπολογιστή του διαχειριστή και να απαντά μέσα σε ένα λεπτό ή λιγότερο αυξάνοντας ή μειώνοντας την έξοδό της. Στην πραγματικότητα η απόκριση είναι της τάξεως των δευτερολέπτων. Η ρύθμιση αυτή χωρίζεται στους μεγάλους σταθμούς παραγωγής χωρίζεται στην 1ουσα ρύθμιση και στην 2ουσα ρύθμιση όπου η πρωτεύουσα αποκρίνεται σε χρόνο ορισμένων msec ως μερικών sec ενώ η δευτερεύουσα σε χρόνο ορισμένων λεπτών. Η πρωτεύουσα στην ουσία είναι η στρεφόμενη ενέργεια (υπό την μορφή ροπής) των αξόνων των μεγάλων ηλεκτροπαραγωγών μονάδων. Δηλαδή στρεφόμενη ενέργεια αντλείται από την κινητική ενέργεια των αξόνων των στροβίλων και μετατρέπεται μέσα σε δευτερόλεπτα σε ηλεκτρική προκαλώντας την επιβράδυνση της ηλεκτρικής γεννήτριας. Η δευτερεύουσα ρύθμιση είναι η σκόπιμη αύξηση της παραγωγής των ηλεκτροπαραγωγών μονάδων με σκοπό την κάλυψη του παραπάνω ζητούμενου φορτίου και την εξισορρόπηση της τάσης και της συχνότητας. Ο τύπος που περιγράφει την ισορροπία ζήτησης-παραγωγής και πως αυτή συσχετίζεται με την μεταβολή της συχνότητας είναι ο ακόλουθος :

$$\Delta P_m - \Delta P_e = \frac{1}{2H} \frac{d(\Delta\omega)}{dt}, \text{ όπου } H \text{ η αδράνεια της μάζας των αξόνων των στροβίλων των}$$

ηλεκτροπαραγωγών μονάδων,  $\Delta P_e$  η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος και  $\Delta P_m$  η ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος ενώ  $\Delta\omega$  είναι η μεταβολή στην γωνιακή ταχύτητα (και συνεπώς στην συχνότητα  $f$  μέσω του τύπου  $\omega(\text{rad} / \text{sec}) = 2 \cdot \pi \cdot f$ ).

Μερικές αγορές χωρίζουν τη ρύθμιση σε δυο επιμέρους στοιχεία: το ένα σχετίζεται με τη δυνατότητα αύξησης της παραγωγής ενέργειας από ένα επίπεδο βάσης και το άλλο με τη μείωση από ένα επίπεδο βάσης. Συχνά, αναφέρονται ως πάνω ρύθμιση και κάτω ρύθμιση αντίστοιχα. Για παράδειγμα, αν το φορτίο ξεπερνάει την παραγωγή η τάση και η συχνότητα πέφτουν, επομένως χρειάζεται πάνω ρύθμιση όπως αποδεικνύεται και από τον τύπο που δείξαμε παραπάνω. Η ρύθμιση ελέγχεται αυτόματα μέσω μιας άμεσης σύνδεσης από το διαχειριστή του δικτύου, καθώς ο διαχειριστής του δικτύου έχει την δυνατότητα να παρέμβει σε οποιοδήποτε ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος του δικτύου, παρεμβαίνοντας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που αυτό παράγει οποιαδήποτε στιγμή. Σε σύγκριση με τη στρεφόμενη εφεδρεία καλείται πολύ πιο συχνά (για παράδειγμα 400 φορές την ημέρα ή και περισσότερο), απαιτεί ταχύτερη απόκριση (λιγότερο από 1 λεπτό) και έχει μικρότερη διάρκεια (μερικά λεπτά τη φορά). Τα ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας φαίνονται να είναι κατάλληλα για τη συγκεκριμένη αγορά, καθώς μπορούν να ανταποκριθούν πολύ γρήγορα σε σήματα ρύθμισης, μπορούν να πραγματοποιήσουν τόσο πάνω ρύθμιση (V2G), όσο και κάτω ρύθμιση (φόρτιση μπαταριών) και τέλος ένας συνδυασμός πάνω και κάτω ρύθμισης προκαλεί πολύ μικρή εκφόρτιση της μπαταρίας χωρίς να προκαλεί προβλήματα φθοράς αναφορικά με τους κύκλους λειτουργίας της μπαταρίας.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας πίνακας στον οποίο φαίνεται αναλυτικά ποιοι τύποι ηλεκτρικών οχημάτων μπορούν να προσφέρουν ικανοποιητικές υπηρεσίες και σε ποιές αγορές. Με “tick” ( “√” ) συμβολίζεται πως στην συγκεκριμένη αγορά το συγκεκριμένο όχημα μπορεί να προσφέρει ικανοποιητικές υπηρεσίες ενώ με x όχι. Όπου υπάρχει ερωτηματικό η απάντηση είναι είτε προς εξέταση/μελέτη είτε δεν είναι εφικτό να απαντηθεί προς το παρόν όντας αβέβαιες οι υπηρεσίες των συγκεκριμένων τύπων οχημάτων στην συγκεκριμένη αγορά.

EDV Type	Interconnection	Potential electricity markets			
		Base-load	Peak	Spinning reserves	Regulation up/down
Battery	Two-way electrical (low cost logic modification to conductive charger)	×	√	√	√
Hybrid using storage	Two-way electrical	×	?	?	√
Hybrid using motor-generator	Electric from vehicle to grid; possible natural gas to vehicle	×	?	?	?
Fuel cell	Electric from vehicle; natural gas/H <sub>2</sub> to vehicle	×	√	√	√

Σχήμα 5.10 Τύποι ηλεκτρικών οχημάτων, διασύνδεση και αγορές ηλεκτρικής ενέργειας

### 5.6.3 Παρούσα ζατάσταση και εμπορικά EVs που κυκλοφορούν σήμερα

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα γίνει μία μικρή αναφορά στα ηλεκτρικά οχήματα που κυκλοφορούν και είναι εμπορικά σήμερα. Έτσι θα αναφερθούμε στο Tesla Roadster το οποίο είναι ένα ηλεκτρικό όχημα μπαταρίας με sport χαρακτηριστικά και το Toyota Prius ένα υβριδικό όχημα το οποίο θεωρείται πρωτοπόρο στην εμπορευματοποίηση των ηλεκτρικών οχημάτων και το πρώτο ηλεκτρικό όχημα που ξεκίνησε να διανέμεται παγκοσμίως.

#### To Tesla Roadster :

Το Tesla Roadster είναι το πρώτο ηλεκτρικό αυτοκίνητο μπαταριών (BEV- Battery Electric Vehicle) αυτοκινητοδρόμων (highway-capable) που έγινε διαθέσιμο στις Η.Π.Α. το 2008. Από το 2008 η Tesla Motors, που το κατασκευάζει, έχει πουλήσει 1.650 οχήματα σε 30 χώρες παγκοσμίως ως τον Μάρτιο του 2011. Είναι το πρώτο ηλεκτρικό αυτοκίνητο με αυτονομία πάνω από 320km ανα φόρτιση ενώ το παγκόσμιο ρεκόρ αυτονομίας για ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο παραγωγής, με μία φόρτιση είναι 501km και επιτεύχθηκε από το Tesla Roadster στις 27 Οκτωβρίου, 2009 στην Αυστραλία με μέση ταχύτητα 40km/h. Έμφαση έχει δοθεί στα sport χαρακτηριστικά και έτσι μπορεί να επιταχύνει από στάση στα 100km/h σε μόλις 3,9sec επίδοση που ελάχιστα αυτοκίνητα στον κόσμο μπορούν να καταφέρουν και μόνο με δυνατούς κινητήρες αρκετών κυλίνδρων. Το σασί είναι κατασκευασμένο από ανθρακονήματα έτσι ώστε να είναι ελαφρύ αλλά και ταυτόχρονα άκαμπτο ενώ κατασκευάζεται από την βρετανική εταιρεία Lotus για λογαριασμό της Tesla Motors.

Ο ηλεκτρικός κινητήρας είναι ένας τριφασικός, επαγωγής, τετραπολικός, ισχύος 185 kW ή 215 kW. Ο δεύτερος είναι ειδική έκδοση με χειροποίητο δρομέα στον ηλεκτρικό κινητήρα και μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος. Το κιβώτιο ταχυτήτων που χρησιμοποιείται είναι μίας ταχύτητας (fixed gear gearbox) [25].



Σχήμα 5.11 Ένα Tesla Roadster φορτίζει με παροχή 70A, 240V



Σχήμα 5.12 Οι συστοιχίες μπαταριών του Tesla Roadster στο πίσω μέρος του οχήματος

Αναφορικά με τις μπαταρίες το ESS (Energy Storage System) αποτελείται από 6,831 μπαταρίες ιόντων λιθίου ταξινομημένες σε 11 παράλληλες σειρές με την κάθε σειρά να αποτελείται από 9 “bricks”. Κάθε “brick” αποτελείται από 69 μπαταρίες οι οποίες συνδέονται παράλληλα. Οι μπαταρίες είναι παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται στους φορητούς υπολογιστές λάπτοπ. Μία πλήρης φόρτιση διαρκεί 3,5 ώρες με παροχή 70A στα 240V ενώ ο χρόνος ζωής εκτιμάται στα 7 χρόνια ή στα 160.000km [25] [57].



Σχήμα 5.13 Το Tesla Roadster

### Το Toyota Prius :

Το Toyota Prius θεωρείται ως το πρωτοπόρο ηλεκτρικό όχημα που παρουσιάστηκε στην αγορά ως το πρώτο ηλεκτρικό όχημα μαζικής παραγωγής. Το πρώτο Prius πωλήθηκε στην Ιαπωνία το 1997 ενώ στην παγκόσμια αγορά εισήχθη το 2001. Τον Μάιο του 2008 οι πωλήσεις του έφτασαν το 1 εκατομμύριο παγκοσμίως, ενώ τον Σεπτέμβριο του 2010 τα 2 εκατομμύρια δείχνοντας έτσι την τάση της αγοράς για αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικών οχημάτων.

Η τρίτη γενιά του Prius που κυκλοφορεί αυτή την στιγμή στην αγορά παρουσιάστηκε το 2009 και είναι ένα υβριδικό όχημα που συνδυάζει συμβατικό κινητήρα εσωτερικής καύσης χωρητικότητας 1.800cc, ο οποίος παράγει 98 ίππους (98hp) ενώ έχει και έναν ηλεκτρικό κινητήρα (μόνιμων μαγνητών καθώς ο κατασκευαστής αναφέρει χρήση ενός κιλού νεοδυμίου στον κινητήρα) απόδοσης 134hp (100kW). Υπάρχει και η δυνατότητα το όχημα κατόπιν παραγγελίας να είναι πλήρως ηλεκτρικό και να απουσιάζει ο κινητήρας εσωτερικής καύσης. Οι μπαταρίες του οχήματος είναι 38 απομονωμένες συστοιχίες nickel metal hydride (NiMH) προσφέροντας στον ηλεκτρικό κινητήρα 273,6V και 6,5Ah με βάρος 53,5 κιλά. Συνήθως φορτίζονται από 40%-60% με σκοπό να προστατευτεί και να επιμηκυνθεί ο χρόνος ζωής τους αλλά και να υπάρχει διαθέσιμη χωρητικότητα για φόρτιση από την αναγεννητική πέδηση.

Τέλος το Prius είναι γνωστό για την αεροδυναμική του σχεδίαση που μειώνει τις απώλειες λόγω αντίστασης του αέρα καθώς και για την εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση συμβατικού καυσίμου (βενζίνης) η οποία αγγίζει τα 3,7L / 100km λόγω του υβριδικού χαρακτήρα και της εκτενής χρησιμοποίησης του ηλεκτρικού κινητήρα. Παρακάτω στην εικόνα 5.6.5 παρουσιάζεται μία συστοιχία μπαταριών από το Prius [58].



Σχήμα 5.14 Μία συστοιχία μπαταριών από το Toyota Prius



Σχήμα 5.15 : Το Toyota Prius  
(Τρίτης Γενιάς)



Εδώ παρατίθεται ένας πίνακας με συγκεντρωμένα τα χαρακτηριστικά των δύο παραπάνω αυτοκινήτων που παρουσιάστηκαν.

Όχημα	Tesla Roadster	Prius (3rd Generation)
Κινητήρας	3-Φ, Τετραπολικός	Μόνιμων Μαγνητών
Ισχύς	248 hp (185 kW)/ 288 hp (215 kW)	134 hp (100kW)
Μέγιστη Ροπή	200ft-lbf (270 N·m)	207 N·m
Στροφές	14,000 rpm	Περιορισμένες λόγω του συμβατικού κινητήρα
Βάρος Κινητήρας	70 pounds (32 kg)	?
0-100km/h	3,9sec /3,7sec	10,9sec
Πλήρης Φόρτιση	3,5h (70A,240V) (Tesla Charger)	Κυμαίνεται
Κόστος Οχήματος	84.000€ - 99.000€	36.500\$
Κόστος Μπαταριών	36.000\$	2.200\$-2.600\$
Χρόνος Ζωής Μπαταριών	7 years/ 160,000 km	over 200.000 miles

Τέλος να αναφέρουμε πως και οι κυβερνήσεις των χωρών προωθούν την ηλεκτροκίνηση μέσω επιδοτήσεων, φοροαπαλλαγών, αλλά και δημιουργώντας φορητούς σταθμούς φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων αλλά και όλες τις απαραίτητες υποδομές έτσι ώστε να στηριχθεί η αγορά ηλεκτρικών οχημάτων. Στο Σχήμα 5.16 φαίνεται το ευρωπαϊκό σήμα που επιλέχθηκε ώστε να υποδεικνύει στους οδηγούς τα διαθέσιμα σημεία φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων [55].



Σχήμα 5.16 Ευρωπαϊκό σήμα σημείων φόρτισης

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>

### ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ, ΕΞΥΠΝΑ ΔΙΚΤΥΑ

#### 6.1 ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ

##### 6.1.1 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.

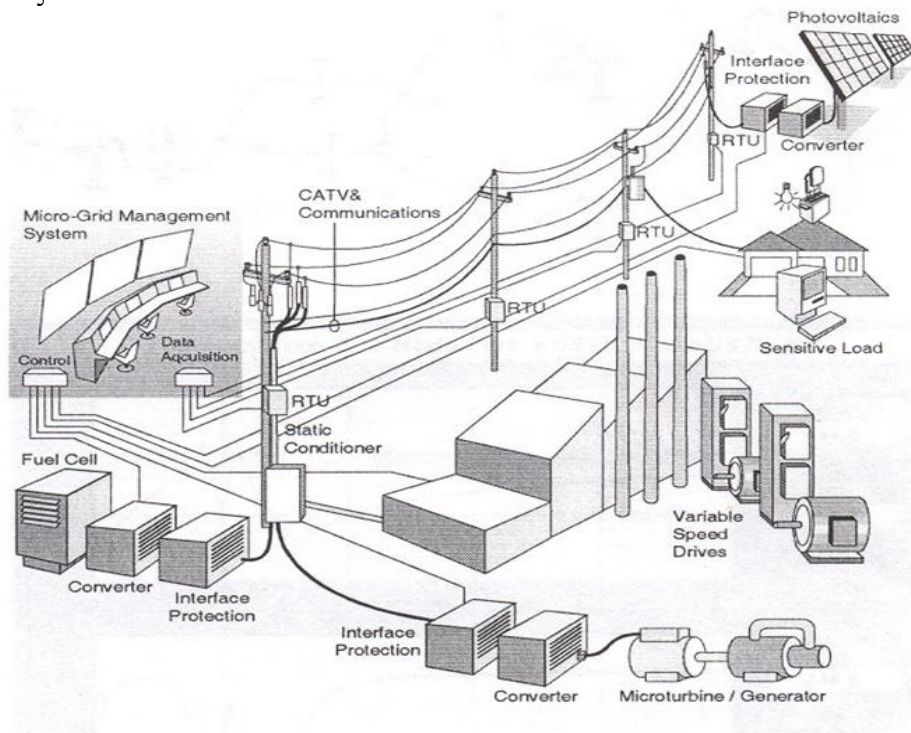
Ο σχεδιασμός του μικροδικτύου είναι ανεξάρτητος από το κεντρικό δίκτυο, ωστόσο μπορεί να υπάρχει διασύνδεση με αυτό, για ανταλλαγή ενέργειας. Τυπικές πηγές ενός μικροδικτύου είναι οι γεννήτριες ντήζελ ή φυσικού αερίου, συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ζεστού νερού (γεννήτριες, μικροστρόβιλοι), οι 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.

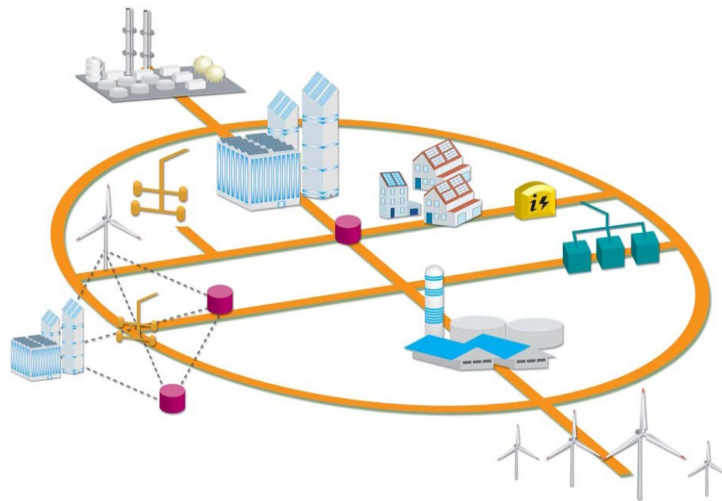
Βασικό γνώρισμα των μικροδικτύων είναι ο συντονισμένος έλεγχος τους, ώστε τελικά να εμφανίζονται στο ανάντη δίκτυο ως μία ενιαία οντότητα με το δικό της αποκεντρωμένο σύστημα ελέγχου το οποίο δεν επιβαρύνει τα συστήματα ελέγχου του ανάντη ευρισκόμενου δικτύου με τον έλεγχο κάθε μιας μονάδας ξεχωριστά. 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 ολόενα 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 6.1.α-β Ένα τυπικό μικροδίκτυο

## 6.1.2 Επιδράσεις μικροδικτύου στη γενικότερη λειτουργία ενός ΣΗΕ

### 6.1.2.1 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 απορροφώμενη 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.

### **6.1.2.2 Ποιότητα ισχύος και αξιοπιστία μικροδικτύου**

Η ποιότητα ισχύος και η αξιοπιστία που προσφέρουν τα μικροδίκτυα έχει ως κύρια διάσταση τη διαθεσιμότητα ισχύος αλλά περιλαμβάνει και δευτερεύουσες πτυχές, όπως είναι ο έλεγχος ευστάθειας τάσης, ο περιορισμός των αρμονικών κτλ.

Ο τοπικός έλεγχος στην ποιότητα και αξιοπιστία ισχύος που τροφοδοτεί τα φορτία, εντός μικροδικτύου, είναι ένα πεδίο το οποίο τίθεται συνεχώς υπό διερεύνηση. Το συγκεκριμένο πλεονέκτημα έχει δύο διαστάσεις. Πρώτον, εξ' ορισμού, ένα μικροδίκτυο έχει τη δυνατότητα ελεγχόμενης νησιδοποιημένης λειτουργίας το οποίο μεταφράζεται σε αυξημένη διαθεσιμότητα ισχύος και επομένως αξιοπιστία για όλα τα φορτία εντός αυτού. Δεύτερον, προσφέρει εν γένει «ετερογενή» ποιότητα και αξιοπιστία ισχύος στις διαφορετικές τελικές καταναλώσεις ανταποκρινόμενο κατ' αυτόν τον τρόπο στην υψηλή ιδιομορφία των απαιτήσεων ποιότητας και αξιοπιστίας ορισμένων φορτίων. Το συγκεκριμένο ζήτημα, καθότι πολύ σημαντικό, θα περιγραφεί εκτενέστερα στη συνέχεια.

Στις ανεπτυγμένες οικονομίες παγκοσμίως, ένα σε γενικές γραμμές ενιαίο σύστημα τροφοδότησης ηλεκτρικής ισχύος έχει εγκαθιδρυθεί από τις αρχές του προηγούμενου αιώνα. Χρονολογείται συγκεκριμένα από την εμφάνιση των πολυφασικών συστημάτων εναλλασσόμενου (AC) ρεύματος. Σε γενικές γραμμές, το κυρίαρχο πρότυπο ενεργειακού συστήματος βασίζεται σε μεγάλης κλίμακας κεντρικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, στη μεταφορά μεγάλου όγκου ηλεκτρικής ισχύος για μεγάλες αποστάσεις μέσω βρογχοειδών κεντρικά ελεγχόμενων δικτύων υψηλής τάσης και στη τοπική διανομή σε χαμηλότερες τάσεις μέσω ακτινικών, εν μέρει τοπικά ελεγχόμενων, γραμμών μονής διεύθυνσης. Βασικό και αρχαικό χαρακτηριστικό της προαναφερθείσας δομής είναι ότι η παροχή ηλεκτρικής ισχύος συντελείται παγκοσμίως σε ένα σταθερό και συνεπές επίπεδο ποιότητας και αξιοπιστίας για τις περισσότερες τουλάχιστον περιοχές. Αυτή η *a priori* προβλεψιμότητα δημιουργεί τεράστιο οικονομικό όφελος στο βαθμό που όλα τα είδη ηλεκτρικού εξοπλισμού μπορούν να κατασκευαστούν βάσει παγκοσμίως ομοιογενών προτύπων. Το συγκεκριμένο παραδοσιακό πρότυπο «ομοιογενούς» ποιότητας ισχύος και αξιοπιστίας έχει ωφελήσει τις ανεπτυγμένες οικονομίες του πλανήτη για μεγάλες χρονικές περιόδους κατά τις οποίες οι ανάγκες κατανάλωσης ηλεκτρισμού αυξάνονταν υπερβολικά έως και εκρηκτικά.

Οι σταδιακές μεταβολές στις προσδοκίες όσον αφορά το ενεργειακό σύστημα, τόσο από την πλευρά της παραγωγής όσο και από την πλευρά της κατανάλωσης, οδηγούν σε ένα σημείο καμπής στην πορεία της εξέλιξης του και πολύ πιθανά σε ένα νέο πρότυπο. Βέβαια, η βελτίωση του παραδοσιακού ενεργειακού συστήματος παγκοσμίως, σε σημείο τέτοιο ώστε να εκπληρώνει τις απαιτήσεις των ευαίσθητων ή των σύγχρονων ψηφιακών φορτίων, μπορεί να αποβεί αναντίστοιχα και αναίτια ακριβή.

Οι μεταβολές στην πλευρά της κατανάλωσης προκύπτουν από την απaráμιλλη ανάγκη για ηλεκτρισμό στη αναδυόμενη ψηφιακή εποχή γεγονός το οποίο μοιραία συνεπάγεται αυξημένες

απαιτήσεις ποιότητας και αξιοπιστίας ισχύος (PQR) για ορισμένες τουλάχιστον εφαρμογές. Παράλληλα, από την πλευρά της παραγωγής, η αυξημένη διείσδυση διακοπόμενων πηγών ενέργειας, οι περιορισμοί στην επέκταση του συστήματος και η αβεβαιότητα των ευμετάβλητων αγορών ενέργειας, δεδομένης της βραχυπρόθεσμης εξάντλησης των αποθεμάτων συμβατικών καυσίμων, αμφισβητούν τη δυνατότητα διατήρησης των σημερινών προτύπων ποιότητας-αξιοπιστίας ισχύος [27] [15].

Σε πλήρη διάσταση με το σημερινό πρότυπο «ομοιογενούς ποιότητας» παρεχόμενου ρεύματος, οι πραγματικές απαιτήσεις PQR των τελικών καταναλώσεων είναι εξαιρετικά ετερογενείς. Για παράδειγμα, η άντληση νερού έχει χαμηλές PQR απαιτήσεις. Αντίθετα, κρίσιμα φορτία ή φορτία που αφορούν ιατρική υποστήριξη είναι υψηλής ευαισθησίας και συνεπώς υψηλών απαιτήσεων ως προς την ποιότητα ισχύος και την αξιοπιστία παροχής. Η παρακάτω Εικόνα 39 παρουσιάζει μια πυραμίδα. Τα φορτία στη βάση της πυραμίδας έχουν χαμηλές απαιτήσεις ποιότητας ισχύος ενώ στην κορυφή της υπάρχουν φορτία που δεν καλύπτονται από τα υπάρχοντα PQR επίπεδα.



Σχήμα 6.2 Πυραμίδα αύξουσας απαιτούμενης PQR

Μέχρι στιγμής δεν είναι ξεκάθαρο εάν τα φορτία χαμηλών απαιτήσεων ξεπερνούν κατά πολύ τα κρίσιμα που βρίσκονται κοντά στην κορυφή. Παρόλα αυτά τα μικροδίκτυα, δεδομένου ότι συμπεριφέρονται με έναν οικονομικά λογικό τρόπο, θα προσπαθήσουν να τα διαμορφώσουν με ανάλογο τρόπο. Ο λόγος είναι ότι τα φορτία χαμηλών απαιτήσεων είναι φθηνότερα ενώ τα αντίστοιχα υψηλών απαιτήσεων είναι ακριβά.

Η λειτουργία των μικροδικτύων προσανατολίζεται στην κατηγοριοποίηση του συνολικού φορτίου κοντά στη βάση της πυραμίδας, όσο κάτι τέτοιο είναι δυνατό. Για παράδειγμα, ένα είδος εξοπλισμού που θεωρείται ευαίσθητο φορτίο αντιστοιχεί συνήθως σε ένα μικρό ποσοστό της ενέργειας που του είναι απαραίτητο (π.χ. για την εκτέλεση των ελέγχων ενώ μεγάλο μέρος της ενέργειας που καταναλώνεται θα μπορούσε να είναι σχετικά χαμηλής ποιότητας). Σε τέτοιες περιπτώσεις, δύο διαφορετικές ποιότητες τροφοδοσίας εξυπηρετούν τα αντίστοιχα τμήματα του εκάστοτε εξοπλισμού. Η ανάλυση των PQR απαιτήσεων σε μορφή πυραμίδας θα μπορούσε πιθανά

να οδηγήσει στη συλλογή των φορτίων ομοειδών απαιτήσεων σε συγκεκριμένα κυκλώματα και στην ακόλουθη τροφοδότησή τους με την κατάλληλη ποιότητα ισχύος. Αντίστοιχα θα μπορούσε να οδηγήσει στον διαχωρισμό μερικών φορτίων στα συστατικά του τμήματα που διαφέρουν ως προς τις PQR απαιτήσεις. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η παροχή ισχύος υψηλής ποιότητας και αξιοπιστίας τοπικά σε ευαίσθητα φορτία μπορεί να συνεπάγεται πιθανή μείωση του κοινωνικού βέλτιστου εξυπηρέτησης του δικτύου.

Σε γενικές γραμμές, τρεις άξονες, ενεργειακή αποδοτικότητα μέσω συμπαραγωγής – μειωμένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα – βελτιωμένη ποιότητα και αξιοπιστία ισχύος, είναι οδηγοί στην ανάπτυξη της αξιόπιστης διασπαρμένης παραγωγής. Παρόλα αυτά, πολλά άλλα πλεονεκτήματα προκύπτουν από την εκμετάλλευσή τους, όπως, μειωμένες απώλειες γραμμών και κοινωνικά χρηστή επέκταση του δικτύου.

Ενώ η εφαρμογή διανεμημένης αξιόπιστης παραγωγής είναι δυνητικά σε θέση να μειώσει την ανάγκη για επέκταση του παραδοσιακού συγκεντρωποιημένου συστήματος, ο έλεγχος ενός τεράστιου αριθμού διασπαρμένων πηγών αποτελεί πρόκληση μπορεί εν μέρει να αντιμετωπιστεί από την τεχνολογία του δικτύου. Αυτή η πρόκληση μπορεί εν μέρει να αντιμετωπιστεί από την τεχνολογία των μικροδικτύων, τα οποία συνίστανται σε οντότητες που συντονίζουν τις εκάστοτε πηγές ενέργειας σε ένα σταθερά πιο αποκεντρωμένο πλαίσιο. Η προδιαγραφείσα αυτή λειτουργία μειώνει το «βάρος» ελέγχου σχετικά με το δίκτυο και επιτρέπει στις μικροπηγές να αποδώσουν τα οφέλη τους στο μέγιστο.

Για το λόγο αυτό τα μικροδίκτυα θεωρούνται βασικό χαρακτηριστικό των μελλοντικών ενεργών δικτύων διανομής αφού είναι σε θέση, αν συντονίζονται και λειτουργούν αποτελεσματικά, να εκμεταλλεύονται στο έπακρο τη διανεμημένη παραγωγή ελαχιστοποιώντας, σε βαθμό εξάλειψης, ενδεχόμενους κινδύνους από τη λειτουργίας τους.

### **6.1.2.3 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 εγγεόμενη 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:

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

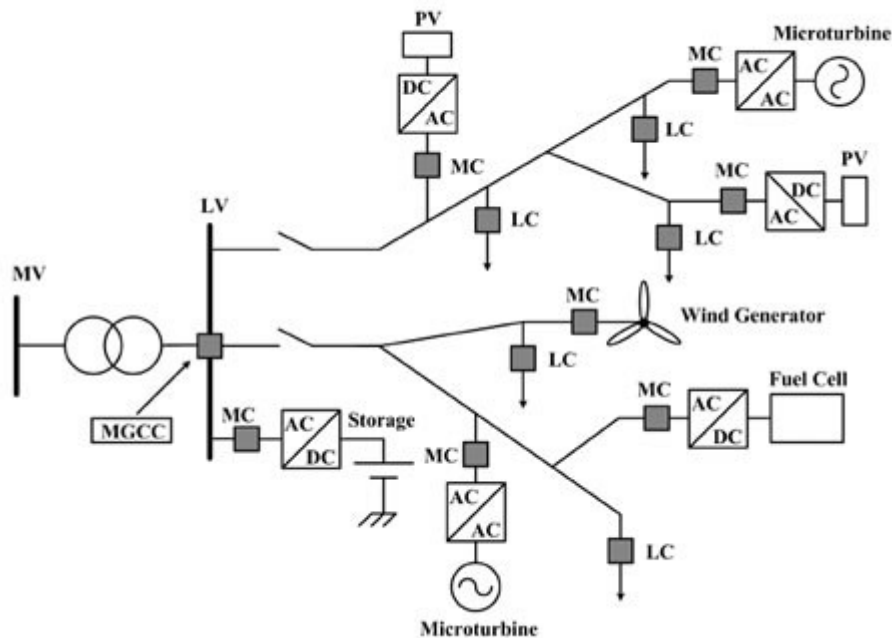
#### 6.1.2.4 Μικροδίκτυο και περιβάλλον

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.

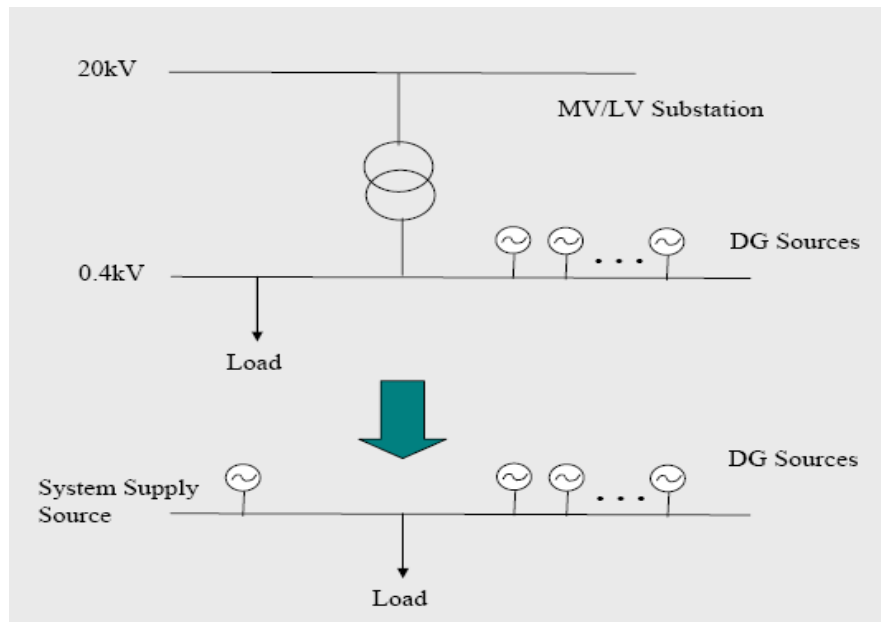
### 6.1.3 Δομή μικροδικτύου

Η γενική δομή για ένα μικροδίκτυο και η θέση του σε σχέση με το σύστημα διαχείρισης των δικτύων διανομής (Distribution Management System) DMS, παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:



Σχήμα 6.3 Δομή μικροδικτύου

Μια τέτοια διάρθρωση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, όπως το μικροδίκτυο, αναμένεται να έχει μεγάλη διείσδυση σε σχετικά πυκνοκατοικημένες περιοχές στις οποίες οι όροι όχλησης είναι αυστηρότεροι σε σύγκριση με πιο απομακρυσμένες ή ήδη υπάρχουσες βιομηχανικές περιοχές. Επομένως σε αυτά τα δίκτυα αναμένεται σημαντική διείσδυση πηγών ενέργειας πιο φιλικών προς το περιβάλλον συγκρινόμενα με τις μεγάλες κεντρικές μονάδες ενός συστήματος, όπως για παράδειγμα τα BIPV (Building Integrated PhotoVoltaics). Αυτό βέβαια δε σημαίνει ότι στις αγροτικές περιοχές δεν μπορεί να γίνει διείσδυση τέτοιων δικτύων. Σε μία τέτοια περίπτωση μπορεί να επιτευχθεί η εκμετάλλευση των τοπικών πηγών ενέργειας, όπως είναι τα μικρά υδροηλεκτρικά ή η βιομάζα.



Σχήμα 6.4 Απλοποιημένη τοπολογία μικροδικτύου

Οι βασικές μονάδες που απαρτίζουν ένα μικροδίκτυο είναι οι:

1. Αντιστροφεείς: Οι περισσότερες μικροπηγές του μικροδικτύου συνδέονται στο υπόλοιπο δίκτυο μέσω μετατροπέων. Οι αυξημένες δυνατότητες που προσφέρουν οι σύγχρονοι αντιστροφεείς καθιστούν δυνατό τον έλεγχο της παραγωγής ενεργού και αέργου ισχύος και κατά συνέπεια της τάσης και της συχνότητας σε απομονωμένη λειτουργία.

2. Μονάδες Αποθήκευσης: Το βασικό πρόβλημα της ηλεκτρικής ενέργειας είναι ότι δεν μπορεί να αποθηκευτεί εύκολα σε εκτεταμένη κλίμακα. Σχεδόν όλη η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σήμερα είναι ταυτόχρονη με την παραγωγή της. Ωστόσο για την λειτουργία των μικροδικτύων, εφόσον αυτά περιλαμβάνουν μεγάλη παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, είναι ιδιαίτερα επιθυμητή η παρουσία μονάδων αποθήκευσης ενέργειας. Οι βασικές μονάδες αποθήκευσης είναι [7]:

- Ηλεκτρικοί συσσωρευτές ή κοινώς μπαταρίες και κυρίως μπαταρίες μολύβδου οξέος, που αποτελούν μονάδες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μετά την ηλεκτροχημική μετατροπή της.
- Μονάδες που λειτουργούν με πεπιεσμένο αέρα (Compressed Air Energy Storage, CAES), όπου ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για την συμπίεση ποσότητας αέρα η οποία στη συνέχεια κινώντας έναν στρόβιλο αναπαράγει την ηλεκτρική ενέργεια.
- Σφόνδυλοι (flywheels). Πρόκειται για διατάξεις όπου μέσω ενός κινητήρα – γεννήτριας μπορεί να γίνει αποθήκευση με την μορφή κινητικής ενέργειας σε μια στρεφόμενη μάζα.
- Υπεραγώγιμες διατάξεις. Εφαρμογές με διατάξεις που χρησιμοποιούν υγρό ήλιο είναι ήδη σε εμπορική εκμετάλλευση ενώ επίσης διατάξεις υγρού αζώτου αναμένονται στο άμεσο μέλλον.
- Διατάξεις άντλησης. Η ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές χρησιμοποιείται για άντληση νερού σε υψηλότερη υψομετρική στάθμη. Κατόπιν ηλεκτρική ενέργεια παράγεται όταν ζητηθεί με έναν υδροστρόβιλο.

3. Μονάδες Ελέγχου: Για να μεγιστοποιηθούν τα οφέλη, το σύστημα ελέγχου του μικροδικτύου θα πρέπει να είναι σε θέση να προσφέρει τα ακόλουθα :

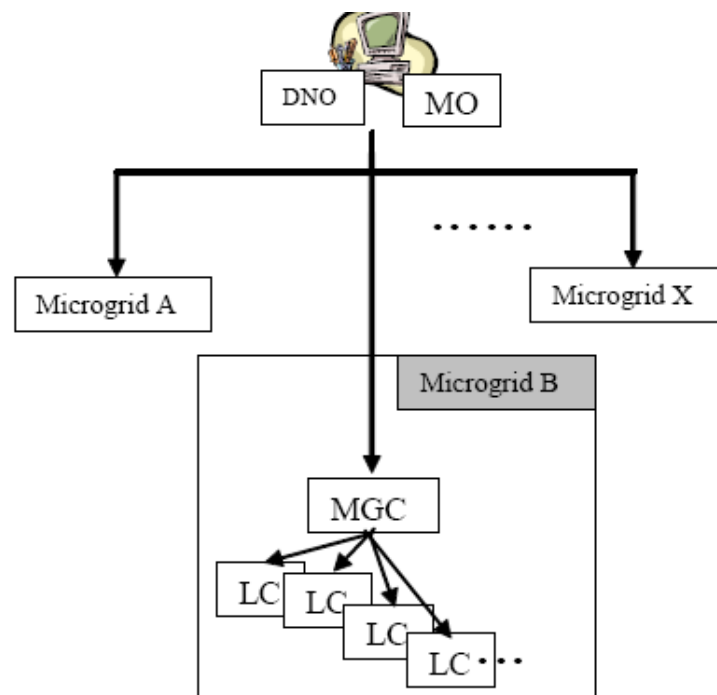
- Παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στα τοπικά φορτία.

- Συμμετοχή στις ενεργειακές αγορές με στόχο τη μείωση του λειτουργικού κόστους και την αύξηση των κερδών των ιδιοκτητών διεσπαρμένης παραγωγής.
- Κατά το δυνατόν αδιάλειπτη παροχή ενέργειας σε κρίσιμα φορτία.
- Συνεισφορά στη μείωση των ρύπων που οφείλονται στην τοπική ζήτηση.
- Παροχή βοηθητικών υπηρεσιών στο τοπικό δίκτυο διανομής όπως έλεγχος τάσης και αέργου ισχύος.
- Νησιδοποίηση και επανεκκίνηση του δικτύου μετά από σφάλμα στο ανάντη δίκτυο.

Ένα μικροδίκτυο θεωρείται ότι λειτουργεί ως τμήμα του δικτύου διανομής και μπορούν να διακριθούν τρία ιεραρχικά επίπεδα ελέγχου:

1. Διαχειριστής δικτύου διανομής (DNO) και Διαχειριστής Αγοράς (MO).
2. Κεντρικός ελεγκτής Μικροδικτύου (MGCC).
3. Τοπικοί ελεγκτές (LC), οι οποίοι διακρίνονται σε ελεγκτές μικροπηγών (EM) και ελεγκτές φορτίου (ΕΦ).

#### 6.1.4 Αρχιτεκτονική ελέγχου



Σχήμα 6.5 Τα επίπεδα ελέγχου ενός μικροδικτύου

Ο DNO είναι υπεύθυνος για την τεχνική λειτουργία του συστήματος στην χαμηλή και μέση τάση. Στο κομμάτι αυτό του δικτύου μπορεί να υπάρχουν περισσότερα του ενός μικροδίκτυα. Ο διαχειριστής της αγοράς (Market Operator-MO) είναι υπεύθυνος για την λειτουργία της αγοράς ενέργειας στην συγκεκριμένη περιοχή του δικτύου διανομής. Είναι προφανές ότι, ανάλογα με το μοντέλο της αγοράς ενέργειας, μπορεί να υπάρχουν περισσότεροι του ενός MO. Εντός ενός

μικροδικτύου συνεπώς μπορεί να λειτουργεί μία αγορά και ένα σύνολο αρκετών μικρών τέτοιων αγορών θα διαπραγματεύονται με τον διαχειριστή της αγοράς της περιοχής του.

Αυτές οι δύο οντότητες (DNO/MO) δεν ανήκουν στο μικροδίκτυο αλλά αποτελούν τους εκπροσώπους του δικτύου με τους οποίους επικοινωνεί το κάθε μικροδίκτυο Α έως Χ που ανήκει στο δίκτυο διανομής. Θα πρέπει να τονιστεί ότι παρά την αυτονομία του μικροδικτύου, εφόσον είναι συνδεδεμένο με το δίκτυο μέσης τάσης, θα πρέπει να διατίθεται ένα ελάχιστο επίπεδο συντονισμού με τους DNO/MO ώστε αυτοί να το αντιλαμβάνονται ως ένα ενιαίο φορτίο. Με την αύξηση της διείσδυσης αυτής της δομής ηλεκτρικού δικτύου στα δίκτυα διανομής η απαίτηση συντονισμού θα γίνεται ολοένα και πιο απαραίτητη.

Οι DNO/MO επικοινωνούν με το μικροδίκτυο μέσω του Κεντρικού ελεγκτή (Microgrid Central Controller –MGCC). Οι λειτουργίες του κεντρικού ελεγκτή του μικροδικτύου (MGCC) μπορούν να εκτείνονται από την απλή εποπτεία και καταγραφή της ενεργού και άεργου ισχύος που παρέχει κάθε διασπαρμένη πηγή έως την πλήρη ευθύνη για την βελτιστοποίηση της λειτουργίας του μικροδικτύου με την αποστολή σημάτων ελέγχου για την παραγωγή των μικροπηγών και των φορτίων. Λεπτομέρειες για τη λειτουργία του MGCC και τις ακολουθούμενες πολιτικές διαχείρισης πηγών και φορτίων δίνονται ακολούθως.

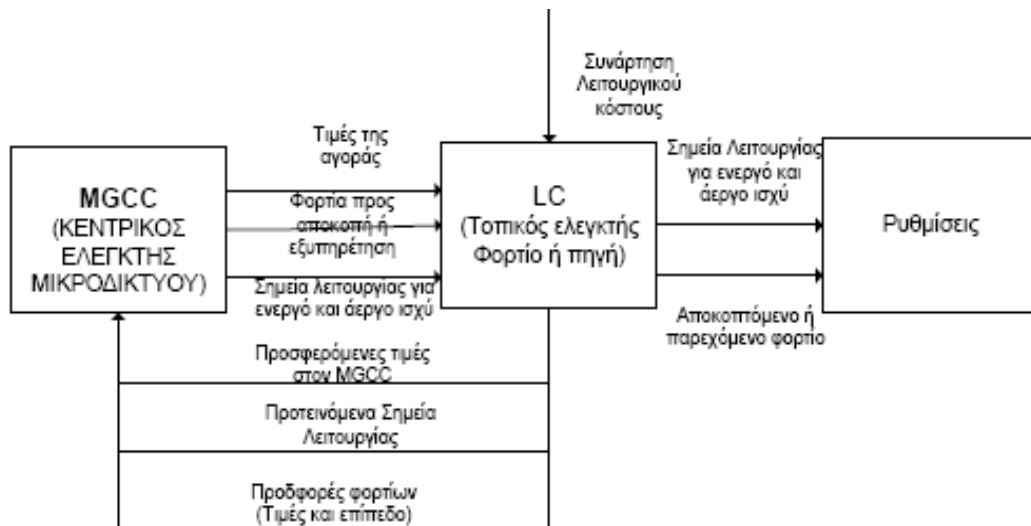
Στο χαμηλότερο επίπεδο ελέγχου ανήκουν οι τοπικοί ελεγκτές - Local Controllers (LC). Οι τοπικοί ελεγκτές μπορούν να ελέγχουν μονάδες παραγωγής, οπότε και ονομάζονται Ελεγκτές Μονάδων (EM), συμπεριλαμβανομένων των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας αλλά και κάποια από τα φορτία, οπότε ονομάζονται Ελεγκτές Φορτίου (ΕΦ). Ο Ελεγκτής Μονάδας εκμεταλλεύεται τις ολοένα και αυξανόμενες δυνατότητες των ηλεκτρονικών ισχύος της διασύνδεσης των μικροπηγών. Μπορεί να εμπλουτιστεί με διάφορους βαθμούς ευφυΐας, από την απλή ανταλλαγή πληροφοριών με τον κεντρικό ελεγκτή μέχρι την αυτόνομη λειτουργία κάθε μικροπηγής ειδικά εάν εφαρμόζεται αποκεντρωμένος έλεγχος.

Είναι σαφές ότι για να λειτουργήσει το μικροδίκτυο, είναι σημαντικό να εξισορροπηθούν με συντονισμένο τρόπο η προσφορά ισχύος από τις τοπικές διασπαρμένες μονάδες παραγωγής και από τη γραμμή διανομής Μέσης Τάσης με τη συνολική ζήτηση. Υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις που μπορούν να εφαρμοστούν, κυμαινόμενες από μια πλήρως αποκεντρωμένη προσέγγιση προς ένα κεντρικό έλεγχο ανάλογα με τις λειτουργίες του MGCC και των LCs.

#### **6.1.4.1. Κεντρικός έλεγχος και αρμοδιότητες του MGCC**

Στον κεντρικό έλεγχο, οι LC ακολουθούν τις εντολές του MGCC, όταν το μικροδίκτυο συνδέεται με το κυρίως δίκτυο, και έχουν την αυτονομία να εκτελέσουν τοπική βελτιστοποίηση της ενεργού και άεργου ισχύος κατά την απομονωμένη λειτουργία του μικροδικτύου. Η κύρια ευθύνη για τη μεγιστοποίηση της αξίας του μικροδικτύου και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του ανατίθεται στον MGCC.

Το προτεινόμενο σχήμα ροής πληροφορίας μεταξύ του MGCC και των τοπικών ελεγκτών σε ένα μικροδίκτυο παρουσιάζεται ως εξής:



Σχήμα 6.6 Η ροή πληροφορίας μεταξύ του κεντρικού ελεγκτή και των τοπικών ελεγκτών σε ένα μικροδίκτυο

Πιο συγκεκριμένα η λειτουργία του MGCC είναι η ακόλουθη: Κάθε  $m$  λεπτά, π.χ. 15 λεπτά, αποστέλλονται στον MGCC οι προσφορές κάθε μονάδας και κάθε φορτίου για την επόμενη ώρα σε διαστήματα  $m$  λεπτών, αντίστοιχα πάντοτε με την εκάστοτε υπό εφαρμογή πολιτική. Αυτές οι προσφορές είναι βασισμένες στις τιμές ενέργειας στην ελεύθερη αγορά, στην ανάγκη για παραγωγή θερμότητας παράλληλα με την παραγωγή ηλεκτρισμού, στο κόστος παραγωγής της μονάδας, στο επιδιωκόμενο ποσοστό κέρδους από τον ιδιοκτήτη της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής ή από την αξία του φορτίου όπως την αντιλαμβάνεται ο καταναλωτής με χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού το επόμενο διάστημα. Οι προσφορές των φορτίων ακολουθούν τους ίδιους κανόνες με εκείνους των πηγών δηλαδή κάθε  $m$  λεπτά υποβάλλουν προσφορές για την επόμενη ώρα σε βήματα των  $m$  λεπτών.

Ο MGCC προσπαθεί να βελτιστοποιήσει την οικονομική λειτουργία του μικροδικτύου βασιζόμενος στα ακόλουθα:

- Την ακολουθούμενη πολιτική αγοράς.
- Την ακολουθούμενη πολιτική προσφοράς φορτίων.
- Τις τιμές της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.
- Τα τεχνικά όρια των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.
- Την πρόβλεψη φορτίου, αν κάτι τέτοιο απαιτείται.
- Την εκτίμηση παραγωγής από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.
- Τους πιθανώς υπάρχοντες περιορισμούς ασφαλείας του δικτύου, όπως είναι π.χ. η ικανότητα της γραμμής διασύνδεσης.
- Τις προσφορές των μονάδων του μικροδικτύου.
- Τις προσφορές των καταναλωτών.
- Τους τυχόν περιορισμούς περιβαλλοντικής πολιτικής.
- Τα όρια παραγωγής για διατήρηση της τάσης.
- Το διεθνώς επικαθορισμένο Εμπόριο Ρύπων.
- Τη λειτουργία σε διασυνδεδεμένη ή νησιδοποιημένη λειτουργία.

Το καθορισμένο ως βέλτιστο σενάριο λειτουργίας επιτυγχάνεται με τον έλεγχο των μικροπηγών και των ελέγξιμων φορτίων μέσα στο μικροδίκτυο με την αποστολή κατάλληλων σημάτων ελέγχου στους τοπικούς LCs, σήματα τα οποία περιέχουν :

- Τις τιμές της αγοράς.

- Τον αριθμό των προβλεπόμενων εν λειτουργία μονάδων.
- Τα σημεία λειτουργίας των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής όπου μπορεί να ελεγχθεί η έξοδός τους, π.χ. στην περίπτωση των μικροτουρμπίνων.
- Τα φορτία που θα εξυπηρετηθούν ή θα αποκοπούν.

Η διαδικασία αυτή λειτουργεί επαναληπτικά κάθε m λεπτά και για την επόμενη ώρα. Όσον αφορά στις τιμές της αγοράς, αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους τοπικούς ελεγκτές προκειμένου να προετοιμαστούν πιο κατάλληλα οι προσφορές τους στον MGCC για τα επόμενα διαστήματα. Για τέτοιου τύπου διασύνδεση και συντονισμό μεταξύ του MGCC και κάθε ενός από τους τοπικούς ελεγκτές, χρειάζεται αμφίδρομη επικοινωνία. Οι τοπικοί ελεγκτές στέλνουν την πληροφορία που απαιτείται από τον MGCC, σε μορφή .txt και .xml. Με όμοιο format αποστέλλεται η πληροφορία για τα σημεία λειτουργίας και για τις τιμές της αγοράς στους τοπικούς ελεγκτές. Η επικοινωνία μπορεί να γίνει είτε με την βοήθεια τηλεφωνικών γραμμών, φερέσυχνων ή και ασύρματης επικοινωνίας, όπως οι τεχνολογίες GSM ή GPRS.

Για να μπορεί ο MGCC να επιτυγχάνει την κατά το δυνατόν βέλτιστη λειτουργία του μικροδικτύου, οι συναρτήσεις οι οποίες πρέπει να υλοποιούνται σε ένα τέτοιο σύστημα ελέγχου είναι σε γενικές γραμμές οι εξής:

**I. Πρόβλεψη φορτίου:** Καθώς ο ορίζοντας βελτιστοποίησης είναι μερικές ώρες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν απλές μέθοδοι όπως η persistent και η μέθοδος χρονοσειρών. Λόγω του μικρού αριθμών φορτίων το σφάλμα της πρόβλεψης αναμένεται να είναι σημαντικότερο από ότι στα μεγαλύτερα δίκτυα. Αν υπάρχουν προσφορές των φορτίων στον MGCC, τότε η ανάγκη για αλγορίθμους πρόβλεψης μειώνεται.

**II. Πρόβλεψη παραγωγής από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας:** Λόγω του δεδομένου υψηλού κόστους για την πρόβλεψή τους, δεν αναμένεται να έχουμε αξιόπιστη μετεωρολογική πληροφορία σε τέτοιου βεληνεκούς τοπικό επίπεδο. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν παρόμοιες με την πρόβλεψη φορτίου μέθοδοι, λόγω του μικρού διαστήματος βελτιστοποίησης και της διαρκούς ανανέωσης των μετρήσεων για την τρέχουσα παραγωγή. Μάλιστα οι μέθοδοι τύπου persistent, που θεωρούν ότι η παραγωγή στο επόμενο χρονικό διάστημα αναμένεται να είναι ίση με την παραγωγή της προηγούμενης χρονικής περιόδου, έχουν αρκετά ικανοποιητική επίδοση στις προβλέψεις, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις αιολικής παραγωγής για τα μικρά διαστήματα που εξετάζονται.

**III. Πρόβλεψη θερμικών αναγκών:** Στη Βόρεια κυρίως Ευρώπη αναμένεται σημαντικός αριθμός εγκαταστάσεων Συμπααραγωγής (CHP). Επομένως, η θερμική ζήτηση αναμένεται να μεταβάλλει τις προσφορές των παραγωγών αλλά και να επηρεάζει τη λειτουργία των μικροδικτύων. Αν ο τοπικός ελεγκτής διαχειρίζεται συνολικά τις ενεργειακές ανάγκες του μικροδικτύου, τέτοιου είδους διαδικασίες είναι απαραίτητες για την βελτιστοποίηση της λειτουργίας του. Η μεθοδολογία πρόβλεψης απαιτεί να εκτιμηθούν παράγοντες όπως είναι η θερμοκρασία. Ειδικότερα απαιτείται ο βαθμός συσχέτισης θερμικής ζήτησης με τη θερμοκρασία, την υγρασία, την ώρα της ημέρας, και τον τύπο της (καθημερινή/ σαββατοκύριακο), τις εποχιακές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας αλλά και το είδους των θερμικών αναγκών της περιοχής.

**IV. Οικονομική λειτουργία:** Αυτή είναι απαραίτητη προκειμένου να επιλεγούν οι οικονομικότερες προσφορές τόσο από τα φορτία όσο κυρίως από τις μονάδες παραγωγής. Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις ρουτίνες επιλογής Ένταξης των Μονάδων παραγωγής-φορτίων (Unit Commitment) και της Οικονομικής Κατανομής (Economic Dispatch). Η πρώτη κατηγορία επιλέγει ποιες μονάδες είναι οικονομικά συμφέρον να λειτουργήσουν σε σχέση με την

αγορά ηλεκτρικής ενέργειας ενώ η οικονομική κατανομή αποφασίζει τα σημεία λειτουργίας αυτών των μονάδων. Αν οι προσφορές των μονάδων είναι της μορφής AX, όπου X η παραγωγή της κάθε μονάδας, η απόφαση εκφυλίζεται στην σύγκριση της παραμέτρου A με την τιμή της αγοράς και τις υπόλοιπες προσφορές των μονάδων. Σε διαφορετική περίπτωση χρησιμοποιούνται και οι δύο συναρτήσεις.

**V. Εκτίμηση ασφάλειας:** Η ειδοποιός διαφορά ενός μικροδικτύου από ένα σύνολο μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής είναι η ικανότητα για την κατά το δυνατόν αδιατάρακτη μετάβαση από τη διασυνδεδεμένη στη νησιδοποιημένη λειτουργία σε περίπτωση βλάβης του ανάντη δικτύου. Οι συναρτήσεις ασφαλείας έχουν ως στόχο να καθορίσουν ποιες μονάδες θα πρέπει να λειτουργούν ή ποια φορτία πρέπει να αποκοπούν προκειμένου να μπορούν να εξυπηρετηθούν τα κρίσιμα φορτία. Επομένως, οι συγκεκριμένες συναρτήσεις μπορούν να διακριθούν σε συναρτήσεις για την εκτίμηση της στατικής ασφάλειας του μικροδικτύου σε περίπτωση διαταραχής (steady state security) και σε συναρτήσεις on-line εκτίμησης της δυναμικής ασφάλειας. Οι τελευταίες με τη βοήθεια μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης, όπως τα Νευρωνικά Δίκτυα και τα Δένδρα απόφασης συμβάλλουν στο να έχει δημιουργηθεί μια βάση γνώσης στον MGCC, ώστε να γνωρίζει τις ασφαλείς και ανασφαλείς καταστάσεις του μικροδικτύου στην περίπτωση διακοπής της διασύνδεσης. Με τη βοήθεια προσομοιώσεων της δυναμικής συμπεριφοράς του μικροδικτύου, δημιουργείται η βάση γνώσης σχετικά με τη λειτουργία των τοπικών μονάδων παραγωγής, τη φόρτιση του δικτύου και τα δυναμικά χαρακτηριστικά των πηγών του δικτύου. Με τον τρόπο αυτό, κάποια ξαφνική αλλαγή στη λειτουργική κατάσταση του μικροδικτύου μπορεί να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά και σύντομα ώστε να αποφευχθούν τυχούσες αποκλίσεις από την επιθυμητή συχνότητα και τάση λειτουργίας.

VI. Ακόμα υλοποιούνται περαιτέρω **Ειδικές Συναρτήσεις** που χρησιμοποιούνται για τη διεκπεραίωση των παρακάτω στόχων:

- Εκτίμηση της πιθανότητας να παραβιάζονται οι τάσεις σε κάποιο κόμβο από τη λειτουργία του μικροδικτύου ή από την παραγωγή κάποιας τοπικής μονάδας παραγωγής.
- Μεταβολή της λειτουργίας του μικροδικτύου ώστε να ελαχιστοποιείται η συνολική ποσότητα των ρύπων που αποφεύγονται και να συμμετέχει το μικροδίκτυο στο εμπόριο ρύπων.
- Βελτιστοποίηση της λειτουργίας σε επείγουσες καταστάσεις. Αυτές οι συναρτήσεις περιλαμβάνουν μεθόδους για την επίτευξη ελέγχου σε περιόδους όπου το δίκτυο λειτουργεί απομονωμένο από το ανάντη ευρισκόμενο δίκτυο ως ένα νησί. Σε αυτήν την ομάδα συναρτήσεων περιλαμβάνονται και οι συναρτήσεις black start του μικροδικτύου.
- Ο βαθμός πολυπλοκότητας των επί μέρους συναρτήσεων για τον έλεγχο ενός μικροδικτύου είναι συνάρτηση του μεγέθους του και των αναμενόμενων κερδών που μπορούν να υπάρχουν από τη βελτίωση της επίδοσης των επί μέρους αλγορίθμων.

#### 6.1.4.2 Πλήρως αποκεντρωμένος έλεγχος

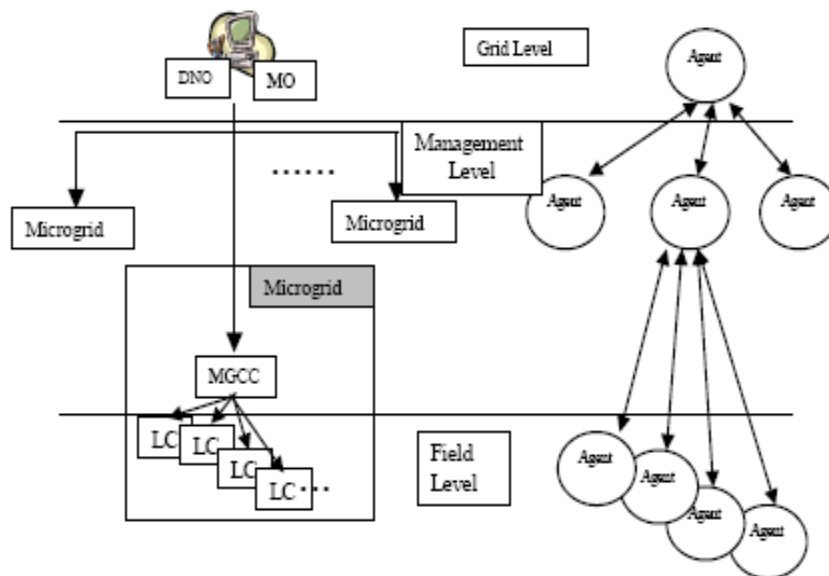
Η ιδέα είναι η απλοποίηση ενός πολύ σύνθετου προβλήματος με μεγάλο αριθμό μεταβλητών, όπως η βελτιστοποίηση της λειτουργίας ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας με πολλές μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής. Γι' αυτό το πρόβλημα διαιρείται σε πολλά επί μέρους προβλήματα τα οποία μπορούν να επιλυθούν το κάθε ένα ξεχωριστά, αξιοποιώντας την κατανομημένη ευφυΐα που υπάρχει στις επί μέρους συνιστώσες ελέγχου.



Σε μια τέτοια μορφή ελέγχου επιδιώκεται η μέγιστη δυνατή αυτονομία των επί μέρους συνιστωσών ελέγχου. Έτσι για παράδειγμα, η κύρια ευθύνη για τον έλεγχο του μικροδικτύου, ανατίθεται στους τοπικούς ελεγκτές των μονάδων (EM), οι οποίοι συνεργάζονται ή ακόμη και ανταγωνίζονται για να μεγιστοποιήσουν την παραγωγή τους προκειμένου να ικανοποιηθεί η ζήτηση και να εξάγουν πιθανώς το μέγιστο ποσό ενέργειας στο δίκτυο μέσης τάσης λαμβάνοντας υπ' όψη τις τρέχουσες τιμές αγοράς. Υπό τέτοιες συνθήκες απαιτείται όχι μόνο ευφυΐα από τον κάθε ελεγκτή, αλλά και αυξημένες ικανότητες τοπικά, ώστε όλο το ελεγχόμενο δίκτυο να αποκτήσει ευφυΐα. Κατ' αυτόν τον τρόπο, θα μπορεί να επιτευχθεί όχι μόνο η τοπική βελτιστοποίηση αλλά και σύγκλιση σε μια πολύ ικανοποιητική λύση δεδομένων και αντικρουόμενων συμφερόντων που μπορούν να υπάρχουν σε ένα μικροδίκτυο.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά που επιζητούμε στον αποκεντρωμένο έλεγχο μπορούν να επιτευχθούν με τη χρήση ενός ευφυούς πολυπρακτορικού συστήματος (Multi Agent Systems-MAS). Η τεχνολογία MAS έχει ήδη χρησιμοποιηθεί σε αρκετές εφαρμογές των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας και χρησιμοποιεί υψηλού επιπέδου γλώσσα επικοινωνίας με συγκεκριμένη σημειολογία ώστε να ανταλλάσσονται όχι μόνο πληροφορίες αλλά και γνώση μεταξύ των πρακτόρων. Η ανταλλαγή των πληροφοριών και οι διαδικασίες μάθησης συμβάλλουν ώστε να επιτευχθεί ο τελικός στόχος, που είναι ο έλεγχος της διαδικασίας για την οποία χρησιμοποιούνται οι πράκτορες. Η ευφυΐα που αποκτά κάθε πράκτορας, τόσο από την βάση γνώσης που διαθέτει, τις τεχνικές μάθησης, π.χ. ενισχυτική μάθηση (reinforcement learning), όσο κυρίως και από την επικοινωνία με τους γειτονικούς του πράκτορες, συμβάλλει στις μετέπειτα αποφάσεις του, που μπορούν να επηρεάζουν και όλο του το περιβάλλον. Μέσα από αυτή τη διαδικασία μάθησης και συνεχούς επικοινωνίας μπορεί να επιτευχθεί ένα σχεδόν βέλτιστο αποτέλεσμα ελέγχου.

Η αντιστοιχία μεταξύ της προσέγγισης των ευφύων πρακτόρων για τον έλεγχο του μικροδικτύου στα διάφορα επίπεδα ελέγχου και της αρχιτεκτονικής ελέγχου, παρουσιάζεται στο επόμενο σχηματικό διάγραμμα με τα τρία επίπεδα ελέγχου και την αντιστοιχίση τους με τα επίπεδα λειτουργίας του μικροδικτύου.



Σχήμα 6.7 Αντιστοιχία επιπέδων ελέγχου για το μικροδίκτυο και προσέγγισης με σύστημα MAS

Στο ανώτερο επίπεδο ή επίπεδο δικτύου είναι το δίκτυο μέσης τάσης και ο πράκτορας που χρησιμοποιείται είναι υπεύθυνος για την επικοινωνία μεταξύ του μικροδικτύου και των DNO/MO, ανταλλάσσοντας μηνύματα για τη λειτουργία της αγοράς ενέργειας. Στο ενδιάμεσο επίπεδο, το επίπεδο διαχείρισης, οι πράκτορες που συμμετέχουν είναι υπεύθυνοι για την οργανωμένη

λειτουργία των ελεγκτών μονάδων παραγωγής και φορτίου, την συμμετοχή του κάθε μικροδικτύου στην αγορά ενέργειας αλλά και την πιθανή συνεργασία του μικροδικτύου με άλλα γειτονικά μικροδίκτυα. Σε αυτό το επίπεδο ένας πράκτορας είναι επιφορτισμένος με το έργο των διαπραγματεύσεων με τον ΜΟ. Οι προσφορές όμως των φορτίων και των μονάδων παραγωγής είναι έργο των πρακτόρων που βρίσκονται στο αμέσως παρακάτω επίπεδο, το επίπεδο Εφαρμογής ή Field level, το οποίο είναι και η ψυχή του πολύ-πρακτορικού συστήματος ελέγχου. Οι πράκτορες αυτοί είναι οι τοπικοί ελεγκτές LCs. Η λειτουργία ενός τέτοιου ελεγκτή απαιτεί δύο τμήματα. Το εξωτερικό παρέχει το περιβάλλον επικοινωνίας με το μικροδίκτυο το οποίο ανταλλάσσει σημεία λειτουργίας (set points), προσφορές και εντολές. Αυτό το τμήμα είναι κοινό ώστε να είναι εφικτή η προτυποποίηση της λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος και να υπάρχει κοινός κώδικας επικοινωνίας. Το εσωτερικό τμήμα είναι επιφορτισμένο με την μετάδοση των εντολών που λαμβάνει ο πράκτορας στην φυσική μονάδα που ελέγχεται, μονάδα παραγωγής ή φορτίο. Επίσης αυτοί οι πράκτορες θα πρέπει να είναι σε θέση να συνεργάζονται και να λαμβάνουν υπ' όψιν τους άλλους τοπικούς ελεγκτές και άλλα ευφυή τμήματα του μικροδικτύου.

Συνοπτικά χαρακτηριστικές εργασίες που θα πρέπει να μπορούν να επιτελούν οι πράκτορες σε κάθε επίπεδο είναι :

- **Επίπεδο Εφαρμογής (Field Level):** Έλεγχος ενεργού αέργου ισχύος, διαχείριση μπαταριών, έλεγχος τάσης, έλεγχος συχνότητας, λειτουργίες διακοπών κτλ.
- **Ενδιάμεσο επίπεδο (Management Level):** Συμμετοχή στην αγορά, αποκοπή φορτίου, καταγραφή και παρακολούθηση ζητημάτων ασφαλείας και ποιότητας ισχύος, νησιδοποίηση και επανατροφοδότηση από το δίκτυο, εκκίνηση μετά από black out κτλ.
- **Επίπεδο δικτύου (Grid level):** Συμμετοχή στην αγορά, αποφάσεις ζητημάτων ασφαλείας και ποιότητας ισχύος.

Επιπρόσθετες απαιτήσεις για την ανάπτυξη αυτής της αρχιτεκτονικής, είναι να μην απαιτούνται σημαντικές αλλαγές στο λογισμικό ελέγχου εξαιτίας της αλλαγής προτεραιοτήτων και λειτουργιών στο μικροδίκτυο ή από την προσθήκη νέων συμμετεχόντων σε αυτό. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει οι πράκτορες να μπορούν να εκπαιδευτούν στα νέα αυτά μηνύματα που λαμβάνουν. Το έργο αυτό διευκολύνεται με την ανάπτυξη ελεγκτών στις τοπικές μονάδες παραγωγής με την μορφή 'plug and play' ώστε να επιτελούν πολυσύνθετες λειτουργίες με μεγαλύτερο βαθμό ευφυΐας από την απλή ανταλλαγή σημείων λειτουργίας. Ήδη η έρευνα κατευθύνεται στον τομέα της ανάπτυξης τέτοιων ελεγκτών και την ενσωμάτωση ευφών ελεγκτών στις μονάδες παραγωγής και φορτίου. Ο τελικός στόχος είναι ο έλεγχος να είναι ακόμη ευκολότερος ανεξάρτητα από τον προμηθευτή του τοπικού ελεγκτή της μονάδας παραγωγής και να προσαρμόζεται η συσκευή που προστίθεται άμεσα στο περιβάλλον λειτουργίας.

#### **6.1.4.3 Εφαρμογές αποκεντρωμένου και κεντρικού ελέγχου λειτουργίας μικροδικτύου**

Και στις δύο προσεγγίσεις ελέγχου λειτουργίας του μικροδικτύου υπάρχει σημαντική αποκέντρωση συγκριτικά με το να δίνονται από κάποιο κεντρικό σημείο οδηγίες για κάθε μια από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας. Η διαφορά έγκειται στο βαθμό αποκέντρωσης που υπάρχει αλλά και στις δυνατότητες που είναι επιθυμητό να παρέχει ο MGCC. Ο αποκεντρωμένος έλεγχος μπορεί να συμβάλλει ώστε όταν οι χρήστες του μικροδικτύου επιθυμούν να επιτύχουν τη βελτιστοποίηση των δικών τους πόρων ή πολύ περισσότερο, όταν τα συμφέροντα ενός χρήστη Α έρχονται σε αντίθεση με τα συμφέροντα ενός χρήστη Β, να συγκλίνει ο έλεγχος σε μία εφικτή λύση που κατά το δυνατόν θα ικανοποιεί και τα συμφέροντα των δύο. Για παράδειγμα σε ένα δίκτυο με οικιακούς καταναλωτές ο ένας μπορεί να επιθυμεί να παράγει θερμότητα και να πουλήσει την περίσσεια ηλεκτρισμού ενώ κάποιος άλλος να έχει αυξημένες

ανάγκες ηλεκτρισμού. Και οι δύο επιθυμούν να επιτύχουν το σκοπό τους με τον πλέον οικονομικό τρόπο, οπότε δε θα επιθυμούσαν να αλλάξει η παραγωγή τους από απομακρυσμένο σημείο και να μην μπορούν να πουλήσουν την περίσσεια της παραγωγής τους ή να αγοράσουν φθηνή ενέργεια.

Αυτός ο τρόπος λειτουργίας μπορεί να συμβάλει, με την βοήθεια της αποκεντρωμένης ευφυΐας και την ενσωμάτωση ευφυών πρακτόρων σε μορφή 'plug and play' συσκευών, στο να έχει ο έλεγχος χαμηλότερο κόστος στο βαθμό που περισσότερες εταιρίες προσπαθούν να αναπτύξουν τέτοιου είδους προϊόντα. Από την άλλη, όταν ο στόχος των συμμετεχόντων είναι η μεταξύ τους συνεργασία ώστε να μειωθεί συνολικά το κόστος ικανοποίησης των θερμικών και ηλεκτρικών αναγκών τους, ο κεντρικός έλεγχος ο οποίος μπορεί να συμπεριλάβει και ειδικές συναρτήσεις, όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο, παρουσιάζει πλεονεκτήματα. Τέτοιο παράδειγμα είναι ένα βιομηχανικό μικροδίκτυο. Επίσης ομάδες θερμοκηπιακών καλλιεργητών θα επιθυμούσαν να συνεργαστούν ώστε να επιτύχουν μείωση των δαπανών για τη θέρμανση και τον ηλεκτρισμό τους. Σε τέτοιο περιβάλλον λειτουργίας αναμένονται οι τελικοί χρήστες να επιλέξουν πιο «κεντρική» φιλοσοφία λειτουργίας. Επιπρόσθετα, στο ανταγωνιστικό περιβάλλον της αγοράς είναι μάλλον απίθανο κάθε ένας μικρός καταναλωτής και κάτοχος πηγής διεσπαρμένης παραγωγής να μπορέσει με μικρή ισχύ να επιτύχει σημαντικά οφέλη σε σχέση με την οργανωμένη παρουσία πολλών μικρών παραγωγών διεσπαρμένης παραγωγής, οι οποίοι θα παρουσιάζονται ως μια οντότητα στην αγορά και θα μπορούσαν να διαπραγματεύονται με ευνοϊκότερους όρους την ικανοποίηση των ενεργειακών τους αναγκών. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον αναμένεται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο εταιρίες που θα μπορούν να αναλάβουν τη λειτουργία αυτών των παραγωγών και θα έχουν και το κατάλληλο προσωπικό που θα δικαιολογούσαν «κεντρική» αντιμετώπιση του ελέγχου. Υπό τέτοιες συνθήκες οι τοπικοί ελεγκτές δε θα ήταν τίποτε άλλο από απλοί μεταβιβαστές εντολών χωρίς να υπάρχει ιδιαίτερη ανάγκη ευφυΐας, όπως στον αποκεντρωμένο έλεγχο του μικροδικτύου.

Επειδή στον κεντρικό έλεγχο είναι εφικτό να υπάρχουν περισσότερες πληροφορίες γνωστές στον κεντρικό ελεγκτή, σε αντίθεση με το τι γνωρίζει κάθε τοπικός ελεγκτής, και επειδή υπάρχει μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύς, ο κεντρικός ελεγκτής μπορεί να υπολογίσει ένα βέλτιστο σετ αποφάσεων για την λειτουργία του μικροδικτύου. Η συνεργασία των τοπικών ελεγκτών μπορεί να επιτύχει αρκετά ικανοποιητικές λύσεις αλλά η λύση που επιτυγχάνεται είναι υπό-βέλτιστη. Υπάρχουν όμως προϋποθέσεις, που η λύση που επιτυγχάνεται να είναι η βέλτιστη και σε αποκεντρωμένο τρόπο λειτουργίας.

Οι προαναφερθείσες παρατηρήσεις συνοψίζονται στον κάτωθι πίνακα:

	Κεντρικός Έλεγχος	Αποκεντρωμένος Έλεγχος
Ιδιοκτησία Διεσπαρμένης Παραγωγής	Ένας ιδιοκτήτης ή συνεταιρισμένοι ιδιοκτήτες που φαίνονται ως οντότητα	Κατά κανόνα πολλοί ιδιοκτήτες
Στόχος Ελέγχου	Βελτιστοποίηση λειτουργίας ικανοποιώντας διάφορους περιορισμούς	Αβεβαιότητα για τις επιδιώξεις του κάθε χρήστη εκείνη τη στιγμή
Διαθεσιμότητα Προσωπικού Για Ειδικές Εργασίες π.χ. low level management	Συνηθισμένη	Σπάνια
Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης	Μπορούν να υλοποιηθούν και εξεζητημένοι αλγόριθμοι	Χρήση απλών αλγορίθμων προκειμένου να μειωθεί το κόστος ελέγχου

Εγκατάσταση Νέας Μονάδας ή Οντότητας	Χρήση προσωπικού για την εγκατάσταση επικοινωνιακών εφαρμογών και προσθήκη στον Κεντρικό Ελεγκτή	Η συσκευή αναμένεται να είναι 'plug and play'. Οι χρήστες θα προσαρμοστούν με διαδικασίες μάθησης στα νέα δεδομένα
Βέλτιστη Λύση	Επιτυγχάνεται	Στην συντριπτική τους πλειοψηφία υπό-βέλτιστες λύσεις
Συμμετοχή Στην Αγορά	Συνεργασία όλων των μονάδων	Πολύ συχνά υπάρχει ανταγωνισμός μεταξύ των μονάδων
Συμμετοχή Μικροδικτύου σε κρισιμότερες αποφάσεις ως τμήμα γενικού μοντέλου ελέγχου	Εφικτή	Μη εφικτή προς το παρόν

### 6.1.5 Πολιτικές συμμετοχής του μικροδικτύου σε ιδεατή αγορά ενέργειας

Εντός του μικροδικτύου αναμένεται να λειτουργήσει μια μικρή αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, τουλάχιστον για τους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίοι θα καταθέτουν τις προσφορές τους στον MGCC για την ισχύ που μπορούν να παράγουν και την τιμή της προσφοράς τους. Ο στόχος του MGCC είναι να βελτιστοποιήσει την οικονομική λειτουργία λαμβάνοντας υπόψη τεχνικούς περιορισμούς. Η βελτιστοποίηση μπορεί να είναι είτε ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής χωρίς ανταλλαγή με το δίκτυο, είτε μεγιστοποίηση των κερδών ενός διαχειριστή. Και στις δύο περιπτώσεις η κάθε μια από τις  $N$  μικροπηγές υποβάλλει πρόσφορα για την παραγωγή και πώληση ενεργού ισχύος, η οποία συμβολίζεται από την μεταβλητή  $active\_bid(x_i)$  όπου  $x_i$  η ενεργός παραγωγή της  $i$  μικροπηγής. Η πλήρης μορφή της συνάρτησης προσφοράς προκειμένου για συνεχή συνάρτηση κόστους δίνεται από την ακόλουθη συνάρτηση που είναι ίδια με την συνάρτηση των μονάδων που καταναλώνουν καύσιμο:  $active\_bid(x_i) = a_i \cdot x_i^2 + b_i \cdot x_i + c_i$ .

Για τις μονάδες που καταναλώνουν καύσιμο ο όρος  $c_i$  αντιπροσωπεύει τον σταθερό όρο για την κατανάλωση καυσίμου συμπεριλαμβάνοντας και το κόστος εκκίνησης της μονάδας, όταν αυτή δεν λειτουργεί κατά τη διάρκεια της υποβολής της προσφοράς στον MGCC. Πιθανόν ο κάτοχος της μονάδας σε αυτήν την τιμή να προσθέτει και τμήμα του κόστους για την επένδυσή του στη διασπαρμένη παραγωγή. Οι παράμετροι  $a_i$  και  $b_i$  αντιπροσωπεύουν το μεταβλητό κόστος παραγωγής για αυτές τις μονάδες. Όλες αυτές οι παράμετροι δίνονται σε μορφή χρηματικών μονάδων, ώστε να μπορεί με ευκολία να γίνει η σύγκριση με τις τιμές της αγοράς.

Για τις μονάδες ΑΠΕ, όπως οι ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά, η παραγωγή τους δεν μπορεί να ρυθμιστεί εξαρτώμενη μόνο από την διαθεσιμότητα ανέμου και ηλιοφάνειας, ενώ το κόστος λειτουργίας τους είναι αμελητέο. Πρακτικά μπορούν να λειτουργούν όποτε είναι εφικτό μειώνοντας το κόστος παραγωγής του συστήματος. Είναι πιθανό ο κάτοχός τους να υποβάλλει προσφορές της μορφής  $active\_bid(x_i)$  στον MGCC, όπου ο όρος  $b_i$  αντιπροσωπεύει την απαραίτητη αποζημίωση ανά παραγόμενη kWh ώστε να αποπληρωθεί η εγκατάσταση σε εύλογο χρονικό διάστημα.

Οι παράμετροι  $a_i$  και  $c_i$  μπορούν να συμπεριλαμβάνουν το κόστος για την αγορά της υποδομής τηλεπικοινωνιών και ελέγχου για την επίτευξη της οργανωμένης λειτουργίας του μικροδικτύου. Το κόστος αυτό αναμένεται να είναι σχετικά μικρό σε σχέση με το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας των μονάδων παραγωγής. Φυσικά οι παράμετροι της υποβολής προσφορών μπορούν να μεταβάλλονται από τους τοπικούς ελεγκτές ανάλογα με την πληροφορία που λαμβάνουν από τον MGCC και τυχόν τοπικές ανάγκες όπως η θέρμανση ή ψύξη του χώρου τους.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται δυο πολιτικές που δύναται να υλοποιηθούν σε ένα μικροδίκτυο.

### 6.1.5.1 Πολιτική 1η - Η πολιτική του «καλού πολίτη»

Σύμφωνα με αυτήν την πολιτική ο στόχος της λειτουργίας του MGCC είναι η μείωση του συνολικού κόστους λειτουργίας του μικροδικτύου με τον περιορισμό ότι δεν θα εξάγει ενέργεια στο ανάντη δίκτυο. Η πολιτική αυτή αναφέρεται στην βιβλιογραφία ως “Good Citizen Policy” - ‘πολιτική του καλού πολίτη’ και η αιτιολόγηση είναι ότι το μικροδίκτυο σε περιόδους αιχμής για το δίκτυο, άρα και υψηλών τιμών αφού οι τιμές στο δίκτυο αντανακλούν την κατάσταση του, μειώνει την επιβάρυνση του δικτύου μειώνοντας τη «φαινόμενη» ζήτησή του.

Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος για αυτήν την πολιτική έχει ως εξής: Κάθε χρονική περίοδο να γίνει ελαχιστοποίηση του συνάρτησης κόστους, δηλαδή

$$\cos t = \sum_{i=1}^N \text{active\_bid}(x_i) + AX$$

όπου  $X$  η ενεργός ισχύς που αγοράζεις από το δίκτυο και  $A$  είναι οι τιμές αγοράς ενέργειας.

Οι περιορισμοί του προβλήματος βελτιστοποίησης ομαδοποιούνται ως προς: 1) τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μικροπηγών, όπως π.χ. τα τεχνικά ελάχιστα και μέγιστα των μονάδων και οι χρόνοι εκκίνησης (αν και σε αυτήν την περίπτωση είναι σχεδόν αμελητέοι) 2) το ισοζύγιο ισχύος εντός του μικροδικτύου, που δίνεται από την σχέση  $X + \sum_{i=1}^N x_i = P\_demand$ , όπου  $P\_demand$  η ζήτηση ενεργού ισχύος.

Σε κάθε περίπτωση η τοπική παραγωγή θα πρέπει να είναι επαρκής όταν η ζήτηση υπερβαίνει τη συμβολαιοποιημένη με το ανάντη δίκτυο ή το τεχνικό όριο ισχύος διασύνδεσης που περιγράφεται από την μεταβλητή  $ConnectionLineCapacity$ . Αυτός ο περιορισμός περιγράφεται από την παρακάτω ανισότητα:

$$\sum_{i=1}^N x_i \geq \max\{0, P\_demand - ConnectionLineCapacity\}$$

Η υλοποίηση μιας τέτοιας πολιτικής λειτουργίας αναμένεται να είναι επιλογή ενός συνεταιρισμού καταναλωτών, αγροτικών, βιοτεχνικών, ή κάποιου δήμου ο οποίος διαχειρίζεται τα κτίριά του ως μια ενιαία οντότητα, ή ακόμα κάποιου συγκροτήματος κατοικιών, π.χ. εργατικές κατοικίες, όπου ο κοινός στόχος είναι η μείωση του κόστους ενέργειας για τους τελικούς χρήστες και η ευελιξία που προσφέρει ένας μεγαλύτερος καταναλωτής στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας.

### 6.1.5.2 Πολιτική 2η - Η πολιτική του «ιδανικού πολίτη»

Σε αυτήν την πολιτική θεωρείται ότι ένας πάροχος ενεργειακών υπηρεσιών (Energy Service Provider) διαχειρίζεται τον MGCC προσπαθώντας να μεγιστοποιήσει τα κέρδη του,

ανταλλάσσοντας ενέργεια με το δίκτυο και χρεώνοντας τους καταναλωτές μέσα στο μικροδίκτυο με τις τιμές της αγοράς. Αναγκαία προϋπόθεση είναι το ανάντη ευρισκόμενο δίκτυο να επιτρέπει την αμφίδρομη ροή ισχύος. Σε αυτήν την περίπτωση σε περιόδους υψηλών τιμών και αναλόγως των συνθηκών ενδέχεται να εγχέεται ισχύς στο ανάντη δίκτυο, οπότε το μικροδίκτυο είναι περισσότερο ενεργό από ότι στην προηγούμενη υπό-ενότητα. Σε μια τέτοια περίπτωση, η λειτουργία του μικροδικτύου προσομοιάζεται με τη συμπεριφορά του «ιδανικού» πολίτη, ο οποίος όχι μόνο δεν επιβαρύνει το δίκτυο διανομής με την ενεργειακή του συμπεριφορά αλλά επιπλέον το υποβοηθά στις περιόδους μεγάλης ζήτησης όχι απλά μειώνοντας την κατανάλωσή του αλλά παρέχοντας και ισχύ στις γειτονικές γραμμές ακόμη και αν δεν είναι μέλη του μικροδικτύου. Κατ' αυτόν τον τρόπο, πρωτίστως επωφελούνται οι καταναλωτές του μικροδικτύου, αλλά και οι γειτονικές του γραμμές αφού μειώνεται η συνολική ζήτηση στη συγκεκριμένη περιοχή.

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι η μεγιστοποίηση της παράστασης  $Maximize\{Income - Expenses\} = Maximize\{Revenues\}$ . Το έσοδα προέρχονται από την πώληση της ενεργού ισχύος τόσο στο δίκτυο Μέσης Τάσης όσο και στους καταναλωτές του μικροδικτύου. Αν η ζήτηση είναι υψηλότερη από την παραγωγή των μικροπηγών, τότε εγχέεται ισχύς από το δίκτυο και μεταπωλείται στους καταναλωτές του μικροδικτύου. Αν η παραγωγή είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση τότε πωλείται ενέργεια στο δίκτυο και ο όρος  $X$  είναι ίσος με μηδέν στις επόμενες δύο εξισώσεις.

$$Income = AX + A \sum_{i=1}^N x_i$$

Ο όρος *expenses* περιλαμβάνει τα κόστη για την αγορά ενεργού ισχύος από το δίκτυο και την αποζημίωση των τοπικών παραγωγών, όπως διατυπώνεται και από την παρακάτω εξίσωση:

$$expenses = \sum_{i=1}^N active\_bid(x_i) + AX . \text{ Ο MGCC πρέπει να μεγιστοποιήσει το μέγεθος } Revenues \text{ με}$$

$$\text{βάση μια εξίσωση: } Revenues = A \sum_{i=1}^N x_i - \sum_{i=1}^N active\_bid(x_i) .$$

Υπάρχει αλλαγή στο ισοζύγιο ισχύος σε σχέση με την αντίστοιχη εξίσωση στην περίπτωση όπου ακολουθείται η πολιτική του καλού πολίτη διότι πλέον μπορεί να ανταλλάσσεται ισχύς με το δίκτυο και συνεπώς μπορεί η παραγωγή των μικροπηγών να υπερβαίνει τη ζήτηση του μικροδικτύου. Πιο συγκεκριμένα θα πρέπει να ικανοποιείται ο περιορισμός που περιγράφεται

$$\text{παρακάτω: } X + \sum_{i=1}^N x_i \geq P\_demand . \text{ Σε καμία περίπτωση όμως η παραγόμενη ισχύς από το}$$

μικροδίκτυο δεν πρέπει να παραβιάζει ούτε τη συμβολαιοποιημένη ούτε την τεχνικά εφικτή ισχύ που εγχέεται στο ανάντη δίκτυο. Οι λοιποί περιορισμοί που πρέπει να ικανοποιούνται είναι ίδιοι με εκείνους που διατυπώνονται για την πολιτική του καλού πολίτη.

$$\sum_{i=1}^N x_i \leq P\_demand + ConnectionLineCapacity$$

### 6.1.6 Λειτουργία αγοράς μικροδικτύου περιλαμβάνοντας προσφορές καταναλωτών – Demand Side Bidding (DSB)

Η διαδικασία της προσφοράς κινήτρων ώστε οι καταναλωτές να αλλάξουν τη μορφή της ζήτησής τους με σκοπό τη μείωση της αιχμής ενός συστήματος, αποτελεί μια συνηθισμένη πρακτική για τη διαχείριση της ζήτησης. Για εφαρμογές διεσπαρμένης παραγωγής ένα σχετικό πείραμα διαχείρισης της ζήτησης πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Προγράμματος DISPOWER

στο οικολογικό συγκρότημα κατοικιών Stutense στο Mannheim με τίτλο ‘Washing with the sun’. Οι κάτοικοι ενημερώνονταν με SMS, για την ύπαρξη πλεονάσματος φωτοβολταϊκής παραγωγής, ώστε να προγραμματίσουν στις συγκεκριμένες ώρες το πλύσιμο και άλλες ενεργοβόρες δραστηριότητες τους. Οι καταναλωτές που ανταποκρίνονταν λάμβαναν ένα υψηλό bonus της τάξης των  $50 \text{ € ct/kWh}$ . Με αυτόν τον τρόπο μειώθηκε σημαντικά η αιχμή και μετακινήθηκε η τυπική καμπύλη ζήτησης των κατοικιών από τη νυχτερινή αιχμή προς τις ώρες της ημέρας που υπήρχε ηλιοφάνεια.

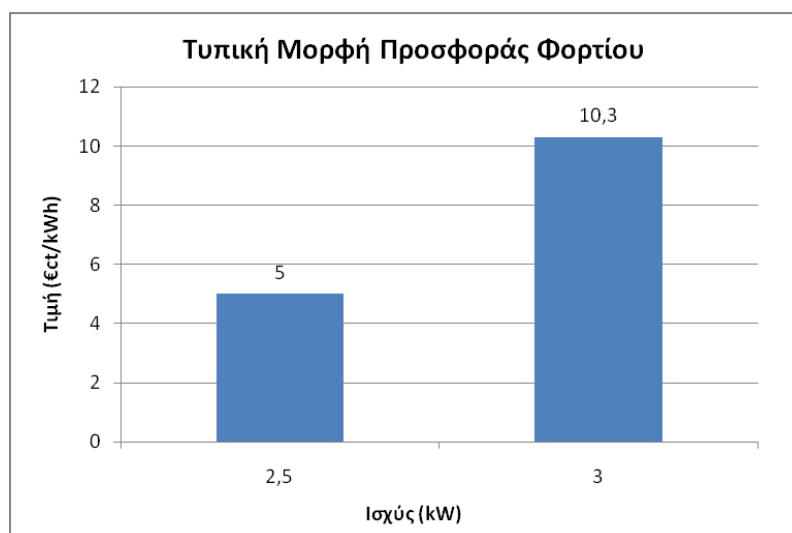
Στο πλαίσιο του ελέγχου ενός μικροδικτύου, εξετάστηκε η περίπτωση όπου, εκτός από τους ιδιοκτήτες των μονάδων, και οι καταναλωτές του μικροδικτύου θα μπορούν να υποβάλλουν προσφορές στον MGCC για την ικανοποίηση της ζήτησής τους ή για τη μείωση της κατανάλωσης τους, απολαμβάνοντας κάποιο όφελος.

Κάθε καταναλωτής μπορεί να έχει υψηλής και χαμηλής προτεραιότητας φορτία, τα οποία επιθυμεί να τροφοδοτηθούν. Σε ομαλές συνθήκες ο καταναλωτής επιθυμεί να εξυπηρετήσει το σύνολο των φορτίων του. Σε περιόδους υψηλών τιμών, για να αποφύγει την υψηλή χρέωση, πιθανόν να επιθυμούσε κάποια φορτία να μεταθέσουν τη λειτουργία τους σε κάποια άλλη χρονική στιγμή (shift) ή ακόμα να μην λειτουργήσουν καθόλου (curtailment). Όμοια σε περιόδους στις οποίες το ανάντη δίκτυο είναι ιδιαίτερα φορτισμένο ή το μικροδίκτυο προσπαθήσει να λειτουργεί απομονωμένο, τότε η μη εξυπηρέτηση κάποιων φορτίων μπορεί να συμβάλλει ή ακόμη να είναι και αναγκαία ώστε η διαθέσιμη ισχύς από τις τοπικές μονάδες παραγωγής να επαρκεί για την ικανοποίηση των υψηλής προτεραιότητας φορτίων [20].

Ακολουθώς περιγράφονται δύο παραλλαγές για την μορφή προσφορών από φορτία:

- Τα φορτία ενημερώνουν για την ισχύ που θέλουν να εξυπηρετηθεί και την τιμή πάνω από την οποία θα ήθελαν να μην εξυπηρετηθεί η ισχύς που δηλώνουν.
- Τα φορτία ενημερώνουν για την ισχύ την οποία θα ήθελαν να αποκοπεί αν αποζημιώνονταν σε συγκεκριμένη τιμή που προτείνουν.

Μία τυπική μορφή προσφοράς καταναλωτή δίνεται στο κάτωθι διάγραμμα. Οι τιμές αυτές αντικατοπτρίζουν το ενδιαφέρον του καταναλωτή να εξυπηρετηθούν τα φορτία αυτά. Όσο πιο υψηλή η τιμή τόσο μεγαλύτερη είναι η «θυσία» που κάνει.



Σχήμα 6.8 Τυπική μορφή προσφοράς καταναλωτή

Ανεξάρτητα από την παραλλαγή για την προσφορά του φορτίου που ακολουθείται, ο MGCC:

- Ενημερώνει τους καταναλωτές για τις τιμές ελεύθερης αγοράς.
- Δέχεται τις προσφορές από τους καταναλωτές.
- Στέλνει σήματα στους (ΕΦ) σύμφωνα με την έκβαση της ρουτίνας βελτιστοποίησης σχετικά με το ποιά φορτία θα συνδεθούν ή ποιά φορτία θα αποκοπούν.

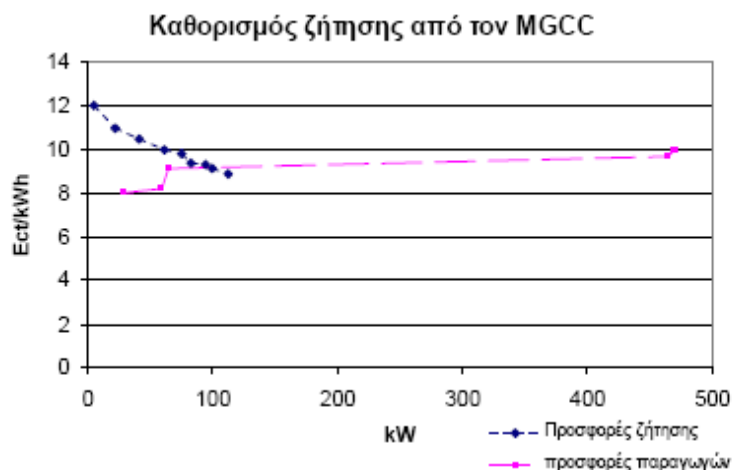
Η γνώση των τιμών της αγοράς βοηθάει τους καταναλωτές στην προετοιμασία των προσφορών τους. Αυτές οι τιμές αν ακολουθείται η πολιτική του «καλού πολίτη» αντιστοιχούν στη μέγιστη τιμή που οι τελικοί χρήστες αναμένεται να χρεωθούν, αν αγνοήσουμε τυχόν περιορισμούς ασφαλείας.

### 6.1.6.1 Η πολιτική της προσφοράς φορτίων προς σύνδεση – παραλλαγή Α’

Σύμφωνα με αυτήν την πολιτική οι καταναλωτές κάνουν προσφορές φορτίου με την μορφή της Εικόνας 6.8. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα ο καταναλωτής δηλώνει ότι η ολική του ζήτηση αναμένεται για την επόμενη περίοδο ελέγχου να είναι  $5.5kW = 2.5kW + 3kW$  και προσφέρει μια χαμηλή τιμή για τα «χαμηλής» προτεραιότητας φορτία και υψηλότερη για τα «υψηλής». Έστω επί παραδείγματι ότι, στη βάση του παραπάνω διαγράμματος ζήτησης και κοστολόγησης, δηλώνεται ότι ο καταναλωτής επιθυμεί να εξυπηρετηθεί το φορτίο των 2.5kW, όταν η τιμή είναι μικρότερη από  $5\text{euros}/kWh$ , ενώ για τα υπόλοιπα φορτία των 3kW αν η τιμή είναι μεγαλύτερη από  $10.3\text{euros}/kWh$ , δεν επιθυμεί την εξυπηρέτηση της ζήτησης αυτής [20].

Στη συνέχεια ο MGCC συγκεντρώνει τις προσφορές φορτίων και παραγωγών συμπεριλαμβανομένου του δικτύου (τιμές αγοράς). Κατατάσσει τις προσφορές των φορτίων σε φθίνουσα σειρά τιμής σύνδεσης και τις προσφορές των παραγωγών σε αύξουσα σειρά και στη συνέχεια βρίσκει το σημείο τομής της καμπύλης προσφοράς και ζήτησης όπως συμβαίνει γενικά για οποιοδήποτε αγαθό. Έτσι υπολογίζεται πόση θα είναι η παραγωγή της κάθε μιας μονάδας και πόσο το αποκοπτόμενο φορτίο για την επόμενη περίοδο της βελτιστοποίησης.

Με την παραλλαγή αυτή δεν απαιτείται πρόβλεψη φορτίου, αφού οι καταναλωτές δηλώνουν εκ των προτέρων τη ζήτησή τους. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα η τελική ζήτηση, όπως προκύπτει από το παρακάτω διάγραμμα, για όλο το μικροδίκτυο είναι 106kW.



Σχήμα 6.9 Η μορφή της προσφοράς και το φορτίο που πρέπει να ικανοποιήσει ο MGCC



### 6.1.6.2 Η πολιτική της προσφοράς φορτίων προς αποκοπή – παραλλαγή Β'

Σε αυτήν την παραλλαγή οι προσφορές δίνονται για φορτία που πρόκειται να αποκοπούν με την προϋπόθεση ότι οι καταναλωτές θα αποζημιωθούν για την απώλεια με μια συγκεκριμένη τιμή στον MGCC που να αντιπροσωπεύει την αξία της απώλειάς τους.

Σε αυτήν την παραλλαγή διαχείρισης φορτίου, δίνεται η δυνατότητα στον MGCC να αποκόψει φορτία τα οποία είναι συνδεδεμένα, όταν η προσφορά των φορτίων είναι οικονομικότερη από την τιμή αγοράς ενέργειας, από κάποια τοπική μονάδα παραγωγής ή από το δίκτυο. Το φορτίο σε μία τέτοια περίπτωση αντιμετωπίζεται ως μία μονάδα «αρνητικής» παραγωγής αφού μειώνει τη συνολική ζήτηση του μικροδικτύου. Σε αυτήν την περίπτωση ο MGCC γνωρίζει την αναμενόμενη κατανάλωση από ένα πρόγραμμα πρόβλεψης φορτίου, και ανάλογα με τις προσφορές φορτίου και παραγωγών αποφασίζει ποια φορτία θα αποκόψει και ποιες μονάδες παραγωγής θα παράγουν. Γνωρίζει την τρέχουσα συνολική ζήτηση του μικροδικτύου και αποστέλλει σήματα διακοπής ενέργειας στους LCs, όταν αυτό είναι οικονομικά συμφέρον.

Για το προαναφερθέν παράδειγμα, βάση της Εικόνας 6.8, ο καταναλωτής δηλώνει ότι δέχεται να αποκοπούν 2,5 kW αν αποζημιωθεί στην τιμή  $5 \text{ € ct/kWh}$  και 3kW επιπλέον αν αποζημιωθεί για αυτά στην τιμή των  $10,3 \text{ € ct/kWh}$ .

Η αποζημίωση του καταναλωτή,  $load\_bid(y_j)$ , προστίθεται στο λειτουργικό κόστος για το πρόβλημα βελτιστοποίησης. Ο όρος  $y_j$  αναφέρεται στην τιμή της ισχύος της προσφοράς του φορτίου  $j$  από τα  $L$  φορτία που υποβάλλουν προσφορές και ο όρος  $load\_bid(y_i)$  αναπαριστά την αποζημίωση του καταναλωτή.

Συνεπώς, ο MGCC λαμβάνοντας υπ' όψιν τα δεδομένα προσφορών φορτίων-παραγωγών και συνολικής ζήτησης είτε από τις προσφορές των φορτίων είτε από κάποιο πρόγραμμα πρόβλεψης φορτίου προσπαθεί να ικανοποιήσει τη ζήτηση του μικροδικτύου. Για την πολιτική του «καλού πολίτη», οι εξισώσεις κόστους και ισοζυγίου ενέργειας μεταβάλλονται, ως εξής:

$$\text{cost} = \sum_{i=1}^N \text{active\_bid}(x_i) + AX + \sum_{j=1}^L \text{load\_bid}(y_j)$$

$$X + \sum_{i=1}^N x_i + \sum_{j=1}^L y_j = P\_demand$$

Αντίστοιχα, για την πολιτική του «ιδανικού» πολίτη αυξάνονται τα έξοδα του διαχειριστή σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\text{expenses} = \sum_{i=1}^N \text{active\_bid}(x_i) + AX + \sum_{j=1}^L \text{load\_bid}(y_j)$$

Αντίστοιχα τα έσοδα –κέρδη του διαχειριστή και το ισοζύγιο ισχύος μεταβάλλεται σύμφωνα με τις εξισώσεις:

$$\text{Revenues} = A \sum_{i=1}^N x_i - \sum_{i=1}^N \text{active\_bid}(x_i) - \sum_{j=1}^L \text{load\_bid}(y_j)$$

$$X + \sum_{i=1}^N x_i + \sum_{j=1}^L y_j \geq P\_demand$$

Είναι φανερό ότι για την πολιτική 2, αν αποκοπεί φορτίο, τα κέρδη για τον πάροχο μειώνονται, επειδή όχι μόνο δεν πουλάει ενέργεια στον καταναλωτή στον οποίο αποκόπτεται μέρος

του φορτίου του, αλλά θα πρέπει να «αγοράσει» το δικαίωμα από τον καταναλωτή αυτό προκειμένου να πουλήσει την ενέργεια στο ανάντη δίκτυο. Συμπερασματικά, προκύπτει ότι στην πολιτική 2, δεν είναι συμφέρον να αποδεχθεί προσφορές φορτίων από την παραλλαγή Β, εκτός αν συντρέχουν λόγοι διασφάλισης της στατικής ασφάλειας του δικτύου.

### **6.1.7 Χρήση συναρτήσεων οικονομικής λειτουργίας για το μικροδίκτυο**

Μέσα σε ένα μικροδίκτυο πάντα επιλύεται το πρόβλημα οικονομικού προγραμματισμού. Οι συναρτήσεις οικονομικής λειτουργίας καθορίζουν τις προσφορές των μονάδων που θα γίνουν αποδεκτές. Επίσης καθορίζουν την παραγωγή των μικροπηγών των οποίων η έξοδος μπορεί να ρυθμιστεί ή αποφασίζουν αν οι μονάδες με διακριτές καταστάσεις λειτουργίας ON/OFF θα λειτουργήσουν ή όχι, καθώς και το αν θα αποκοπούν κάποια από τα φορτία που υποβάλλουν προσφορές. Όλα αυτά πραγματοποιούνται σύμφωνα με τις πολιτικές βάσει των οποίων προδιαγράφεται η λειτουργία τους. Για τον υπολογισμό αυτών των εξόδων θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν και οποιαδήποτε από τις παροχές που οι χρήστες του μικροδικτύου θα ήθελαν να τους παρέχεται, όπως η εξασφάλιση στατικής ασφάλειας, διατήρησης τάσεων σε συγκεκριμένα επίπεδα αλλά και οι πολιτικές για την περιβαλλοντικά φιλική λειτουργία του μικροδικτύου.

#### **6.1.7.1 Ένταξη μονάδων (unit commitment)**

Η διαδικασία της ένταξης μονάδων απαρτίζεται από τα παρακάτω βήματα:

1. Υπολογίζεται η μέγιστη και ελάχιστη ικανότητα των μονάδων παραγωγής είτε όπως δηλώνεται από τις προσφορές τους είτε από το μοντέλο πρόβλεψης παραγωγής αν πρόκειται για μονάδες ΑΠΕ είτε ως στατικά χαρακτηριστικά γνωστά στον MGCC.
2. Λαμβάνονται ως είσοδοι οι τιμές της αγοράς. Το ανάντη δίκτυο- εξωτερική αγορά θεωρείται μια «ιδεατή» μεγάλη γεννήτρια με μέγιστη ικανότητα παραγωγής που καθορίζεται από το όριο μεταφερόμενης ισχύος της διασύνδεσης. Επομένως, ο αριθμός των μονάδων ο οποίος λαμβάνεται υπ' όψιν στην διαδικασία επιλογής των μονάδων είναι όσες οι μικροπηγές που υποβάλλουν προσφορές συν μία.
3. Λαμβάνονται υπ' όψιν οι προσφορές των φορτίων. Αν αυτά πρόκειται να αποζημιωθούν, θεωρούνται ως μονάδες παραγωγής με ισχύ την ισχύ της αποκοπής και τιμή φορτίου την τιμή που προσφέρονται για αποκοπή.
4. Λαμβάνεται υπ' όψιν η ικανοποίηση των περιορισμών στατικής ασφάλειας (steady state security), των περιορισμών τάσης για την υποχρεωτική ένταξη τοπικών μονάδων ή τον περιορισμό ισχύος τους. Τυχόν μεταβολές στο κόστος που επέρχονται από τη συμμετοχή του μικροδικτύου στο εμπόριο ρύπων συνυπολογίζονται επίσης.
5. Κατόπιν επιλύεται το μαθηματικό πρόβλημα. Για την επίλυση του προβλήματος αυτού υπάρχουν μια σειρά από μεθοδολογίες βελτιστοποίησης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

Συνήθως όμως οι προσφορές φορτίων και παραγωγών αναμένονται να είναι απλές γραμμικές συναρτήσεις χωρίς καν σταθερό όρο, οπότε μπορούν και να χρησιμοποιηθούν λιγότερο απαιτητικές υπολογιστικά μέθοδοι. Τότε η επιλογή των μονάδων δεν είναι τίποτα άλλο από μια απλή ταξινόμηση της λίστας προτεραιότητας που περιλαμβάνει τόσο τις προσφορές των φορτίων όσο και των παραγωγών.

Για την πολιτική 1, η ένταξη των μονάδων ολοκληρώνεται μόλις η ζήτηση του μικροδικτύου μπορεί να ικανοποιηθεί, ώστε να μην πωλείται ενέργεια πλέον στο δίκτυο και να

ικανοποιηθεί ο περιορισμός  $X + \sum_{i=1}^N x_i + \sum_{y=1}^L y_i = P\_demand$ . Για την πολιτική 2, η διαδικασία

επιλογής των μονάδων ολοκληρώνεται όταν η μονάδα που πρόκειται να ενταχθεί είναι το δίκτυο. Αν οι προσφορές των τοπικών μονάδων με κόστος μικρότερο του δικτύου υπερκαλύπτουν τη ζήτηση, τότε μόλις το δίκτυο γίνει η οικονομικότερη μονάδα, η διαδικασία επιλογής μονάδων σταματά αφού δεν μπορεί να αγοραστεί ενέργεια από το δίκτυο και ταυτόχρονα να πωληθεί ενέργεια σε αυτό. Σε μια τέτοια περίπτωση το μικροδίκτυο δρα ως παραγωγός ενέργειας. Σε αντίθετη περίπτωση, το δίκτυο συμβάλλει έτσι ώστε να ικανοποιηθεί η ζήτηση, η σχέση  $X + \sum_{i=1}^N x_i + \sum_{y=1}^L y_i \geq P\_demand$  ικανοποιείται ως ισότητα και το μικροδίκτυο είναι ένας καταναλωτής.

Για την επίλυση του προβλήματος της ένταξης μονάδων, με συναρτήσεις υποβολής κόστους από τις μονάδες στη μορφή της εξίσωσης  $active\_bid(x_i) = a_i \cdot x_i^2 + b_i \cdot x_i + c_i$ , χρησιμοποιείται η μέθοδος της λίστας προτεραιότητας που περιλαμβάνει τις μονάδες παραγωγής και τα φορτία κατά αύξουσα σειρά, ώστε να επιλεγθούν οι μονάδες που θα λειτουργήσουν και τα φορτία που τελικά θα αποκοπούν. Προκύπτει λοιπόν συνάρτηση της μορφής:

$$av\_cost(x_i) = \frac{active\_bid(x_i)}{x_i}$$

Όταν στην  $active\_bid(x_i) = a_i \cdot x_i^2 + b_i \cdot x_i + c_i$ , ο όρος  $a$  είναι μηδενικός τότε το σημείο υπολογισμού είναι το τεχνικό μέγιστο της εξεταζόμενης μονάδας, ή η μέγιστη ισχύς που απομένει να εξυπηρετηθεί από την εξεταζόμενη μονάδα, αν αφαιρεθούν τα τεχνικά ελάχιστα των ήδη ενταγμένων μονάδων. Αν όμως ο όρος  $a$  δεν είναι μηδενικός, υπάρχουν τιμές αγοράς για τις οποίες αν και οι μονάδες δεν είναι οι πιο οικονομικές σε σχέση με το δίκτυο, αν φορτιστούν στη μέγιστη τιμή τους υπάρχουν σημεία λειτουργίας για τα οποία το κόστος παραγωγής τους είναι μικρότερο. Με την ίδια λογική ενδέχεται το μέσο κόστος στο μέγιστο φορτίο να είναι μικρότερο, από την αντίστοιχη τιμή αγοράς ενέργειας από το δίκτυο, αλλά το κόστος μεταβολής κατά 1kWh για τη μονάδα αυτή να είναι μεγαλύτερο από ότι η τιμή του δικτύου. Αν λοιπόν, όπως αναμένεται χωρίς τις τοπικές μονάδες παραγωγής, το δίκτυο μπορεί να ικανοποιήσει τη ζήτηση του μικροδικτύου, υπάρχουν τιμές αγοράς για τις οποίες δεν είναι συμφέρον να παρέχεται όλη η ισχύς από τις τοπικές μονάδες παραγωγής αν και έχουν μικρότερο μέσο κόστος παραγωγής στην πλήρη ισχύ τους. Αντίθετα μπορούν να υπάρξουν τιμές αγοράς για τις οποίες αν και οι τοπικές μονάδες παραγωγής έχουν υψηλότερο μέσο κόστος παραγωγής, εν τούτοις κάποια έγχυση ισχύος από τις τοπικές μονάδες να μπορεί να μειώσει περαιτέρω το κόστος.

Για κάθε μονάδα λοιπόν με πλήρη μορφή συνάρτησης προσφοράς  $active\_bid(x_i) = a_i \cdot x_i^2 + b_i \cdot x_i + c_i$ , το βέλτιστο σημείο λειτουργίας σε σχέση με το δίκτυο θα δίνεται από την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης  $active\_bid(x_i) - Ax_i$ , η οποία προκύπτει να είναι  $x_{opt\_i} = \frac{A - b_i}{2a_i}$ , με  $A$  την τιμή αγοράς του δικτύου.

Αν αυτή η τιμή είναι μεγαλύτερη από το τεχνικό μέγιστο, τότε το βέλτιστο σημείο λειτουργίας της μονάδας ως προς το δίκτυο είναι το τεχνικό της μέγιστο και ως προς αυτό γίνονται οι υπολογισμοί στην  $av\_cost(x_i) = \frac{active\_bid(x_i)}{x_i}$ . Αν η τιμή αυτή είναι μικρότερη από το τεχνικό ελάχιστο της μονάδας, τότε η τιμή στην οποία γίνονται οι υπολογισμοί είναι το τεχνικό ελάχιστο της μονάδας.

Αυτή η φιλοσοφία μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τον τοπικό ελεγκτή της μονάδας παραγωγής ώστε να μπορεί να υπολογιστεί η τιμή στην οποία υποβάλλονται προσφορές, η τιμή της παραγωγής που προτίθεται να προσφέρει καθώς και τα όρια παραγωγής ώστε να μην αποζημιώνεται λιγότερο από το κόστος παραγωγής τους.

Αφού έχουν υπολογιστεί για όλες τις μονάδες οι τιμές της συνάρτησης  $av\_cost(x_i) = \frac{active\_bid(x_i)}{x_i}$ , οι τιμές αυτές μπαίνουν στη λίστα προτεραιότητας και ταξινομούνται κατά αύξουσα σειρά. Στη συνέχεια αφαιρούνται από τη συνολική ζήτηση οι ποσότητες  $x_{opt\_i}$  όταν κάθε μια μονάδα ορίζεται ως ενταγμένη. Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν είτε για την πολιτική 1 έχει εξυπηρετηθεί όλη η ζήτηση, είτε όταν η μονάδα που πρόκειται να ενταχθεί είναι το δίκτυο για την πολιτική 2.

### 6.1.7.2 Οικονομική κατανομή (Economic Dispatch)

Μετά από την επιλογή του προγράμματος ένταξης μονάδων, η συνάρτηση οικονομικής κατανομής έχει ως στόχο τον καθορισμό των σημείων λειτουργίας των μονάδων που αποφασίστηκε να ενταχθούν. Τα βήματα για την επίλυση αυτού του προβλήματος συνοψίζονται παρακάτω:

1. Λαμβάνονται οι τεχνικοί περιορισμοί των μονάδων των οποίων οι προσφορές έχουν γίνει αποδεκτές από τη διαδικασία ένταξης μονάδων. Οι ενταγμένες μονάδες λειτουργούν τουλάχιστον στο τεχνικό τους ελάχιστο. Αν έχει αποφασιστεί να αγοραστεί ενέργεια από το δίκτυο τότε το δίκτυο θεωρείται ως μια «φανταστική» μονάδα με τεχνικό μέγιστο την ισχύ της διασύνδεσης.
2. Αφαιρούνται από το σύνολο της ζήτησης οι αναμενόμενες παραγωγές των μονάδων των οποίων η έξοδος δεν μπορεί να ρυθμιστεί, όπως π.χ. μονάδες ΑΠΕ, καθώς και οι προσφορές των φορτίων που έχουν γίνει αποδεκτές.
3. Λαμβάνονται υπ' όψιν οι περιορισμοί για την αναγκαστική παραγωγή των τοπικών μονάδων παραγωγής για περιορισμούς τάσης αν προβλέπεται τέτοια πολιτική μέσα στο μικροδίκτυο. Οι περιορισμοί ασφαλείας έχουν ήδη ληφθεί υπ' όψιν κατά την επιλογή των μονάδων και πλέον αναμένεται η οικονομικότερη λειτουργία.

Στη συνέχεια επιλέγονται τα σημεία λειτουργίας των ενταγμένων μονάδων παραγωγής των οποίων η έξοδος μπορεί να ρυθμιστεί και η υπολειπόμενη ισχύς αγοράζεται από το δίκτυο αν έχει αποφασιστεί κάτι τέτοιο. Για τον καθορισμό αυτών των σημείων λειτουργίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος της οικονομικής κατανομής. Για παράδειγμα αν χρησιμοποιούνται συνεχείς συναρτήσεις για τις προσφορές των μονάδων, τότε για την επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέθοδοι, όπως ο Σειριακός Τετραγωνικός Προγραμματισμός – Sequential Quadratic Programming (SQP) που είναι γενίκευση της μεθόδου Newton ή άλλες μαθηματικές μέθοδοι. Αν οι συναρτήσεις των προσφορών είναι κυρτές, όπως αποδεικνύεται ότι είναι οι συναρτήσεις δευτέρου βαθμού με  $\alpha > 0$ , τότε τέτοιου είδους μέθοδοι εγγυώνται την ύπαρξη ολικού βέλτιστου.

Μέθοδοι που στηρίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη μπορούν κάλλιστα να χρησιμοποιηθούν αν και σε συνεχείς συναρτήσεις δεν εγγυώνται τη βέλτιστη λύση. Η χρήση τους όμως είναι σχεδόν μονόδρομος στην περίπτωση που οι προσφορές των φορτίων είναι ασυνεχείς συναρτήσεις.

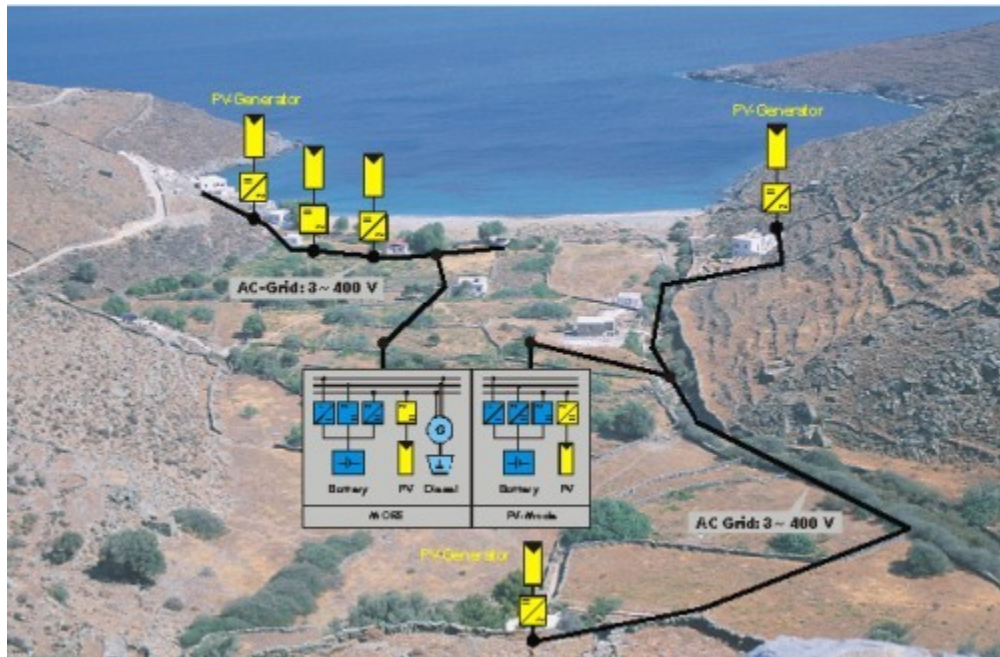
Επειδή αναμένονται, στις περισσότερες περιπτώσεις, οι προσφορές να είναι απλά γραμμικές συναρτήσεις της μορφής  $b_i \cdot x_i + c_i$ , η κατάταξη των μονάδων με βάσει αυτές τις προσφορές σε μια λίστα προτεραιότητας είναι αρκετή συγκρίνοντας απλά τις παραμέτρους  $b_i$  των μονάδων, των

οποίων οι προσφορές έχουν γίνει αποδεκτές, αφού η παράμετρος  $c_i$  θα πληρωθεί ούτως ή άλλως ανεξάρτητα από το ύψος της παραγωγής της μονάδας. Έτσι αναμένεται τέτοιου είδους μονάδες να λειτουργούν στο τεχνικό τους μέγιστο εφόσον κάτι τέτοιο είναι εφικτό [20] [42].

### 6.1.8 Τα μικροδίκτυα στην Ελλάδα

Δυστυχώς πολλά είναι τα προβλήματα που συνδέονται με την διείσδυση των ΑΠΕ και άλλων μικρών μονάδων στο εγχώριο σύστημα παραγωγής και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας και κατ' επέκταση στη δημιουργία των μικροδικτύων. Βασικός παράγοντας είναι η διαφορετική φιλοσοφία πάνω στην οποία χτίστηκε το ελληνικό σύστημα. Ένα σύστημα που μέχρι σήμερα βασίζεται πάνω στην συγκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μεγάλους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς και ακτινωτή μεταφορά προς τις καταναλώσεις με μονόδρομη ροή ισχύος, συναντά μια σειρά εμποδίων που έχουν να κάνουν με τον έλεγχο, την ευστάθεια, τις προστασίες και την αξιοπιστία στην μετατροπή του σε ένα δίκτυο διανεμημένης παραγωγής. Επιπλέον απαιτούνται σημαντικές παρεμβάσεις στο δίκτυο διανομής και ελέγχου, ώστε να μπορούν να διαχειριστούν την διανεμημένη παραγωγή τόσο από τις μονάδες ανανεώσιμων πηγών όσο και από τις άλλες μικρές μονάδες. Θέματα που επίσης χρειάζονται μελέτη είναι η συμβολή των μικροδικτύων που διασυνδέονται με το κεντρικό δίκτυο μέσης ή χαμηλής τάσης στη στάθμη βραχυκύκλωσης αυτού, καθώς και η συμπεριφορά τους σε σφάλματα ή γενικές διακοπές.

Παρά τις δυσκολίες γίνονται προσπάθειες στη χώρα μας για την ένταξη των μικροδικτύων στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Μία από αυτές είναι το πιλοτικό μικροδίκτυο στην Κύθνο. Βρίσκεται στην περιοχή Γαϊδουρομάντρα της Κύθνου και είναι ένα μονοφασικό μικροδίκτυο. Ηλεκτροδοτεί δώδεκα σπίτια σε μία μικρή κοιλάδα της Κύθνου. Το μικροδίκτυο πληρεί τις προϋποθέσεις ασφαλείας που προβλέπονται από τη ΔΕΗ για τη σύνδεση με τα σπίτια. Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι γιατί μελλοντικά το μικροδίκτυο μπορεί να συνδεθεί με το υπόλοιπο δίκτυο του νησιού. Η ισχύς σε κάθε σπίτι που ηλεκτροδοτείται από το μικροδίκτυο ελέγχεται από μία ασφάλεια των 6 Ampere. Ο οικισμός βρίσκεται περίπου 4 χιλιόμετρα μακριά από το πλησιέστερο σημείο της γραμμής μέσης τάσης του νησιού. Ένα κτήριο είκοσι τετραγωνικών μέτρων κατασκευάστηκε στη μέση του οικισμού για να τοποθετηθούν οι μπαταρίες και οι αντιστροφείς τους, η νηξελογεννήτρια καθώς και ο υπολογιστής ελέγχου και το υλικό επικοινωνίας.



Σχήμα 6.10 Πιλοτικό μικροδίκτυο Κύθνου

Κάθε αντιστροφέας των μπαταριών έχει μέγιστη ισχύ εξόδου τα 3,6 kW. Είναι συνδεδεμένοι παράλληλα επιτρέποντας τη χρήση ενός ή περισσότερων ανάλογα με τις ανάγκες των καταναλωτών. Υπάρχουν επίσης διακόπτες ελέγχου φορτίου που χρησιμοποιούνται στο να μην υποφορτίζονται ή υπερφορτίζονται οι μπαταρίες.

Το σύστημα αποτελείται από 10 kWp φωτοβολταϊκών διαχωρισμένα σε μικρότερα υποσυστήματα, από μία μπαταρία ονομαστικής χωρητικότητας 53 kWh και από μια γεννήτρια diesel με ονομαστική έξοδο 5 kVA. Ένα δεύτερο σύστημα με περίπου 2 kWp βρίσκεται στην ταράτσα του κτηρίου που στεγάζεται ο εξοπλισμός και συνδέεται με ένα αντιστροφέα και μία μπαταρία των 32 kWh. Αυτό το δεύτερο σύστημα παρέχει την απαιτούμενη ισχύ για τον έλεγχο και την επικοινωνία του συστήματος.

## 6.2 ΕΞΥΠΙΝΑ ΔΙΚΤΥΑ

### 6.2.1 Εισαγωγή

Οι νέες προκλήσεις που προέρχονται από την απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας και από τις τεχνολογικές εξελίξεις επιβάλλουν την αναθεώρηση των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. Τα υπάρχοντα δίκτυα έχουν λειτουργήσει καλά έως τώρα αλλά δεν θα είναι επαρκή στο μέλλον. Θα πρέπει να εξασφαλίσουν ασφάλεια και σταθερότητα στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, να εκμεταλλευτούν τις νέες τεχνολογίες και να συμβαδίσουν με τις νέες πολιτικές και τα νέα επιχειρηματικά πλαίσια.

Ο τομέας της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη αντιμετωπίζει νέες ευκαιρίες και προκλήσεις και πρέπει να ανταποκριθεί σε ένα νέο όραμα το οποίο περιλαμβάνει:

- Χριστοκεντρική προσέγγιση
- Ανανέωση και καινοτομία στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας
- Ασφάλεια παροχής ενέργειας
- Απελευθερωμένες αγορές
- Διαλειτουργικότητα μεταξύ των ευρωπαϊκών δικτύων
- Διεσπαρμένη παραγωγή και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας
- Κεντρική παραγωγή
- Περιβαλλοντικά θέματα
- Διαχείριση ζήτησης και κάλυψης αυτής
- Πολιτικά και νομικά θέματα
- Κοινωνικά και δημογραφικά ζητήματα

Στην πραγματοποίηση αυτού του οράματος θα συνδράμουν όλοι, από τους καθημερινούς χρήστες μέχρι τα κυβερνητικά στελέχη. Οι απλοί καταναλωτές, οι πάροχοι ηλεκτρικής ενέργειας, οι ερευνητές και όσοι σχετίζονται με τη δημιουργία των νόμων, εμπλέκονται όλοι στη διασφάλιση του μέλλοντος του ηλεκτρισμού στην Ευρώπη.

Το μέλλον αυτό προβλέπει τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας να είναι:

- Ευέλικτα, δηλαδή να καλύπτουν τις ανάγκες των καταναλωτών και να ανταποκρίνονται στις αλλαγές και τις προκλήσεις του μέλλοντος.
- Προσβάσιμα, δηλαδή να εγγυούνται πρόσβαση των χρηστών σε όλα τα δίκτυα, κυρίως σε ΑΠΕ και σε δίκτυα τοπικής παραγωγής με υψηλή απόδοση και χαμηλές ή μηδενικές εκπομπές άνθρακα.
- Αξιόπιστα, δηλαδή να διασφαλίζουν και να βελτιώνουν την ασφάλεια και την ποιότητα της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας συμβαδίζοντας με τις απαιτήσεις της ψηφιακής εποχής.
- Οικονομικά, δηλαδή παροχή της καλύτερης αξίας μέσω καινοτομιών, αποτελεσματική διαχείριση ενέργειας και ανταγωνισμός επί ίσοις όροις μέσω νομοθετικών ρυθμίσεων.

Η νέα φιλοδοξία είναι τα παγκόσμια δίκτυα ηλεκτρισμού να γίνουν «έξυπνα», βασισμένα πλέον στο Πρωτόκολλο του Ίντερνετ (IP), έτσι ώστε οι καταναλωτές να μπορούν στο μέλλον να παρακολουθούν και να ελέγχουν κατά βούληση την κατανάλωση ενέργειας, μια δυνατότητα που, μεταξύ άλλων, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση καυσίμων, περιορισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και καλύτερη προστασία του περιβάλλοντος.

### 6.2.2 Ορισμός - χαρακτηριστικά

Η αναβάθμιση του υπάρχοντος Ευρωπαϊκού δικτύου με 'έξυπνότερες τεχνολογίες' είναι μία από τις βασικότερες προτεραιότητες ώστε να επιτευχθεί ο τριπλός στόχος που έχει τεθεί ως το 2020 – μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> κατά 20%, χρησιμοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο 20% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας και βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κατά 20%. Σκοπός της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι η διασφάλιση της ποιότητας και της αξιοπιστίας της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας υιοθετώντας τις δομές και τις διαδικασίες, λαμβάνοντας υπόψη την

νέα προσέγγιση της αγοράς ενέργειας και τις νέες νομοθεσίες, δηλαδή ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο σύστημα και αύξηση της απόδοσης μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα έξυπνα δίκτυα (smart grids) είναι ένα μέσο που θα συνδράμει στην επίτευξη του τριπλού στόχου του 2020. Ένα έξυπνο δίκτυο είναι ένα ηλεκτρικό δίκτυο που μπορεί να ενσωματώσει ευφυώς τη συμπεριφορά και τις δράσεις όλων των χρηστών που συνδέονται με αυτό – παραγωγών, καταναλωτών και όσων κάνουν και τα δύο – με σκοπό να διασφαλιστεί αποτελεσματικά η σταθερότητα, η οικονομία και η ασφάλεια της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα έξυπνο δίκτυο, που περιλαμβάνει ένα συνδυασμό λογισμικού και υλικού επιτρέποντας αποτελεσματικότερη ροή ισχύος και δίνοντας τη δυνατότητα στους καταναλωτές να ελέγχουν τη ζήτηση ενέργειας, είναι ένα σημαντικό κομμάτι της λύσης για το μέλλον.

Τα έξυπνα ή ευφυή δίκτυα έχουν ως κύριους άξονες την:

- “Ευφυή” συνύπαρξη της κεντρικής και δεσπαρμένης παραγωγής με αποτέλεσμα την μείωση της χρήσης άνθρακα και αποδοτικού χειρισμού της ζήτησης,
- εμπορία ενέργειας και βελτιστοποίηση κόστους μέσω χρονομεταβλητών τιμολογίων και διαφόρων κινήτρων εξαρτώμενων από το μεταβαλλόμενο φορτίο,
- ενεργό συμμετοχή του πελάτη με βάση την επικοινωνία σε δύο κατευθύνσεις και μεγάλη ροή πληροφορίας.

### **6.2.3 Παράγοντες που οδηγούν στην ανάπτυξη των έξυπνων δικτύων στην Ευρώπη**

Η σημερινή εποχή είναι ίσως η πλέον κατάλληλη για την ανάπτυξη των έξυπνων δικτύων. Η απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας σε συνδυασμό με το όλο και αυξανόμενο ενδιαφέρον σε ενεργειακά θέματα καθώς και οι τεχνολογικές εξελίξεις συντελούν προς αυτή την κατεύθυνση. Οι πολιτικές που ακολουθούνται από τις κυβερνήσεις ενθαρρύνουν τις τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας με μειωμένες εκπομπές άνθρακα καθώς και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Παράλληλα οι εξελίξεις στον τομέα της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, της διαχείρισης φορτίου και της επικοινωνίας καθώς και η αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας καθιστούν επιτακτική ανάγκη την επένδυση στη δημιουργία νέων δικτύων. Όλα αυτά οδηγούν στη δημιουργία ενός κοινού οράματος, τη δημιουργία των έξυπνων δικτύων.

Τα νέα αυτά δίκτυα πρέπει να είναι ασφαλή, φιλικά προς το περιβάλλον και να συμφέρουν οικονομικά. Οι παράγοντες που πρέπει να απασχολήσουν τα δίκτυα του μέλλοντος στην Ευρώπη έχουν να κάνουν με:

- Την Ευρωπαϊκή εσωτερική αγορά. Η εξέλιξη της αγοράς σε συνδυασμό με ένα αποδοτικό νομοθετικό πλαίσιο θα βοηθήσει στην οικονομική εξέλιξη της Ευρώπης. Ο αυξανόμενος ανταγωνισμός θα οδηγήσει σε νέες τεχνολογικές εξελίξεις και καινοτομίες. Έτσι η εσωτερική αγορά της Ευρώπης αναμένεται να παρέχει πολλά οφέλη στους Ευρωπαίους πολίτες όπως ένα μεγαλύτερο εύρος υπηρεσιών που θα οδηγήσει σε μείωση των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας.
- Την ασφάλεια και την ποιότητα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Η σύγχρονη κοινωνία εξαρτάται πολύ από την αδιάλειπτη παροχή ενέργειας. Η παλαιότητα των δομών της μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας απειλούν την ασφάλεια, την ποιότητα και



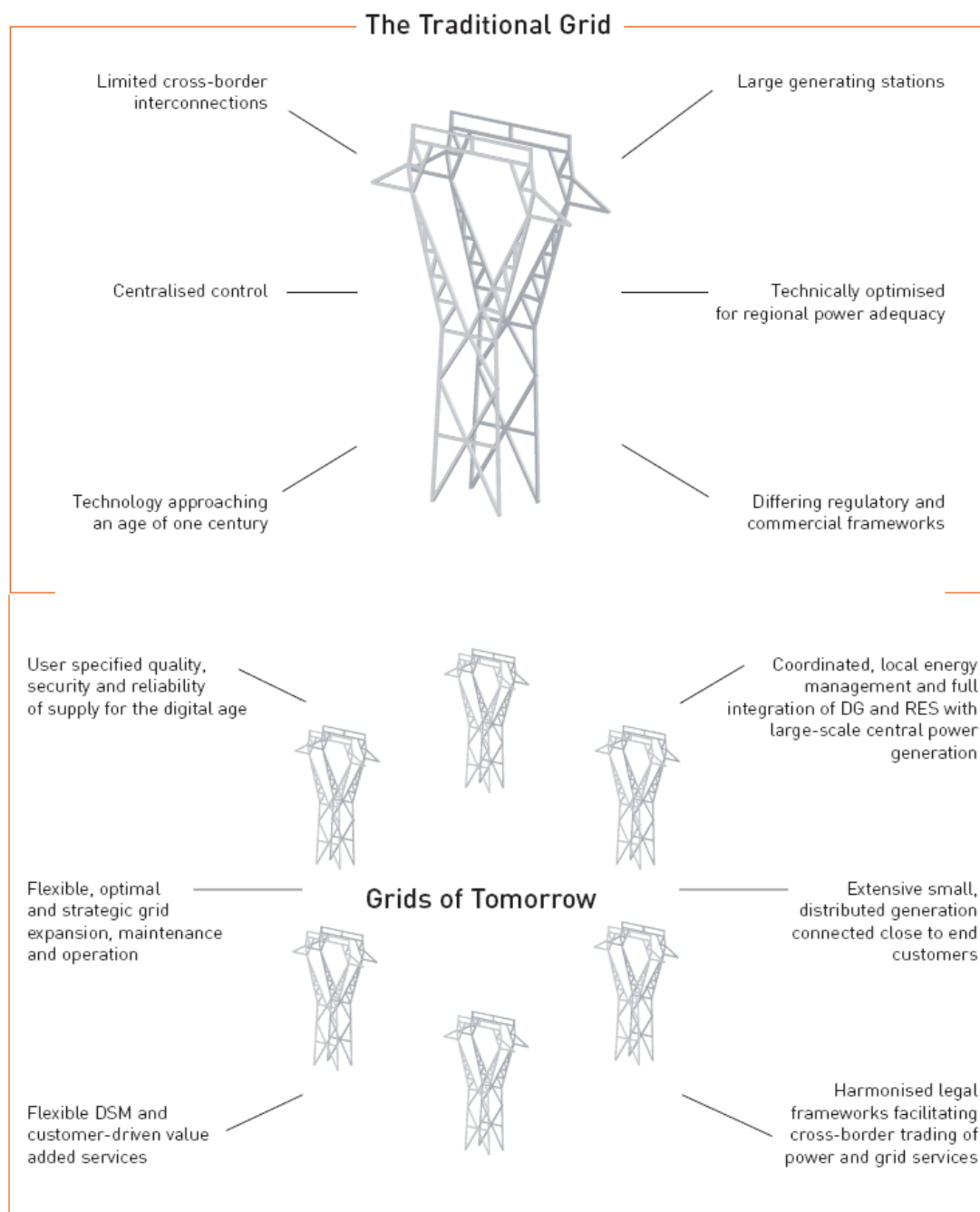
την αξιοπιστία της παροχής αυτής. Παράλληλα η μειωμένη διαθεσιμότητα ορυκτών καυσίμων σε αρκετές χώρες είναι ένας ανησυχητικός παράγοντας.

- Το περιβάλλον. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα των ορυκτών καυσίμων είναι ότι κατά την καύση τους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εκλύουν τοξικά αέρια (διοξείδιο του άνθρακα και του θείου, νιτρικά οξείδια) βλαβερά για το περιβάλλον. Τα αέρια του θερμοκηπίου, όπως αποκαλούνται, συμβάλλουν στην κλιματική αλλαγή η οποία είναι μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις και απειλές που αντιμετωπίζει η ανθρωπότητα. Υπάρχει μεγάλη ανάγκη για έρευνα με στόχο την εύρεση αποδοτικών τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας που θα βοηθήσουν παράλληλα στην επίτευξη των στόχων για το Πρωτόκολλο του Κιότο.

#### **6.2.4 Η μετάβαση από το σήμερα στο αύριο**

Τα υπάρχοντα δίκτυα βασίζονται κυρίως σε μεγάλους κεντρικούς σταθμούς παραγωγής που σε συνδέονται με συστήματα μεταφοράς υψηλής τάσης τα οποία με τη σειρά τους συνδέονται με συστήματα μέσης και χαμηλής τάσης δίκτυα διανομής. Η διανομή και η μεταφορά της ενέργειας γίνεται κατά κύριο λόγο μονοπωλιακά από δημόσιους φορείς ενώ αντίθετα στον τομέα της παραγωγής υπάρχει μεγάλος ανταγωνισμός.

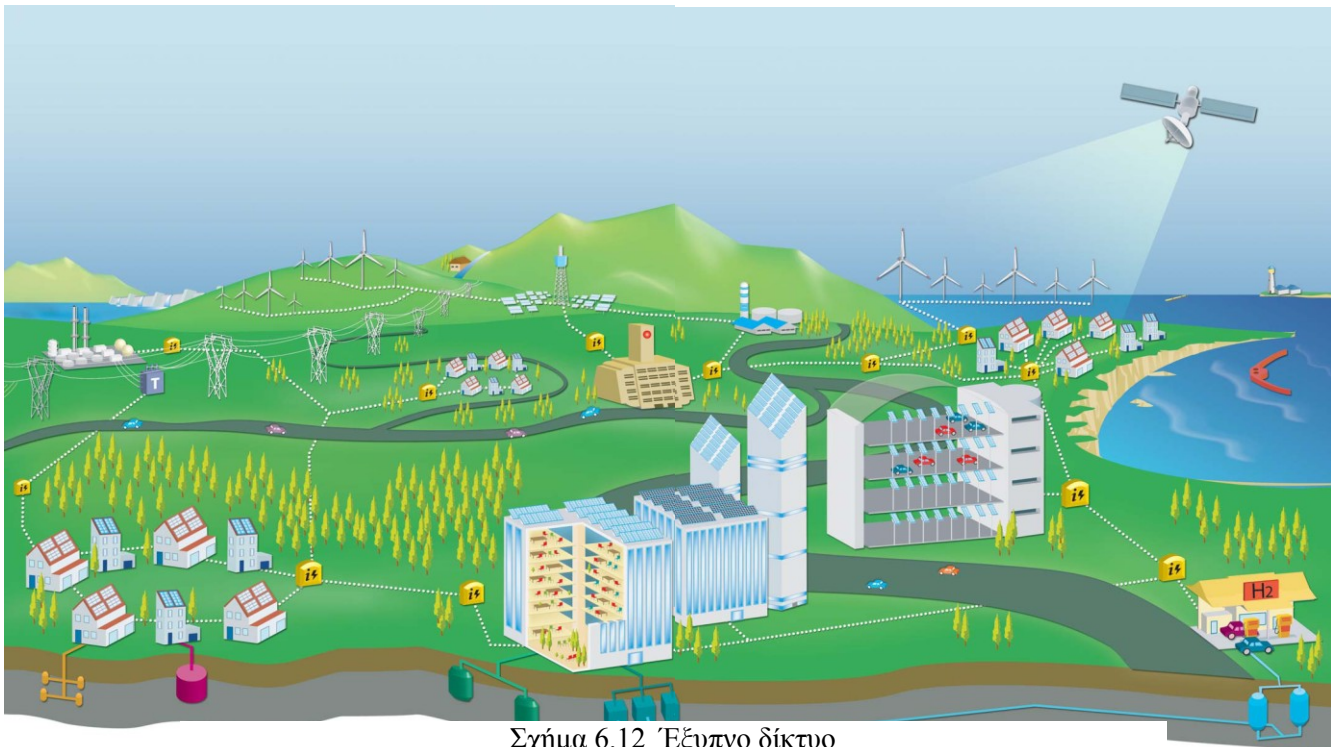
Η παροχή ισχύος και ο έλεγχος του δικτύου γίνονται στα σημερινά δίκτυα από κεντρικές εγκαταστάσεις και έτσι ελέγχονται διάφορες περιοχές από ένα μέρος. Υπάρχει λίγο έως καθόλου συμμετοχή του καταναλωτή και απουσιάζει εντελώς η επικοινωνία. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται υπάρχουν σχεδόν για ένα αιώνα και τα δίκτυα έχουν σχεδιασθεί να λειτουργούν βέλτιστα για τοπική κάλυψη. Οι διασυνδέσεις αναπτύχθηκαν κυρίως για αμοιβαία υποστήριξη μεταξύ χωρών και περιφερειών σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης αλλά χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για εμπορικούς λόγους. Η διαφορά ανάμεσα στα υπάρχοντα δίκτυα διανομής και σε αυτά του μέλλοντος φαίνεται στην εικόνα 1.



Σχήμα 6.11 Δίκτυα του σήμερα και του αύριο

Τα μελλοντικά δίκτυα διανομής θα έχουν ενεργητικό ρόλο και πρέπει να εξασφαλίζουν αμφίδρομη ροή ισχύος. Τα Ευρωπαϊκά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργούν πλέον σε ένα πλαίσιο μοντέλου αγοράς στο οποίο οι μονάδες παραγωγής διανέμονται σύμφωνα με τις δυνατότητες της κάθε αγοράς και το κέντρο ελέγχου του δικτύου αναλαμβάνει ένα γενικό ρόλο εποπτείας (εξισορρόπηση ροής ενεργού ισχύος, έλεγχος σταθεροποίησης τάσης κλπ). Από την άλλη πλευρά, τα δίκτυα διανομής δεν έχουν αλλάξει πολύ και τείνουν να είναι ακτινικά με ροή ισχύος προς μία κατεύθυνση και έχοντας παθητική λειτουργία. Ο κύριος ρόλος τους είναι η παροχή ενέργειας στους τελικούς καταναλωτές.

Μία μεγάλη ποσότητα ηλεκτρισμού που παράγεται από μεγάλους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής θα προέρχεται από διεσπαρμένη παραγωγή και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Παράλληλα θα πραγματοποιείται και ηλεκτρική αποθήκευση διαχείριση ζήτησης ενέργειας. Επιπλέον μπορεί να χρειασθεί η ύπαρξη εφεδρείας σε περίπτωση ελλιπούς παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές. Ίσως είναι οικονομικά αποδοτικότερο να βρεθεί μία λύση για εξομάλυνση των αιχμών του φορτίου σε πανευρωπαϊκό επίπεδο παρά σε εθνικό. Αυτό όμως προϋποθέτει πολλές αλλαγές στα υπάρχοντα δίκτυα διανομής και μεταφοράς αφού πολλές διασυνδέσεις μεταξύ των χωρών θα είναι απαραίτητες.



Σχήμα 6.12 Έξυπνο δίκτυο

### 6.2.5 Δημιουργία έξυπνων δικτύων

Τα ηλεκτρικά δίκτυα του μέλλοντος θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ευφυή για διάφορους λόγους. Πρώτο απ' όλα επιτρέπουν την ενεργό συμμετοχή του καταναλωτή στην παροχή ηλεκτρισμού. Η διαχείριση φορτίου βοηθάει στην εξοικονόμηση ενέργειας η οποία ανταμείβεται. Ακόμη, καθώς γίνονται νέες διασυνδέσεις μεταξύ των Ευρωπαϊκών χωρών καθίσταται δυνατή η αποτελεσματικότερη λειτουργία του δικτύου λόγω της ανταλλαγής ενέργειας μεταξύ των χωρών. Παράλληλα με τη χρησιμοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θα επιτευχθεί μείωση των περιβαλλοντικών προβλημάτων.

Ο στόχος των έξυπνων δικτύων είναι η αειφόρος ανάπτυξη με τη δημιουργία ενός αποδοτικού δικτύου διανομής δίνοντας έμφαση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και στη διεσπαρμένη παραγωγή. Θα διευκολυνθεί η διασύνδεση περιοχών που έχουν διαφορετικές αλλά συμπληρωματικές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (όπως είναι η αιολική ενέργεια και η ενέργεια από

αντλιοσταμείωση. Η απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας δίνει ώθηση να εκμεταλλευθούν οι εμπορικές ευκαιρίες που παρουσιάζονται.

Το ηλεκτρικό δίκτυο θα γίνει όπως το διαδίκτυο (internet) . Μέχρι το 2020 οι εταιρίες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας θα επιτρέπουν σε όλους να έχουν πρόσβαση στις υπηρεσίες τους όπως είναι η διαχείριση του φορτίου. Οι έξυπνοι μετρητές, τα ηλεκτρονικά ισχύος, τα νέα μέσα επικοινωνίας και η αυξανόμενη συμμετοχή των καταναλωτών θα βοηθήσουν στο να αναπτυχθεί η διαχείριση της κάλυψης ζήτησης σε τοπικό επίπεδο.

Οι υπηρεσίες μέτρησης θα ανοίξουν το δρόμο για πρόσβαση στο δίκτυο του μέλλοντος και θα διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη του τομέα της διαχείρισης φορτίου. Έτσι ηλεκτρονικοί μετρητές, αυτοματοποιημένα συστήματα διαχείρισης μετρητών και τηλεπικοινωνιακά συστήματα θα βοηθήσουν προς αυτή την κατεύθυνση. Το σημαντικό πλεονέκτημα των έξυπνων μετρητών είναι ότι όχι μόνο υπολογίζουν τις καταναλώσεις σε πιο ανεπτυγμένο επίπεδο από τους κλασικούς μετρητές αλλά το ότι επικοινωνούν με το ηλεκτρικό δίκτυο και αποστέλλουν τις πληροφορίες που συλλέγουν για σκοπούς παρακολούθησης (monitoring) και χρεώσεων. Για αυτό το σκοπό το συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης υιοθέτησε το τρίτο ενεργειακό πακέτο τον Απρίλιο του 2009. Σύμφωνα με αυτό έξυπνοι μετρητές πρέπει να έχουν εγκατασταθεί τουλάχιστον στο 80% των οικιακών καταναλωτών μέχρι το 2020 και στο 100% μέχρι το 2022.

Ανεπτυγμένα ηλεκτρονικά ισχύος θα επιτρέπουν τη λειτουργία των ηλεκτρογεννητριών και των κινητήρων σε μεταβλητές στροφές ώστε να αυξηθεί συνολικά η απόδοση και η ποιότητα της παροχής ισχύος. Παράλληλα μπορούν να επεκτείνουν την λειτουργία των γραμμών υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος (HVDC), χρησιμοποιώντας για παράδειγμα υπεραγώγιμα καλώδια τα οποία θα βελτιώσουν τη μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Η ευρυζωνική επικοινωνία θα χρησιμοποιηθεί για να υπάρχει εικονική πρόσβαση σε όλους τους σταθμούς παραγωγής και σε όλα τα φορτία σε κάθε επίπεδο ισχύος με πολύ χαμηλό κόστος. Αυτό θα οδηγήσει στην εφαρμογή νέων στρατηγικών, όπως είναι η δημιουργία εικονικών σταθμών παραγωγής ή η καθιέρωση αγορών ακόμη και για μικρούς παραγωγούς ή καταναλωτές.

Για μία επιτυχή μετάβαση στα έξυπνα δίκτυα απαραίτητη είναι η συμμετοχή όλων. Κυβερνήσεις, νομοθέτες, καταναλωτές, παραγωγοί, έμποροι, εταιρίες διανομής και μεταφοράς, κατασκευαστές ηλεκτρολογικού εξοπλισμού και πάροχοι υπηρεσιών πληροφορικής και επικοινωνιών πρέπει όλοι να συμμετέχουν ενεργά. Παράλληλα σημαντική είναι και η δημιουργία πιλοτικών προγραμμάτων, όχι μόνο σε τεχνικό επίπεδο αλλά και σε οργανωτικό. Για παράδειγμα, οι νομοθετικές διατάξεις πρέπει να ανανεωθούν με τρόπο ώστε να παρέχουν κίνητρα για νέες εξελίξεις.

Για την επιτυχή ανάπτυξη των έξυπνων δικτύων πρέπει:

- Οι υποδομές και ο εξοπλισμός που θα εγκατασταθεί να μην χρειάζονται συχνή αντικατάσταση και να αντέχουν στο χρόνο.
- Να γίνει μία εναρμόνιση των αγορών, των τεχνικών προδιαγραφών και των νομοθετικών πλαισίων κάθε χώρας.
- Να αποφευχθεί η δημιουργία απομονωμένων εξελίξεων αφού δεν θα είναι αποτελεσματικές εξαιτίας της πολυπλοκότητας των δικτύων.
- Να αντιμετωπισθεί το ζήτημα της επάρκειας του εξειδικευμένου προσωπικού που θα βοηθήσει στην ανάπτυξη πρωτοποριακών τεχνολογιών.

### 6.2.6 Έξυπνοι μετρητές

Αναφέρθηκε προηγουμένως ότι οι έξυπνοι μετρητές θα συνδράμουν κατά πολύ στη δημιουργία και την εξέλιξη των έξυπνων δικτύων. Ουσιαστικά ένας έξυπνος μετρητής είναι μία συσκευή η οποία μετράει την ενέργεια που χρησιμοποιείται και στέλνει τις πληροφορίες στο σύστημα και από εκεί καταλήγουν στον πελάτη, ενημερώνοντας τον για την εκάστοτε κατανάλωση του και το αντίστοιχο κόστος αυτής. Οι έξυπνοι μετρητές έχουν τη δυνατότητα αμφίδρομης επικοινωνίας, συνήθως, δυνατότητα δηλαδή εκτός από την αποστολή δεδομένων, και την λήψη εντολών. Αποτελούν ένα οικονομικό τρόπο για μέτρηση και παρακολούθηση της κατανάλωσης, που επιτρέπει στην καλύτερη ρύθμιση της παραγωγής βασισμένη σε ημερήσια δεδομένα πραγματικού χρόνου (εξοικονόμηση ενέργειας και χρημάτων-μικρότερες επενδύσεις σε δίκτυα διανομής). Στόχος είναι με τους έξυπνους μετρητές οι χρεώσεις στους καταναλωτές να γίνεται βάσει του ακριβούς ποσού ενέργειας που έχει καταναλωθεί.

Οι έξυπνοι μετρητές θα έχουν την δυνατότητα να μετρούν άμεσα την κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος και να μεταδίδουν τις μετρήσεις στις βάσεις δεδομένων στο κέντρο διαχείρισης. Ο καταναλωτής μπορεί οποιαδήποτε στιγμή να έχει γνώση της πραγματικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Σε συνθήκες απελευθερωμένης αγοράς, οι εταιρίες ηλεκτρικής ενέργειας θα έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνούν με τους καταναλωτές μέσω μηνυμάτων πάνω στον έξυπνο μετρητή και να προσφέρουν μειωμένες χρεώσεις κιλοβατώρας ή να κάνουν προσφορές ώστε να καταρτίσουν ειδικά προγράμματα χρέωσης με βάση τις ώρες κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Η αύξηση της τιμής της κιλοβατώρας σε περιόδους αιχμής είναι μια μέθοδος που μπορεί να μειώσει την αντίστοιχη ζήτηση με αποτέλεσμα τεράστιο όφελος τόσο για τον παραγωγό όσο και την γενικότερη πολιτική εξοικονόμησης. Με την αυτόματη αναγνώριση μετρητή, ο διαχειριστής θα είναι σε θέση να γνωρίζει σε πραγματικό χρόνο την κατανάλωση ενέργειας κάθε οικίας, επιχείρησης, βιομηχανίας κτλ, γεγονός που αποτελεί τεράστιο όφελος και εξοικονόμηση οικονομικών και ανθρωπίνων πόρων, αφού μεγάλος αριθμός υπαλλήλων της ΔΕΗ απασχολείται για τη μέτρηση της ηλεκτρικής ενέργειας στους μετρητές ή υποθέτει ένα ποσό κατανάλωσης με βάση στατιστικά δεδομένα και σε επόμενους λογαριασμούς διορθώνει τις αποκλίσεις από την πραγματικότητα, γεγονός που μειώνει την αξιοπιστία του παρόχου και προβληματίζει τους πελάτες ως προς το ύψος των λογαριασμών τους.

### 6.2.7 Μοντέλο Ίντερνετ

Ένα πιθανό μοντέλο ανάπτυξης των ηλεκτρικών δικτύων του μέλλοντος είναι ανάλογο με αυτό του διαδικτύου, με την έννοια ότι η λήψη αποφάσεων είναι κατανεμημένη και ότι υπάρχει ροή προς όλες τις κατευθύνσεις. Έτσι όχι μόνο ο πάροχος ηλεκτρικής ενέργειας για έναν καταναλωτή μπορεί να ποικίλει από τη μία χρονική περίοδο στην άλλη αλλά και η λειτουργία του δικτύου μπορεί να ποικίλει καθώς το δίκτυο αποφασίζει από μόνο του για τη διαμόρφωση του. Ένα τέτοιο

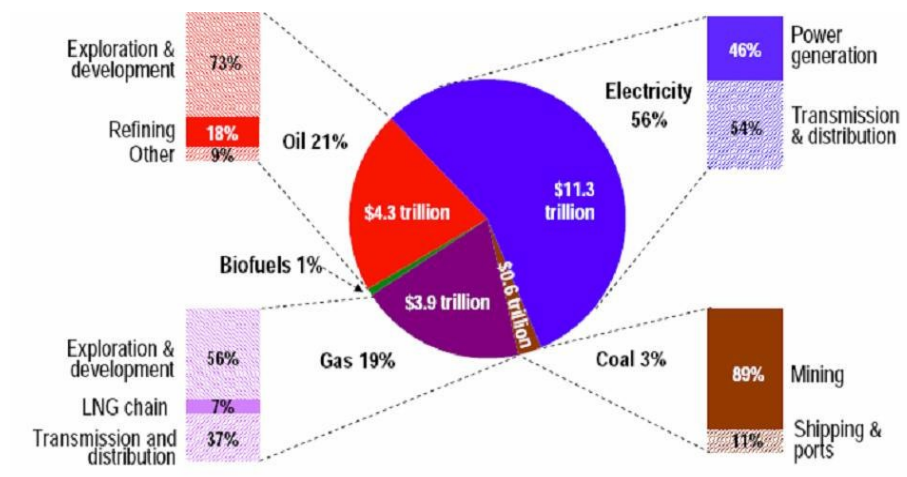
σύστημα έχει υψηλές τεχνολογικές απαιτήσεις σε υλικό και λογισμικό καθώς και σε πρωτόκολλα διαχείρισης επικοινωνιών.

Τα νέα αυτά δίκτυα θα διευκολύνουν την διεσπαρμένη παραγωγή, την διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τη διαχείριση φορτίου καθώς και την ευέλικτη ηλεκτρική αποθήκευση. Παράλληλα θα δημιουργήσουν ευκαιρίες για νέα είδη εξοπλισμού και υπηρεσιών καθώς και νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες που θα στηρίζονται στις νέες πηγές ενέργειας, στις νέες καταναλωτικές συνήθειες και στην καινούργια νομοθεσία σχετικά με τα ενεργειακά θέματα.

Για να είναι ευκολότερη η προσέγγιση του διαδικτυακού μοντέλου είναι απαραίτητο να επικεντρωθούμε σε διάφορες μελέτες που πραγματοποιούνται ανά την Ευρώπη, όπως είναι τα ενεργά δίκτυα διανομής. Η βασική λειτουργία αυτών των δικτύων είναι να ενώσει τους σταθμούς παραγωγής με τις ανάγκες των καταναλωτών με τρόπο ώστε να επιτρέπει και στους δύο να αποφασίζουν για το πώς θα λειτουργούν πιο αποτελεσματικά σε συνθήκες πραγματικού χρόνου. Για να πραγματοποιηθεί κάτι τέτοιο χρειάζεται συνεχής έλεγχος ροής ισχύος και έλεγχος τάσης καθώς και νέα εξελιγμένα συστήματα επικοινωνίας.

### 6.2.8 Επενδύσεις για την ανάπτυξη των έξυπνων δικτύων

Σύμφωνα με το Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA – International Energy Agency) οι επενδύσεις για τις υποδομές στον ενεργειακό τομέα από το 2005 έως το 2030 ανέρχονται στα 20,2 τρισεκατομμύρια δολάρια εκ των οποίων πάνω από τα μισά θα διατεθούν για τον τομέα του ηλεκτρισμού. Στο Σχήμα 6.13 φαίνεται αναλυτικά πως θα καταναμηθούν αυτά τα κεφάλαια.



Σχήμα 6.13 Επενδύσεις για τις υποδομές στον τομέα παροχής ενέργειας

### 6.2.9 Τα έξυπνα δίκτυα ανά τον κόσμο

Η ανάπτυξη των ευφυών δικτύων δεν γίνεται μόνο στην Ευρώπη αλλά σε όλο τον κόσμο. Σε αυτό τον τομέα δραστηριοποιείται η γιγάντια αμερικανική εταιρία Cisco, ο κυριότερος στον κόσμο παραγωγός και πάροχος τεχνολογίας και εξοπλισμού για τα δίκτυα Ίντερνετ σε όλο τον κόσμο.

Στο Κολοράντο στην πόλη Μπούλντερ πραγματοποιείται πιλοτικό πρόγραμμα για τη δημιουργία μιας έξυπνης πόλης. Βασικό συστατικό αυτής της πόλης είναι τα έξυπνα σπίτια, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.14.



Σχήμα 6.14 Έξυπνο σπίτι (smart home)

Κύριο όραμα για τα έξυπνα σπίτια είναι η επικοινωνία με το δίκτυο ώστε να λαμβάνουν οι καταναλωτές τον ηλεκτρισμό βάσει των προσωπικών τους αναγκών. Θα έχουν την δυνατότητα να επιλέξουν αν θέλουν να τροφοδοτούνται τα σπίτια τους από 100% πράσινη ενέργεια ή από ένα μίγμα διαφόρων πηγών ενέργειας ή από τη φθηνότερη μορφή ενέργειας με το πάτημα ενός ποντικιού. Τεχνολογίες όπως οι έξυπνοι μετρητές, που δίνουν στον πελάτη την δυνατότητα να επιλέξει ανάμεσα σε διάφορα τιμολόγια πραγματικού χρόνου, καθώς και οι έξυπνες συσκευές, οι οποίες επικοινωνούν με το δίκτυο και αυτόματα τίθενται εντός και εκτός λειτουργίας είναι απαραίτητες για την λειτουργία των έξυπνων σπιτιών. Τα υβριδικά ηλεκτρικά αυτοκίνητα μπορούν επίσης να διαδραματίσουν ένα σημαντικό ρόλο για την ανάπτυξη της έξυπνης πόλης. Γίνονται μελέτες στο πως μπορούν τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα να αποθηκεύουν ενέργεια και να την δίνουν στο σπίτι σε ώρες αιχμής φορτίου. Τέλος εξελιγμένοι αισθητήρες σε όλο το δίκτυο καθώς και ένα σύστημα γρήγορης επικοινωνίας κάνουν το όλο σύστημα να λειτουργεί αποτελεσματικά.

Και άλλες πόλεις ανά τον κόσμο έχουν δραστηριοποιηθεί στον τομέα των έξυπνων δικτύων. Το πρώτο και μεγαλύτερο παράδειγμα είναι στην Ιταλία όπου ολοκληρώθηκε το 2005. Το έργο αυτό στο οποίο για πρώτη φορά χρησιμοποιήθηκαν σε εμπορική κλίμακα οι τεχνολογίες των έξυπνων δικτύων εξοικονομεί ετησίως 500 εκατομμύρια € και το κόστος του ήταν 2,1 δισεκατομμύρια €. Στις ΗΠΑ, στην πόλη Όστιν του Τέξας, γίνονται προσπάθειες για τη δημιουργία έξυπνου δικτύου από το 2003, όπου το ένα τρίτο των χειροκίνητων μετρητών του δικτύου αντικαταστάθηκε με έξυπνους μετρητές οι οποίοι επικοινωνούν μέσω ενός ασύρματου δικτύου. Το ηλεκτρικό δίκτυο της πόλης διαχειρίζεται 200000 συσκευές σε πραγματικό χρόνο (αισθητήρες και έξυπνους μετρητές και θερμοστάτες) και ευελπιστεί μέχρι το 2009 οι συσκευές αυτές να φθάσουν τις 500000. Προσπάθειες ανάπτυξης έξυπνου δικτύου γίνονται και στο Οντάριο του Καναδά.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup>

## ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

### 7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

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 [19].

Όσον αναφορά τώρα την βελτιστοποίηση σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας σκοπός μας είναι να έχουμε όσο το δυνατόν μικρότερες απώλειες σε συνδυασμό με το μικρότερο δυνατό κόστος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που χρειάζεται κάθε στιγμή το σύστημα. Έτσι στην συγκεκριμένη περίπτωση, η αντικειμενική μας συνάρτηση περιέχει την ενεργό ισχύ κάθε μικροπηγής, η οποία για κάθε μικροπηγή δίνεται από μία συνάρτηση κόστους της εκάστοτε μικροπηγής. Σκοπός μας ανάλογα με την περίπτωση είναι είτε να δώσουμε προτεραιότητα στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (για λόγους περιβαλλοντικής πολιτικής) είτε να βελτιστοποιήσουμε βάσει κόστους αποκλειστικά παραγωγές και απώλειες βρίσκοντας το ελάχιστο σημείο του προβλήματος μας μέσω των τεχνικών που χρησιμοποιούμε. Ακολουθεί μία ανάλυση των τεχνικών που χρησιμοποιούνται, πριν περάσουμε στην ανάλυση των τεχνικών που εμείς χρησιμοποιήσαμε, δηλαδή του αρμονικού αλγορίθμου (Harmony Search – HS).

### 7.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

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

Σκοπός είναι η εύρεση ενός διανύσματος  $x$  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.

$$\begin{array}{ll} g_i = 0, & i = 1, 2, \dots \\ y_i \leq 0, & i = 1, 2, \dots \end{array} \quad \text{> } k \quad m \in \square$$

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 περισσότερο 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 βάσει 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.

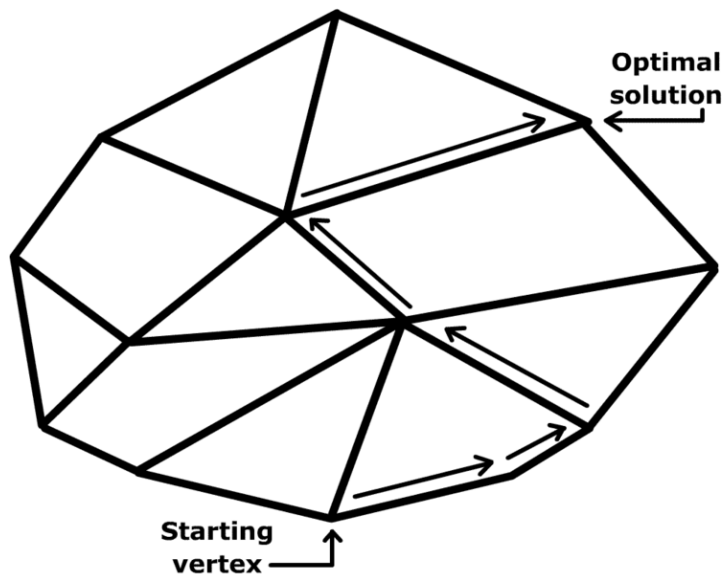
Στα προβλήματα βελτιστοποίησης γίνονται και κάποιοι διαχωρισμοί παρατηρώντας τα προβλήματα τα οποία χρειάζονται να επιλυθούν. Έτσι έχουμε προβλήματα που ανάλογα τις επιτρεπτές τιμές που μπορούν να λάβουν χωρίζονται σε προβλήματα ακεραίου και συνεχών τιμών προγραμματισμού. Ακόμα υπάρχουν τα ντετερμινιστικά 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) [19] [70].

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.

### 7.2.1 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 7.1 Γραφική αναπαράσταση της μεθόδου Simplex που ξεκινάει από έναν κόμβο και διασχίζει τις γραμμικές ανισότητες φτάνοντας στον κόμβο που αποτελεί λύση [71]

Στον μη γραμμικό προγραμματισμό υπάρχουν πολλές μέθοδοι επίλυσης, και κάθε φορά διαλέγουμε την καταλληλότερη με βάση 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 κλασσικές 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).

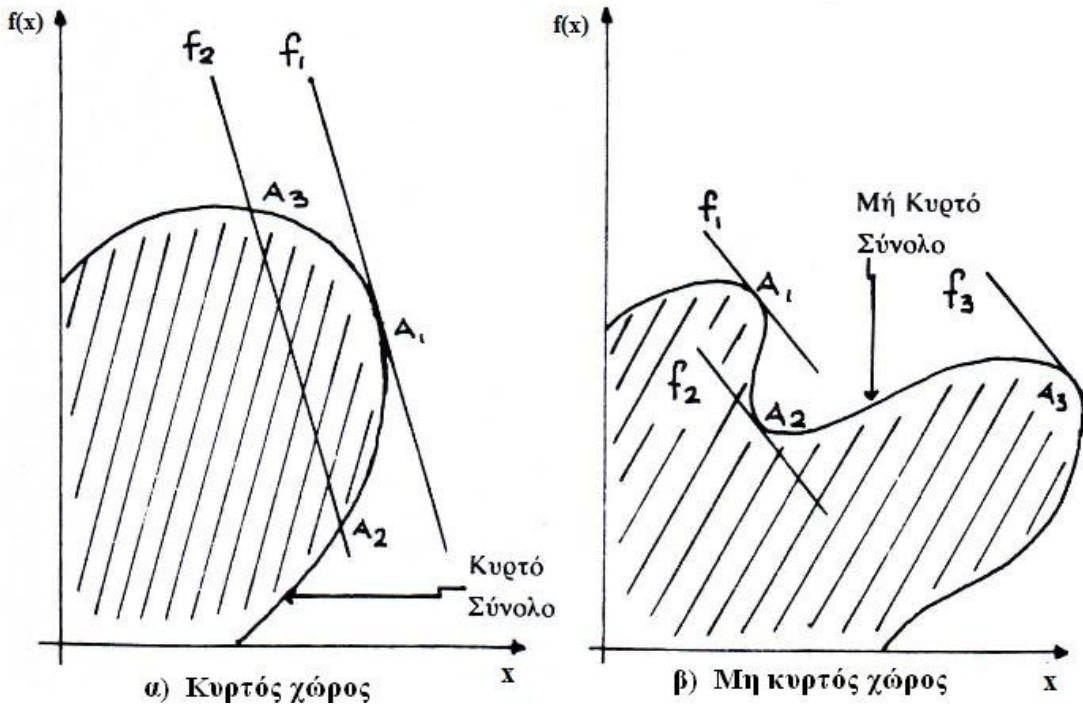
Διαχωρισμοί, ανάλογα με την μέθοδο και το υπολογιστικό υπόβαθρο, που χρησιμοποιεί για να επιλύσει το ζητούμενο πρόβλημα υπάρχουν πολλοί. Για παράδειγμα ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των παρακάτω τεχνικών μπορεί να γίνει ο εξής διαχωρισμός για αντικειμενικές συναρτήσεις χωρίς περιορισμούς :

- ❖ 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 διαφορών ειδών
- ❖ Μέθοδος Συζυγών Διευθύνσεων
- ❖ Μέθοδοι Αναζήτησης

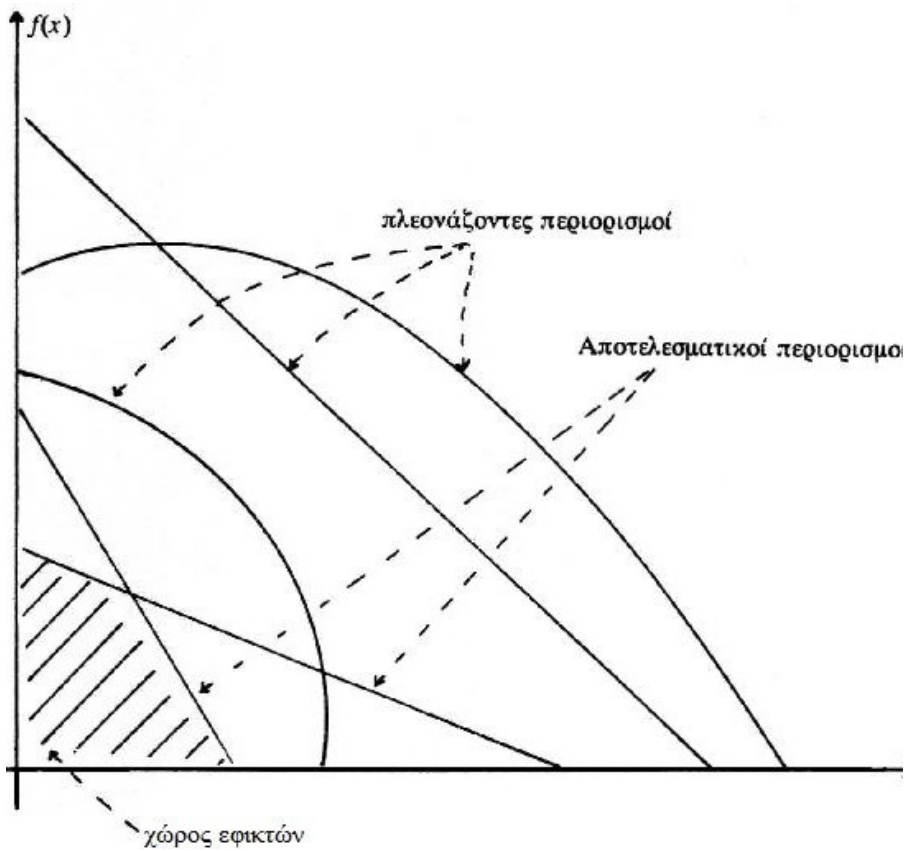
Εδώ να αναφέρουμε πως παρουσιάζονται προβλήματα στις παραπάνω μεθόδους όπως για παράδειγμα η αδυναμία των μεθόδων Newton και Gradient (μέθοδοι κλίσης) να αντιμετωπίσουν προβλήματα με ανισωτικούς περιορισμούς οι οποίοι κάνουν πολυπλοκότερο το πρόβλημα. Αν πάλι λάβουμε ως υπόψη μας τις αντικειμενικές συναρτήσεις με περιορισμούς και γραμμικές προσεγγιστικές μεθόδους τότε προκύπτει ένας διαχωρισμός όπως ο παρακάτω [19] :

- ❖ 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 6.2.1). 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 6.2.1) 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. Τις μεθόδους αυτές που ανήκουν στον κλάδο της Ολικής βελτιστοποίησης (*Global Optimization*) θα αναλύσουμε συνοπτικά παρακάτω πριν επικεντρωθούμε στην δική μας μέθοδο βελτιστοποίησης που καλείται αρμονικός αλγόριθμος (Harmony Search-HS).



Σχήμα 6.2. Χώροι εφικτών λύσεων (κυρτός και μη κυρτός)



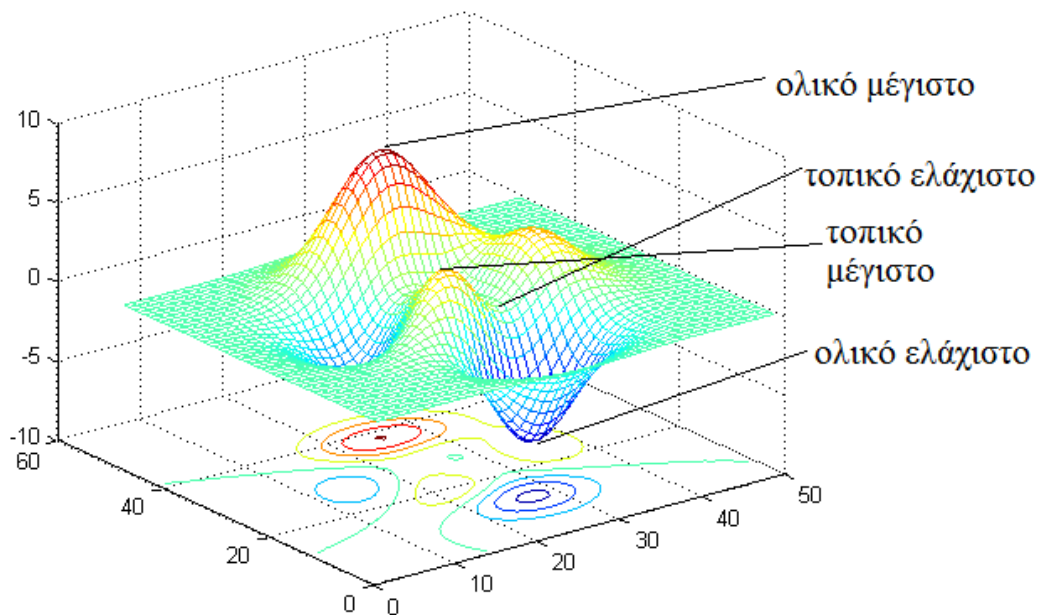
Σχήμα 6.3 Περιορισμοί σε πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού και αποτελεσματικότητά αυτών

## 7.2.2 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 6.4 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 [72]. 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.

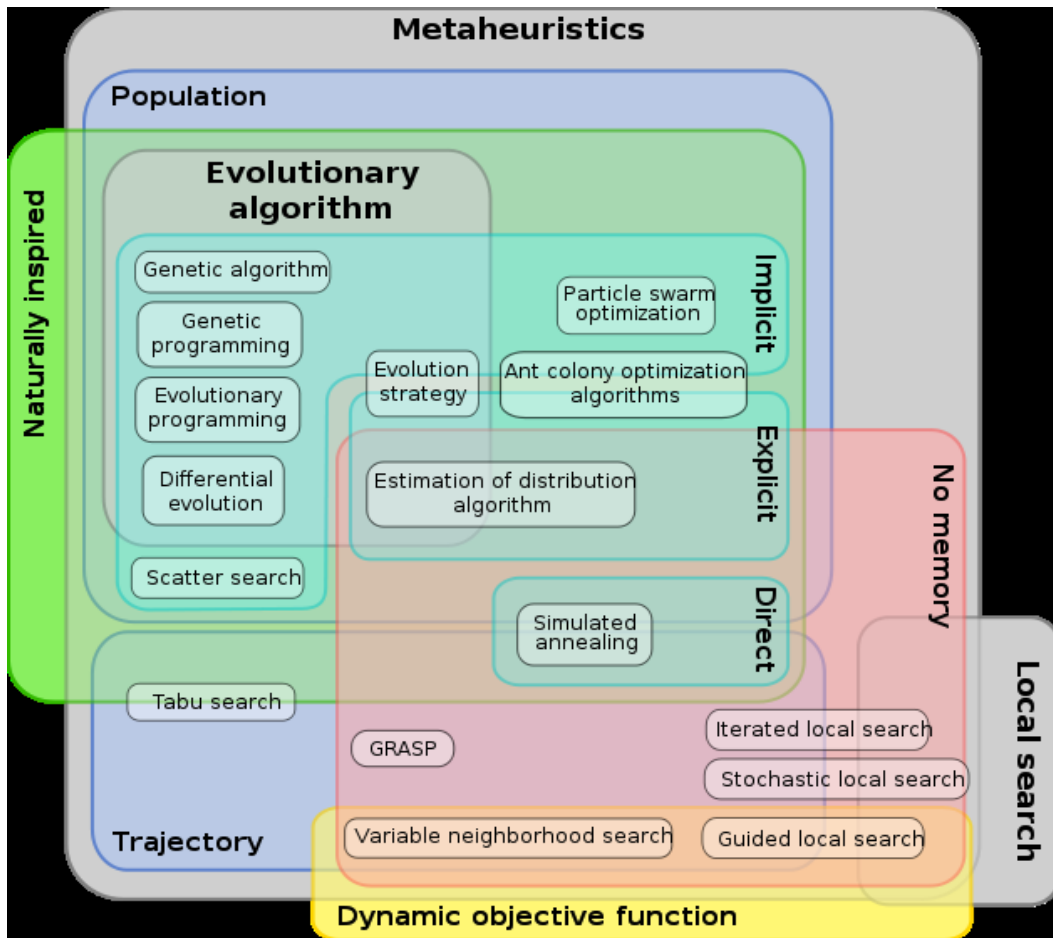
Παρακάτω δίνουμε δύο ορισμούς για τις ευριστικές συναρτήσεις και τις μετά-ευριστικές συναρτήσεις πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση τους.

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 [19].

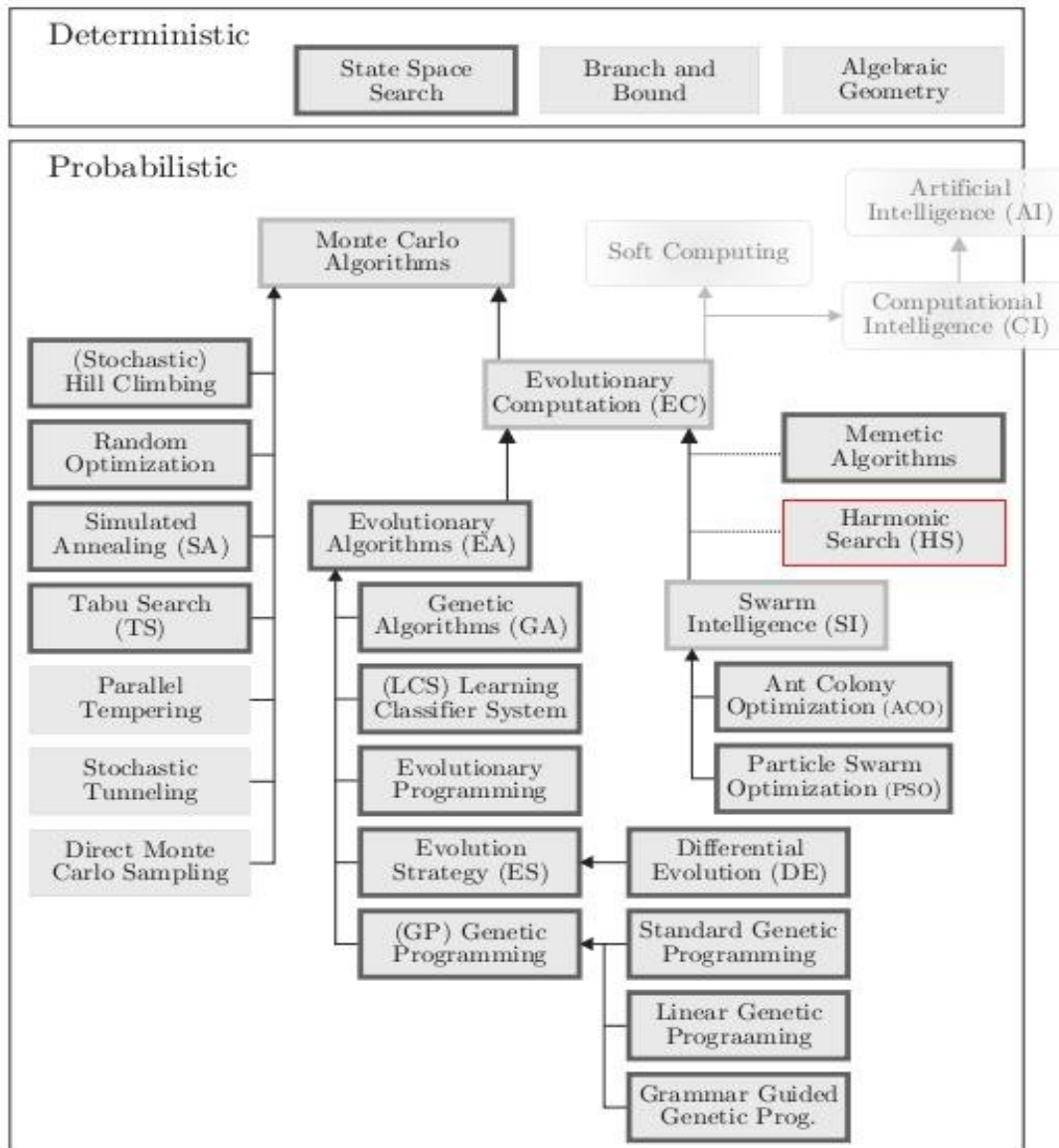
Οι ευριστικές συναρτήσεις (*heuristics*) στην ολική βελτιστοποίηση είναι συναρτήσεις, το αποτέλεσμα των οποίων καθορίζει το σύνολο των πιθανών λύσεων που θα εξεταστούν στη συνέχεια της αναζήτησης. Χρησιμοποιούνται ώστε να επιταχύνουν την διαδικασία εύρεσης μίας λύσης εκεί που η αναλυτική αναζήτηση θα 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 [74]. 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 [74].

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



Σχήμα 6.5 Οικογένεια Μετ-Ευριστικών Αλγορίθμων





Σχήμα 6.6 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 απόπτηση (*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 [75].

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 [70], προγραμματισμός στόχων (Goal programming) [76] 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 ιδιάζουσες συνθήκες που μπορεί να επικρατούν από πρόβλημα σε πρόβλημα.

Στην συνέχεια γίνεται ανάλυση του αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής.

## 7.3 Ο ΑΡΜΟΝΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ (HARMONY SEARCH ALGORITHM)

### 7.3.1 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 – [77] ) 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 [30] [31] [78].

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

### 7.3.2 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).

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

**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  $(1 - HMCR)$ , 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,  $0 \leq par \leq 1$ ), 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  $x'_i \leftarrow x'_i + fw \cdot u(-1,1)$  για συνεχείς μεταβλητές.
- με πιθανότητα  $1 - par$ , δεν συμβαίνει τίποτα.

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

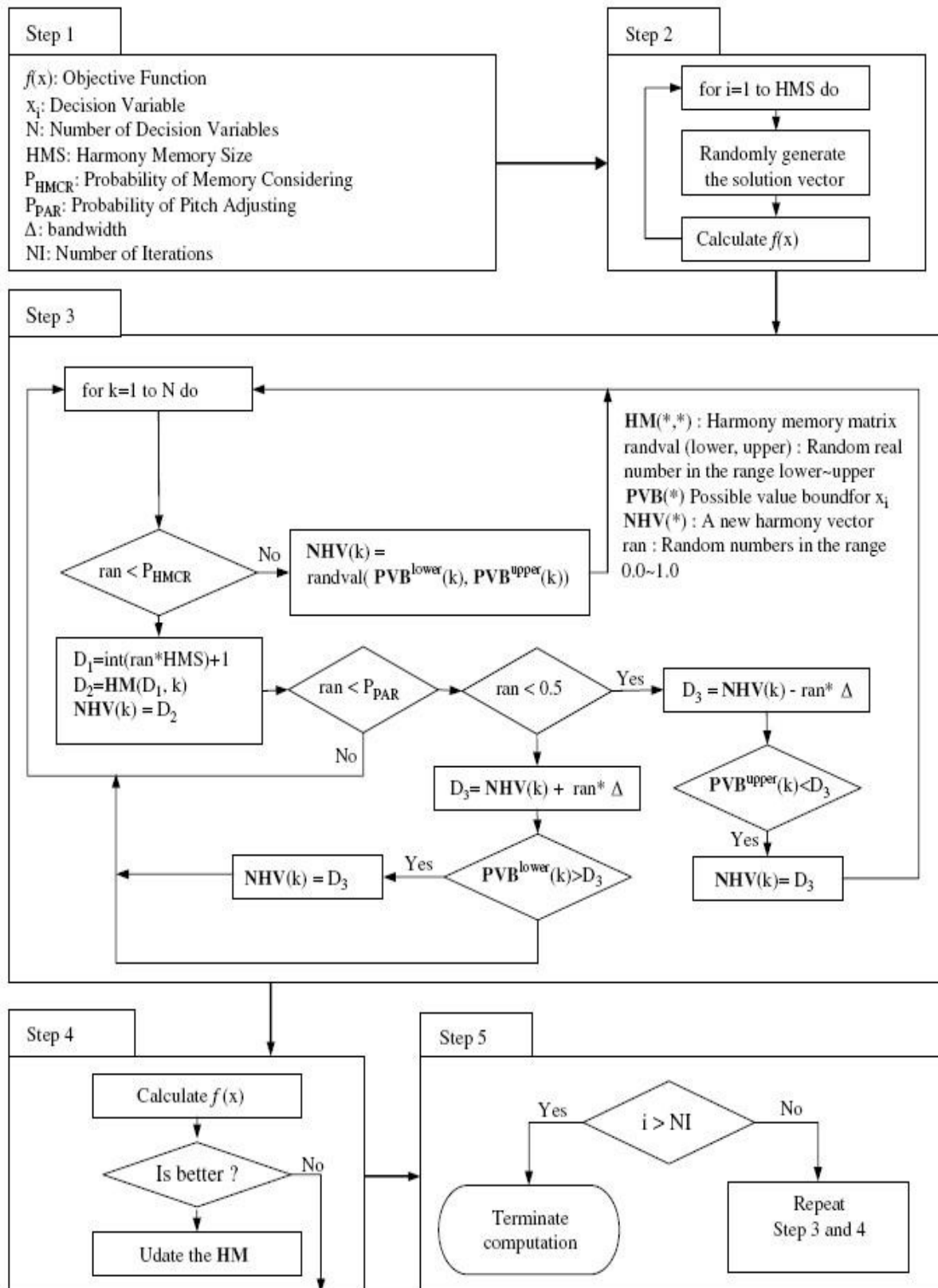
**Βήμα 5:** Επαναλάβετε το βήμα 2 έως το βήμα 4 μέχρι το κριτήριο τερματισμού (π.χ. μέγιστες επαναλήψεις) να ικανοποιηθεί.

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)
- $\rho_{\text{par}}$  = το ποσοστό της επιλογής μιας γειτονικής αξίας. Κυμαίνεται γενικά από 0,1 έως 0,5. (μία τυπική τιμή = 0,3)
- $\delta$  = 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.

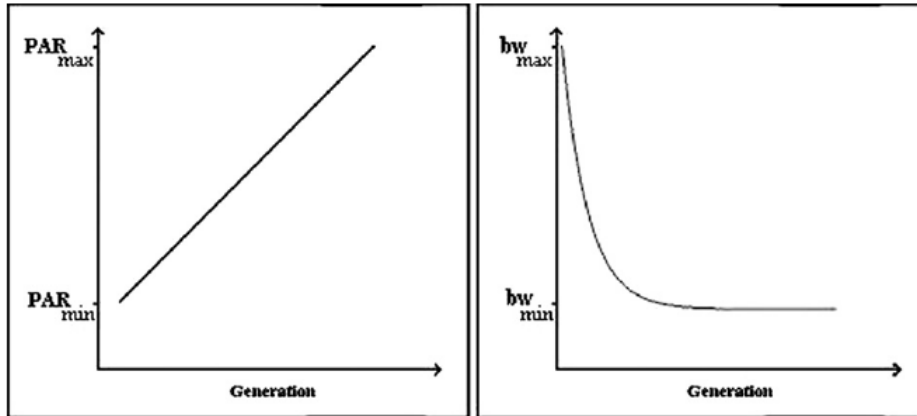
Παρακάτω ακολουθεί ένα αναλυτικό διάγραμμα ροής που απεικονίζει όλα τα βήματα τα οποία εκτελούνται έτσι ώστε ο αρμονικός αλγόριθμος να επιστρέψει μία λύση σε ένα δοθέν πρόβλημα.



Σχήμα 6.7 Διάγραμμα Ροής του Αρμονικού Αλγορίθμου

### 7.3.3 Ο βελτιωμένος αρμονικός αλγόριθμος

Η διαφορά του βελτιωμένου αρμονικού αλγορίθμου αναζήτησης (IHS) από τον απλό είναι η δυναμική αλλαγή των παραμέτρων  $par$  και  $bw$  σε κάθε επανάληψη  $t$ , για  $t=1 \dots NI$ . Για τη βελτίωση της απόδοσης του HS αλγορίθμου και για την απαλοιφή των μειονεκτημάτων που συνοδεύουν τις σταθερές τιμές των  $par$  και  $bw$ , ο IHS αλγόριθμος χρησιμοποιεί τις δύο αυτές παραμέτρους στο Βήμα 3. Αυτές οι παράμετροι αλλάζουν δυναμικά με τον αριθμό των επαναλήψεων όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα [29]:



Οι τιμές των  $par$  και  $bw$  σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

$$PAR(gn) = PAR_{min} + \frac{(PAR_{max} - PAR_{min})}{NI} \times gn,$$

όπου

$PAR$  pitch adjusting rate for each generation

$PAR_{min}$  minimum pitch adjusting rate

$PAR_{max}$  maximum pitch adjusting rate

$NI$  number of solution vector generations

$gn$  generation number

και

$$bw(gn) = bw_{max} \exp(c \cdot gn),$$

$$c = \frac{\text{Ln}\left(\frac{bw_{min}}{bw_{max}}\right)}{NI},$$

όπου

$bw(gn)$  bandwidth for each generation

$bw_{min}$  minimum bandwidth

$bw_{max}$  maximum bandwidth

Ένα μειονέκτημα του IHS είναι ότι ο χρήστης πρέπει να καθορίσει τις τιμές των παραμέτρων  $bw_{min}$ ,  $bw_{max}$ ,  $PAR_{min}$ ,  $PAR_{max}$ , κάτι το οποίο είναι δύσκολο και αποτελεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης από μόνο του.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8<sup>ο</sup>

## ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

### 8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου επιλύθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια με ντετερμινιστικά μοντέλα, τα οποία όμως δεν ανταποκρίνονται στις πραγματικές πρακτικές εφαρμογές. Στις ρεαλιστικές εφαρμογές η ζήτηση φορτίου θεωρείται τυχαία μεταβλητή. Επομένως είναι απαραίτητο να δημιουργηθεί ένα στοχαστικό μοντέλο. Η στοχαστική αναζήτηση και οι τεχνικές βελτιστοποίησης γίνονται όλο και πιο δημοφιλείς την τελευταία δεκαετία σαν εναλλακτική στην αντιμετώπιση πολύπλοκων και δύσκολων προβλημάτων βελτιστοποίησης στη μηχανική.

Στα ντετερμινιστικά μοντέλα γίνεται απλοϊκά η θεώρηση πως το πρόβλημα δεν επηρεάζεται από εσωτερικές και εξωτερικές διαταραχές και ανακρίβειες. Αυτή η ιδανική θεώρηση δεν είναι αληθινή στις πραγματικές εφαρμογές, και οι αποκλίσεις θα μπορούσαν να είναι αρκετά σημαντικές σε ορισμένες περιπτώσεις. Οι αβεβαιότητες μπορεί να προέλθουν από εσωτερικές αλλαγές παραμέτρων ή και από εξωτερικούς συνεχώς μεταβαλλόμενους παράγοντες όπως η ζήτηση φορτίου. Στόχος της βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής παράλληλα με την ικανοποίηση των απαιτήσεων σε ηλεκτρισμό και θερμότητα και των εκάστοτε περιορισμών.

### 8.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Υπάρχουν τρεις τύποι μονάδων παραγωγής: οι μονάδες που παράγουν μόνο ηλεκτρισμό, οι μονάδες συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού και οι μονάδες που παράγουν μόνο θερμότητα. Το κόστος καυσίμου για καθεμιά από αυτές τις μονάδες δίνεται παρακάτω:

- Μονάδες που παράγουν μόνο ηλεκτρισμό:

$$C_i(P_i) = \alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2$$

όπου P είναι η παραγωγή (έξοδος) της μονάδας-i και  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  οι συντελεστές κόστους.

- Μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού-θερμότητας

$$C_j(O_j, H_j) = \alpha_j + \beta_j O_j + \gamma_j O_j^2 + \delta_j H_j + \theta_j H_j^2 + \xi_j O_j H_j$$

όπου O και H η παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας στην έξοδο αντίστοιχα, j ο δείκτης της μονάδας συμπαραγωγής και  $\alpha_j, \beta_j, \gamma_j, \delta_j, \theta_j, \xi_j$  οι συντελεστές κόστους.

- Μονάδες που παράγουν μόνο θερμότητα

$$C_k(T_k) = \alpha_k + \delta_k T_k + \theta_k T_k^2$$

όπου T η παραγωγή θερμότητας στην έξοδο της μονάδας-k και  $\alpha_k, \delta_k, \theta_k$  οι συντελεστές κόστους.

Επομένως το συνολικό κόστος καυσίμου σε ένα σύστημα είναι το άθροισμα του κόστους όλων των παραπάνω μονάδων, δηλαδή:

$J_1 = \sum_{i=1}^{N_p} C_i(P_i) + \sum_{j=1}^{N_c} C_j(O_j, H_j) + \sum_{k=1}^{N_h} C_k(T_k)$  όπου  $N_p, N_c, N_h$  το πλήθος των μονάδων παραγωγής μόνο ηλεκτρισμού, συμπαραγωγής και μόνο θερμότητας αντίστοιχα.

### 8.2.1 Αναμενόμενο κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας

Το στοχαστικό μοντέλο της συνάρτησης  $J_1$  μπορεί να προκύψει θεωρώντας τη ζήτηση ηλεκτρισμού και τη ζήτηση θερμότητας σαν τυχαίες μεταβλητές. Οπότε το αναμενόμενο κόστος παραγωγής θα είναι:

$$\begin{aligned} \bar{J}_1 &= \sum_{i=1}^{N_p} \left[ \alpha_i + \beta_i \bar{P}_i + \gamma_i \left( \bar{P}_i^2 + Var(P_i) \right) \right] \\ &+ \sum_{j=1}^{N_c} \left[ \alpha_j + \beta_j \bar{O}_j + \gamma_j \left( \bar{O}_j^2 + Var(O_j) \right) + \delta_j \bar{H}_j + \theta_j \left( \bar{H}_j^2 + Var(H_j) \right) + \xi_j \left( \bar{O}_j \bar{H}_j + Cov(O_j, H_j) \right) \right] \\ &+ \sum_{k=1}^{N_h} \alpha_k + \delta_k \bar{T}_k + \theta_k \left( \bar{T}_k^2 + Var(T_k) \right) \\ \Rightarrow \bar{J}_1 &= \sum_{i=1}^{N_p} \left[ \alpha_i + \beta_i \bar{P}_i + \gamma_i \left( \bar{P}_i^2 + V(P_i)^2 \cdot \bar{P}_i^2 \right) \right] \\ &+ \sum_{j=1}^{N_c} \left[ \alpha_j + \beta_j \bar{O}_j + \gamma_j \left( \bar{O}_j^2 + V(O_j)^2 \cdot \bar{O}_j^2 \right) + \delta_j \bar{H}_j + \theta_j \left( \bar{H}_j^2 + V(H_j)^2 \cdot \bar{H}_j^2 \right) + \xi_j \left( \bar{O}_j \bar{H}_j + C(O_j, H_j) \cdot \bar{O}_j \bar{H}_j \right) \right] \\ &+ \sum_{k=1}^{N_h} \alpha_k + \delta_k \bar{T}_k + \theta_k \left( \bar{T}_k^2 + V(T_k)^2 \cdot \bar{T}_k^2 \right) \\ \Rightarrow \bar{J}_1 &= \sum_{i=1}^{N_p} \left[ \alpha_i + \beta_i \bar{P}_i + \gamma_i \bar{P}_i^2 \left( 1 + V(P_i)^2 \right) \right] \\ &+ \sum_{j=1}^{N_c} \left[ \alpha_j + \beta_j \bar{O}_j + \gamma_j \bar{O}_j^2 \left( 1 + V(O_j)^2 \right) + \delta_j \bar{H}_j + \theta_j \bar{H}_j^2 \left( 1 + V(H_j)^2 \right) + \xi_j \bar{O}_j \bar{H}_j \left( 1 + C(O_j, H_j) \right) \right] \\ &+ \sum_{k=1}^{N_h} \alpha_k + \delta_k \bar{T}_k + \theta_k \bar{T}_k^2 \left( 1 + V(T_k)^2 \right) \end{aligned}$$

Όπου έγινε η αντικατάσταση  $Var(X) = V(X) \cdot \bar{X}^2$  και  $Cov(X, Y) = \bar{X} \cdot \bar{Y} \cdot C(X, Y)$  με  $V, C$  τους συντελεστές μεταβλητότητας και συσχέτισης αντίστοιχα.

### 8.2.2 Αναμενόμενη απόκλιση παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος

Οι αναμενόμενες αποκλίσεις της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος είναι ανάλογες των «προσδοκιών» του τετραγώνου της ανικανοποίητης ζήτησης, που μπορούν να παρασταθούν ως εξής:

$$\bar{J}_2 = E \left[ \left( P_D + P_L - \sum_{i=1}^{N_p} P_i - \sum_{j=1}^{N_c} O_j \right)^2 \right]$$



όπου  $P_D$ ,  $P_L$  είναι η ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος από το φορτίο και η απώλειες στις γραμμές μεταφοράς αντίστοιχα, και μπορεί περαιτέρω να παρασταθεί ως εξής:

$$\begin{aligned} \bar{J}_2 &= \sum_{i=1}^{N_p} Var(P_i) + \sum_{j=1}^{N_c} Var(O_j) \\ &+ 2 \sum_{i=1}^{N_p-1} \sum_{m=i+1}^{N_p} Cov(P_i, P_m) \\ &+ 2 \sum_{j=1}^{N_c-1} \sum_{m=j+1}^{N_c} Cov(O_j, O_m) \\ &+ \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_c} Cov(P_i, O_j) \end{aligned}$$

### 8.2.3 Αναμενόμενη απόκλιση παραγωγής θερμότητας

Με παρόμοιο τρόπο η αναμενόμενη απόκλιση της παραγωγής θερμότητας μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\bar{J}_3 = E \left[ \left( H_D - \sum_{j=1}^{N_c} H_j - \sum_{k=1}^{N_h} T_k \right)^2 \right] \text{ όπου } H_D \text{ η ζήτηση θερμότητας από το φορτίο, και μπορεί}$$

περαιτέρω να παρασταθεί:

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

### 8.2.4 Περιορισμοί

Ο ισοτικός περιορισμός τόσο της ηλεκτρικής ισχύος όσο και της θερμότητας πρέπει να ικανοποιείται σε όλες τις λειτουργίες του συστήματος. Το ισοζύγιο της ηλεκτρικής ισχύος δίνεται από την εξίσωση:

$$\bar{P}_D + \bar{P}_L - \sum_{i=1}^{N_p} \bar{P}_i - \sum_{j=1}^{N_c} \bar{O}_j = 0 \text{ όπου } \bar{P}_L \text{ η αναμενόμενη απώλεια ισχύος.}$$

Ομοίως το ισοζύγιο θερμότητας είναι το:

$$\bar{H}_D - \sum_{j=1}^{N_c} \bar{H}_j - \sum_{k=1}^{N_h} \bar{T}_k$$

Επιπλέον, οι παραγωγές ηλεκτρισμού και θερμότητας περιορίζονται από την ικανότητα των μονάδων:

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

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

$$\bar{H}_{\min,j} \leq \bar{H}_j \leq \bar{H}_{\max,j}, \quad j = 1, 2, \dots, N_c$$

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

όπου  $\bar{P}_{\min,i}, \bar{P}_{\max,i}, \bar{O}_{\min,j}, \bar{O}_{\max,j}$  οι αναμενόμενες ικανότητες της εξόδου ηλεκτρισμού και  $\bar{H}_{\min,j}, \bar{H}_{\max,j}, \bar{T}_{\min,k}, \bar{T}_{\max,k}$  οι αναμενόμενες ικανότητες της εξόδου θερμότητας.

### 8.2.5 Τελικό πρόβλημα

Συνοψίζοντας, αυτή η μελέτη μπορεί να αντιμετωπιστεί σαν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με πολλές αντικειμενικές συναρτήσεις, το οποίο μπορεί να οριστεί ως εξής:  $Minimize \{J_1, J_2, J_3\}$

## 8.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Στη δικιά μας εφαρμογή, στο δίκτυο των 17 ζυγών, έχουμε θεωρήσει μόνο συμβατικές μονάδες παραγωγής, που παράγουν μόνο ηλεκτρισμό, οπότε η συνάρτηση κόστους καθεμιάς μονάδας είναι  $C_i(P_i) = \alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2$ .

Οπότε σύμφωνα με την παράγραφο 8.2 οι σχέσεις απλοποιούνται στις εξής:

$$\bar{J}_1 = \sum_{i=1}^{N_p} \left[ \alpha_i + \beta_i \bar{P}_i + \gamma_i \bar{P}_i^2 (1 + V(P_i)^2) \right]$$

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

υπό τον ισοτικό περιορισμό  $\bar{P}_D + \bar{P}_L - \sum_{i=1}^{N_p} \bar{P}_i = 0$  και τους ανισοτικούς περιορισμούς

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

Το τελικό πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι το:  $Minimize \{J_1, J_2\}$ , και πιο συγκεκριμένα:

$$J = w_1 \cdot J_1 + w_2 \cdot J_2 \rightarrow Minimize \{J_1\}, \text{ όπου } w_1 \text{ και } w_2 \text{ είναι δύο βάρη.}$$

Επίσης, επειδή ο αρμονικός αλγόριθμος έχει κατασκευαστεί έτσι ώστε να έχει μόνο ανισοτικούς περιορισμούς, οι ισοτικοί περιορισμοί του δικού μας μοντέλου λύθηκαν ως προς μια μεταβλητή η κάθε εξίσωση και το ισοδύναμο αυτής της μεταβλητής αντικαταστάθηκε στη θέση της στους ανισοτικούς περιορισμούς.

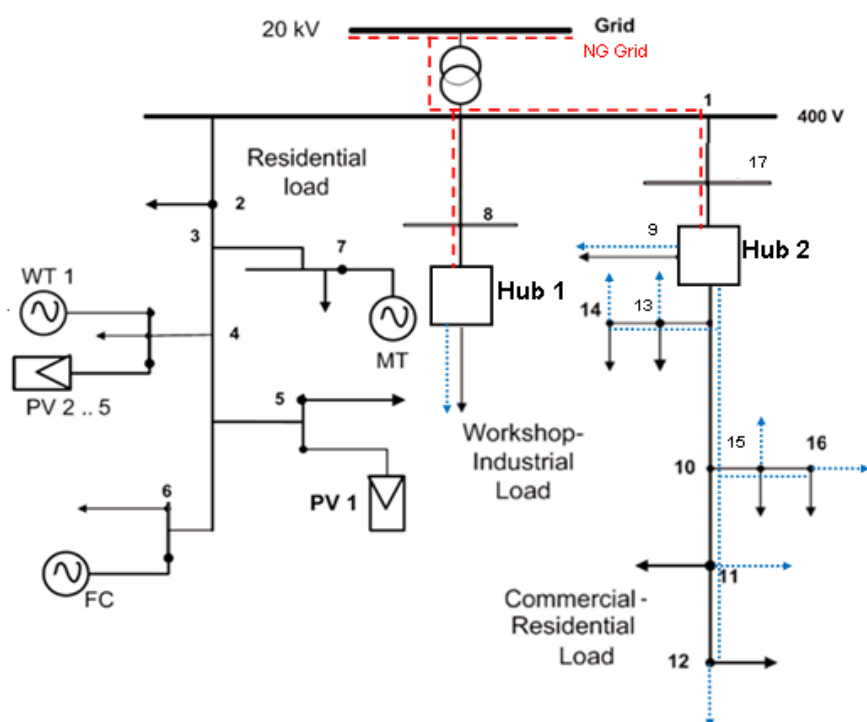
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9<sup>ο</sup>

## ΔΙΚΤΥΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

### 9.1 ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

#### 9.1.1 Στοιχεία του συστήματος

Το δίκτυο το οποίο μελετήθηκε στην παρούσα εργασία είναι το ακόλουθο:



Σχήμα 9.1 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.

Στη συνέχεια ακολουθεί ένας πίνακας που συμπληρώνεται με τα δεδομένα του δικτύου. Ο πίνακας αυτός, μαζί με τα δεδομένα ζήτησης και παραγωγής των ζυγών, ήταν η είσοδος στο πρόγραμμα επίλυσης της ροής φορτίου. Η πρώτη στήλη δηλώνει τις συνδέσεις που υπάρχουν μεταξύ των ζυγών του δικτύου. Οι στήλες 2, 3, και 4 περιέχουν την αντίσταση (R), την αντίδραση (X) και το ήμισυ της συνολικής εγκάρσιας επιδεκτικότητας της γραμμής ( $\frac{1}{2} B$ ), το φανταστικό δηλαδή μέρος της σύνθετης αγωγιμότητας της γραμμής χρησιμοποιώντας ισοδύναμο μοντέλο-π. Η τελευταία στήλη αναφέρεται σε γραμμή με μετασχηματιστές που έχουν μεταβολή της σχέσης μετασχηματισμού. Συνήθως θεωρούνται ονομαστικές λήψεις με  $t=1$ .

Σημείωση: Όλες οι παρακάτω τιμές είναι σε ανά μονάδα και ότι ως βασική ισχύ επιλέξαμε τα 100 kVA, ενώ ως βασική τάση τα 400V της χαμηλής τάσης.

Συνδέσεις	R (p.u.)	X (p.u.)	$\frac{1}{2} B$	Λήψεις M/Σ
1-2	0,0001	0,0001	0	1
2-3	0,0125	0,00375	0	1
3-4	0,0125	0,00375	0	1
4-5	0,0125	0,00375	0	1
5-6	0,0125	0,00375	0	1
3-7	0,021875	0,004375	0	1
1-8	0,033125	0,00875	0	1
1-9	0,0075	0,005	0	1
9-10	0,015	0,010625	0	1
10-11	0,02125	0,005625	0	1

11-12	0,02125	0,005625	0	1
9-13	0,010625	0,005625	0	1
13-14	0,010625	0,005625	0	1
10-15	0,023125	0,00625	0	1
15-16	0,023125	0,00625	0	1
17-1	0,0025	0,01	0	1

Πίνακας 9.1 ΟΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

### 9.1.2 Μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής

Μια ποικιλία από μονάδες διανεμημένης παραγωγής, όπως μια μικροτουρμπίνα (Micro Turbine, MT), μια κυψέλη καυσίμου (Fuel Cell, FC), μια άμεσα συνδεδεμένη ανεμογεννήτρια (Wind Turbine, WT) και αρκετές συστοιχίες φωτοβολταϊκών (Photovoltaic, PV) έχουν εγκατασταθεί στην τροφοδοσία της κατοικημένης περιοχής.

- 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<sup>ου</sup> 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<sub>p</sub>. Για την παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά χρησιμοποιήσαμε κανονικοποιημένες χρονοσειρές από τις συστοιχίες φωτοβολταϊκών ισχύος 1,1 kW που είναι εγκατεστημένες στο χώρο του ΕΜΠ στο 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/m<sup>3</sup> και η τιμή 10 €/ct/m<sup>3</sup>.

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:

Μικροπηγή	Συντελεστής ισχύος
PV1	0,95
PV2..5	0,95
WT	0,95
MT	-0,9
FC	1
CHP	-0,8

Πίνακας 9.2

Αν κάποια στιγμή η άεργος παραγωγή των ζυγών 4,5 και 7 γίνει μεγαλύτερη ή μικρότερη από τα όρια  $Q_{\min}$ ,  $Q_{\max}$  που έχουν οριστεί για καθέναν από αυτούς τους τρεις ζυγούς, τότε προσαρμόζεται ο συντελεστής ισχύος και δημιουργούνται νέα όρια  $Q_{\min}$ ,  $Q_{\max}$  οπότε κατ' επέκταση και μια νέα άεργος παραγωγή, η οποία θα προκύπτει από την ενεργό παραγωγή, που είναι ούτως ή άλλως καθορισμένη, και τον νέο προσαρμοσμένο συντελεστή ισχύος. Όλος αυτός ο έλεγχος και ο επανακαθορισμός των μεγεθών των σχετικών με την άεργο παραγωγή γίνεται πριν τη δημιουργία του τελικού πίνακα με τα δεδομένα των γραμμών, πριν τη ροή φορτίου.

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

$$C_i = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 \quad (\text{σχ. 9.1})$$

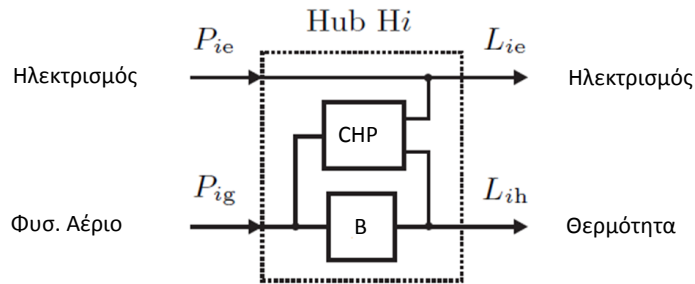
Για τις ΑΠΕ συγκεκριμένα θεωρήσαμε πως τα κόστη λειτουργίας τους είναι μηδενικά (δηλαδή δωρεάν η πώληση της αιολικής και της φωτοβολταϊκής ενέργειας), καθώς σκοπός μας ήταν να ελαχιστοποιήσουμε τα έξοδα των καταναλωτών. Συγκεντρωτικά τα δεδομένα (ελάχιστη και μέγιστη παραγόμενη ισχύς και συντελεστές 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 <sup>2</sup>
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 9.3 Δεδομένα των μονάδων DG.

### 9.1.3 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 9.2 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. Για να αυξήσουμε κατά το δυνατόν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων από τις προσομοιώσεις που θα ακολουθήσουν, θεωρήσαμε μεταβλητό ηλεκτρικό και θερμικό βαθμό απόδοσης. 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. Η συνάρτηση κόστους τόσο των CHP όσο και των Boiler είναι και σε αυτή την περίπτωση η (9.1), με τους συντελεστές κόστους να έχουν ληφθεί από τη ΔΕΠΑ για όλο το 2008 και το 2009. Τα χαρακτηριστικά των μονάδων των διανομέων εμφανίζονται στους πίνακες που ακολουθούν.

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

Πίνακας 9.4.α 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 9.4.β Είσοδος φυσικού αερίου και απόδοση των μονάδων των διανομέων.

Είσοδος Φυσ. Αερίου $P_g$ kW	$\eta_e$	$\eta_h$
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 9.5 Δεδομένα για τους βαθμούς απόδοσης των CHP

#### A. αποδοτικότητα του Boiler

$$\left. \begin{array}{l} \beta \cdot \alpha_{BL} = 0,8 \\ \min\_input\_gas = 0 \end{array} \right\} BL\ limitDo = 0$$

$$\left. \begin{array}{l} \beta \cdot \alpha_{BL} = 0,8 \\ \max\_input\_gas = 400kW \end{array} \right\} BL\ limitUp = 0,8 * 400 = 320kW$$



## B. αποδοτικότητα του CHP

Είσοδος φυσικού αερίου kW	$\eta_e$	$\eta_h$	Pout_e	Pout_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

Από τις 7 τιμές εισόδου φυσικού αερίου και από τους αντίστοιχους ηλεκτρικούς και θερμικούς βαθμούς απόδοσης παίρνουμε 7 τιμές εξόδου ηλεκτρισμού και θερμότητας. Επομένως μπορούμε να φτιάξουμε τη σχέση που συνδέει έξοδο ηλεκτρισμού με τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης. Σε αυτή τη σχέση μπορούμε να βάζουμε ως μεταβλητή οποιαδήποτε τιμή ισχύος εξόδου που θα μας δίνει η βελτιστοποίηση και να υπολογίζουμε τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης  $\eta_e$  της αυτής ισχύος εξόδου.

```
CV = 0.01115; % θερμογόνος δύναμη σε MWh/N.m^3
timi_aeriu = 0.62; % €/m^3
cost_kWh_eisodou = timi_aeriu/CV; % κόστος kWh εισόδου σε €/MWh
```

```
for k=1:1:7
    ΕΞΟΔΟΣ_e(k) = ΕΙΣΟΔΟΣ_ΦΥΣ_ΑΕΡΙΟΥ(k) * ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ_ΒΑΘΜΟ_ΑΠΟΔΟΣΗΣ(k);
end;
```

```
cE = polyfit(ΕΞΟΔΟΣ_e, ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ_ΒΑΘΜΟΣ_ΑΠΟΔΟΣΗΣ,5); % coefficients of a
polynomial of degree-5
```

$$\eta_e = \sum_{i=1}^6 c_E(i) \cdot x^{6-i} = c_E(1) \cdot x^5 + c_E(2) \cdot x^4 + c_E(3) \cdot x^3 + c_E(4) \cdot x^2 + c_E(5) \cdot x + c_E(6)$$

Επίσης έξοδος ηλεκτρισμού και έξοδος θερμότητας του CHP συνδέονται με τη σχέση

$$HPR = \frac{P_{CHP,h}}{P_{CHP,e}} \Rightarrow P_{CHP,h} = HPR \cdot P_{CHP,e}, \text{ οπότε γνωρίζοντας την ηλεκτρική ισχύ εξόδου του CHP από}$$

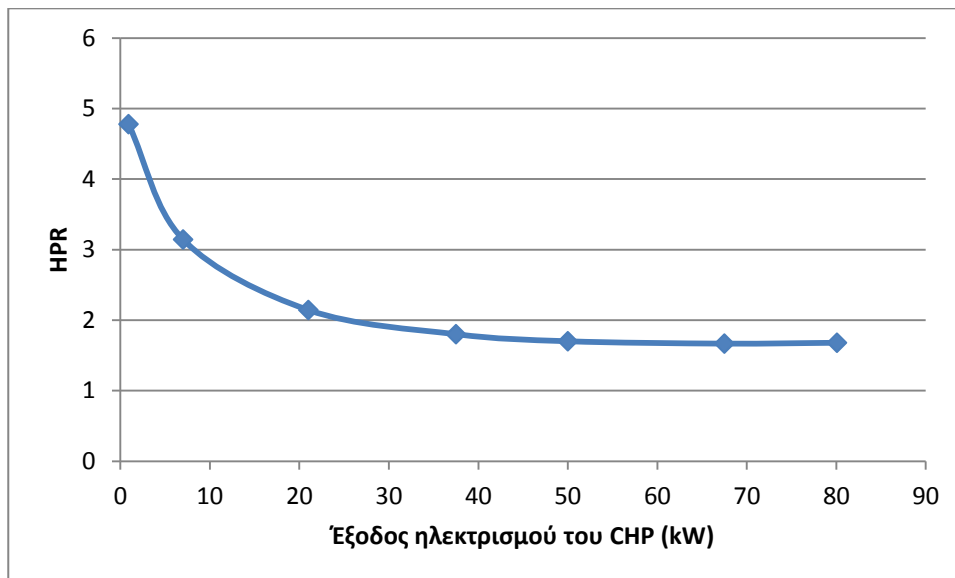
τη βελτιστοποίηση και τον αντίστοιχο βαθμό HPR, μπορούμε να βρούμε και τη θερμική έξοδο του CHP. Από τα δεδομένα προκύπτουν τα εξής:

```

input_gas_min = 10kW
input_gas_max = 286kW
ηe_min = 0,09
ηe_max = 0,28
ηh_min = 0,43
ηh_max = 0,47
CHPlimitDo_e = input_gas_min * ηe_min
CHPlimitUp_e = input_gas_max * ηe_max
CHPlimitDo_h = input_gas_min * ηh_min
CHPlimitUp_h = input_gas_max * ηh_max

for k=1:1:7
    Pe_out(k) = P_gas_in(k) * ηe(k);
    Ph_out(k) = P_gas_in(k) * ηh(k);
    HPR(k) = Ph_out(k) / Pe_out(k);
    A(k) = HPR(k) * Pe_out(k);
end;

```



Κι επειδή οι 7 δεδομένες τιμές HPR με τις αντίστοιχες τιμές εξόδου ηλεκτρισμού σχηματίζουν μια παραβολή της μορφής  $HPR = \frac{A}{x}$ , όπου A μια σταθερά  $A > 0$  και x η έξοδος ηλεκτρισμού του CHP, μπορούμε για κάθε x που μας δίνει η βελτιστοποίηση να βρίσκουμε πρώτα το συντελεστή A, ο οποίος με τη σειρά του θα μας δώσει το HPR για το δεδομένο x κι έπειτα μπορούμε να βρούμε μέσω του HPR τη θερμική έξοδο του CHP.

$$aa = \text{polyfit}(P_{e\_out}, A, 1)$$

$$AA = aa(1) * x + aa(2)$$

$$HPR = AA / x$$

#### 9.1.4 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 του μεσαίου και του δεξιά κλάδου) σχετίζεται με το συνολικό ηλεκτρικό με την αναλογία:

$$\frac{TL_{th}}{TL_{el}} = \frac{55}{45}, \text{ όπου } TL_{th} \text{ και } TL_{el} \text{ είναι το συνολικό θερμικό και ηλεκτρικό φορτίο αντίστοιχα. Το}$$

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 δεξιά (αστικού - εμπορικού) κλάδου αντίστοιχα.

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.

#### 9.1.5 Σύστημα (ανάντη δίκτυο)

Στην περίπτωση που η παραγόμενη ισχύς από τις μονάδες DG δεν επαρκεί για την κάλυψη των φορτίων, θα πρέπει να εισάγουμε ισχύ από το δίκτυο. Για να έχουμε πιο ρεαλιστική απεικόνιση της απελευθερωμένης αγοράς ενέργειας στην οποία λειτουργεί το δίκτυο ΧΤ, χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες Οριακές Τιμές του ελληνικού Συστήματος διανομής (ΟΤΣ), όπως δίνονται από τον ΔΕΣΜΗΕ, και αναφέρονται σε όλο το 2008 και όλο το 2009. Χρησιμοποιήθηκαν δυο ΟΤΣ, μία υψηλή (αυτή του 2008) και μία χαμηλή (του 2009) για να παρατηρήσουμε τις διαφορές που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις στην τιμή της αντικειμενική συνάρτησης και στο κόστος.

## 9.2 ΣΕΝΑΡΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Τέσσερα διαφορετικά σενάρια διαμορφώθηκαν έτσι ώστε να υπάρξει κατάλληλη σύγκριση των αποτελεσμάτων και εξέταση της συνδυασμένης θεώρησης των μικροδικτύων και των ενεργειακών διανομέων. Αυτά έχουν ως ακολούθως:

- Σενάριο 1 – Απουσία μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής και μονάδων συμπαραγωγής:

Λειτουργία του δικτύου χωρίς διανεμημένη παραγωγή. Οι ενεργειακοί διανομείς έχουν σε λειτουργία μόνο τη μονάδα Boiler, ενώ η μονάδα CHP είναι εκτός. Στο σενάριο αυτό όλη η ηλεκτρική ισχύς εισάγεται από το σύστημα και έτσι αναμένεται να είναι το πιο επιζήμιο σενάριο για τους καταναλωτές. (No-DG scenario)

- Σενάριο 2 – Παρουσία μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, απουσία μονάδων συμπαραγωγής, ανεξάρτητη λειτουργία:

Στο σενάριο αυτό όλες οι μονάδες DG είναι παρούσες αλλά λειτουργούν ανεξάρτητα. Ωστόσο, οι μονάδες CHP είναι και πάλι απύσες. Το δίκτυο δεν συντονίζει τη λειτουργία του και οι συμβατικές μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής (FC, MT) απλώς καλύπτουν τις ανάγκες των φορτίων τοπικά, ακόμα και αν αυτός δεν είναι ο πιο οικονομικός τρόπος λειτουργίας του δικτύου. Αν δεν επαρκούν, απλά εισάγεται ηλεκτρική ισχύς από το σύστημα. Σε αντίθετη περίπτωση η επιπλέον ισχύς θεωρείται ότι χάνεται και δεν αποθηκεύεται. Πιθανότατα αρκετά ασύμφορο σενάριο για τους χρήστες. (Only-DG.No-CHP scenario)

- Σενάριο 3 – Παρουσία μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής και μονάδων συμπαραγωγής, ανεξάρτητη λειτουργία:

Όπως και το Σενάριο 2, αλλά αυτή τη φορά οι ενεργειακοί διανομείς είναι πλήρεις και μπορούν να τροφοδοτούν τα ηλεκτρικά φορτία τους, αλλά μόνο τοπικά. Υπάρχει δυνατότητα να υπολειτουργούν αν αυτό είναι οικονομικότερο. Η επίδραση των μονάδων CHP μάλλον θα έχει σημαντική επίδραση στο ενεργειακό κόστος του δικτύου. (Only-DG+CHP scenario)

- Σενάριο 4 – Λειτουργία μικροδικτύου:

Στο σενάριο αυτό στο δίκτυο είναι παρούσες και οι μονάδες DG και οι μονάδες CHP, αλλά αυτή τη φορά λειτουργούν συντονισμένα και κατά το βέλτιστο τρόπο, χωρίς όμως να μπορούν να εξάγουν ηλεκτρική ισχύ στο δίκτυο. Το πρόβλημα αυτό είναι πρόβλημα βελτιστοποίησης και λογικά θα αποτελεί τον καλύτερο τρόπο λειτουργίας του δικτύου. (Microgrid scenario)

Επιπλέον πληροφορίες:

- Στην ανεξάρτητη λειτουργία αν η ζήτηση του ζυγού στον οποίο συνδέεται και η ΜΤ είναι ανάμεσα στα επιτρεπτά όρια λειτουργίας της τελευταίας, τότε αυτή παράγει όσο είναι και το ζητούμενο φορτίο. Αν το ζητούμενο φορτίο είναι μεγαλύτερο από το άνω όριο λειτουργίας της ΜΤ, αυτή τίθεται να λειτουργεί στο μέγιστό της και η υπόλοιπη ζήτηση καλύπτεται από το ανάντη δίκτυο. Τέλος, αν το ζητούμενο φορτίο είναι μικρότερο και από το κάτω όριο λειτουργίας της ΜΤ, αυτή τίθεται να λειτουργεί σε αυτό το κάτω όριο και η επιπλέον ενέργεια που παράγει αλλά δεν καταναλώνεται από το φορτίο, χάνεται στο σύστημα.
- Ακριβώς ίδια λειτουργία με την ΜΤ έχει και το FC επίσης στην ανεξάρτητη λειτουργία.
- Οι ανεμογεννήτρια και τα φωτοβολταϊκά ό,τι παράγουν, το δίνουν στους ζυγούς στους οποίους συνδέονται.
- Η ανεξάρτητη λειτουργία στους ενεργειακούς διανομείς φαίνεται ως εξής: τοπικά ο κάθε ενεργειακός διανομέας φροντίζει να καλύπτει τα θερμικά φορτία που ζητούνται στον κλάδο στον οποίο συνδέεται. Αυτά τα θερμικά φορτία καλύπτονται με παράλληλη λειτουργία του boiler και του CHP του HUB. Συντονίζουν τις παραγωγές τους έτσι ώστε η θερμική έξοδος του boiler με τις εξόδους ηλεκτρισμού και θερμότητας του CHP να ικανοποιούν όλες μαζί τους ισοτικούς και ανισοτικούς περιορισμούς που θα περιγραφούν παρακάτω.

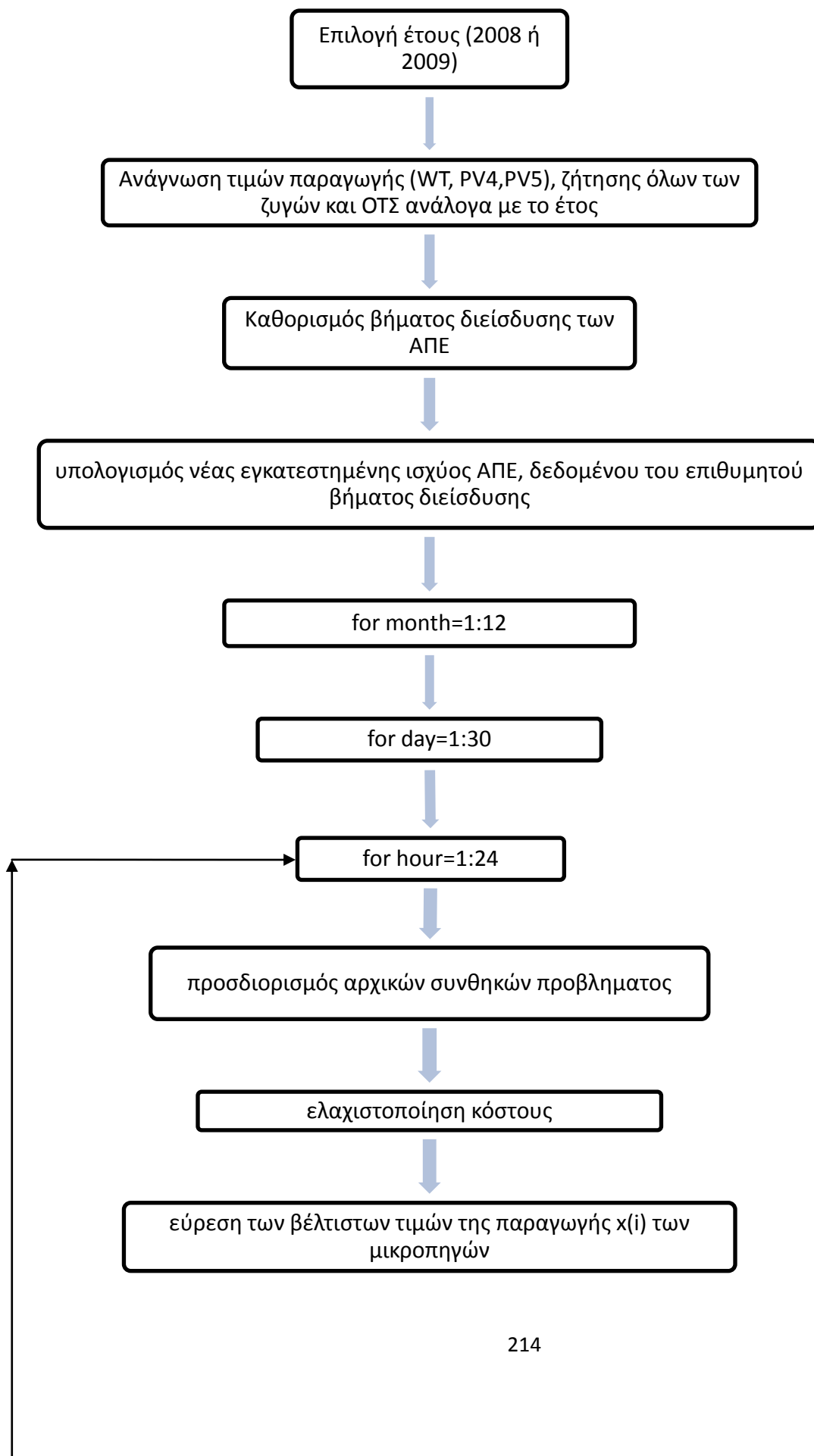
### 9.3 ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Το δεύτερο, τρίτο και τέταρτο σενάριο μελετήθηκαν για διάφορα επίπεδα διείσδυσης διανεμημένης παραγωγής και συγκεκριμένα για εγκατεστημένη ισχύ από 88 kW έως 151 kW. Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε βήμα διείσδυσης προστίθενται 5kW αολικής εγκατεστημένης ισχύος, 3 kW εγκατεστημένης ισχύος στο ζυγό 5 (όπου αρχικά ήταν εγκατεστημένο ένα φωτοβολταϊκό ισχύος 3kW, οπότε το βήμα διείσδυσης είναι σταθερά 3kW) και 2,5kW εγκατεστημένης ισχύος στο ζυγό 4 (όπου αρχικά υπήρχε εγκατεστημένη συστοιχία τεσσάρων φωτοβολταϊκών των 2,5 kW το καθένα). Άρα σε κάθε βήμα διείσδυσης η εγκατεστημένη ισχύς των ΑΠΕ αυξάνεται με βήμα 10,5 kW, και προφανώς με το ίδιο βήμα διείσδυσης αυξάνεται και η συνολική εγκατεστημένη ισχύς όλο του δικτύου των 17 ζυγών. Η μικροτουρμπίνα και η κυψέλη καυσίμου παραμένουν ίδιες σε αριθμό.

	Διείσδυση	Διείσδυση
βήμα	DGs (kW)	ΑΠΕ (kw)
1	88	28
2	98,5	38,5
3	109	49
4	119,5	59,5
5	130	70
6	140,5	80,5
7	151	91

## 9.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΣΕΝΑΡΙΩΝ

Ακολουθεί ένα διάγραμμα ροής που παρουσιάζει συνοπτικά την πορεία των προσομοιώσεων:



-> σχηματισμός ορίων άεργου παραγωγής  $Q_{min}$ ,  $Q_{max}$  των ζυγών 4-9  
-> εύρεση φορτίων  $P_i, Q_i$  και παραγωγής  $P_g, Q_g$  όλων των ζυγών  
-> έλεγχος συντελεστών ισχύος και ορίων άεργης παραγωγής, αλλιώς εκ νέου καθορισμός των  $Q_{min}$ ,  $Q_{max}$ ,  $Q_g$   
-> σχηματισμός πινάκων linedata, busdata με τα τελικά δεδομένα των γραμμών

Σχηματισμός μήτρας αγωγιμτήτων  $Y$

μέθοδος επίλυσης Newton - Raphson

ροή φορτίου

παρουσίαση εξόδου (μέτρα τάσεων, γωνίες, φορτια, παραγωγές και απώλειες)

Αρχικά πριν αναλύσουμε λίγο περαιτέρω τη διαδικασία της προσομοίωσης, παραθέτουμε για καθένα σενάριο την τελική μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης και των αντίστοιχων ισοτικών και ανισοτικών περιορισμών:

Αντικειμενική συνάρτηση:

▪ **Σενάριο 1:**

$$f = a_{SB} + b_{SB} \cdot x(1) + c_{SB} \cdot x(1)^2 \dots$$

$$+ a_{BL} + b_{BL} \cdot x(2) + c_{BL} \cdot x(2)^2 \dots$$

$$+ a_{BL} + b_{BL} \cdot x(3) + c_{BL} \cdot x(3)^2$$

▪ **Σενάριο 2:**

$$f = a_{SB} + b_{SB} \cdot x(1) + c_{SB} \cdot x(1)^2 \dots$$

$$+ a_{MT} + b_{MT} \cdot MT(day, Period) + c_{MT} \cdot MT(day, Period)^2 \dots$$

$$+ a_{FC} + b_{FC} \cdot FC(day, Period) + c_{FC} \cdot FC(day, Period)^2 \dots$$

$$+ a_{BL} + b_{BL} \cdot x(2) + c_{BL} \cdot x(2)^2 \dots$$

$$+ a_{BL} + b_{BL} \cdot x(3) + c_{BL} \cdot x(3)^2$$

▪ **Σενάριο 3:**

$$f = a_{SB} + b_{SB} \cdot x(1) + c_{SB} \cdot x(1)^2 \dots$$

$$+ a_{MT} + b_{MT} \cdot MT(day, Period) + c_{MT} \cdot MT(day, Period)^2 \dots$$

$$+ a_{FC} + b_{FC} \cdot FC(day, Period) + c_{FC} \cdot FC(day, Period)^2 \dots$$

$$+ \text{cost}_{kWh\_eisodou} \cdot x(2) / ne_1 \dots$$

$$+ \text{cost}_{kWh\_eisodou} \cdot x(4) / ne_2 \dots$$

$$+ a_{BL} + b_{BL} \cdot x(3) + c_{BL} \cdot x(3)^2 \dots$$

$$+ a_{BL} + b_{BL} \cdot x(5) + c_{BL} \cdot x(5)^2$$

▪ **Σενάριο 4:**

$$f = a_{SB} + b_{SB} \cdot x(1) + c_{SB} \cdot x(1)^2 \dots$$

$$+ a_{MT} + b_{MT} \cdot x(2) + c_{MT} \cdot x(2)^2 \dots$$

$$+ a_{FC} + b_{FC} \cdot x(3) + c_{FC} \cdot x(3)^2 \dots$$

$$+ \text{cost}_{kWh\_eisodou} \cdot x(4) / ne_1 \dots$$

$$+ \text{cost}_{kWh\_eisodou} \cdot x(6) / ne_2 \dots$$

$$+ a_{BL} + b_{BL} \cdot x(5) + c_{BL} \cdot x(5)^2 \dots$$

$$+ a_{BL} + b_{BL} \cdot x(7) + c_{BL} \cdot x(7)^2$$



Περιορισμοί:

▪ **Σενάριο 1:**

$$SBlimitDo \leq x(1) \leq SBlimitUp$$

$$BLlimitDo \leq x(2) \leq BLlimitUp$$

$$BLlimitDo \leq x(3) \leq BLlimitUp$$

$$x(1) - TLel = 0$$

$$x(2) - TLth1 = 0$$

$$x(3) - TLth2 = 0$$

▪ **Σενάριο 2:**

$$SBlimitDo \leq x(1) \leq SBlimitUp$$

$$BLlimitDo \leq x(2) \leq BLlimitUp$$

$$BLlimitDo \leq x(3) \leq BLlimitUp$$

$$x(1) + MT(day,Period) + FC(day,Period) + WT(Period,day) + PV4(Period,day) + PV5(Period,day) - TLel = 0$$

$$x(2) - TLth1 = 0$$

$$x(3) - TLth2 = 0$$

▪ **Σενάριο 3:**

$$SBlimitDo \leq x(1) \leq SBlimitUp$$

$$CHPlimitDo\_e \leq x(2) \leq CHPlimitUp\_e$$

$$BLlimitDo \leq x(3) \leq BLlimitUp$$

$$CHPlimitDo\_h \leq HPR\_x2 \cdot x(2) \leq CHPlimitUp\_h$$

$$CHPlimitDo\_e \leq x(4) \leq CHPlimitUp\_e$$

$$BLlimitDo \leq x(5) \leq BLlimitUp$$

$$CHPlimitDo\_h \leq HPR\_x4 \cdot x(4) \leq CHPlimitUp\_h$$

$$x(1) + MT(day,Period) + FC(day,Period) + WT(Period,day) + PV4(Period,day) \dots$$

$$+ PV5(Period,day) + x(2) + x(3) - TLel = 0$$

$$HPR\_x2 \cdot x(2) + x(3) - TLth1 = 0$$

$$HPR\_x4 \cdot x(4) + x(5) - TLth2 = 0$$

▪ **Σενάριο 4:**

$$SB\text{limitDo} \leq x(1) \leq SB\text{limitUp}$$

$$MT\text{limitDo} \leq x(2) \leq MT\text{limitUp}$$

$$FC\text{limitDo} \leq x(3) \leq FC\text{limitUp}$$

$$CH\text{PlimitDo}_e \leq x(4) \leq CH\text{PlimitUp}_e$$

$$BL\text{limitDo} \leq x(5) \leq BL\text{limitUp}$$

$$CH\text{PlimitDo}_h \leq HPR\_x4 \cdot x(4) \leq CH\text{PlimitUp}_h$$

$$CH\text{PlimitDo}_e \leq x(6) \leq CH\text{PlimitUp}_e$$

$$BL\text{limitDo} \leq x(7) \leq BL\text{limitUp}$$

$$CH\text{PlimitDo}_h \leq HPR\_x6 \cdot x(6) \leq CH\text{PlimitUp}_h$$

$$x(1) + x(2) + x(3) + WT(\text{Period}, \text{day}) + PV4(\text{Period}, \text{day}) + PV5(\text{Period}, \text{day}) + x(4) + x(6) - TLel = 0$$

$$HPR\_x4 \cdot x(4) + x(5) - TLth1 = 0$$

$$HPR\_x6 \cdot x(6) + x(7) - TLth2 = 0$$

όπου

- «...limitDo» και «...limitUp» είναι τα όρια των μικροπηγών ορισμένα στις παραγράφους 9.1.2 και 9.1.3
- $x(i)$  είναι η προς βελτιστοποίηση και εύρεση της παραγωγής της  $i$ -οστής μικροπηγής ανάλογα με το σενάριο λειτουργίας
- $HPR\_x4$ ,  $HPR\_x6$  τα  $HPR$  των  $CHP$  των ενεργειακών διανομέων στους ζυγούς 8 και 9 αντίστοιχα
- $TLel$ ,  $TLth1$ ,  $TLth2$  το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο, το συνολικό θερμικό φορτίο του μεσαίου κλάδου και το συνολικό θερμικό φορτίο του δεξιά κλάδου αντίστοιχα
- $a$ ,  $b$ ,  $c$  οι συντελεστές κόστους της εκάστοτε μικροπηγής
- $\eta_e$  ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης

Διαδικασία:

Αφού, λοιπόν, σχηματίσουμε τις εξισώσεις κόστους για όλο το σύστημα, ανάλογα με τις μικροπηγές που συμμετέχουν στο εκάστοτε σενάριο, διαμορφώνουμε το αντίστοιχο πρόβλημα. Αυτά αποτελούν προβλήματα Οικονομικής Κατανομής Φορτίου (Economic Dispatch, ED), με την επίλυση των οποίων καταλήγουμε στο ποσό ισχύος που θα πρέπει κάθε μονάδα να εγγείει στο δίκτυο, ανάλογα πάντα με τις συνθήκες που επιβάλλει το εκάστοτε σενάριο. Εδώ να σημειώσουμε ότι η παραγωγή των ΑΠΕ δεν υπόκειται σε περιορισμό, με άλλα λόγια όση ισχύ έχουν διαθέσιμη κάθε χρονική στιγμή, με αυτή τροφοδοτούν τα φορτία και όχι μόνο τοπικά.

Για την επίλυση όλων των προβλημάτων χρησιμοποιήσαμε το περιβάλλον της Matlab. Αφού πρώτα σχηματίζαμε το ανάλογο πρόβλημα για κάθε σενάριο, στη συνέχεια τροφοδοτούσαμε τα δεδομένα των συνδέσεων μεταξύ των ζυγών, τη ζήτηση αλλά και την παραγωγή του κάθε ζυγού τη δεδομένη ώρα της ημέρας και τους περιορισμούς αέργου ισχύος όλων των ζυγών σε ένα πρόγραμμα που υπολογίζει τη ροή φορτίου σε κάθε κλάδο του δικτύου με τη μέθοδο Newton-Raphson.

Από αυτό εξάγαμε διάφορα σημαντικά δεδομένα, όπως την ισχύ κάθε ζυγού, τις απώλειες μεταξύ των γραμμών, τις συνολικές απώλειες του δικτύου, κ.ά. Σε περίπτωση που η εισαγωγή ισχύος από το σύστημα που υπολόγιζε το πρόγραμμα μας απέκλινε σημαντικά από αυτή που υπολόγιζε το πρόγραμμα ροής φορτίου, τότε επαναλαμβάναμε την παραπάνω διαδικασία μέχρι οι δύο τιμές να έχουν διαφορά της τάξης των W (μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια).

Επιπλέον, ο μεταβλητός βαθμός απόδοσης των μονάδων CHP κάνει το πρόβλημα μη κυρτό, στην περίπτωση που αυτά είναι παρόντα στο δίκτυο (σενάρια 3 και 4). Σε αυτή την περίπτωση δεν μπορούμε να εγγυηθούμε ότι η λύση που βρίσκει το πρόγραμμα στο περιβάλλον της Matlab είναι η μοναδική.

## 9.5 ΜΕΓΕΘΗ ΠΡΟΣ ΜΕΛΕΤΗ

- Κόστος λειτουργίας
- Απώλειες ενεργού ισχύος στις γραμμές μεταφοράς
- Εγχύσιμη ισχύς από το δίκτυο
- Παραγωγή της μικροτουρμπίνας
- Παραγωγή της κυψέλης καυσίμου
- Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από τους ενεργειακούς διανομείς των ζυγών 8 και 9
- Παραγωγή θερμικής ισχύος από τους ενεργειακούς διανομείς των ζυγών 8 και 9
- Υπερφορτίσεις γραμμών μεταφοράς
- Προβλήματα τάσεων στους ζυγούς (με αυστηρό όριο  $\pm 3\%$  γύρω από την τιμή 1 αμ)

Για τα πρώτα 7 μεγέθη: Ανά ώρα προστίθεται το ανάλογο μέγεθος, σχηματίζεται το σύνολο ανά ημέρα και με διαδοχικές αθροίσεις βγαίνει το σύνολο ανά μήνα.

## 9.6 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΟΝ ΑΡΜΟΝΙΚΟ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ

Η μόνη διαφορά στην προσομοίωση των σεναρίων είναι ότι η βελτιστοποίηση δε γίνεται πλέον με τη Lagrange αλλά με την κλήση μιας νέας συνάρτησης με όνομα harmony στη θέση κλήσης της fmincon (με είσοδο τα κατάλληλα ορίσματα φυσικά, τα οποία αναλύθηκαν στην παράγραφο 7.3.2).

## 9.7 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΟ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

### 9.7.1 Προσομοίωση στοχαστικού μοντέλου για εύρεση ετήσιου λειτουργικού κόστους

Οι προσομοιώσεις με το στοχαστικό μοντέλο έγιναν με τον αρμονικό αλγόριθμο αναζήτησης και όχι με τη μέθοδο Lagrange λόγω της πολυπλοκότητας του μοντέλου. Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 8.3 δεν υπάρχουν πια οι ισοτικοί περιορισμοί, είναι ενσωματωμένοι κατά κάποιο τρόπο μέσα στους ισοτικούς. Για την εύρεση των παραμέτρων Var (V) και Con (C), όπως επίσης και των βαρών  $w_1$ ,  $w_2$  έγιναν διάφορες δοκιμές, όπως θα δούμε και στο κεφάλαιο με τα αποτελέσματα των εφαρμογών.

### 9.7.2 Προσομοίωση στοχαστικού μοντέλου του CHP

Σύμφωνα με το [] σχεδιάστηκε ένα μοντέλο το οποίο παίρνει ως είσοδο: α) τη θερμοκρασία περιβάλλοντος  $T_{ambient}$ , β) τη ζήτηση ενεργού ισχύος από το φορτίο του εκάστοτε κλάδου (μεσαίου ή δεξιού). Το CHP προσομοιώνεται με μια θερμική αντίσταση R και μια θερμοχωρητικότητα C. Με ένα HPR=1.3 βρίσκεται και η θερμική ζήτηση από το ζυγό. Επίσης, ανάλογα με το μήνα του έτους καθορίζεται μια αρχική θερμοκρασία  $T_{cut\_in}$  στην οποία αρχίζει να λειτουργεί το CHP και μια θερμοκρασία  $T_{cut\_out}$  στην οποία σταματά τη λειτουργία του. Επίσης ορίζεται από εμάς ένας χρόνος μέτρησης ίσος με 900 sec. Με όλα αυτά τα δεδομένα, βρίσκουμε κάποιους χρόνους  $t_{on}$  και  $t_{off}$  και έπειτα κάποιες ισχύς  $P_{min}$ ,  $P_{max}$  ανάμεσα στις οποίες λειτουργεί το CHP τη συγκεκριμένη ώρα, ημέρα και μήνα. Δε βρίσκουμε ακριβώς την ισχύ που παράγει το CHP, αλλά με τη βοήθεια κάποιων πιθανοτήτων που μας παρέχει το μοντέλο, μπορούμε από την απλή σχέση  $\bar{x} = \sum x \cdot P(x)$ , όπου P η πιθανότητα της μεταβλητής x, να βρούμε τη μέση τιμή.

Έτσι φτιάχνουμε έναν πίνακα 12x30x24 με όλες τις μέσες τιμές παραγωγής ηλεκτρισμού του CHP. Κατηγοριοποιούμε τις τιμές ανάλογα με την εποχή και την ώρα σε πίνακες των 90 τιμών (ανά εποχή). Αυτές τις 90 τιμές τις τροφοδοτούμε ως είσοδο σε πρόγραμμα που τρέχει τη μέθοδο Gram-Charlier και μας δίνει τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των μέσων τιμών για μια συγκεκριμένη ώρα και εποχή του έτους.

## 9.8 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

### 9.8.1 Παράμετροι και εξεταζόμενα μεγέθη

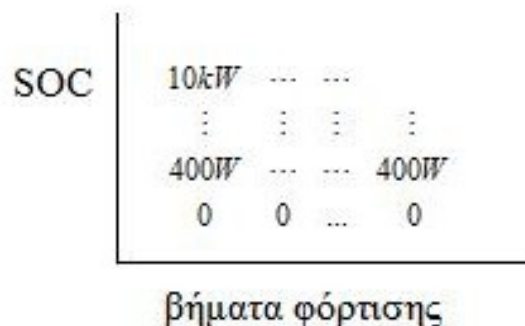
Στο πρόβλημα παρουσία ηλεκτρικών οχημάτων γίνεται μία προσπάθεια υπολογισμού του κόστους με προσθήκη ηλεκτρικών οχημάτων στο σύστημα κατά τις βραδινές ώρες της εκάστοτε ημέρας. Έτσι λοιπόν θεωρούμε πως τα ηλεκτρικά οχήματα βρίσκονται συνδεδεμένα για 10 ώρες από τις 24 της ημέρας με την 1<sup>η</sup> ώρα να λειτουργεί ως ώρα σύνδεσης του ηλεκτρικού οχήματος ή αλλιώς ώρα 'ανίχνευσης παρουσίας' του ηλεκτρικού οχήματος από το σύστημα. Κατ' αυτόν τον τρόπο μόνον οι 9 ώρες από τις 10 που είναι συνδεδεμένο το ηλεκτρικό όχημα είναι διαθέσιμες για την φόρτιση του. Εδώ να σημειωθεί πως το πρόβλημα όπως είναι δομημένο επιτρέπει την

προσομοίωση με πολλές διαφορετικές παραμέτρους δημιουργώντας μία πληθώρα αποτελεσμάτων αλλά και προσομοιώσεων. Να συμπληρώσουμε επίσης πως τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα και το κόστος φόρτισης τους εξαρτάται και από την διείσδυση των ΑΠΕ στο μικροδίκτυο και γι' αυτό τον λόγο γίνεται και μία σχετική προσομοίωση ώστε να αναδειχθεί η εξάρτηση του κόστους φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων και από την διείσδυση ΑΠΕ.

Οι παράμετροι που μπορούν να διαφοροποιηθούν στο πρόβλημα είναι η κατάσταση της μπαταρίας κατά την σύνδεση της, η μέθοδος φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων, το πλήθος των ηλεκτρικών οχημάτων, η θέση σύνδεσης των ηλεκτρικών οχημάτων στο μικροδίκτυο, το μέγεθος της μπαταρίας των ηλεκτρικών οχημάτων καθώς και η αντίστοιχη διείσδυση των ΑΠΕ σε συνδυασμό με όλα τα παραπάνω. Είναι κατανοητό από τα παραπάνω πως στον σύντομο χρόνο εκπόνησης αυτής της διπλωματικής δεν είναι δυνατόν να εξεταστούν όλα τα παραπάνω σενάρια και η αλληλεξάρτηση τους καθώς οι συνδυασμοί που προκύπτουν σε συνάρτηση με τον χρονικό διάστημα που εξετάζονται (8760 τιμές για έναν χρόνο) δημιουργούν άπειρους συνδυασμούς και αποτελέσματα. Συνεπώς για τους σκοπούς αυτής της διπλωματικής κρίθηκε καταλληλότερο να διατηρηθεί ένας συγκεκριμένο τρόπος φόρτισης, να θεωρηθεί η δυσμενέστερη κατάσταση για την μπαταρία κατά της σύνδεση της καθώς και να προκαθοριστεί μία συγκεκριμένη θέση στην οποία συνδέονται τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα.

- **Πλήθος Ηλεκτρικών Οχημάτων :**

Το πλήθος των ηλεκτρικών οχημάτων επηρεάζει πρωτίστως την ροή φορτίου και δευτερευόντως το κόστος. Αυτό συμβαίνει λόγω του τρόπου που λειτουργεί ο αλγόριθμος. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος δημιουργεί έναν πίνακα αναλόγως με δύο μεγέθη που δίνονται ως δεδομένα : το συνολικό μέγεθος της μπαταρίας και τα επιτρεπόμενα βήματα φόρτισης που εδώ είναι 400W το κάθε ένα όπως είπαμε. Επομένως δημιουργείται ένα διάγραμμα :



Το διάγραμμα αυτό έχει στον άξονα x'x τα βήματα της φόρτισης (ανά ώρα τοποθετημένα ενώ ο κάθετος άξονας απεικονίζει την εκάστοτε κατάσταση της μπαταρίας. Κάθετη άνοδος υποδηλώνει περισσότερα από ένα βήματα φόρτισης σε μία ώρα. Δηλαδή αν για ένα x υπάρξουν περισσότερες τιμές y έχουμε περισσότερα βήματα φόρτισης ανά ώρα. Αυτό είναι επιτρεπτό καθώς δεν υπάρχει αντιστοιχία 1-1 όντας μέθοδος βελτιστοποίησης. Η μέθοδος αυτή επομένως ψάχνει πώς να φτάσει στο μέγιστο σημείο των 10kW ανεβαίνοντας αναλόγως ανά 400W όπου το επιτρέπουν οι επικρατούσες συνθήκες στο δίκτυο. Όσα

περισσότερα αυτοκίνητα τόσο πιθανότερο είναι να εμφανιστούν προβλήματα στην ροή φορτίου καθώς τα 10kW σε ένα σχετικά μικρό σύστημα όπως αυτό είναι αρκετά πόσο μάλλον όταν πολλαπλασιάζονται τα αυτοκίνητα. Έτσι όταν εννοούμε πως δεν συνδέεται με το κόστος εννοούμε πως εφόσον η παραγωγή ενεργού ισχύος της ανεμογεννήτριας και των φωτοβολταϊκών δεν υπεισέρχεται στην αντικειμενική συνάρτηση που βελτιστοποιεί το κόστος τότε το μόνο που μπορεί να επηρεάσει το κόστος από το αυξημένο πλήθος ηλεκτρικών οχημάτων είναι προφανώς η αυξημένη ζήτηση ενεργού ισχύος. Εδώ όμως επεμβαίνει ο αλγόριθμος φόρτισης που για να βελτιστοποιήσει το κόστος ανιχνεύει το δίκτυο και αν καταλήξει πως είναι επιζήμιο για το δίκτυο, από άποψη κόστους να φορτίσει τα ηλεκτρικά οχήματα, τότε αναβάλλει την φόρτιση τους για την επόμενη ώρα. Έτσι εκμεταλλευόμαστε στο μέγιστο δυνατό τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, που δεν συμπεριλαμβάνονται στην αντικειμενική μας συνάρτηση, βελτιστοποιώντας το κόστος μέσω ενός ακριβούς ελέγχου του δικτύου. Κατ' αυτό τον τρόπο οι διαφορές στο κόστος είτε μιλάμε για ένα είτε για δέκα οχήματα είναι αμελητέες στην διάρκεια ενός μήνα, πόσο μάλλον ενός χρόνου. Αυτό όμως δεν σημαίνει απαραίτητα πως μπορούμε να φορτίσουμε όσα οχήματα επιθυμούμε χωρίς κόστος διότι αυτή είναι μία ιδανική κατάσταση που παύει να ισχύει όταν συμβούν ένα από τα δύο παρακάτω:

- ❖ Εάν ο αριθμός των οχημάτων είναι τόσο μεγάλος που ο αλγόριθμος δεν προλαβαίνει μέσα στις δέκα αυτές ώρες, που του δίνονται, να φορτίσει τα ηλεκτρικά οχήματα, όπως εκείνος επιλέξει βάσει των συμπερασμάτων του από την εποπτεία του δικτύου, τότε προκύπτει ένας περιοριστικός αριθμός περίπου ίσος με >31 οχημάτων, αριθμός ικανοποιητικός αν αναλογιστούμε τα μέγεθος και την δυναμικότητα του συστήματος μας.
- ❖ Εάν λόγω παρουσίας αυτών των οχημάτων παραβαίνονται οι περιορισμοί που παρέχουν ποιότητα στο δίκτυο όπως περιορισμοί τάσης πέρα των ορίων, περιορισμοί ρευμάτων, περιορισμοί γραμμών. Εδώ μπορεί να γίνει ενδυνάμωση του δικτύου έτσι ώστε να ανταπεξέλθει σε περισσότερα οχήματα. Αυτός ο περιορισμός είναι πιο αυστηρός από τον 1<sup>ο</sup> ως προς το πλήθος των ηλεκτρικών οχημάτων καθώς ανάλογα με τον μήνα περιορίζει τα ηλεκτρικά οχήματα σε περίπου έως και 15. Αυτό βέβαια τονίζουμε ισχύει για τις γραμμές και το σύστημα ως έχει ενώ με μικρές τροποποιήσεις μπορούμε να έχουμε μόνο τον 1<sup>ο</sup> περιορισμό για τον καθορισμό του πλήθους των ηλεκτρικών οχημάτων.

Στην περίπτωση που τοποθετηθούν τα οχήματα γίνεται βελτιστοποίηση κόστος ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες (ανά ώρα) του δικτύου. Αν για παράδειγμα υπάρξει ένα βράδυ στο οποίο η ζήτηση για διαφόρους λόγους είναι αυξημένη ενώ οι ΑΠΕ δεν παράγουν μεγάλες ποσότητες ισχύος δημιουργώντας πρόβλημα. Αυτό γιατί το σύστημα θα πρέπει να καλύψει την ζήτηση ανά ώρα, αλλά ταυτόχρονα επειδή θα έχει πολλά ηλεκτρικά οχήματα (τα οποία στο τέλος τη 10<sup>15</sup> ώρας θα πρέπει να έχουν φορτίσει πλήρως) δεν θα υπάρχει η δυνατότητα να αναβάλλει την φόρτιση τους για μία μετέπειτα ώρα περιοριζόμενο από τον περιορισμό των 10 ωρών για φόρτιση. Σε αυτή την περίπτωση τα ηλεκτρικά οχήματα όσα και να είναι θα φορτιστούν αλλά με αυξημένο κόστος διότι αναγκαστικά θα χρειαστεί να

λειτουργήσουν συμβατικές μονάδες παραγωγής ενέργειας. Ένας ακόμα λόγος βελτιστοποίησης είναι η αυξημένη ζήτηση τα βράδια του χειμώνα που προορίζεται για θέρμανση. Γι' αυτό γίνεται βελτιστοποίηση και στις μονάδες CHP (συμπααραγωγής) που έχουν ρυθμιστεί έτσι ώστε προτεραιότητας τους να δίνεται στην κάλυψη των θερμικών φορτίων και μετέπειτα των ηλεκτρικών, δηλαδή ότι περισσεύει από την εγκατεστημένη ισχύ τους (βάσει ενός λόγου θερμότητας-ηλεκτρισμού) . Συνεπώς το σύστημα των ηλεκτρικών οχημάτων για εύλογο αριθμό οχημάτων λειτουργεί ανεπηρέαστο με το ελάχιστο δυνατό κόστος.

- **Κατάσταση Μπαταρίας:**

Η μπαταρία κατά την σύνδεση της την 1<sup>η</sup> ώρα θεωρούμε πως είναι τελείως άδεια ή σχεδόν άδεια (κάτω από το 5%) αγνοώντας τα επίπεδα ασφαλείας που πιθανόν να έχει η μπαταρία ή την κατάσταση της μπαταρίας έπειτα από την χρήση που της έκανε ο ιδιοκτήτης του EV κατά την διάρκεια της ημέρας. Έγινε αυτή η θεώρηση καθώς σκοπός μας είναι να εξετάσουμε το κόστος φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων και πως αυτό επηρεάζει το συνολικό κόστος στην διάρκεια μίας ημέρας, και κατά συνέπεια στην διάρκεια του χρόνου, θεωρώντας την οριακή τιμή του έτους 2008 (η οποία ήταν μία αρκετά υψηλή οριακή τιμή συστήματος). Έτσι λοιπόν όντας άδεια η μπαταρία το σύστημα θα έχει να επιτελέσει επιπρόσθετο έργο καθώς θα πρέπει να διαθέσει μεγαλύτερα ποσά ενεργού ισχύος για την πλήρη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων. Με γνώμονα λοιπόν την εξέταση του κόστους επιλέχθηκε η δυσμενέστερη συνθήκη έτσι ώστε να εξεταστεί αναλυτικά το δυσκολότερο δυνατό σενάριο.

Ακόμα η μπαταρία θεωρείται πως είναι 10kW όμοιων χαρακτηριστικών για όλα τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα που συνδέονται στο δίκτυο. Τέλος εξετάζονται δύο σενάρια διείσδυσης των ΑΠΕ όπου κατά το 1<sup>ο</sup> σενάριο οι ΑΠΕ (που είναι η ανεμογεννήτρια και τα φωτοβολταϊκά) έχουν εγκατεστημένη ισχύ αθροιστικά 28kW ενώ κατά το 2<sup>ο</sup> σενάριο η ισχύς αυτή σχεδόν διπλασιάζεται και γίνεται 59,5kW. Παρακάτω παρουσιάζονται εκτενέστερα οι παράμετροι πριν γίνει περιγραφή των μεθόδων βελτιστοποίησης αυτού του πολυκριτηριακού προβλήματος.

- **Τρόπος Φόρτισης :** Ως τρόπος φόρτισης της μπαταρίας έχει επιλεγθεί ένα σύστημα το οποίο θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως Level 1 φόρτιση με την διαφορά πως επιβάλλεται ανώτατο όριο για το επίπεδο της φόρτισης σε κάθε βήμα της φόρτισης. Το σύστημα το οποίο φορτίζει την μπαταρία του εκάστοτε ηλεκτρικού οχήματος έχει ως βήμα φόρτισης τα 400W. Ελέγχοντας έτσι την ζήτηση του συστήματος αλλά και την παραγωγή (από ΑΠΕ αλλά και από τις συμβατικές πηγές ενέργειας) επιλέγει ποια ώρα είναι βέλτιστη για να δοθεί ή να δοθούν βήματα φόρτισης. Λέμε να δοθούν βήματα φόρτισης γιατί μέσα σε αυτή την μία ώρα μπορούν να σταλθούν περισσότερα από ένα βήματα φόρτισης με max βήματα φόρτισης που καθορίζονται από το δίκτυο και την κατάσταση του και σπανίως ξεπερνάνε τα 6 βήματα (6x400W=2.4kW δηλαδή ανά ώρα). Ακολούθως το σύστημα μπορεί να φορτίσει κάποιο όχημα σε μία συγκεκριμένη ώρα, επειδή η κατάσταση της μπαταρίας του και το

δίκτυο επιτρέπουν αυτή την ενέργεια ενώ μπορεί να μην φορτίσει κάποιο άλλο για τους ίδιους λόγους και να αναβάλλει την φόρτιση του για επόμενη ώρα.

- **Θέση Ηλεκτρικών Οχημάτων :** Η θέση των ηλεκτρικών οχημάτων τοποθετείται στην θέση του ζυγού 2 θεωρώντας πως οι κάτοικοι εναποθέτουν τα αυτοκίνητα τους σε αυτή την θέση για φόρτιση. Αυτή η θέση είναι δυνατό να αλλάξει αλλά μελέτη περαιτέρω θέσεων για την φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων και πως αυτό επηρεάζει την ροή φορτίου δεν ενδιαφέρει την παρούσα διπλωματική.

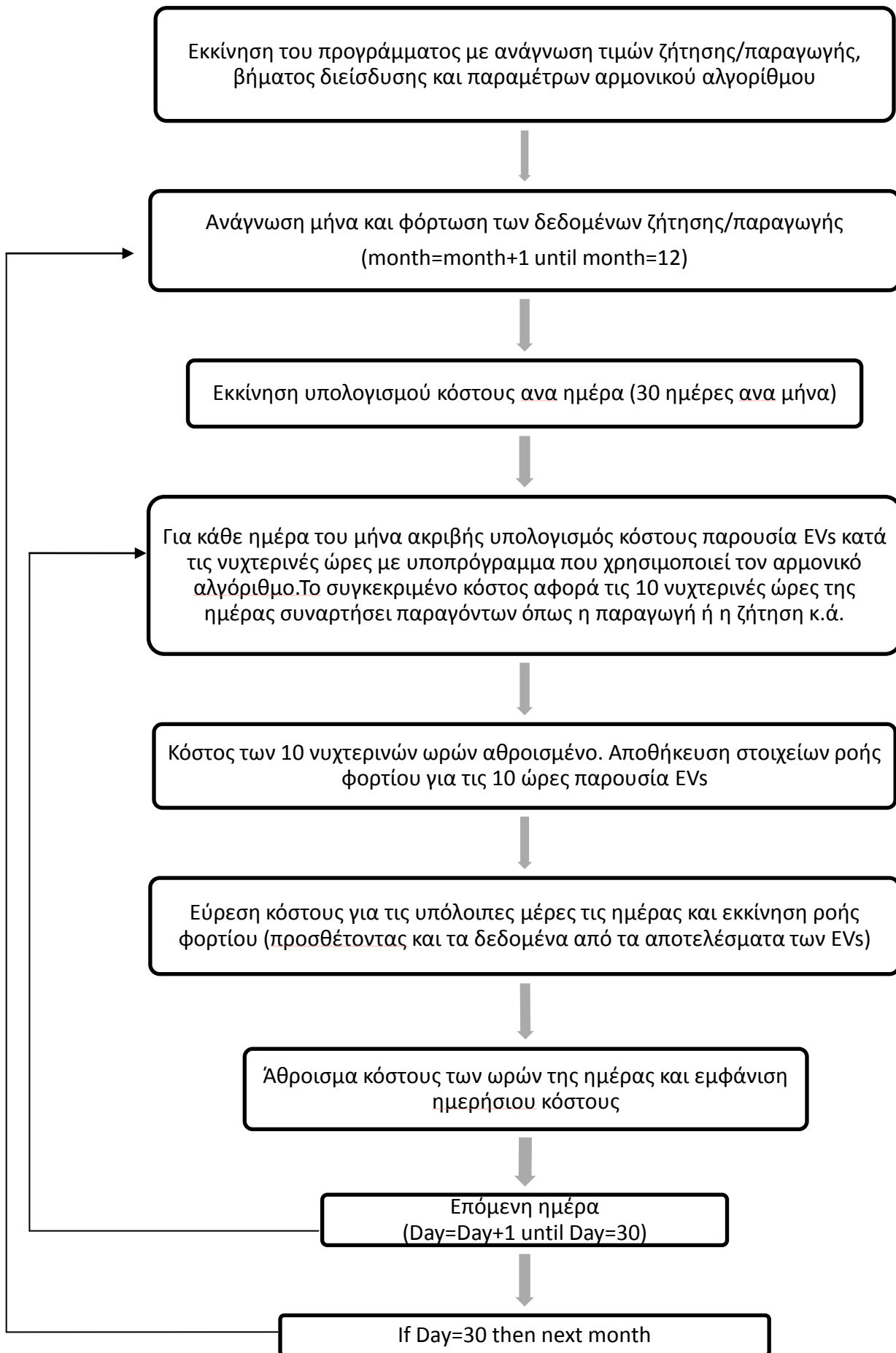
### 9.7.2 Το πρόγραμμα και η δομή του

Το πρόγραμμα έχει δομηθεί έτσι ώστε να υπάρχει ένα υποπρόγραμμα ή αλλιώς μία υποσυνάρτηση που θα τρέχει τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα προτού ξεκινήσει το κυρίως μέρος του προγράμματος. Έτσι στην αρχή γίνεται ανάγνωση των δεδομένων ζήτησης και παραγωγής ανά μήνα για όλους τους μήνες του χρόνου. Ακόμα γίνεται ανάγνωση των παραμέτρων του αρμονικού αλγορίθμου και των δεδομένων της διείσδυσης. Έπειτα το πρόγραμμα ξεκινά να υπολογίζει το κόστος των ηλεκτρικών οχημάτων καθώς και την επιβάρυνση σε ενεργό ισχύ στον ζυγό 2 που είναι συνδεδεμένα τα ηλεκτρικά οχήματα. Το υποπρόγραμμα αυτό των ηλεκτρικών οχημάτων χρησιμοποιεί τον αρμονικό αλγόριθμο για να διατρέξει το διάγραμμα που παρουσιάστηκε παραπάνω και να φτάσει στα 10kW για το κάθε αυτοκίνητο. Υπάρχουν δηλαδή τόσα διαγράμματα όσα και τα αυτοκίνητα και όλα αυτά συνδυάζονται σε ένα μεγάλο πολυδιάστατο πίνακα όπου οι συνδυασμοί φόρτισης αυξάνονται εκθετικά. Σε αυτό τον πίνακα ο αρμονικός αλγόριθμος ψάχνει τις βέλτιστες δυνατές μεταβάσεις βάσει των περιορισμών που υποβάλλονται.

Τονίζεται πως εδώ ο αρμονικός αλγόριθμος καλείται ξεχωριστά από το υποπρόγραμμα, και ανεξάρτητα από την κύρια ροή του προγράμματος που τον ξανακαλεί στην συνέχεια για την βελτιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης κόστους. Το κυρίως πρόγραμμα παραμένει σε παύση έως ότου το υποπρόγραμμα των ηλεκτρικών οχημάτων επιστρέψει με το συνολικό κόστος για τις 10 πρώτες ώρες καθώς και έναν πίνακα 10x1 που δείχνει την επιβάρυνση στον ζυγό 2 ανά ώρα σε ενεργό ισχύ. Τότε το κυρίως πρόγραμμα ξεκινάει και τρέχει το κόστος για 24 ώρες της ημέρας απουσία των ηλεκτρικών οχημάτων. Από αυτές τις 24 ώρες το κόστος των τελευταίων 14<sup>ov</sup> ωρών προστίθενται με το κόστος των υπόλοιπων 10 ωρών των ηλεκτρικών οχημάτων ενώ οι αρχικές 10 ώρες που έτρεξαν απουσία των ηλεκτρικών οχημάτων κρατούνται για την απαραίτητη σύγκριση.

Η ροή φορτίου τρέχει στην συνέχεια λαμβάνοντας υπόψη τον πίνακα 10x1 που υποδηλώνει την επιβάρυνση στον ζυγό 2 λόγω των ηλεκτρικών οχημάτων παρουσιάζοντας την ροή φορτίου του 24ώρου. Έτσι τρέχει όλος ο μήνας δημιουργώντας τα κόστη ανά ημέρα που αθροίζονται συνολικά για να εξαχθεί το κόστος του μήνα. Το άθροισμα του κόστους του εκάστοτε μήνα μας δίνει το κόστος για όλο τον χρόνο. Το πρόγραμμα ακριβώς όπως περιγράφηκε παραπάνω ξανατρέχει για άλλα δεδομένα διείσδυσης (διπλάσια διείσδυση όπως αναφέρθηκε και παραπάνω) αλλάζοντας τις μεταβλητές διείσδυσης που διαβάζονται από το πρόγραμμα στην αρχή πριν την εκκίνηση του όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Η οριακή τιμή είναι του έτους 2008 για όλες τις προσομοιώσεις.





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10<sup>ο</sup>

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

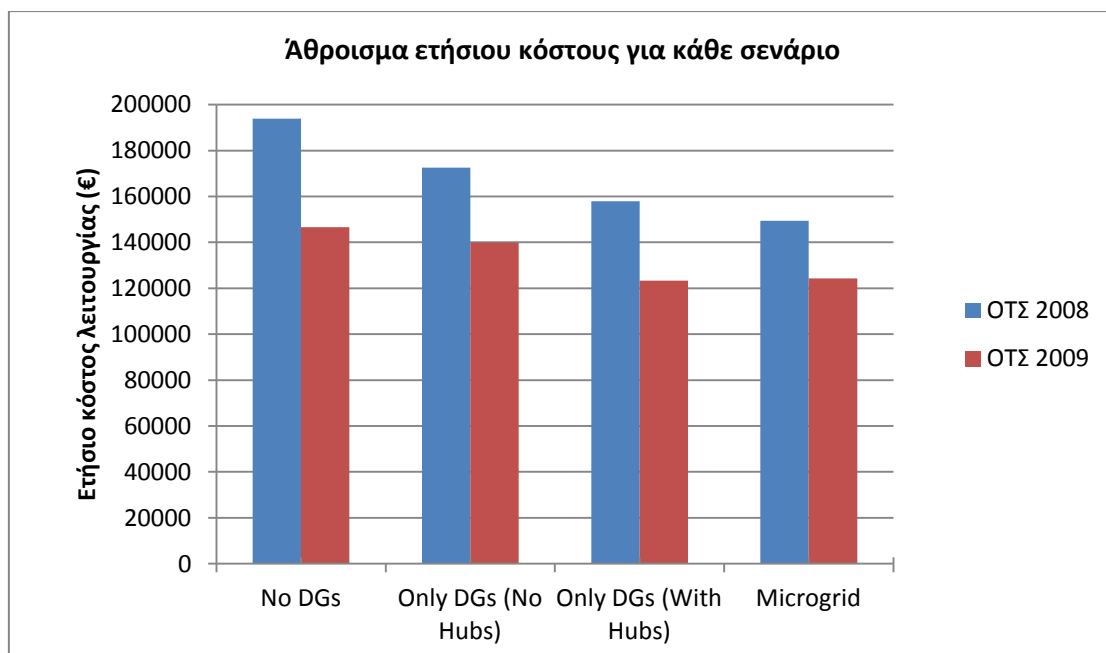
#### 10.1 ΜΕΛΕΤΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΔΙΑΦΟΡΑ ΜΕΓΕΘΗ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ

##### 10.1.1 Ετήσιο κόστος

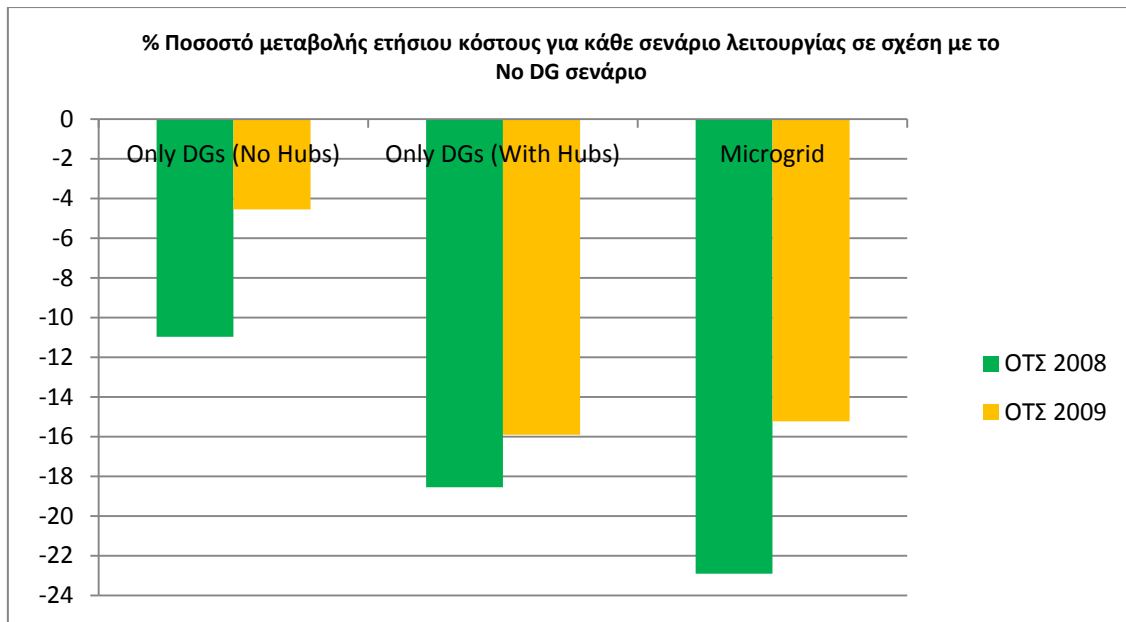
##### 10.1.1.1 Μελέτη ως προς ένα επίπεδο DG διείσδυσης (88kW)

Στα δύο διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζεται:

- το άθροισμα του ετήσιου κόστους λειτουργίας για δύο διαφορετικές ΟΤΣ και για τα τέσσερα υπό μελέτη σενάρια, πάντα για εγκατεστημένη DG παραγωγή 88 kW.
- το επί τοις εκατό ποσοστό μείωσης του ετήσιου κόστους για τα σενάρια Only DGs(No Hubs), Only DGs (With Hubs) και Microgrid σε σχέση με το No DGs σενάριο.



Σχήμα 10.1



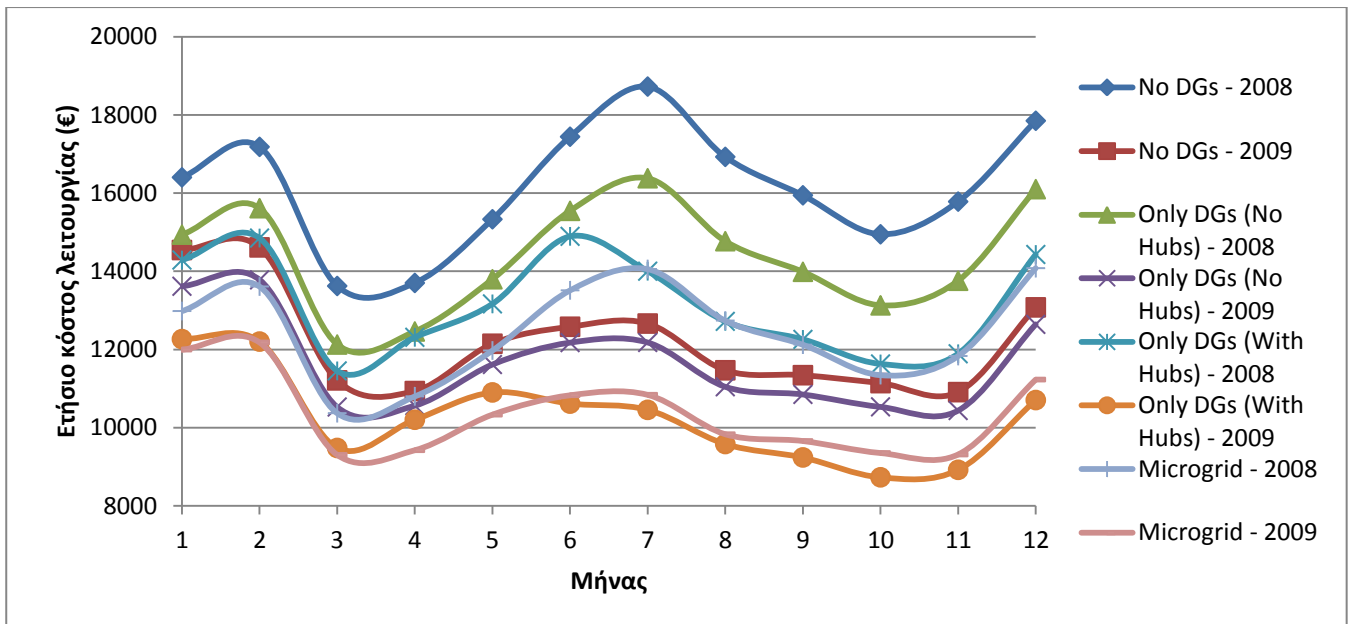
Σχήμα 10.2

Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 10.1, το συνολικό ετήσιο κόστος στην περίπτωση που η ζήτηση ικανοποιείται αποκλειστικά από το ανάντη δίκτυο (No DGs σενάριο) ανέρχεται στα 193.859 € για οριακή τιμή του συστήματος 2008, ενώ στα 146.636 € για οριακή τιμή του συστήματος 2009.

Για το Only DGs σενάριο χωρίς Hubs [Only DGs (No Hubs) – σενάριο 2] το αντίστοιχο κόστος μειώνεται στα 172.612 € και στα 139.980,2 € για ΟΤΣ 2008 και 2009 αντίστοιχα. Η διαφορά τους σε σχέση με το No DGs σενάριο ανέρχεται στα 21.245,95 € , που αντιστοιχεί σε ποσοστό μείωσης 10,96% για την ΟΤΣ 2008, ενώ για την ΟΤΣ 2009 η διαφορά με το No DGs σενάριο είναι 6.655,772 €, δηλαδή κόστος μειωμένο κατά 4,54% σύμφωνα και με το Σχήμα 10.2.

Όμοια για το Only DGs σενάριο αλλά με Hubs αυτή τη φορά, το κόστος είναι ακόμα μικρότερο σε σχέση και με τα δύο προηγούμενα σενάρια. Συγκεκριμένα, για ΟΤΣ 2008 το κόστος ανέρχεται στα 157.899 €, σημειώνοντας διαφορά 18,55% σε σχέση με το No DGs σενάριο του ίδιου έτους, δηλαδή διαφορά 35.959,01 €. Και για την ΟΤΣ 2009 όμοια το κόστος λειτουργίας για το Only DGs σενάριο με Hubs είναι 123.315,7 €, δηλαδή κατά 23.320,32 € μειωμένο σε σχέση με το σενάριο αναφοράς No DGs, διαφορά που αντιστοιχεί σε 15,9% μείωση.

Τέλος, για το σενάριο του μικροδικτύου, εδώ παρατηρούμε και τη μεγαλύτερη μείωση του ετήσιου κόστους, η οποία φτάνει και στο 22,91% για ΟΤΣ 2008 (με κόστος να ανέρχεται μόλις στα 149445 €, δηλαδή κατά 44.412,95 € λιγότερα σε σχέση με το No DGs σενάριο). Για την ΟΤΣ 2009 παρατηρείται και εδώ μείωση σε σχέση με το σενάριο αναφοράς, η οποία ανέρχεται σε 15,22%, και συνολικό κόστος λειτουργίας 124.309,9 €.

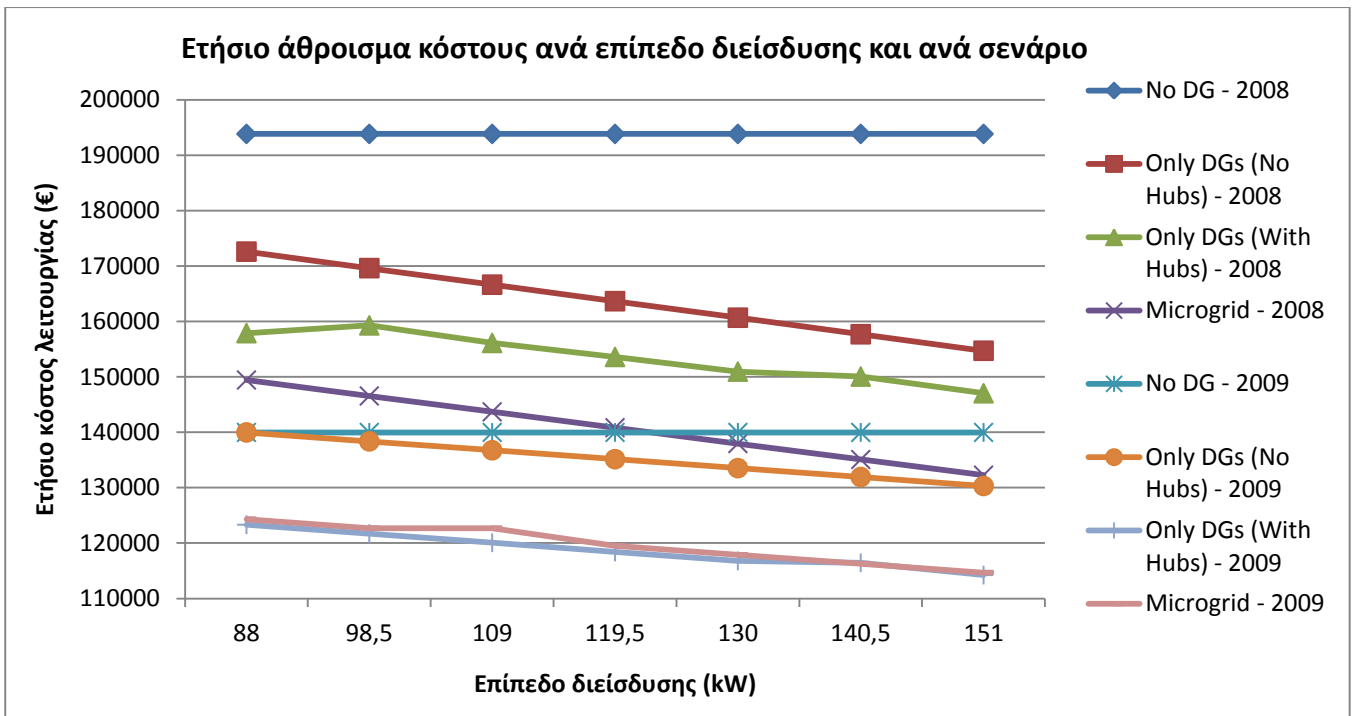


Σχήμα 10.3 Κόστος λειτουργίας ανά μήνα για όλα τα σενάρια, για δύο ΟΤΣ

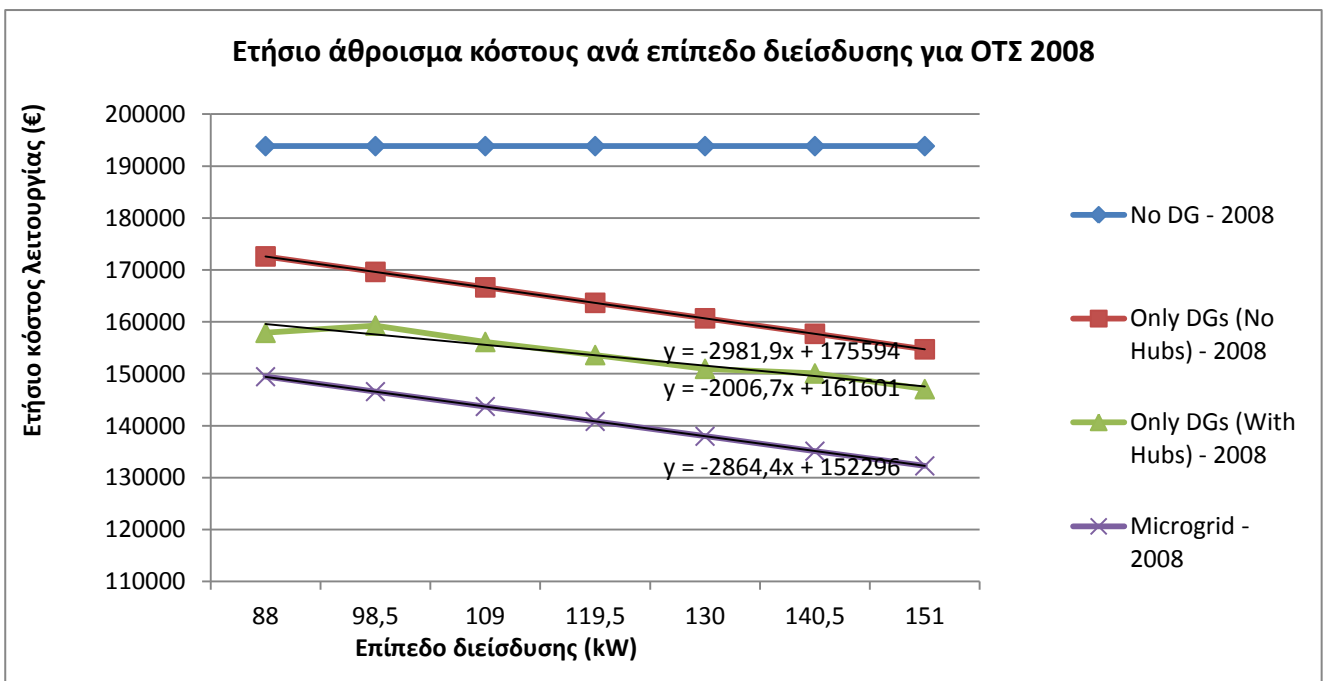
Παραθέτουμε ενδεικτικά και το Σχήμα 10.3 για να δείξουμε πώς μεταβάλλεται το κόστος λειτουργίας του δικτύου κατά τη διάρκεια του έτους. Παρόλες τις διαφορές των σεναρίων λειτουργίας σε σχέση με το No DGs σενάριο και την οριακή τιμή του συστήματος, παρατηρείται μια μείωση του ενεργειακού κόστους τον 3<sup>ο</sup> μήνα του έτους, δηλαδή το Μάρτιο. Αυτή η μείωση φαίνεται να είναι μεγαλύτερη από τη δεύτερη μείωση που παρατηρείται κατά τους φθινοπωρινούς μήνες Σεπτέμβριο-Νοέμβριο. Αντιθέτως, το μεγαλύτερο ενεργειακό κόστος παρατηρείται, όπως είναι και αναμενόμενο άλλωστε, τους καλοκαιρινούς μήνες Ιούνιο με Αύγουστο, με το κόστος να παρουσιάζει μέγιστο τον Ιούλιο. Αυτό το peak του κόστους δικαιολογείται προφανώς από την αυξημένη ζήτηση ενέργειας την οποία καλείται να ικανοποιήσει το δίκτυο λόγω της εκτεταμένης χρήσης κλιματιστικών μονάδων σε όλους τους ιδιωτικούς και δημόσιους κλειστούς χώρους, όπως επίσης και λόγω του αυξημένου τουρισμού. Τους δύο χειμωνιάτικους μήνες, Δεκέμβριο και Ιανουάριο, επίσης το κόστος αυξάνεται κατ' αναλογία και με τη ζήτηση πάντα, αλλά φτάνει σε τιμές λίγο χαμηλότερες από αυτές του καλοκαιριού.

#### 10.1.1.2 Μελέτη ως προς περισσότερα επίπεδα DG διείσδυσης (88-151 kW)

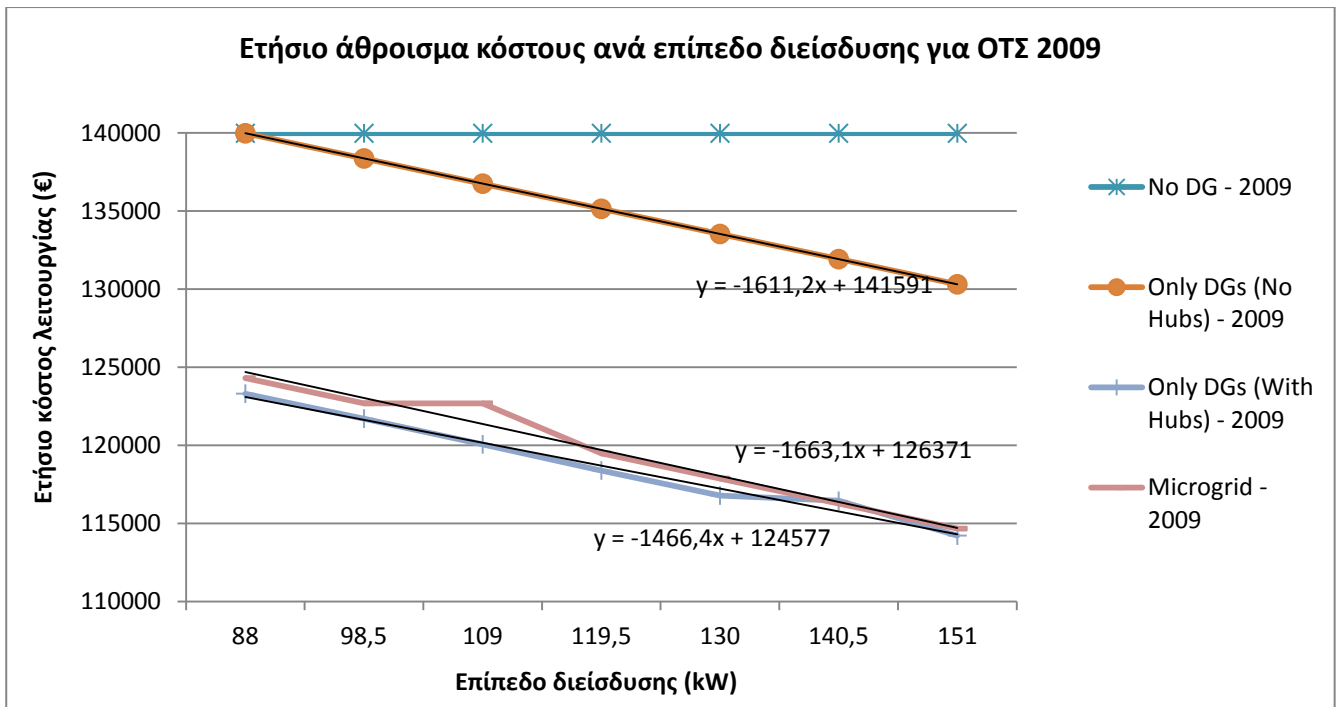
Το ετήσιο κόστος μελετήθηκε πριν για τα διάφορα σενάρια λειτουργίας μόνο για ένα επίπεδο διείσδυσης, αυτό της εγκατεστημένης ισχύος των 88 kW, που είναι και η αρχική εγκατεστημένη ισχύς στο δίκτυο που μελετάμε. Παρακάτω ακολουθεί μελέτη του κόστους για επτά επίπεδα διείσδυσης διεσπαρμένης παραγωγής, από τα 88 kW ως τα 151 kW με βήμα 10,5 kW, όπως αναφέρθηκε και στην §9.3.



Σχήμα 10.4.α



Σχήμα 10.4.β



Σχήμα 10.4.γ

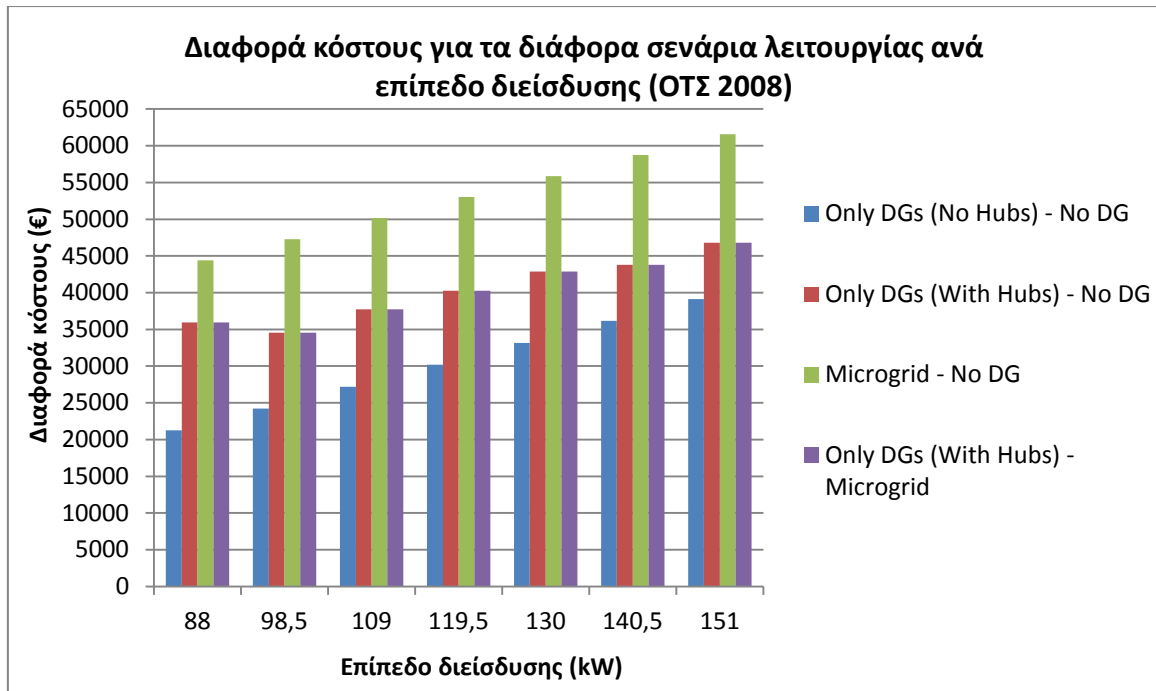
Το Σχήμα 10.4.α παρουσιάζει συνολικά και για τα τέσσερα σενάρια λειτουργίας του δικτύου και για τις δύο ΟΤΣ το ετήσιο ενεργειακό κόστος ανά επίπεδο διείσδυσης. Για να φανεί καλύτερα η μείωση του κόστους σε κάθε σενάριο όσο αυξάνεται η διείσδυση, τα Σχήματα 10.4.β και 10.4.γ παρουσιάζουν τις ίδιες καμπύλες αλλά μόνο για ΟΤΣ 2008 και 2009 αντίστοιχα.

Καταρχήν να σημειωθεί ότι, ανεξάρτητα από το επίπεδο διείσδυσης, όταν όλη η ζήτηση καλύπτεται από το ανάντη δίκτυο (No DG σενάριο), τότε το λειτουργικό κόστος είναι σταθερό (ευθεία γραμμή στα 193.858 € και στα 146.636 € για ΟΤΣ 2008 και 2009 αντίστοιχα).

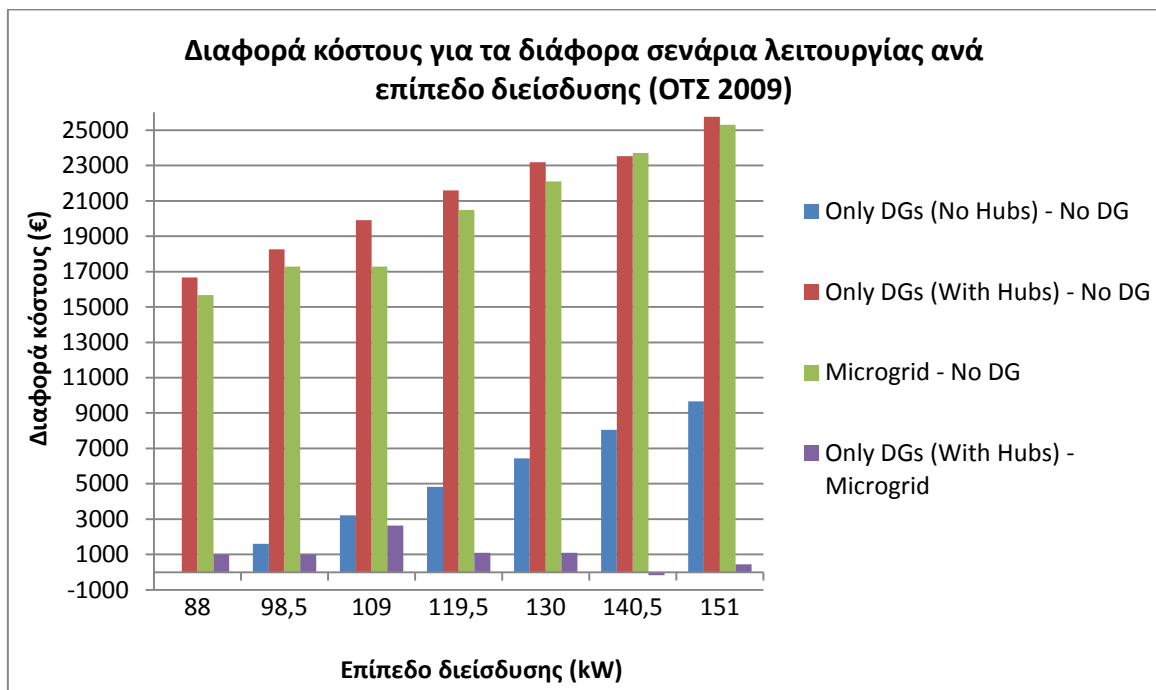
Από κει πέρα, όπως είδαμε και στην §10.1.1, μόνο για το πρώτο βήμα διείσδυσης, που είναι και το μηδενικό με την ήδη υπάρχουσα εγκατεστημένη ισχύ στα 88 kW, το κόστος, όσο αυξάνεται η διείσδυση των ΑΠΕ, ελαττώνεται γραμμικά. Στα Σχήματα 10.4.β και γ παρατίθενται πάνω από τις καμπύλες και οι γραμμές τάσης που τις αντιπροσωπεύουν. Για την ΟΤΣ 2008, οι καμπύλες κόστους για τα σενάρια Only DGs (No Hubs), Only DGs (With Hubs) και Microgrid είναι σχεδόν παράλληλες, η μια μετακινημένη προς τα κάτω σε σχέση με την αμέσως προηγούμενη. Αυτό φανερώνει πως το κόστος μειώνεται σταθερά όσο αυξάνεται η διείσδυση και η «υπομετρική» διαφορά εξηγείται από τα συμπεράσματα της §10.1.1, ότι κάθε σενάριο είναι «καλύτερο» από το προηγούμενό του με την έννοια του ακόμα μικρότερου ετήσιου κόστους λειτουργίας.

Την ίδια καθοδική, παράλληλη πορεία ακολουθούν και οι καμπύλες στο Σχήμα 10.4.γ για ΟΤΣ 2009, μόνο που εδώ η καμπύλη κόστους για το σενάριο Only DGs (With Hubs) είναι μετακινημένη ελαφρώς πιο πάνω από την καμπύλη του Microgrid σεναρίου. Αυτό φάνηκε άλλωστε και στο Σχήμα 10.2 της παραγράφου 10.1.1 όπου η ποσοστιαία μείωση του ετήσιου κόστους για το Microgrid σενάριο ήταν λίγο μικρότερη από την αντίστοιχη του Only DGs (With Hubs) σεναρίου (15,22% και 15,90% αντίστοιχα -> πολύ μικρή διαφορά στα 0,68%).

Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνεται η διαφορά κόστους μεταξύ των σεναρίων (4 διαφορετικοί συνδυασμοί προς σύγκριση) πρώτα για ΟΤΣ 2008 και έπειτα για ΟΤΣ 2009.



Σχήμα 10.5



Σχήμα 10.6

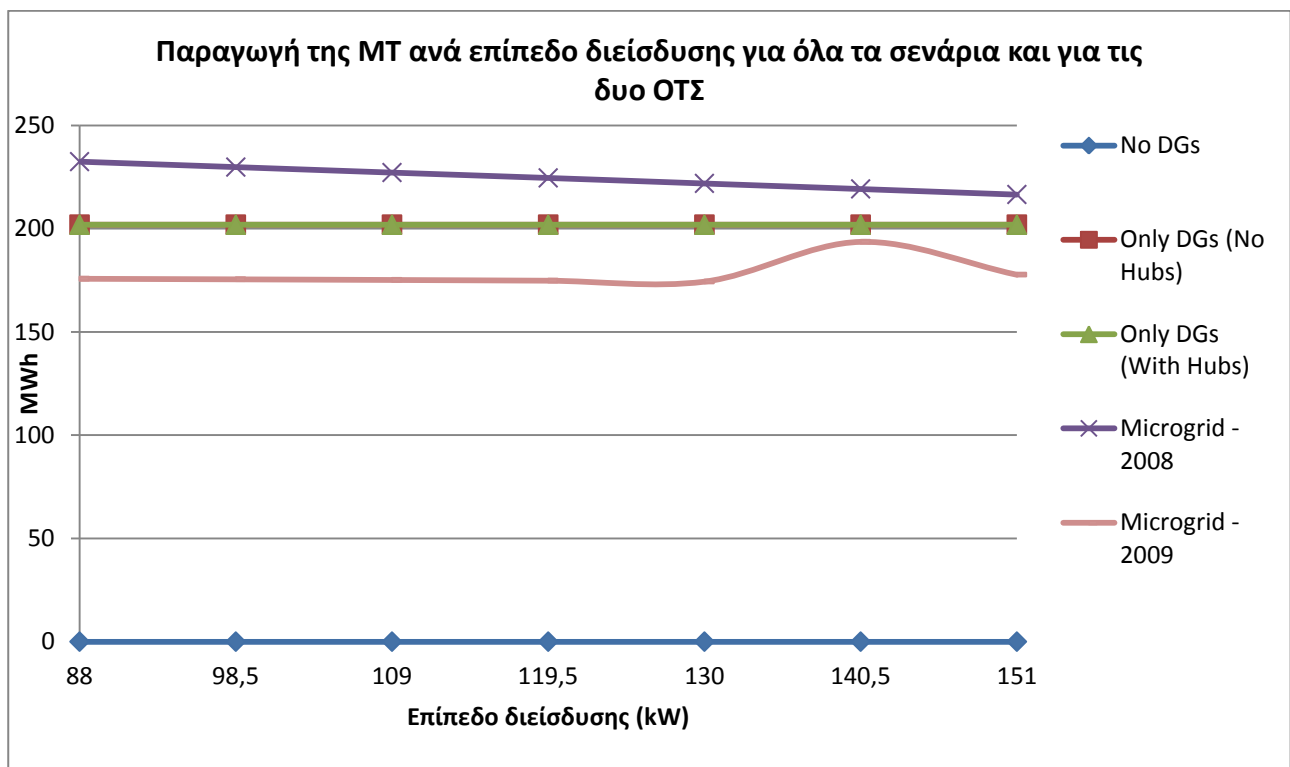
Στο Σχήμα 10.5 για ΟΤΣ 2008 η μεγαλύτερη διαφορά παρατηρείται ανάμεσα στα σενάρια Microgrid και No DGs, και αυτή ανέρχεται στα 61.591 €. Για ΟΤΣ 2009, οι συνδυασμοί Microgrid-

No DG και Only DGs(With Hubs)-No DG ακολουθούν ίδια ανοδική πορεία όσο αυξάνεται η διείσδυση των ΑΠΕ, με τις διαφορές κόστους μεταξύ Microgrid-No DG να είναι ελαφρώς μικρότερες των διαφορών κόστους μεταξύ Only DGs(With Hubs)-No DGs.

Η μορφή των καμπυλών αποδεικνύει πως το μικροδίκτυο είναι η πιο αποδοτική επιλογή από άποψη οικονομική, εφόσον καταγράφονται σημαντικά κέρδη από τη λειτουργία του σε σχέση με την αντίστοιχη του δικτύου χωρίς καθόλου διεσπαρμένη παραγωγή.

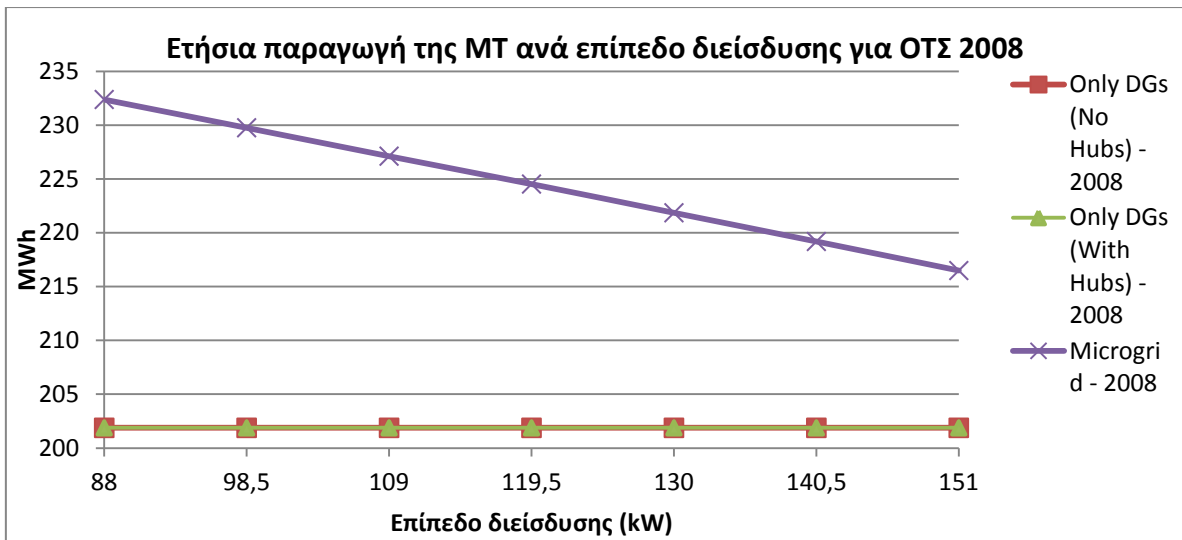
Να αναφέρουμε ότι αν αυξάναμε κι άλλο τη διείσδυση των ΑΠΕ, τότε η καμπύλη κόστους για το μικροδίκτυο θα συνέχιζε την καθοδική της πορεία, όμως σε κάποιο επίπεδο διείσδυσης θα έκανε ελάχιστο και από εκεί και πέρα το κόστος θα άρχιζε να αυξάνει ξανά. Η καμπύλη του ετήσιου λειτουργικού κόστους τότε θα έπαιρνε τη μορφή παραβολής. Οπότε η λειτουργία του δικτύου ως μικροδίκτυο είναι συμφέρουσα μόνο για τα χαμηλά επίπεδα διείσδυσης των ΑΠΕ, που είναι και τα πιο ρεαλιστικά, γιατί ας μην ξεχνάμε πως ξεφεύγει από τα όρια της πραγματικότητας μια διείσδυση ΑΠΕ επιπέδου 298kW εγκατεστημένης ισχύος (δηλαδή 21<sup>ο</sup> βήμα διείσδυσης), όταν η μέγιστη ζήτηση που εμφανίζεται κάποια ώρα από τις 8760 του έτους είναι περίπου 230kW!

### 10.1.2 Ετήσια παραγωγή ΜΤ και FC

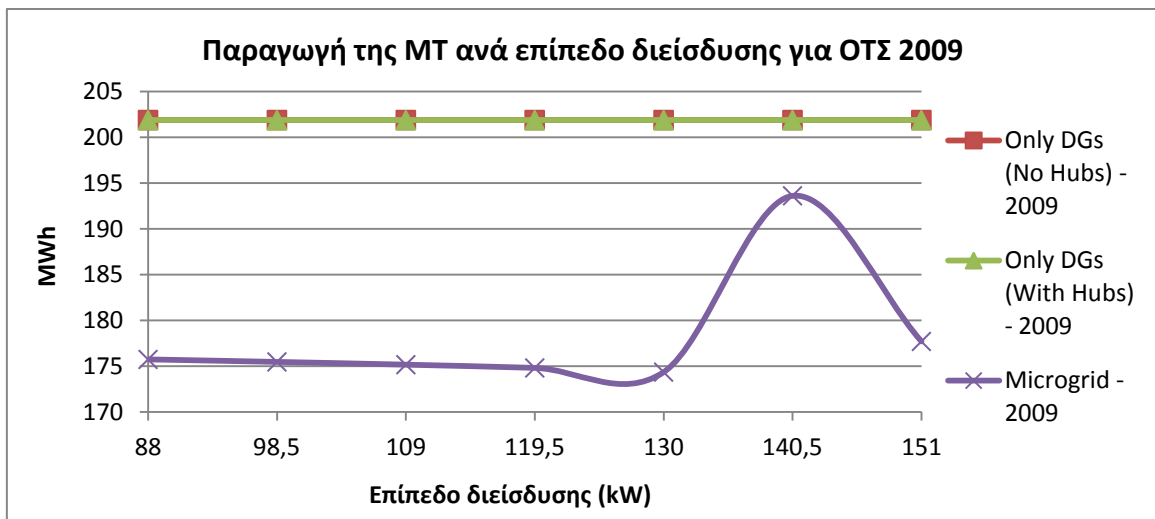


Σχήμα 10.7.α

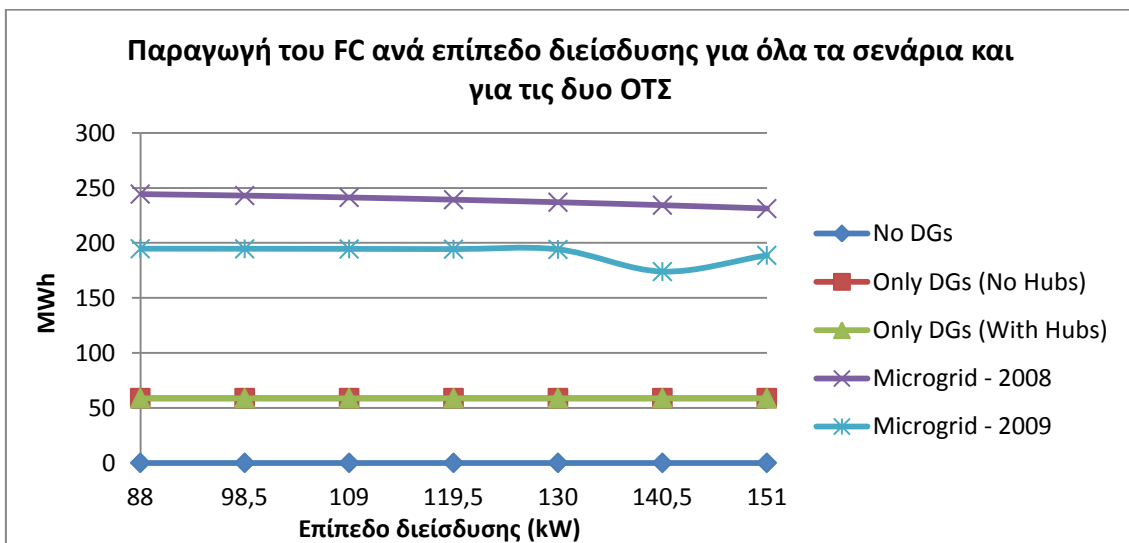




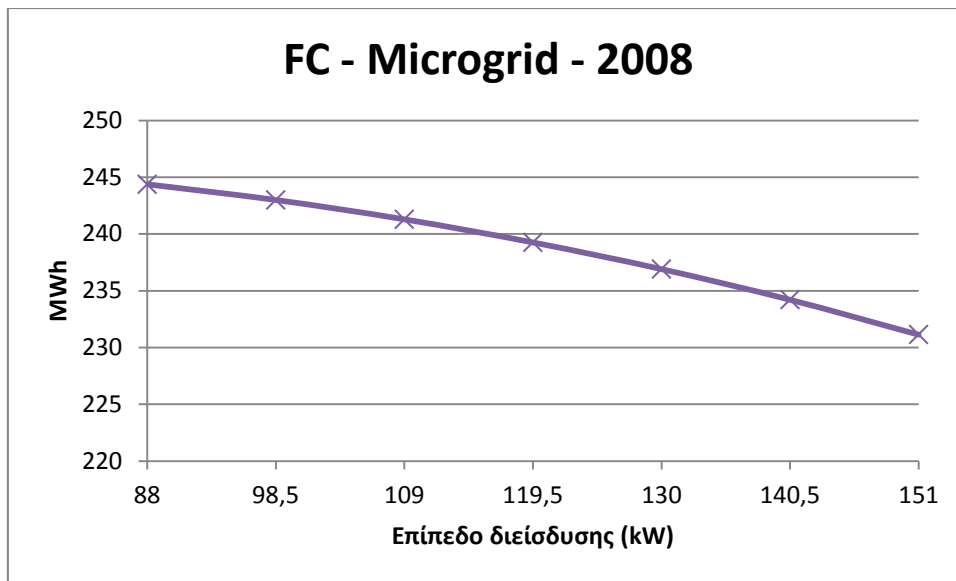
Σχήμα 10.7.β



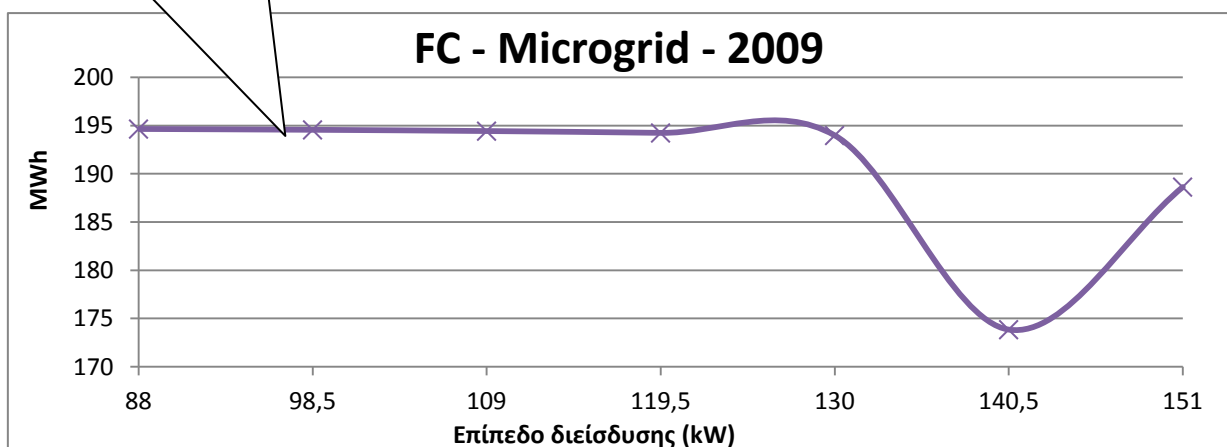
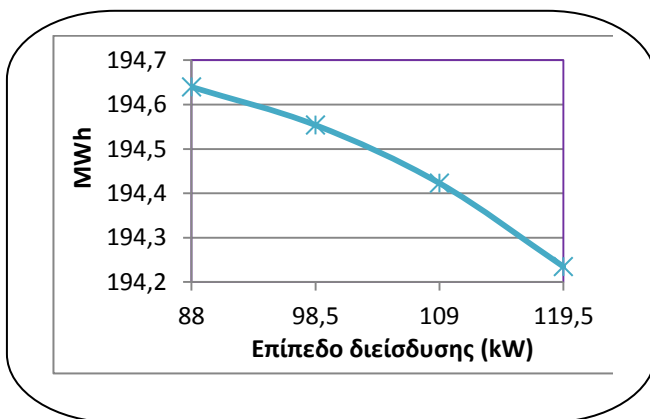
Σχήμα 10.7.γ



Σχήμα 10.8.α



Σχήμα 10.8.β



Σχήμα 10.8.γ

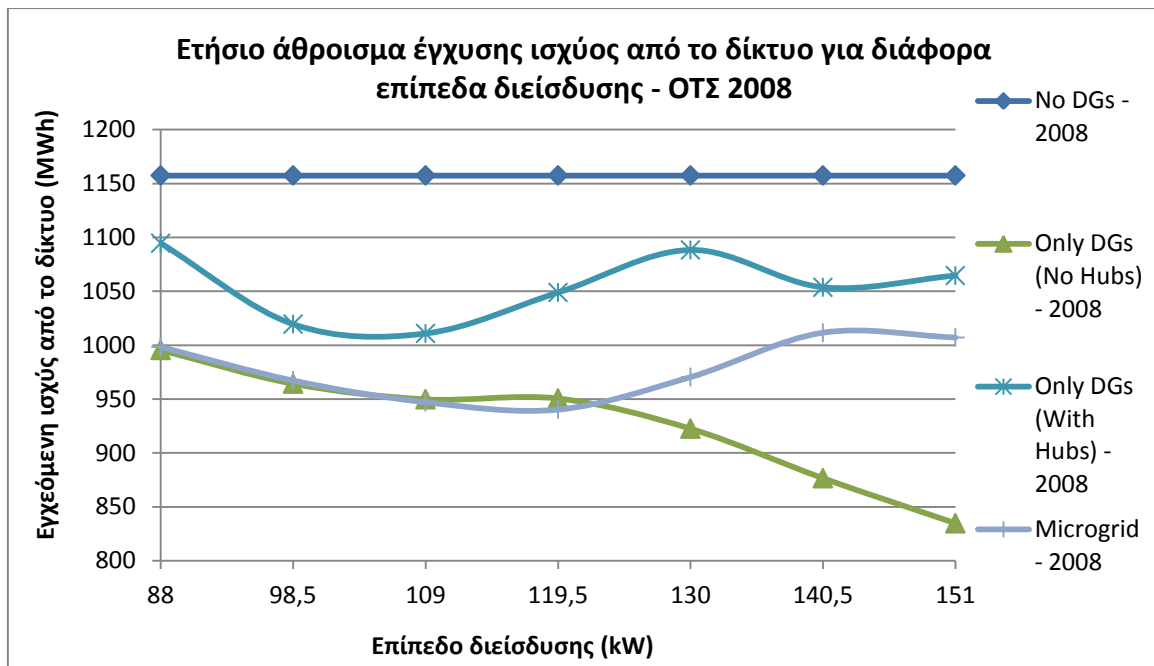
Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα:

- Όταν όλη η ζήτηση καλύπτεται από το ανάντη δίκτυο (No DGs σενάριο), τότε δεν υπάρχει καμιά μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής σε λειτουργία στο δίκτυο, οπότε και η παραγωγή τόσο της μικροτουρμπίνας MT όσο και της κυψέλης καυσίμου FC είναι μηδενική (Σχήμα 10.7.α και Σχήμα 10.8.α)
- Στα σενάρια λειτουργίας Only DGs (No Hubs) και Only DGs (With Hubs) έχουμε ανεξάρτητη λειτουργία των μικροπηγών. Αυτό, όπως αναλύθηκε και στην §9.2, σημαίνει πως MT και FC λειτουργούν καλύπτοντας το φορτίο που ζητείται μόνο τοπικά:
  - ο Αν το φορτίο που ζητείται είναι μικρότερο από το όριο ελάχιστης παραγωγής, τότε η MT παράγει όσο είναι το κατώτατο επιτρεπτό της όριο. Αν η ζήτηση είναι πάλι μεγαλύτερη από το ανώτατο όριο λειτουργίας της MT, αυτή τίθεται να παράγει το μέγιστο που μπορεί. Τρίτη και τελευταία περίπτωση, αν το ζητούμενο φορτίο είναι ανάμεσα στα όρια λειτουργίας της MT, τότε αυτή τίθεται να παράγει όσο είναι αυτό το ζητούμενο φορτίο. Στη δεύτερη περίπτωση, όπου δεν επαρκεί η παραγωγή της MT για την κάλυψη του φορτίου, εισάγεται ισχύς από το δίκτυο για να καλύψει την υπολειπόμενη ζήτηση. Όμοια και για το FC.

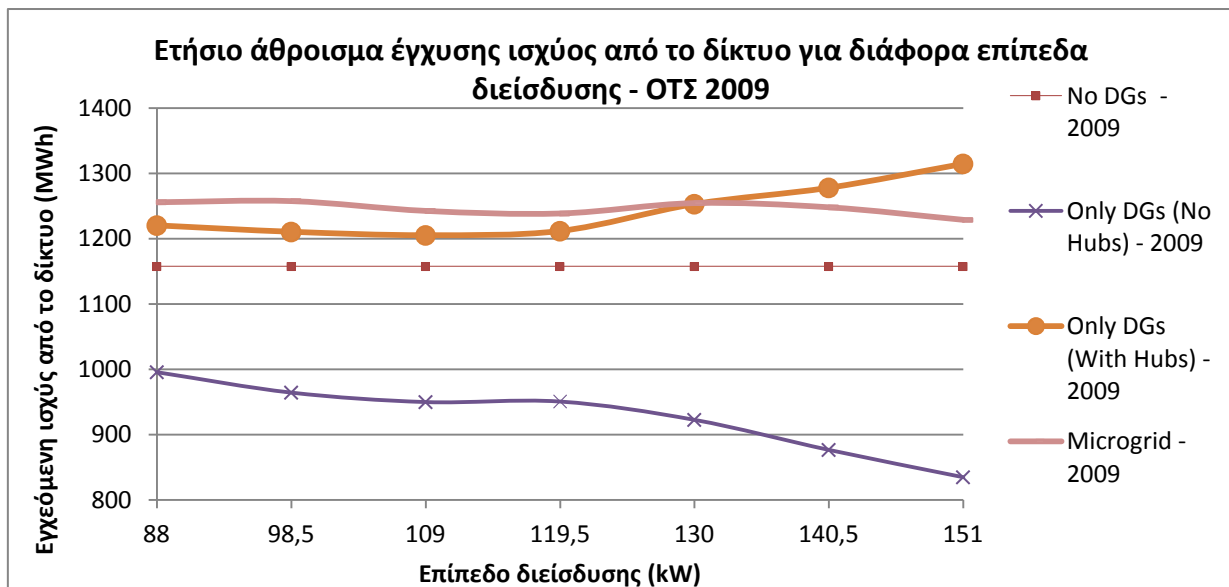
Άρα, ανεξάρτητα από την ΟΤΣ και από το επίπεδο διείσδυσης των ΑΠΕ, η μηνιαία και κατ' επέκταση η ετήσια παραγωγή των MT και FC είναι σταθερή στην τιμή 201,8787 MWh και 58,80673 MWh αντίστοιχα (Σχήμα 10.7.α και Σχήμα 10.8.α).

- Τέλος, στο σενάριο Microgrid για ΟΤΣ 2008 παρατηρούμε πως όσο αυξάνεται η διείσδυση των ΑΠΕ, η παραγωγή τόσο της MT όσο και του FC ελαττώνεται, επειδή το ζητούμενο φορτίο καλύπτεται από την όλο και πιο μεγάλη σε κάθε βήμα διείσδυσης παραγωγή των ΑΠΕ. (Σχήμα 10.7.β και Σχήμα 10.8.β)
- Για την ΟΤΣ 2009, ωστόσο, για το σενάριο Microgrid, στο 6<sup>ο</sup> βήμα διείσδυσης (εγκατεστημένη ισχύς 140,5 kW) η παραγωγή της MT αυξάνει δραματικά από τις 175MWh κατά προσέγγιση που ήταν ως το 5<sup>ο</sup> βήμα διείσδυσης, στις περίπου 195 MWh. Αντίστοιχα και το FC στο ίδιο βήμα διείσδυσης (6<sup>ο</sup>, 140,5 kW εγκατεστημένη ισχύς) παρουσιάζει μια απότομη μείωση της παραγωγής του από τις 194 MWh στις 174 MWh. (Σχήμα 10.7.γ και Σχήμα 10.8.γ) Αυτό συμβαίνει επειδή η MT παράγει πιο φτηνή ενέργεια από το FC (φαίνεται και από τους συντελεστές κόστους τους) και το σύστημα έκρινε οικονομικά πιο συμφέρον να πάρει την ενέργεια που χρειάζεται από τη MT παρά από το FC. Γι' αυτό ακριβώς στο ίδιο βήμα διείσδυσης η παραγωγή της MT κάνει μια απότομη αύξηση ενώ του FC μια απότομη μείωση.

### 10.1.3 Εγγυόμενη από το δίκτυο ισχύς



Σχήμα 10.9

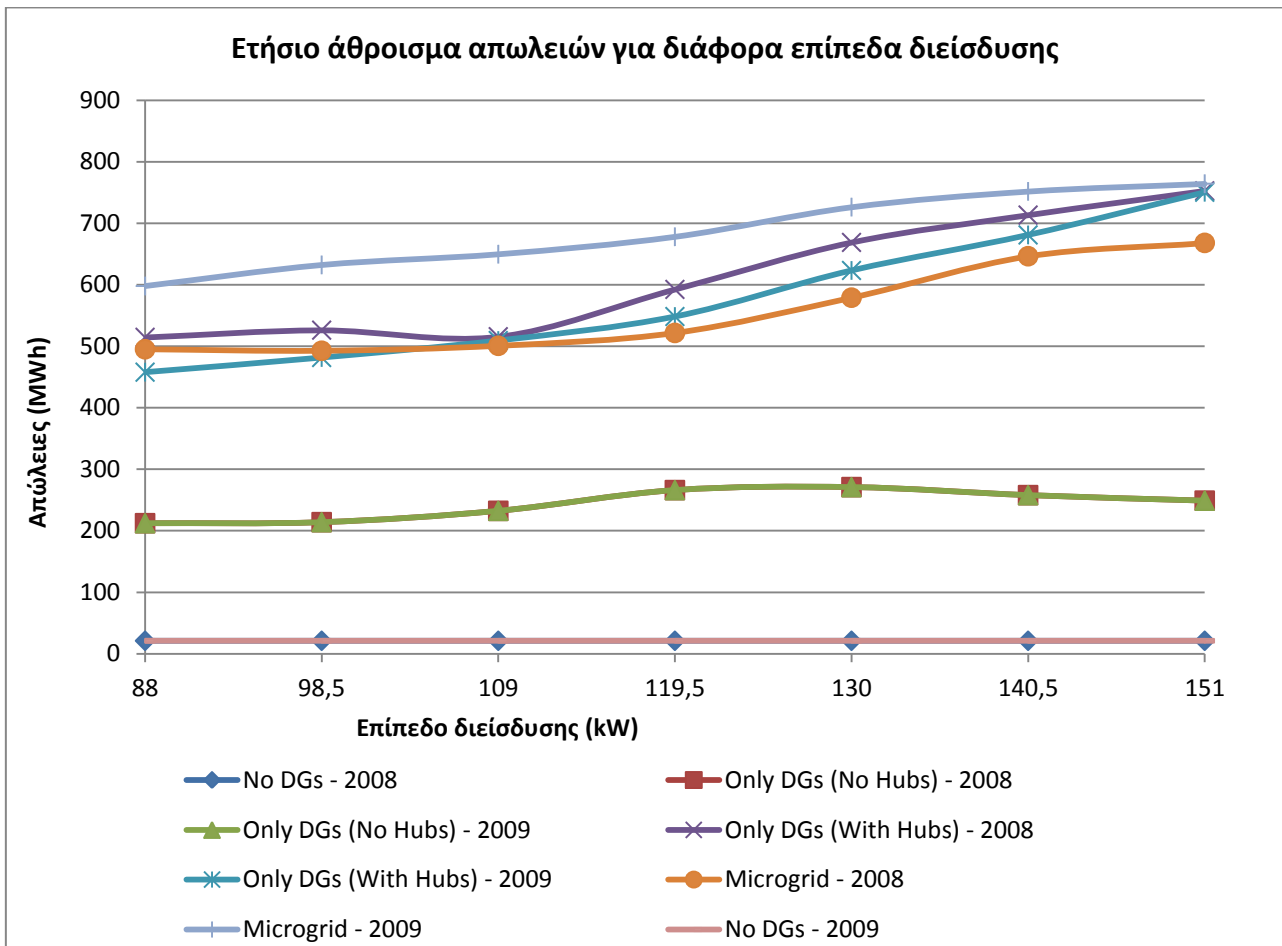


Σχήμα 10.10

- Η εγγυόμενη από το δίκτυο ισχύς στην περίπτωση που δεν υπάρχει διεσπαρμένη παραγωγή (No DGs σενάριο) είναι σταθερή (ευθεία γραμμή) στις 1157,4 MWh και για τις δύο ΟΤΣ.
- Για το σενάριο το 2<sup>ο</sup> (Only DGs-No Hubs) και για τις δύο ΟΤΣ η καμπύλη ακολουθεί την ίδια πορεία: από τις 995,5MWh αρχίζει να μειώνεται η εγγυόμενη από το δίκτυο ισχύς, στο 2<sup>ο</sup>, στο 3<sup>ο</sup> και στο 4<sup>ο</sup> βήμα διείσδυσης μένει περίπου σταθερή στις 950MWh και ακολουθεί περαιτέρω μείωση όσο αυξάνεται η διείσδυση των ΑΠΕ.

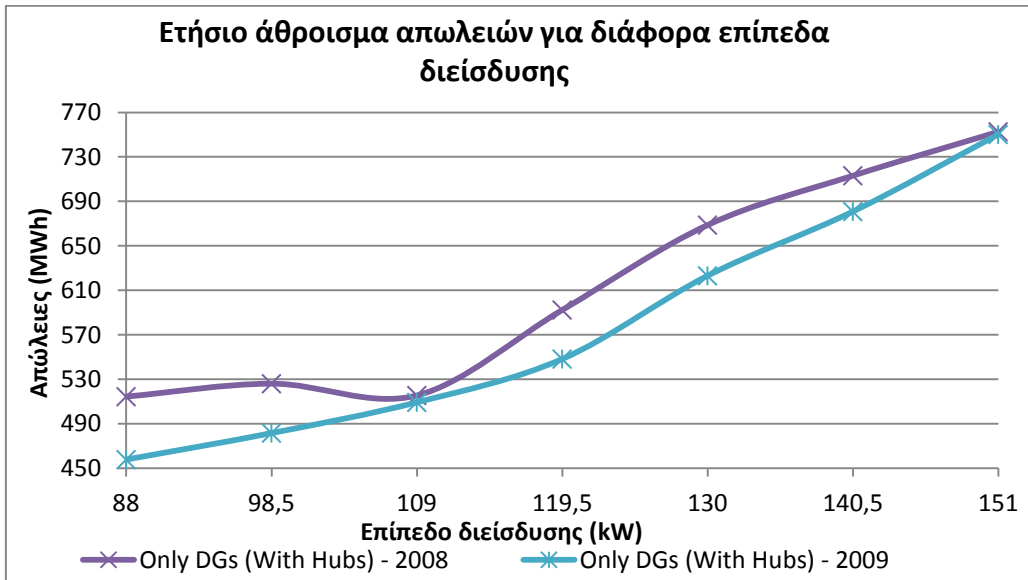
- Την ίδια πορεία μείωσης θα έπρεπε να ακολουθεί η παραγωγή του Slack Bus και για τα άλλα δύο σενάρια (Only DGs-With Hubs και Microgrid). Θα έπρεπε η εγχυόμενη ισχύς να έχει τη μορφή παραβολής και να μειώνεται. Παρόλα αυτά, η εγχυόμενη ισχύς για ΟΤΣ 2008, όπως παρατηρούμε και στο Σχήμα 10.9, μειώνεται για τα χαμηλά επίπεδα διείσδυσης αλλά μετά αρχίζει να αυξάνει ξανά. Αυτό συμβαίνει γιατί εισάγουμε και άεργο ισχύ από το δίκτυο, με ότι αυτό συνεπάγεται για τους συντελεστές.
- Για ΟΤΣ 2009, παρατηρούμε στο Σχήμα 10.10 ότι η έγχυση ισχύος για το σενάριο του Μικροδικτύου είναι ελαφρά μεγαλύτερη απ' ότι στο No DGs σενάριο και σταθερή περίπου στις 1250MWh. Αντίθετα, για το Only DG-With Hubs σενάριο η εγχυόμενη από το δίκτυο ισχύς είναι και μεγαλύτερη απ' ότι στο No DG και αυξάνει σταδιακά με την αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ. (ελαφριά μείωση και ξανά αυξάνεται)

#### 10.1.4 Συνολικές απώλειες

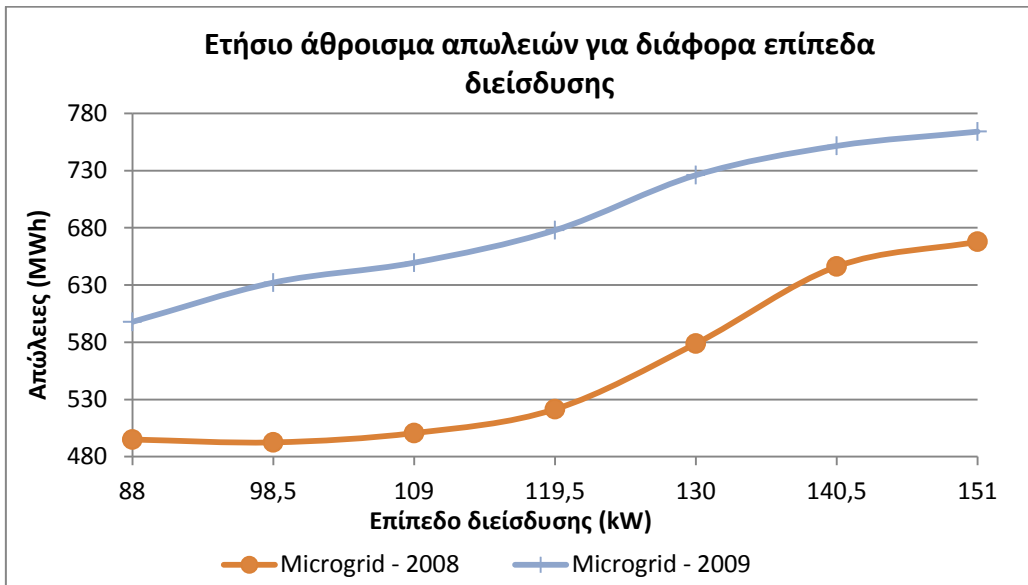


Σχήμα 10.11.α

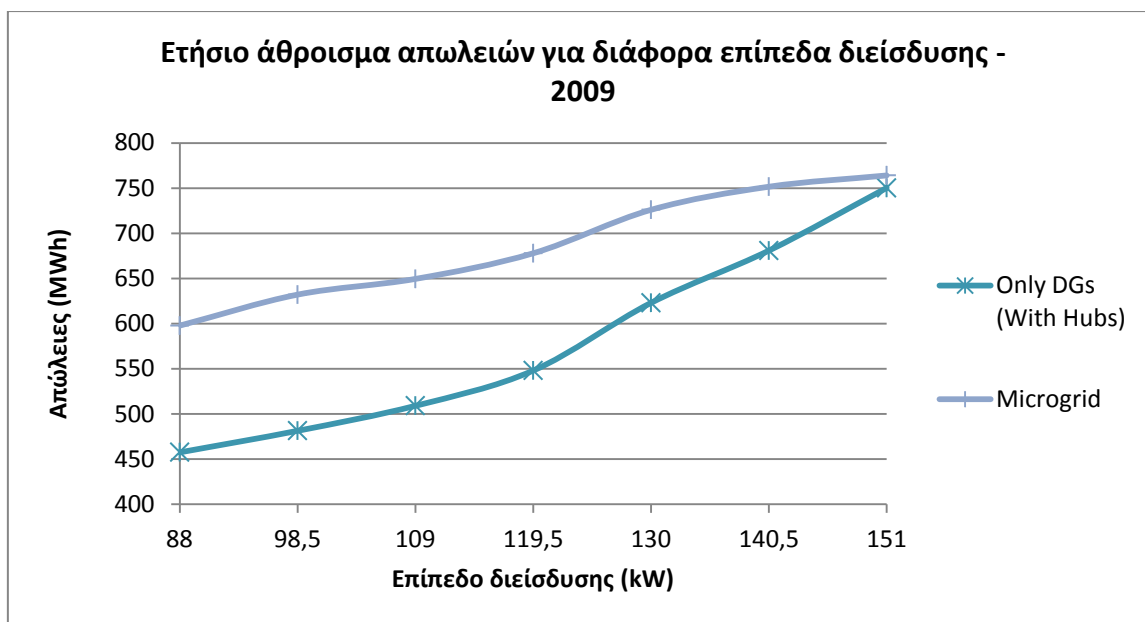
- Οι καμπύλες No DG – 2008 και No DG – 2009 ταυτίζονται ανεξάρτητα από την οριακή τιμή του συστήματος. Οι απώλειες σε αυτά τα σενάρια ανέρχονται στις 20,97656 MWh ετησίως.
- Ομοίως στα σενάρια Only DGs (No Hubs) – 2008 και Only DGs (No Hubs) – 2009 οι συνολικές ετήσιες απώλειες του δικτύου είναι ίδιες, οι καμπύλες ταυτίζονται όπως φαίνεται και στο παραπάνω γράφημα, και οι απώλειες κυμαίνονται μεταξύ 213-270 MWh.



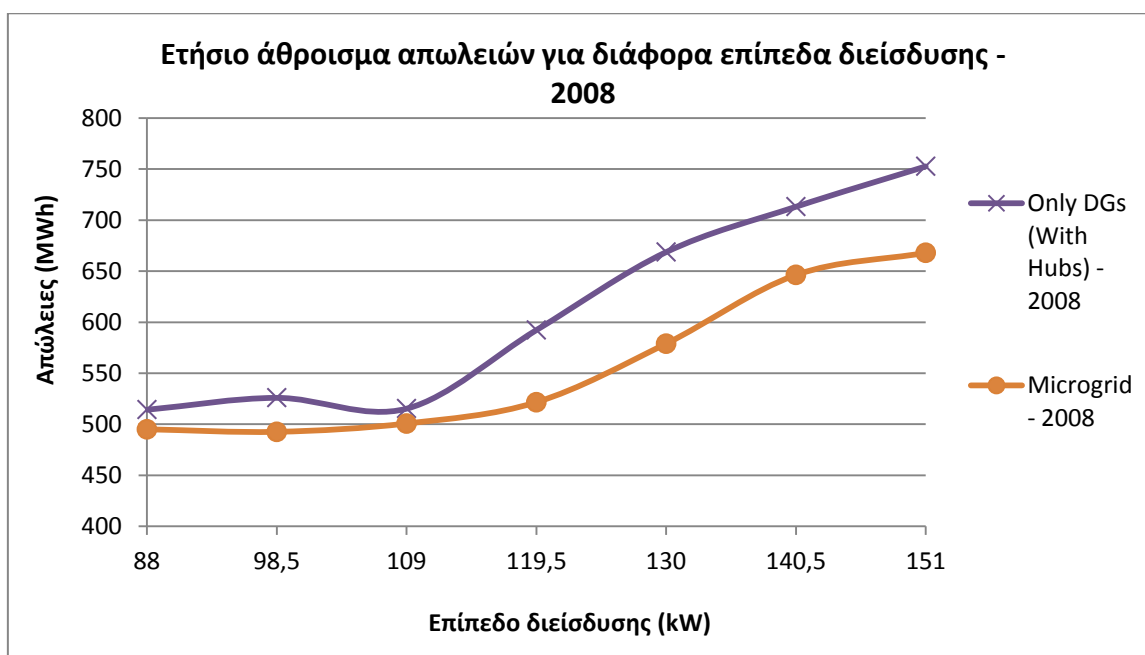
Σχήμα 10.11.β



Σχήμα 10.11.γ



Σχήμα 10.11.δ



Σχήμα 10.11.ε

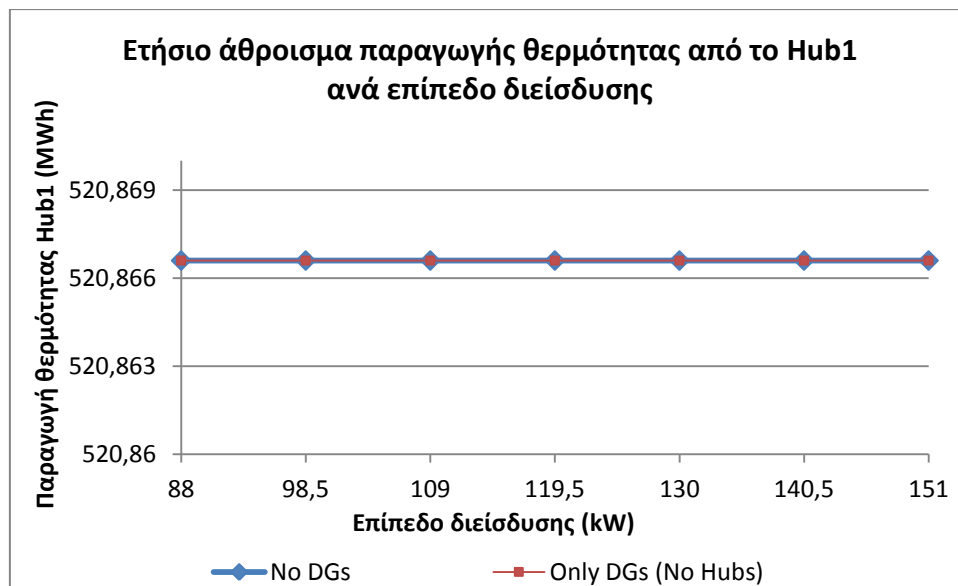
- Μόνο στο μικροδίκτυο η παραγωγή της κάθε μονάδας επηρεάζεται από οικονομικά κριτήρια. Στα σενάρια Only DGs (With ή No Hubs) η παραγωγή των μονάδων είναι τοπική και ανεξάρτητη του ενεργειακού κόστους, οπότε οι απώλειες του δικτύου ταυτίζονται.
- Οι ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά επιλέγονται από το μικροδίκτυο και τροφοδοτούν τους ζυγούς του δικτύου. Επειδή η παραγωγή είναι «δίπλα» στην κατανάλωση θα ήταν αναμενόμενο οι απώλειες να μειώνονται. Παρόλα αυτά, με την αύξηση των επιπέδων

διείσδυσης αυξάνει δραματικά η παραγωγή των συγκεκριμένων μονάδων. Κάτι τέτοιο συνεπάγεται την αντίστοιχα δραματική αύξηση των συνολικών απωλειών του δικτύου δεδομένου ότι πλέον οι μονάδες αυτές τροφοδοτούν ένα μεγαλύτερο κομμάτι του μικροδικτύου και όχι απλά τον τοπικό ζυγό.

- Για ΟΤΣ 2009 οι απώλειες στο σενάριο του μικροδικτύου είναι μεγαλύτερες απ' ότι στο σενάριο Microgrid.
- Στο σενάριο Only DGs (With Hubs) για ΟΤΣ 2008 οι απώλειες του συστήματος είναι μεγαλύτερες απ' ότι για ΟΤΣ 2009.

### 10.1.5 Παραγωγή των ενεργειακών διανομέων (HUBS)

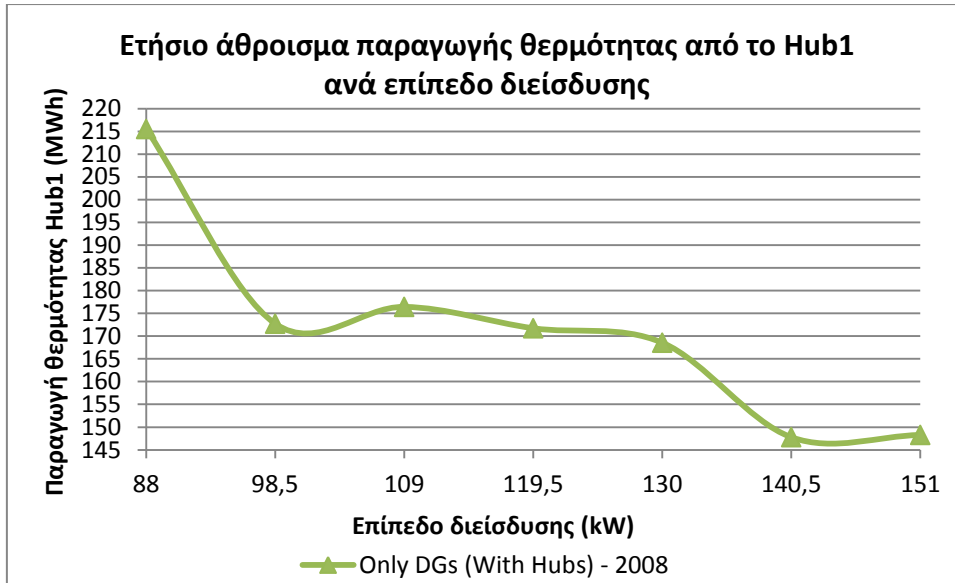
#### 10.1.5.1 Παραγωγή θερμότητας του Hub1



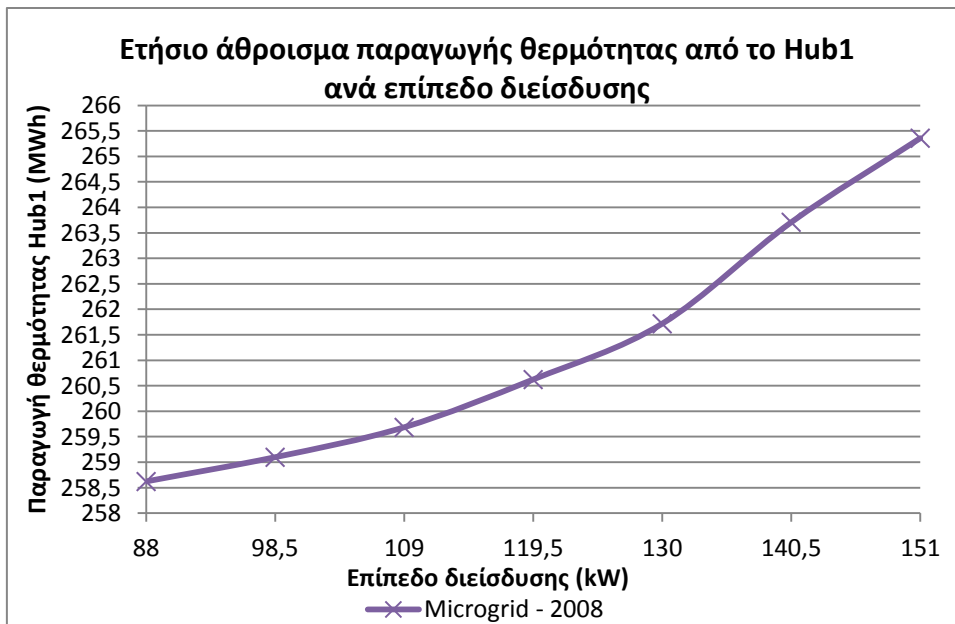
Σχήμα 10.12.α

Για τα σενάρια No DGs και Only DGs (No Hubs) και για τις δυο ΟΤΣ (2008 και 2009), το Hub1 (στον μεσαίο, βιομηχανικό κλάδο) παράγει το ίδιο ποσό θερμότητας ετησίως, κι αυτό γιατί και στις δυο περιπτώσεις μόνο το Boiler του Hub λειτουργεί για να καλύψει το θερμικό φορτίο του κλάδου. Επομένως αφού το ηλεκτρικό φορτίο είναι δεδομένο για τους 12 μήνες του χρόνου, έτσι και το θερμικό φορτίο ως το 55/45 του ηλεκτρικού είναι και αυτό δεδομένο. Γι' αυτό και η παραγωγή θερμότητας του Boiler είναι σταθερή, ανεξαρτήτως ΟΤΣ.

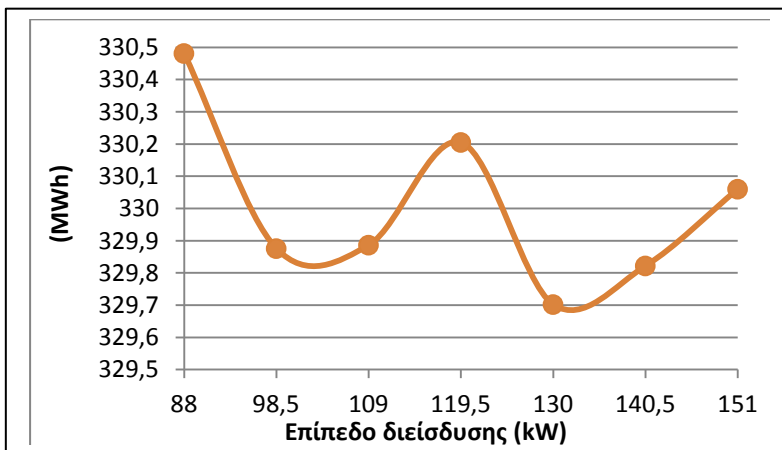
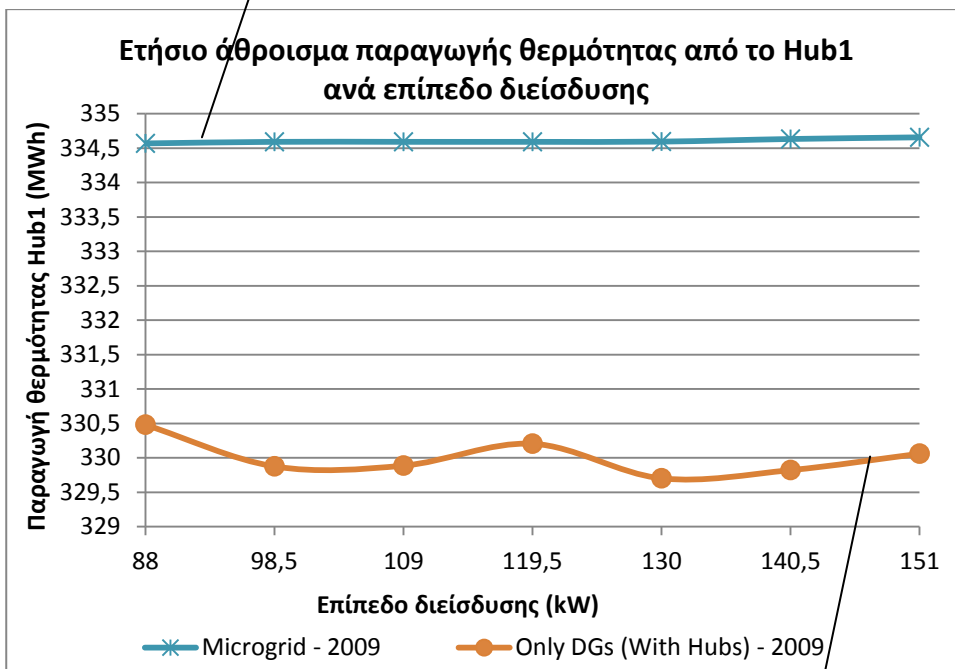
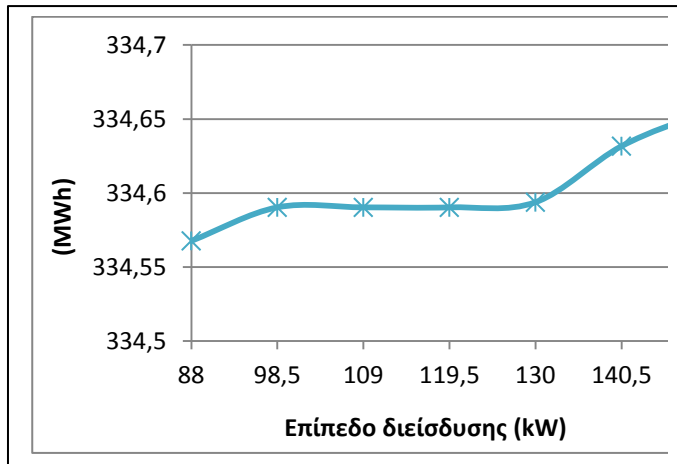




Σχήμα 10.12.β

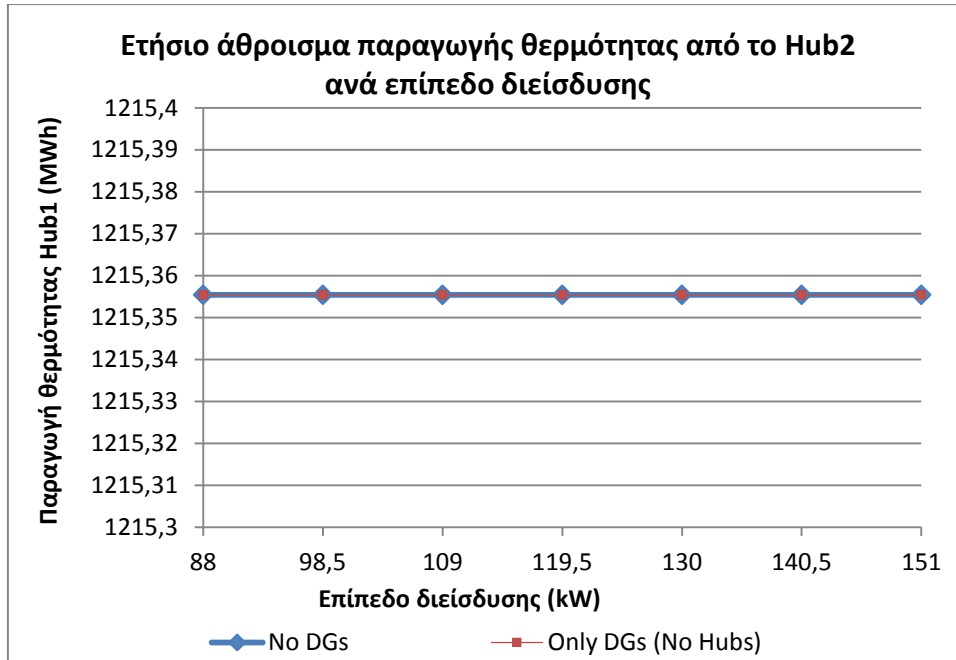


Σχήμα 10.12.γ

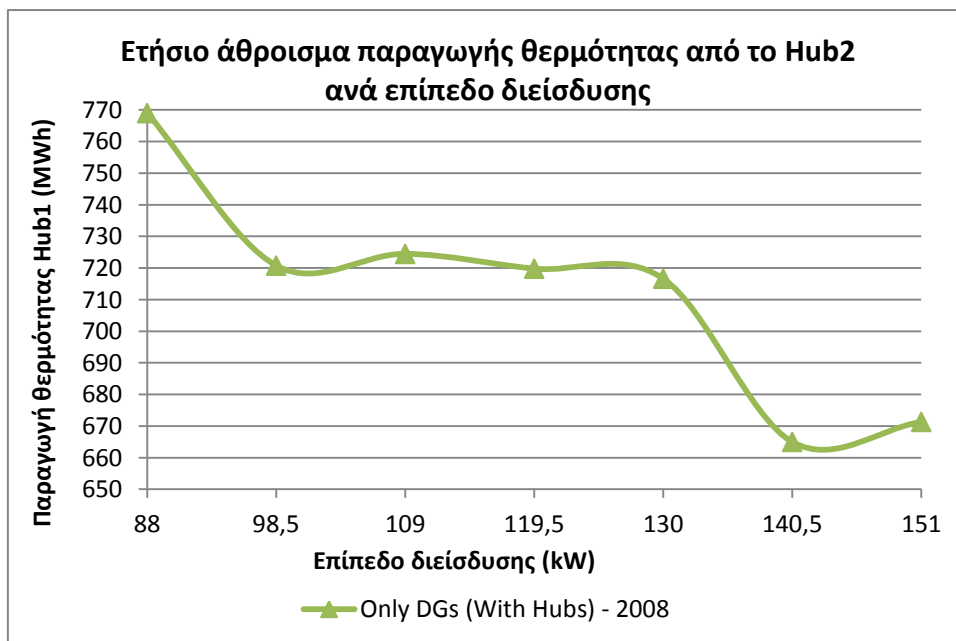


Σχήμα 10.13

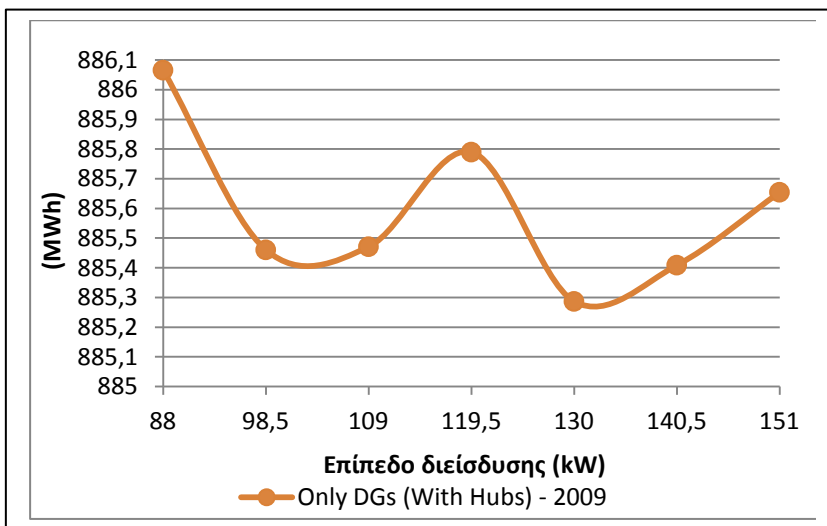
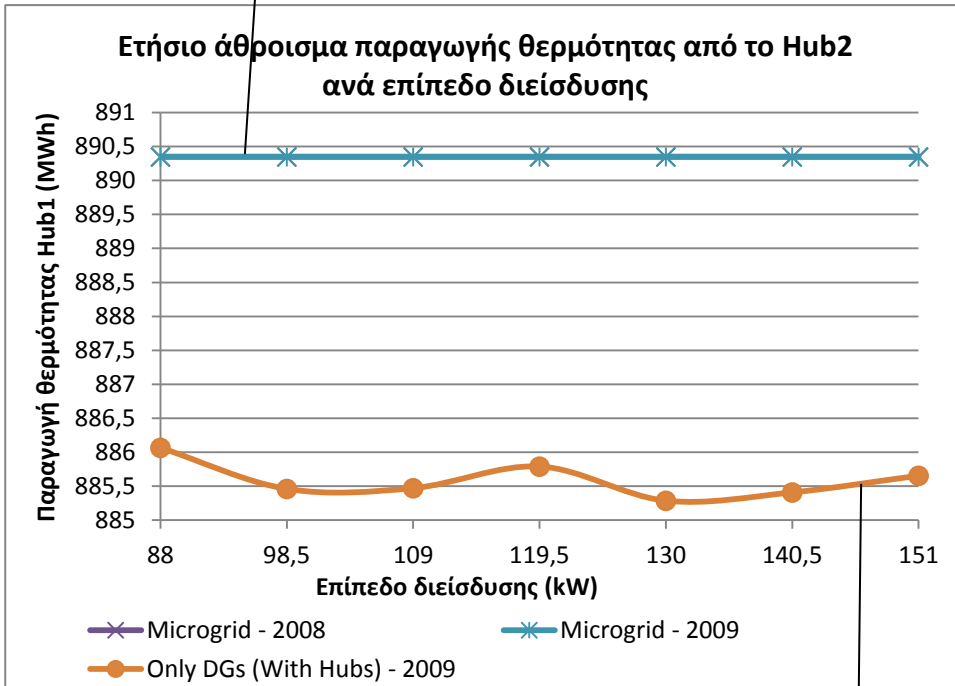
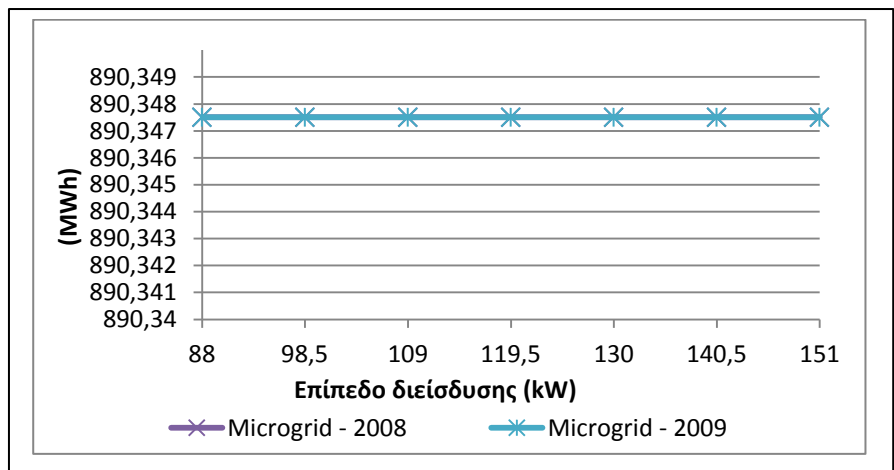
### 10.1.5.2 Παραγωγή θερμότητας του Hub2



Σχήμα 10.14.α

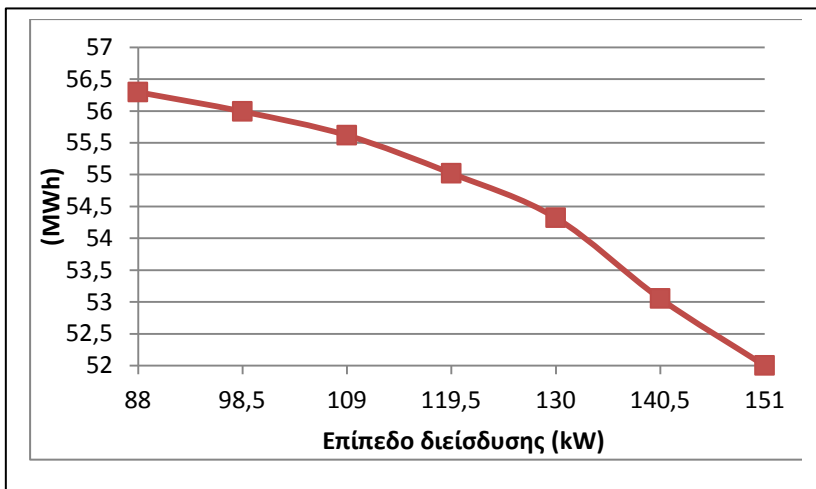
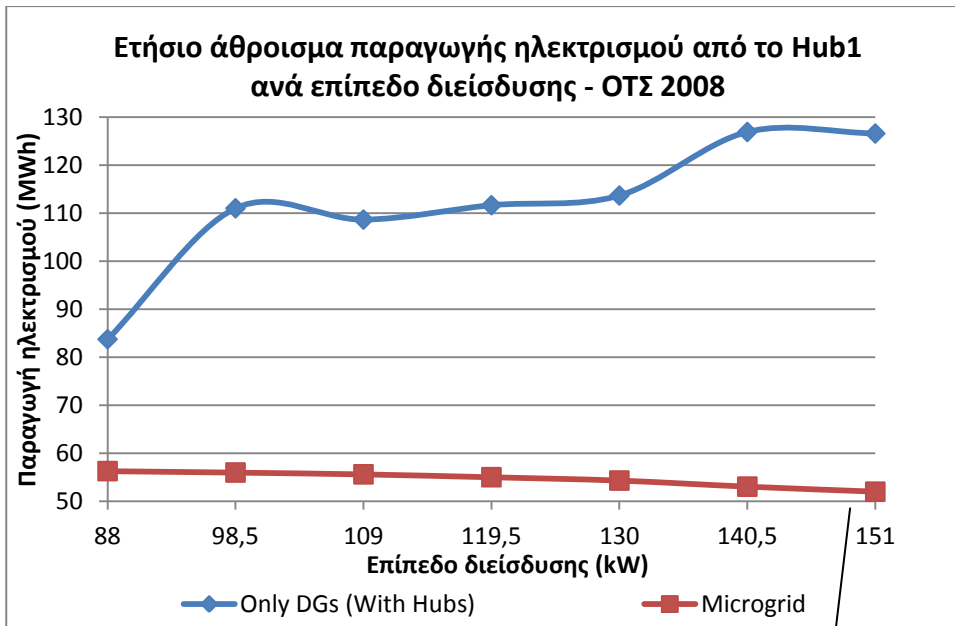


Σχήμα 10.14.β

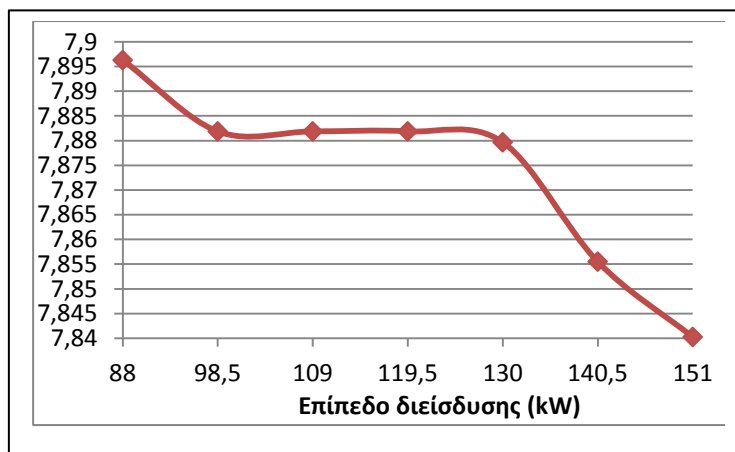
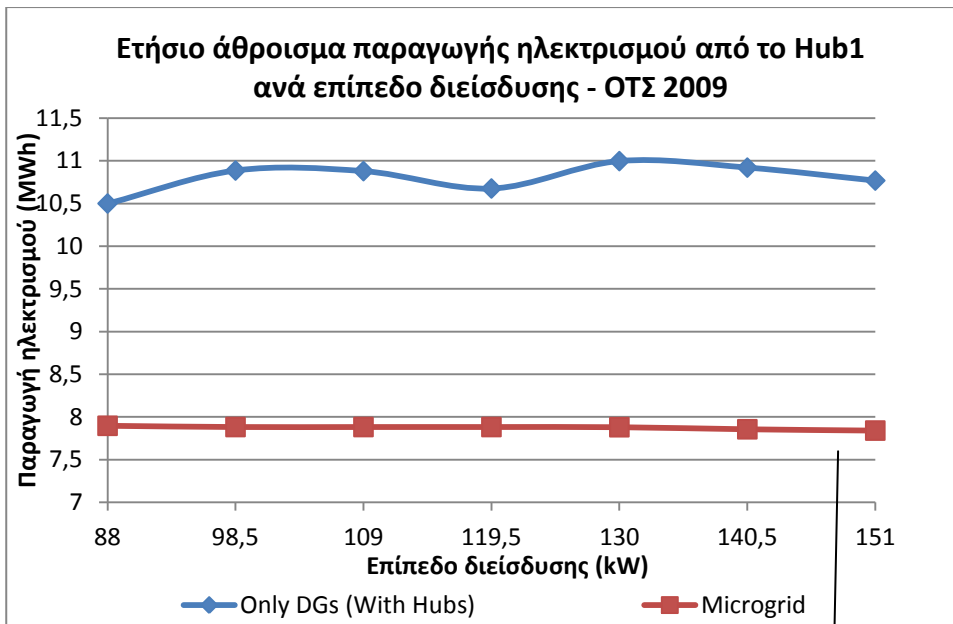


Σχήμα 10.15

### 10.1.5.3 Παραγωγή ηλεκτρισμού του Hub1



Σχήμα 10.16.α



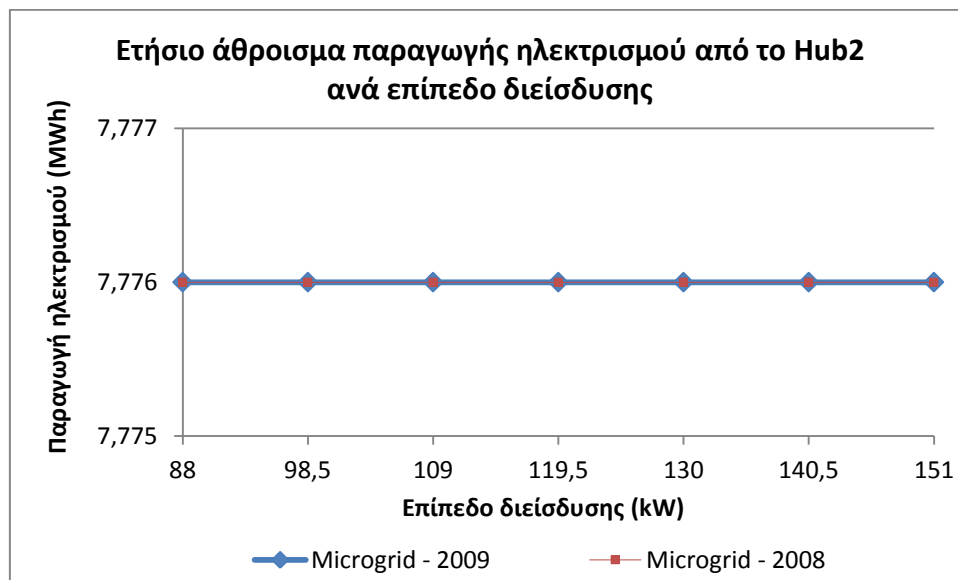
Σχήμα 10.16.β

- Η παραγωγή ηλεκτρισμού από το Hub1 είναι μηδενική για τα πρώτα δυο σενάρια, No DGs και Only DGs (No Hubs). Σε αυτά τα αρχικά σενάρια λειτουργεί μόνο το Boiler του Hub, από καλύπτεται μόνο το ζητούμενο θερμικό φορτίο του βιομηχανικού κλάδου από τον ενεργειακό διανομέα. Το ηλεκτρικό φορτίο καλύπτεται από το ανάντη δίκτυο.
- Στο σενάριο Only DGs-With Hubs - 2009 (Σχήμα 10.16.β) είναι σταθερή η παραγωγή ηλεκτρισμού του Hub εφόσον η διείσδυση των ΑΠΕ γίνεται τοπικά μόνο τους ζυγούς 4 και 5 του αριστερού κλάδου και δε «ρέει» η επιπλέον παραγόμενη ενέργεια προς το υπόλοιπο δίκτυο (δεν είναι μικροδίκτυο)
- Στο τελευταίο σενάριο, αυτό του Microgrid, «ζουμάροντας» στη γραφική παράσταση παρατηρούμε πως όσο αυξάνεται η διείσδυση των ΑΠΕ, τόσο ελαττώνεται η παραγωγή

ηλεκτρικής ισχύος από τον ενεργειακό διανομέα. Αυτό συμβαίνει επειδή ενέργεια «έρχεται» πλέον και από τις μικροπηγές του αριστερά (πρώτου) κλάδου, οι οποίες δεν καλύπτουν μόνο τοπικά τα φορτία αλλά εξυπηρετούν και τους υπόλοιπους ζυγούς του δικτύου.

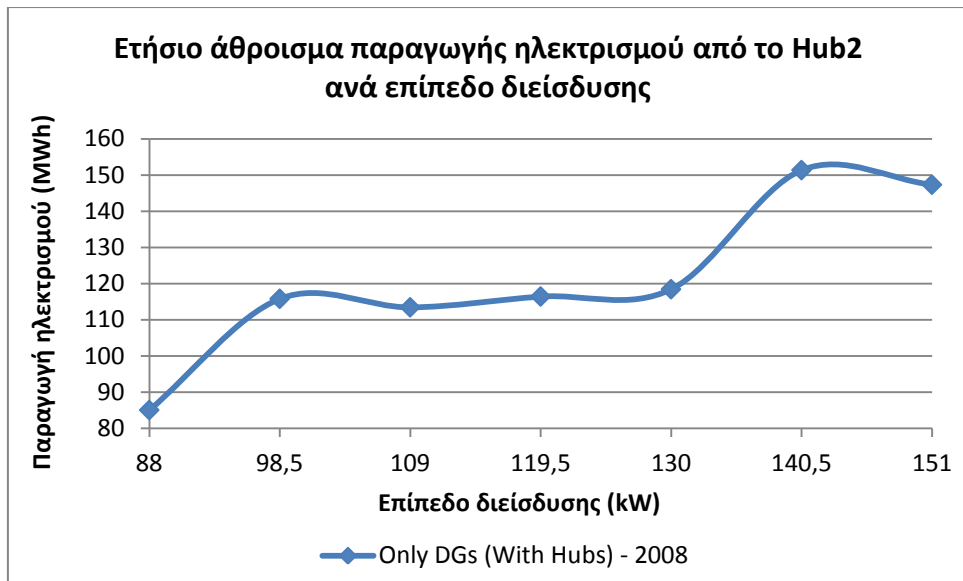
#### 10.1.5.4 Παραγωγή ηλεκτρισμού του Hub2

Ομοίως για το δεύτερο ενεργειακό διανομέα, στα σενάρια No DGs και Only DGs-No Hubs λειτουργεί μόνο το Boiler για την κάλυψη των θερμικών φορτίων. Το CHP δεν υφίσταται, οπότε δεν παράγεται καθόλου ηλεκτρισμός. Η παραγωγή ηλεκτρισμού του Hub2 για αυτά τα δύο πρώτα σενάρια είναι μηδενική, γι' αυτό και δεν παρατίθεται σε κάποιο διάγραμμα

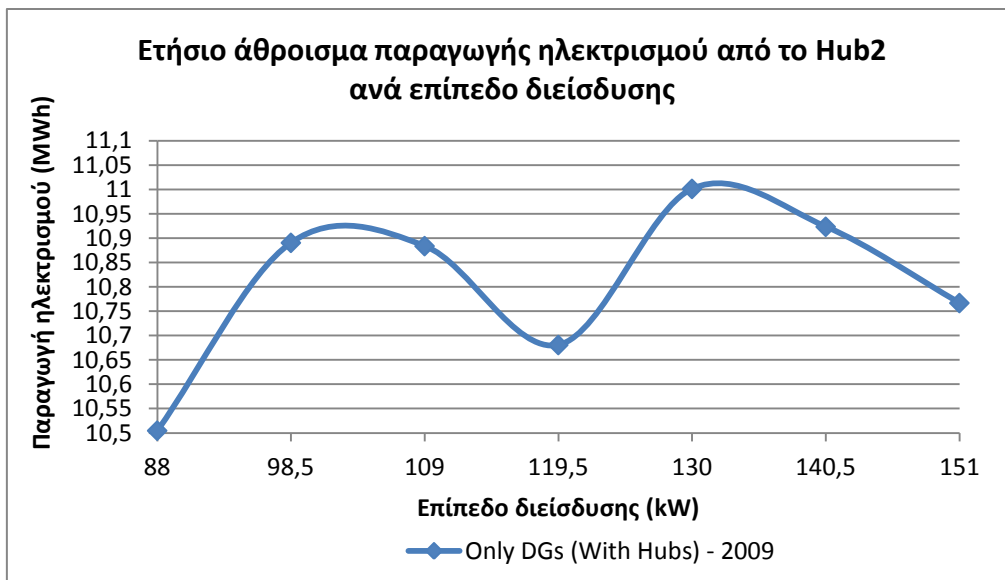


Σχήμα 10.17.α

Γιατί στο σενάριο του Μικροδικτύου και για τις δύο ΟΤΣ η παραγωγή ηλεκτρισμού του CHP παραμένει σταθερή; Αφού μέσα στην οικονομική βελτιστοποίηση και κατανομή υπεισέρχονται και οι άλλες μικροπηγές πλέον και «στέλνουν» κι αυτές ενέργεια στους απομακρυσμένους ζυγούς και τελευταίου κλάδου. Μήπως είναι οικονομικά πιο συμφέρον να παράγει μόνο του το HUB2 τοπικά όλη την ηλεκτρική ενέργεια που χρειάζεται, ανεξαρτήτως διείσδυσης των ΑΠΕ. Επειδή ας μην ξεχνάμε πως οι ζυγοί 10-16 είναι οι πιο απομακρυσμένοι από τις μικροπηγές των ζυγών 4-7, οπότε «δε φτάνει ως εκεί» κατά κάποιο τρόπο η παραγόμενη από τις μικροπηγές ενέργεια. Κι ας είδαμε στο Hub1 πως στο σενάριο του Μικροδικτύου όσο αυξάνεται η διείσδυση των ΑΠΕ να μειώνεται η παραγωγή ηλεκτρισμού από το Hub1. Το Hub1 είναι πιο κοντά στις μικροπηγές και «φτάνει» ως εκεί η ενέργεια που ρέει.



Σχήμα 10.17.β



Σχήμα 10.17.γ

-Για ΟΤΣ 2009 στο σενάριο Only DGs-With Hubs όντως η παραγωγή ηλεκτρισμού του Hub2 μένει περίπου σταθερή (Σχήμα 10.17.γ αρκετά μεγεθυμένο)



## 10.1.6 Προβλήματα τάσεων

### 10.1.6.1 Τρόπος εύρεσης πιθανών προβλημάτων τάσεων στους ζυγούς

Κατά την προσομοίωση όλων των σεναρίων (για οποιαδήποτε ΟΤΣ και για οποιοδήποτε βήμα διείσδυσης) δημιουργούνται δύο πίνακες με όνομα `below_V` και `over_V`. Αυτοί είναι πίνακες τεσσάρων διαστάσεων 12x30x24x17 (12 μήνες, 30 μέρες, 24 ώρες, 17 ζυγοί στο δίκτυο). Περιέχουν τη διαφορά των τάσεων όλων των ζυγών από το 0,97 και από το 1,03. Να θυμίσουμε ότι τέθηκαν αυστηρά κριτήρια στις τάσεις  $\pm 3\%$  γύρω από την τιμή 1αμ. Οπότε αν το μέτρο της τάσης  $V_m$  κάποιου ζυγού  $n$  είναι μικρότερο του 0,97 στη θέση `below_V(month,day,hour,n)` καταχωρείται η διαφορά  $0,97-V_m(n)$ . Με παρόμοιο τρόπο αν το μέτρο της τάσης κάπου ζυγού είναι μεγαλύτερο του 1,03 τότε στη θέση `over_V(month,day,hour,n)` καταχωρείται η διαφορά  $V_m(n)-1,03$ .

Μετά το τέλος της προσομοίωσης του κάθε σεναρίου, με μια σειρά εντολών γινόταν ο έλεγχος κατά πόσο κάτω από 0,97 έπεφταν οι τάσεις ή πάνω από 1,03 έφταναν. Πιο συγκεκριμένα:

- `number_of_elements = numel(below_V)`  
αυτή η εντολή μας δίνει το συνολικό αριθμό των στοιχείων που περιέχει ο πίνακας `below_V`, και προφανώς ισούται πάντα με  $12 \times 30 \times 24 \times 17 = 146880$
- `number_of_elements_non_zero = numel(find(below_V))`  
με αυτή την εντολή βρίσκουμε συνολικά σε όλο τον πίνακα πόσα μη μηδενικά στοιχεία υπάρχουν
- `number_of_elements_096_097 = numel(find(0<below_V & below_V<= 0.01))`  
βρίσκουμε αν κάποιες τάσεις ήταν μεταξύ 0.96 και 0.97 αμ
- `number_of_elements_095_096 = numel(find(0.01<below_V & below_V<= 0.02))`  
βρίσκουμε αν κάποιες τάσεις ήταν μεταξύ 0.95 και 0.96 αμ
- `number_of_elements_094_095 = numel(find(0.02<below_V & below_V<= 0.03))`  
βρίσκουμε αν κάποιες τάσεις ήταν μεταξύ 0.94 και 0.95 αμ
- `number_of_elements_093_094 = numel(find(0.03<below_V & below_V<= 0.04))`  
βρίσκουμε αν κάποιες τάσεις ήταν μεταξύ 0.93 και 0.94 αμ

και:

- `number_of_elements = numel(over_V)`  
αυτή η εντολή μας δίνει το συνολικό αριθμό των στοιχείων που περιέχει ο πίνακας `over_V`, και προφανώς ισούται πάντα με  $12 \times 30 \times 24 \times 17 = 146880$
- `number_of_elements_non_zero = numel(find(over_V))`  
με αυτή την εντολή βρίσκουμε συνολικά σε όλο τον πίνακα πόσα μη μηδενικά στοιχεία υπάρχουν
- `number_of_elements_103_104 = numel(find(0<over_V & over_V<= 0.01))`  
βρίσκουμε αν κάποιες τάσεις ήταν μεταξύ 1.03 και 1.04 αμ

- `number_of_elements_104_105 = numel(find(0.01<over_V & over_V<= 0.02))`  
βρίσκουμε αν κάποιες τάσεις ήταν μεταξύ 1.04 και 1.05 αμ
- `number_of_elements_105_106 = numel(find(0.02<over_V & over_V<= 0.03))`  
βρίσκουμε αν κάποιες τάσεις ήταν μεταξύ 1.05 και 1.06 αμ
- `number_of_elements_106_107 = numel(find(0.03<over_V & over_V<= 0.04))`  
βρίσκουμε αν κάποιες τάσεις ήταν μεταξύ 1.06 και 1.07 αμ

Ακριβώς με παρόμοιες εντολές στη Matlab για όλους τους ζυγούς n του υπό μελέτη δικτύου εκτελούμε τις παρακάτω εντολές:

- `number_of_elements = numel(below_V (:, :, :, n))`
- `number_of_elements_non_zero = numel(find(below_V (:, :, :, n)))`
- `number_of_elements_096_097 = numel(find(0<below_V(:, :, :, n) & below_V(:, :, :, n)<= 0.01))`
- `number_of_elements_095_096 = numel(find(0.01<below_V(:, :, :, n) & below_V(:, :, :, n)<= 0.02))`
- `number_of_elements_094_095 = numel(find(0.02<below_V(:, :, :, n) & below_V(:, :, :, n)<= 0.03))`
- `number_of_elements_093_094 = numel(find(0.03<below_V(:, :, :, n) & below_V(:, :, :, n)<= 0.04))`

και βλέπουμε για κάθε σενάριο, για κάθε ΟΤΣ και για κάθε βήμα διείσδυσης σε ποια επίπεδα κυμαίνεται το μέτρο της τάσης του κάθε ζυγού.

### 10.1.6.1 Αποτελέσματα

ΣΕΝΑΡΙΟ 1		
ΖΥΓΟΣ	ΟΤΣ 2008	ΟΤΣ 2009
1		
2		
3		
4	0.96-0.97	0.96-0.97
5	0.96-0.97	0.96-0.97
6	0.96-0.97	0.96-0.97
7	0.95-0.97	0.95-0.97
8	0.95-0.97	0.95-0.97
9		
10		
11	0.96-0.97	0.96-0.97
12	0.96-0.97	0.96-0.97
13		
14		
15	0.96-0.97	0.96-0.97
16	0.96-0.97	0.96-0.97
17		

Στο 1<sup>ο</sup> σενάριο λειτουργίας (No DGs) όπου όλη η ζήτηση καλύπτεται από το ανάντη δίκτυο, παρατηρούμε ότι προβλήματα τάσεων δημιουργούνται στους ζυγούς 4,5,6 και 7 του αριστερού κλάδου, εκεί όπου υπάρχουν εγκατεστημένες οι μικροπηγές του δικτύου μας. Μόνο στο ζυγό 7 η τάση πέφτει σε τιμές 0.95 αμ. Στους άλλους τρεις ζυγούς του αριστερού κλάδου οι τάσεις πέφτουν οριακά κάτω από 0.97 ως το 0.96 αμ.

Ως το 0.95 αμ πέφτει και η τάση του ζυγού 8, στον μεσαίο (βιομηχανικό) κλάδο.

Οριακά κάτω από 0.97 αμ πέφτει η τάση στους ζυγούς 15 και 16 του δεξιά κλάδου, επειδή αυτοί είναι οι πιο απομακρυσμένοι του δικτύου. Είναι μακριά από τις πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των ζυγών 4,5,6 και 7.

ΣΕΝΑΡΙΟ 3	ΟΤΣ 2008						
ΖΥΓΟΣ	s=1	s=2	s=3	s=4	s=5	s=6	s=7
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8	0.94-0.95	0.94-0.95	0.94-0.95	0.94-0.95	0.94-0.95	0.94-0.95	0.94-0.95
9							
10	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97
11	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97
12	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97
13	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97
14	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97
15	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97
16	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97
17							
	ΟΤΣ 2009						
ΖΥΓΟΣ	s=1	s=2	s=3	s=4	s=5	s=6	s=7
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8	0.94-0.95	0.94-0.95	0.94-0.95	0.94-0.95	0.94-0.95	0.94-0.95	0.94-0.95
9							
10	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97
11	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97
12	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97
13	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97
14	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97
15	0.95-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97
16	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97
17							

ΣΕΝΑΡΙΟ 4	ΟΤΣ 2008						
ΖΥΓΟΣ	s=1	s=2	s=3	s=4	s=5	s=6	s=7
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8	0.94-0.95	0.94-0.95	0.94-0.95	0.94-0.95	0.94-0.95	0.94-0.95	0.94-0.95
9							
10	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97
11	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97
12	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97
13	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97
14	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97
15	0.95-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97
16	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97
17							
	ΟΤΣ 2009						
ΖΥΓΟΣ	s=1	s=2	s=3	s=4	s=5	s=6	s=7
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8	0.94-0.95	0.94-0.95	0.94-0.95	0.94-0.95	0.94-0.95	0.94-0.95	0.94-0.95
9							
10	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97
11	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97
12	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97
13	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97
14	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97	0.96-0.97
15	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97
16	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97	0.95-0.97
17							

Για το Σενάριο 2 (ανεξάρτητη λειτουργία μικροπηγών χωρίς την παρουσία CHPs, Only DGs-No Hubs) δεν παραθέτουμε κάποιον πίνακα διότι δεν προέκυψε κάποιο πρόβλημα στις τάσεις. Παρόλο

που είχαμε θέσει το αυστηρό κριτήριο  $\pm 3\%$  γύρω από την τιμή 1 αμ, καμιά τάση κανενός ζυγού για κανένα βήμα διείσδυσης δεν έπεσε κάτω από 0.97αμ.

Επίσης, όπως παρατηρούμε και στους τρεις παραπάνω πίνακες, πουθενά δε γίνεται αναφορά για πρόβλημα τάσεων με μέτρο μεγαλύτερο του 1.03 αμ. Όλα τα προβλήματα ήταν στο κάτω όριο.

Να σημειωθεί ξανά πως το όριο  $\pm 3\%$  ήταν ένα αυστηρό όριο. Θα μπορούσαμε αντί για αυτό να είχαμε θέσει ως όριο το πιο ελαστικό  $\pm 5\%$ . Με αυτόν το νέο περιορισμό δε θα είχαμε κανένα πρόβλημα, παρά μόνο στο ζυγό 8, του οποίου η τάση στα σενάρια 3 και 4 (Only DGs-With Hubs και Microgrid) φτάνει ως και το 0.94 αμ !! Αυτή είναι η χαμηλότερη τάση που παρατηρούσαμε σε κάθε προσομοίωση.

Δεν μπορούμε να αποφανθούμε πως με την αρχικά εγκατεστημένη ισχύ των 88 kW (εκ των οποίων τα 28kW ΑΠΕ) δεν έχουμε προβλήματα στις τάσεις και πως αυτά εμφανίζονται με την ολοένα και αυξανόμενη διείσδυση των ΑΠΕ ( $s=2..7$ ). Από την αρχή ως το τέλος των σεναρίων προσομοίωσης ως προς διείσδυση ΑΠΕ η τάση όλων των ζυγών κυμαίνεται στα ίδια περίπου επίπεδα. Ακόμα και αν είχαμε θέσει τον πιο αυστηρό περιορισμό του  $\pm 5\%$ , και πάλι δε θα είχαμε προβλήματα τάσεων με τη διείσδυση των ΑΠΕ.

## **10.1.7 Υπερφορτίσεις γραμμών**

### **10.1.7.1 Αποτελέσματα**

Σε όλα τα σενάρια λειτουργίας του δικτύου, και για τις δύο ΟΤΣ (2008 και 2009) και όλα τα βήματα διείσδυσης των ΑΠΕ οι γραμμές 1-17, 1-2, 1-8 και 1-9 εμφάνιζαν υπερφόρτιση, αρχικά επειδή η γραμμή 1-17 συμβολίζει τη γραμμή που συνδέει το δίκτυό μας με το ανάντη δίκτυο και επιπλέον ακριβώς επειδή από τις γραμμές 1-2, 1-8 και 1-9 περνά όλο το ρεύμα που οδεύει προς τον αριστερό, το μεσαίο και το δεξιά κλάδο του δικτύου αντίστοιχα. Επίσης σε όλες τις προσομοιώσεις και στον κλάδο 2-3 εμφανιζόταν υπερφόρτιση με ρεύμα που ξεπερνούσε τα 200 Α.

Από κι έπειτα για όλα τα σενάρια λειτουργίας παρατηρήθηκαν τα εξής:

- Για το σενάριο 1 (No DGs) υπερφόρτιση εμφανίστηκε στις γραμμές που μόλις αναφέραμε (1-17, 1-8, 1-9, 1-2, 2-3).
- Στις προσομοιώσεις των υπόλοιπων τριών σεναρίων (Only DGs-No Hubs, Only DGs-With Hubs και Microgrid), εκτός από τις πέντε προαναφερθείσες γραμμές, υπερφόρτιση παρουσίαζαν και οι γραμμές 3-4, 3-7, 5-6, 6-7, όλες στον αριστερό κλάδο του δικτύου. Αυτό συνέβη γιατί τα φορτία εκεί είναι μεγαλύτερα απ' ό,τι στους άλλους δύο κλάδους, υπάρχουν και οι παραγωγές των μικροπηγών, κατά συνέπεια τα ρεύματα που κυκλοφορούν είναι μεγάλα. Ας μην ξεχνάμε πως ισχύς ρέει από εκείνους τους κλάδους όπου βρίσκονται οι μικροπηγές και προς τους πιο δεξιά κλάδους του δικτύου, όπου δεν υπάρχει καμία παραγωγή και όλη τη ζήτηση την καλύπτουν παίρνοντας ενέργεια είτε από το ανάντη δίκτυο είτε από τις μικροπηγές του αριστερού κλάδου στο σενάριο του μικροδικτύου μόνο βέβαια.

### 10.1.7.2 Πιθανές λύσεις

Οι πιθανές λύσεις στο πρόβλημα των υπερφορτίσεων των γραμμών του δικτύου είναι οι εξής:

- διπλές γραμμές (οπότε αν θέλαμε να προσομοιώσουμε ξανά τα διάφορα σενάρια λειτουργίας του δικτύου, στον πίνακα που περιέχει τις αντιστάσεις και τις αυτεπαγωγές των γραμμών όπου R και X θα βάζαμε  $\frac{R}{2}$  και  $\frac{X}{2}$  αντίστοιχα, αφού διπλή γραμμή σημαίνει  $Z // Z = \frac{Z}{2}$ )
- πυκνωτές αντιστάθμισης

## 10.2 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΡΜΟΝΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

### 10.2.1 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με τον αρμονικό αλγόριθμο

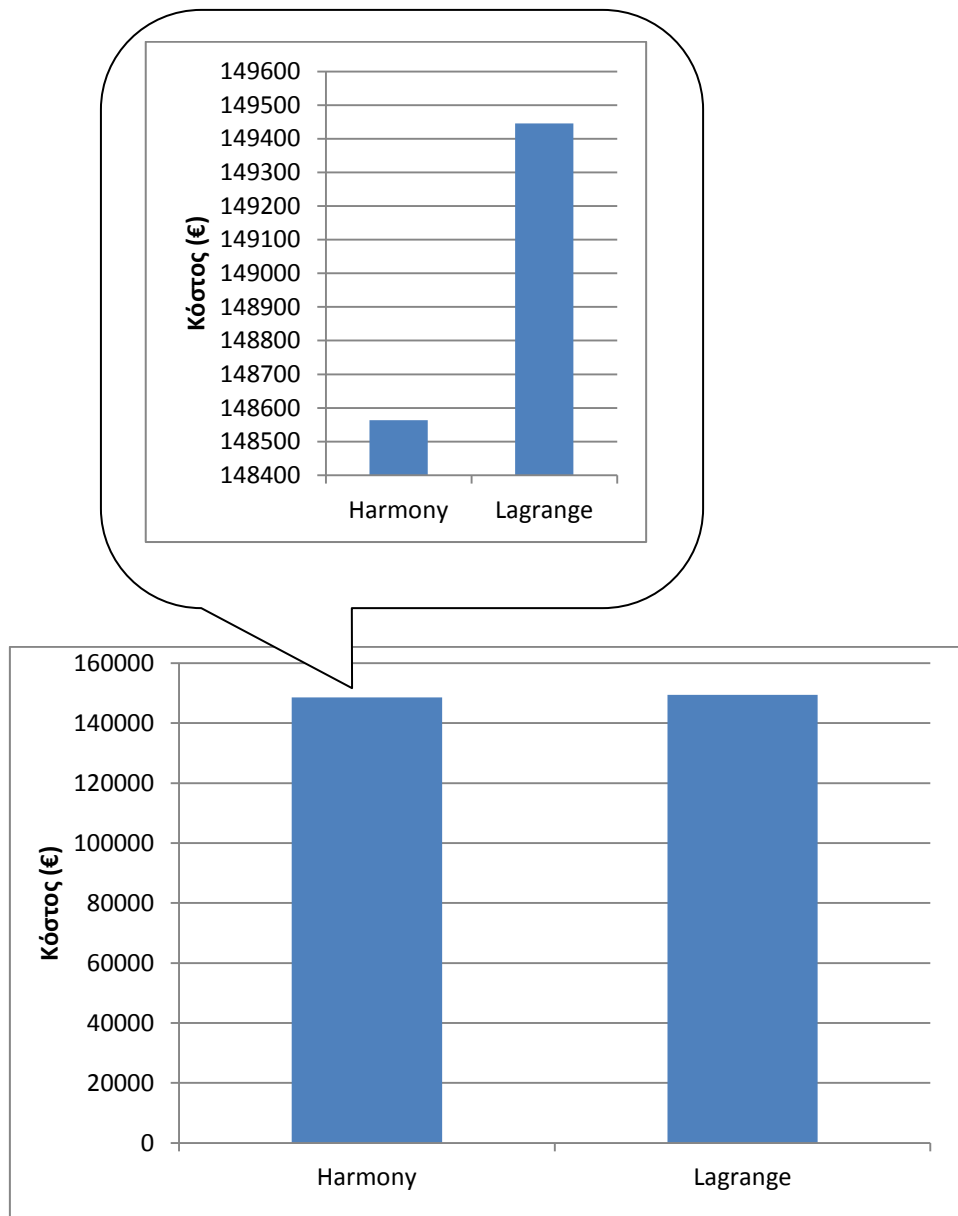
Ο παρακάτω συγκριτικός πίνακας περιέχει ανά μήνα τους έτους 2008 το κόστος λειτουργίας του μικροδικτύου, προσομοιωμένο τόσο με τη μέθοδο Lagrange όσο και με τον αρμονικό αλγόριθμο.

Πριν καταλήξουμε στην τελική προσομοίωση με τον αρμονικό αλγόριθμο, εκείνη που θα μας έδινε αποτελέσματα παρόμοια με τη μέθοδο Lagrange, έγιναν διάφορες δοκιμαστικές προσομοιώσεις αλλάζοντας κάθε φορά μια από τις παραμέτρους HMS, NI, PAR και HMCR ceteris paribus. Τελικά καταλήξαμε στις παρακάτω τιμές των παραμέτρων:

$$\begin{aligned} \text{HMS} &= 6 \\ \text{PAR} &= 0,3 \\ \text{HMCR} &= 0,95 \\ \text{NI} &= 10.000 \end{aligned}$$

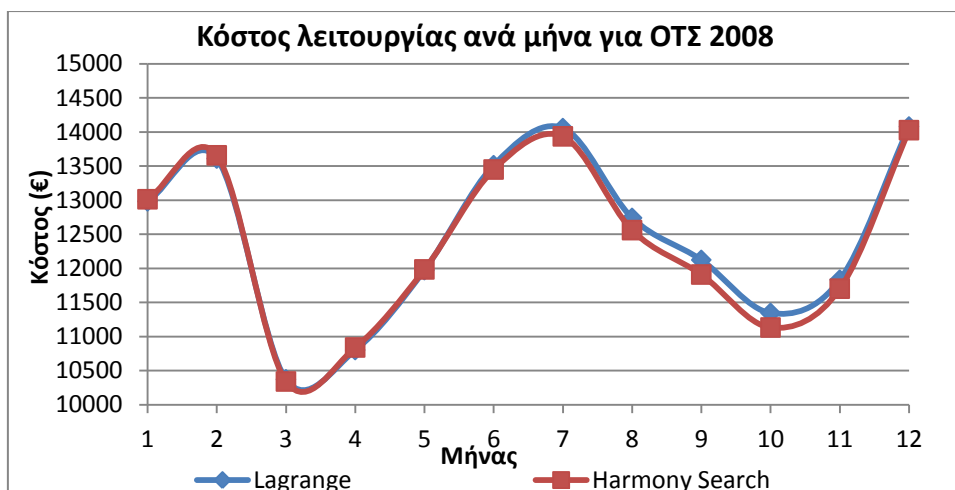
Μήνας	HS	Lagrange
1	13014,46488	12984,28028
2	13658,83248	13611,51246
3	10341,36108	10372,69021
4	10840,35258	10802,80281
5	11985,06557	11975,24869
6	13450,61853	13513,69466
7	13936,97242	14057,87307
8	12561,75538	12740,68887
9	11910,64778	12124,476
10	11133,28777	11346,30798
11	11702,53778	11834,16382
12	14027,76394	14081,29993
<b>άθροισμα</b>	<b>148563,6602</b>	<b>149445,0388</b>

Τελικά η μέθοδος Lagrange μας έδωσε ετήσιο κόστος 149.445 €, ενώ η επίλυση με αρμονικό αλγόριθμο 148.563,66 €. Η διαφορά των δύο μεθόδων βελτιστοποίησης στο ετήσιο κόστος λειτουργίας του μικροδικτύου για ΟΤΣ 2008 είναι μόλις 881,3786 €, διαφορά πολύ ικανοποιητική για την τάξη μεγέθους του συνολικού ετήσιου κόστους, που ανέρχεται περίπου στα 150.000 €. Το σχετικό σφάλμα μεταξύ των δύο κόστεων είναι μόλις 0,5897677%, πάρα πολύ ικανοποιητική προσέγγιση.



Σχήμα 10.18





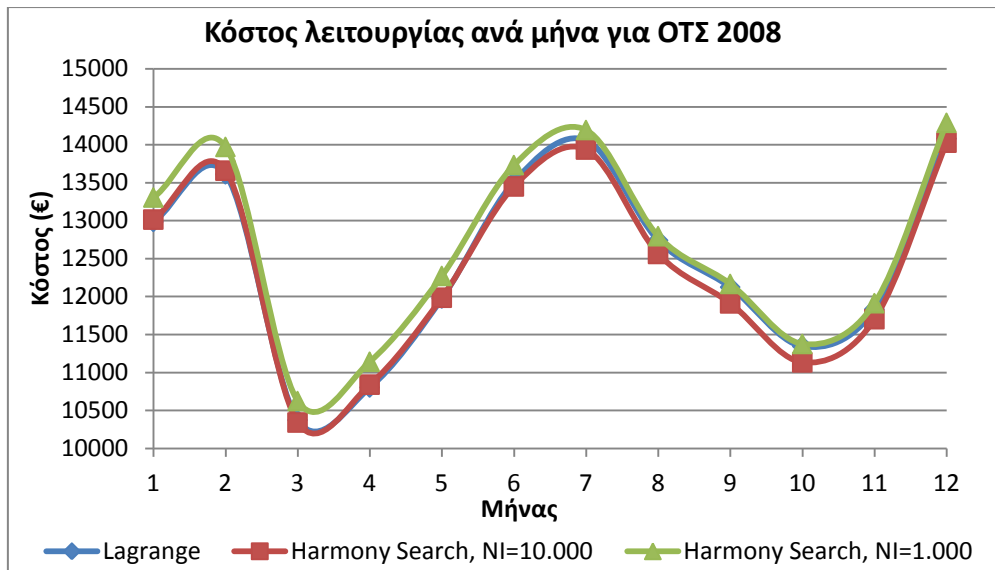
Σχήμα 10.19

Το Σχήμα 10.19 δείχνει ακριβώς για κάθε μήνα του έτους την τιμή του κόστους λειτουργίας. Οπότε όντως και γραφικά φαίνεται πόσο παραπλήσιες είναι οι μετρήσεις που λάβαμε με την εφαρμογή των δύο μεθόδων.

### 10.2.2 Αποτελέσματα ενδιάμεσων προσομοιώσεων

Αξίζει να αναφερθεί ότι όσο πιο μεγάλος είναι ο αριθμός των επαναλήψεων, τόσο πιο μικρό είναι το σφάλμα μεταξύ των δύο μεθόδων, δηλαδή τόσο περισσότερο τα αποτελέσματα που δίνει ο αρμονικός αλγόριθμος αναζήτησης πλησιάζουν αυτά της μεθόδου Lagrange. Παρόλα αυτά, και οι προσομοιώσεις με αριθμό επαναλήψεων NI=1.000 (10 φορές μικρότερος αριθμός επαναλήψεων από το κατά δύναμη βέλτιστο) μας έδωσαν πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα, όπως δείχνει ο παρακάτω πίνακας.

Μήνας	Lagrange	HS NI=1.000	HS NI=10.000
1	12984,28028	<b>13305,44602</b>	13014,46488
2	13611,51246	<b>13971,46021</b>	13658,83248
3	10372,69021	<b>10623,24619</b>	10341,36108
4	10802,80281	<b>11141,646</b>	10840,35258
5	11975,24869	<b>12271,75689</b>	11985,06557
6	13513,69466	<b>13732,30464</b>	13450,61853
7	14057,87307	<b>14193,9525</b>	13936,97242
8	12740,68887	<b>12795,6529</b>	12561,75538
9	12124,476	<b>12166,2842</b>	11910,64778
10	11346,30798	<b>11376,15465</b>	11133,28777
11	11834,16382	<b>11913,11474</b>	11702,53778
12	14081,29993	<b>14288,94166</b>	14027,76394
<b>άθροισμα</b>	<b>149.445,0388</b>	<b>151.779,9606</b>	<b>148.563,6602</b>
<b>απόλυτη</b>	<b>διαφορά (€)</b>	<b>2.334,921792</b>	881,3786198
<b>σχετική</b>	<b>διαφορά (%)</b>	<b>1,53835973</b>	0,589767735



Σχήμα 10.20

Ακόμα και με αριθμό επαναλήψεων NI=1.000 η σχετική διαφορά των δύο μεθόδων είναι 2.335 € περίπου, με σχετικό σφάλμα 1,54%, που κι αυτό είναι ικανοποιητικό.

Ακολουθούν ενδεικτικά οι χρόνοι προσομοίωσης:

	Lagrange	HS NI=1.000	HS NI=10.000
Χρόνος προσομοίωσης (sec)	1.160,62	3.132,67	26.873,51

Σχήμα 10.21

Αν και ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας εργασίας η περαιτέρω μελέτη του αρμονικού αλγορίθμου αναζήτησης, είναι βέβαιο πως αν αυξάναμε ακόμα περισσότερο τον αριθμό των επαναλήψεων σε NI=100.000 πχ ή NI=1.000.000 (κάτι το οποίο επαναλαμβάνουμε, δεν είναι ο σκοπός μας), το ετήσιο άθροισμα κόστους των δύο μεθόδων θα είχε σφάλμα ακόμα πιο μικρό του 0,5% !

### 10.2.2 Βελτιωμένος Αρμονικός αλγόριθμος (Improved Harmony Search, IHS)

Όπως αναλύθηκε και στο κεφάλαιο 7.3.3 της θεωρίας του αρμονικού αλγορίθμου, ο βελτιωμένος αρμονικός αλγόριθμος κάνει δυναμική αλλαγή των παραμέτρων PAR και bw σε κάθε επανάληψη της προσομοίωσης σύμφωνα με τους τύπους που δόθηκαν.

Στις δικές μας τις προσομοιώσεις κάναμε κάποιες αλλαγές στο αρχείο harmony στο οποίο κάνει κλήση η συνάρτηση και τροποποιήσαμε τον HS σε IHS. Έγιναν διάφορες δοκιμές στις

παραμέτρους  $PAR_{min}$ ,  $PAR_{max}$ ,  $bw_{min}$ ,  $bw_{max}$  και τελικά καταλήξαμε στους εξής λόγους για τους οποίους δεν έγινε χρήση του IHS αλγορίθμου στις προσομοιώσεις μας:

- Με τις παραμέτρους  $PAR_{min}$  –  $PAR_{max}$  δεν είχαμε πρόβλημα, δεν επηρέαζαν ιδιαίτερα τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων (άλλωστε είναι τέτοια η φύση της παραμέτρου  $PAR$  που έχει μικρή επίδραση στο σύστημα)
- Όμως οι παράμετροι  $bw_{min}$ ,  $bw_{max}$  παίρνουν πολύ μικρές τιμές (πχ  $bw_{min} = 10^{-8}bw$  και  $bw_{max} = 10^{-3}bw$ ). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σε κάθε επανάληψη το βήμα να είναι απειροελάχιστο, οπότε μέχρι να ολοκληρωθούν όλες οι επαναλήψεις NI δεν έχουμε απομακρυνθεί πολύ από το  $bw_{min}$ , στην ουσία έχουμε εγκλωβιστεί στο κάτω όριο. Θα ανεβαίναμε πιο ψηλά αλλά με πάρα πολύ μεγάλο αριθμό επαναλήψεων, κάτι το οποίο ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας εργασίας, αφού σκοπός μας δεν ήταν να μελετήσουμε τον αρμονικό αλγόριθμο. Σε πολλές δημοσιεύσεις που έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια πάνω στον αρμονικό αλγόριθμο και τις μεταγενέστερες εκδόσεις του, μια απ' τις οποίες είναι και ο IHS, αναφέρεται ότι η εύρεση των κατάλληλων παραμέτρων της μεθόδου αυτής αποτελεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης από μόνη της.

## 10.3 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ

### 10.3.1 Ορθότητα στοχαστικού μοντέλου

Το στοχαστικό μοντέλο που κατασκευάσαμε είναι σωστό διότι με  $V=0$ ,  $C=1$ ,  $w_1=1$  και  $w_2=0$  αυτές τις τιμές παραμέτρων το στοχαστικό γίνεται ντετερμινιστικό μοντέλο και με τον αρμονικό αλγόριθμο με τις παραμέτρους που είπαμε στην §10.2.1 με αριθμό επαναλήψεων  $NI=1.000$  βέβαια (για εξοικονόμηση χρόνου κι ό  $NI=10.000$ ) προέκυψαν ακριβώς τα ίδια μηνιαία κόστη λειτουργίας, οπότε και το ίδιο συνολικό ετήσιο κόστος.

Μήνας	Στοχαστικό	Ντετερμινιστικό
1	13297,63685	13305,44602
2	13959,76337	13971,46021
3	10619,06013	10623,24619
4	11125,53043	11141,646
5	12291,61305	12271,75689
6	13733,38502	13732,30464
7	14196,76914	14193,9525
8	12801,08345	12795,6529
9	12163,08946	12166,2842
10	11394,05921	11376,15465
11	11906,76859	11913,11474
12	14289,48636	14288,94166
<b>άθροισμα</b>	151778,245	151779,9606

### 10.3.2 Διάφορες δοκιμές με το στοχαστικό μοντέλο

Έγιναν διάφορες προσομοιώσεις μόνο για τον 1<sup>ο</sup> μήνα του έτους αλλάζοντας κάθε φορά είτε τους συντελεστές C, V είτε τα βάρη w1, w2 είτε και τους τέσσερις μαζί. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στα οποία καταλήξαμε είναι τα εξής:

Παράμετροι στοχαστικού μοντέλου	Λειτουργικό κόστος 1ου μήνα (€)
w1=0.8,w2=0.2 V=0.2,C=1	10654,18407
w1=0.6,w2=0.4 V=0.2,C=1	7992,677466
w1=0.9,w2=0.1 V=0.2,C=1	11993,86814
w1=0.95,w2=0.05 V=0.2,C=1	12655,443
w1=0.8,w2=0.2 V=0.5,C=0.5	10695,29675
w1=0.8,w2=0.2 V=0.3,C=0.8	10675,97216
w1=0.8,w2=0.2 V=0.1,C=0.9	10647,9187
w1=0.95,w2=0.05 V=0.1,C=0.9	12638,9741
w1=0.95,w2=0.05 V=0.05,C=0.95	12626,88415
w1=0.97,w2=0.03 V=0.1,C=0.98	12917,71863
<b>w1=0.97,w2=0.03 V=0.1,C=0.99</b>	<b>12921,04174</b>
<b>Ντετερμινιστικό μοντέλο κόστος αναφοράς 1ου μήνα (€)</b>	<b>13305,44602</b>

Από τον παραπάνω πίνακα διαπιστώνουμε πως για να προσεγγίσει το στοχαστικό μοντέλο το ντετερμινιστικό θα πρέπει:

- Το βάρος w1 να είναι κατά πολύ μεγαλύτερο του w2, και μάλιστα το w1 να είναι της τάξης του 0.9 και το w2 μικρότερο από 0.1, με το άρθρισμά τους πάντα να ισούται με 1.
- Ο συντελεστής διακύμανσης V να είναι μικρός, της τάξης του 0.1-0.2

- Ο συντελεστής συσχέτισης C να είναι κοντά στη μονάδα (0.9-1)

### 10.3.3 Προσομοίωση στοχαστικού μοντέλου για ένα έτος

Βάσει των παραπάνω διαπιστώσεων προσομοιώσαμε το στοχαστικό μοντέλο μας με τις εξής παραμέτρους:  $w_1=0.97$ ,  $w_2=0.03$ ,  $V=0.1$ ,  $C=0.99$

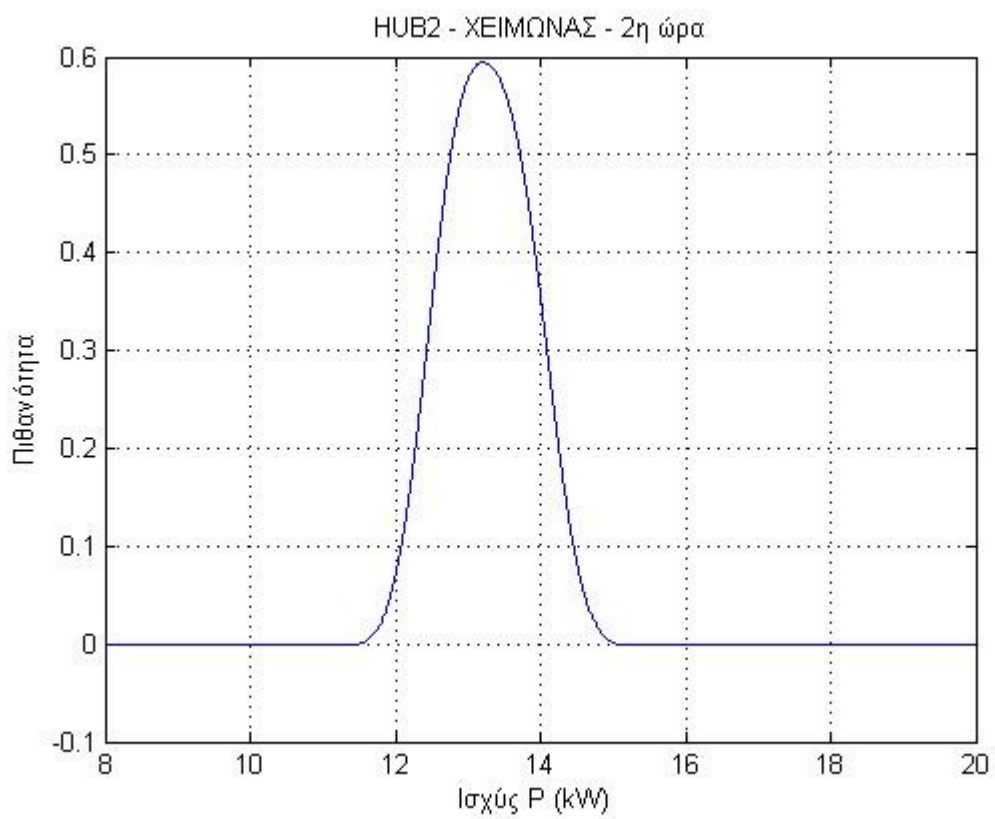
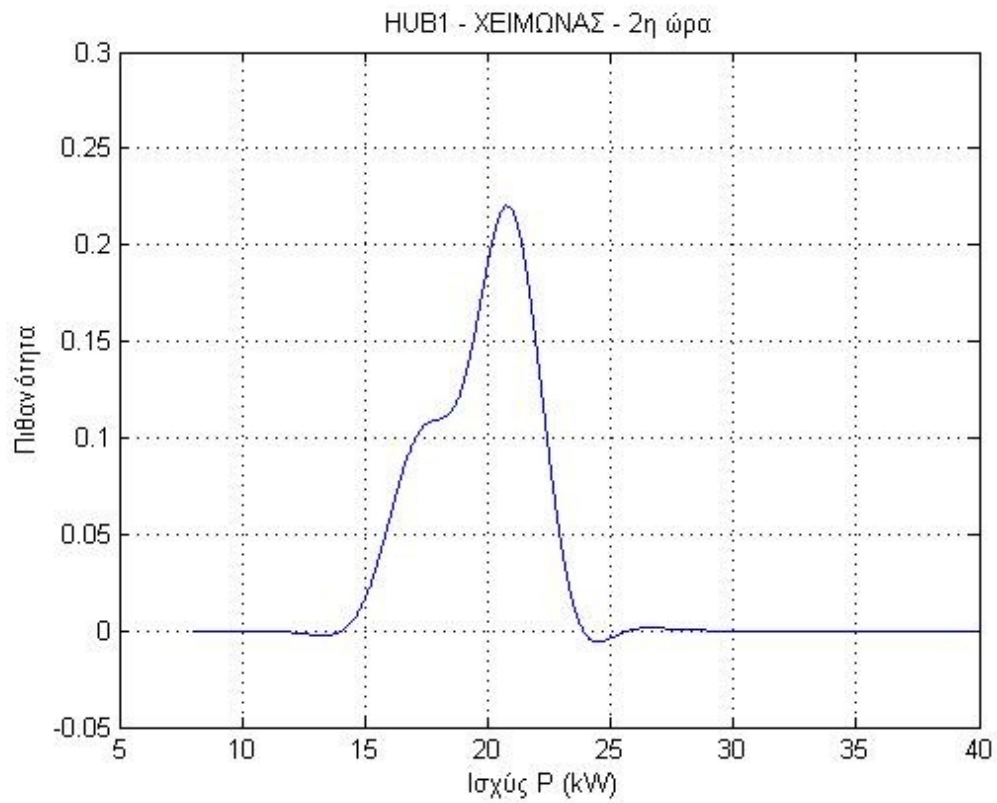
Ο χρόνος προσομοίωσης ήταν 33.514,876636 sec και προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

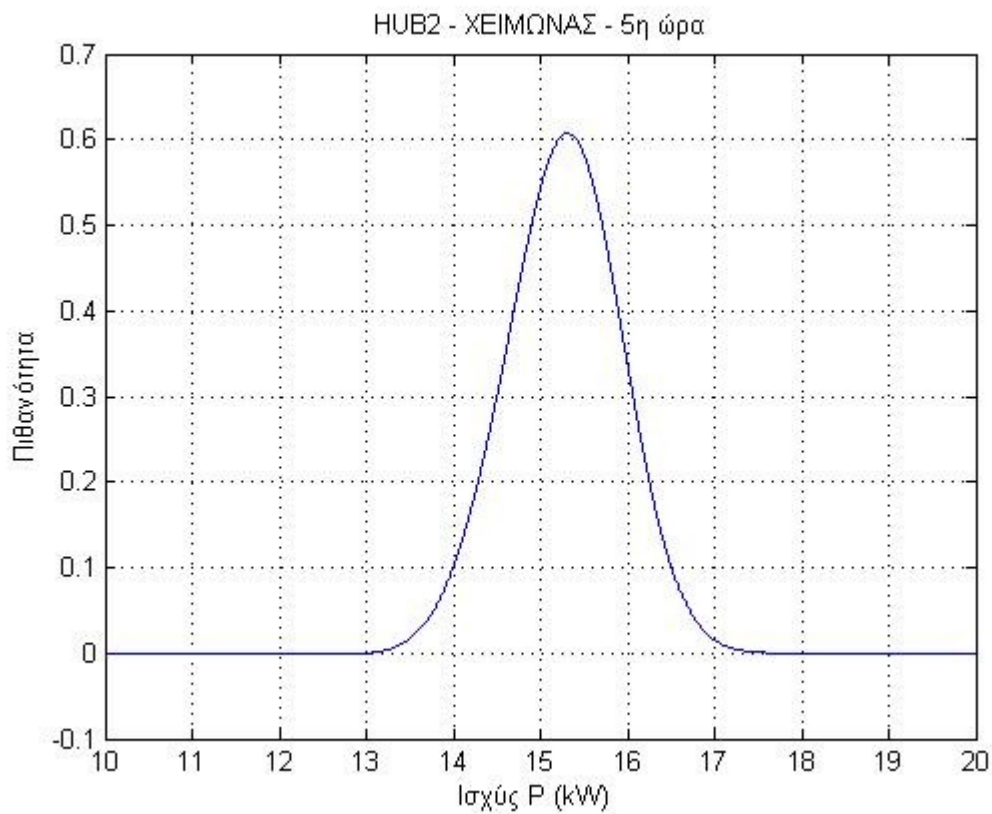
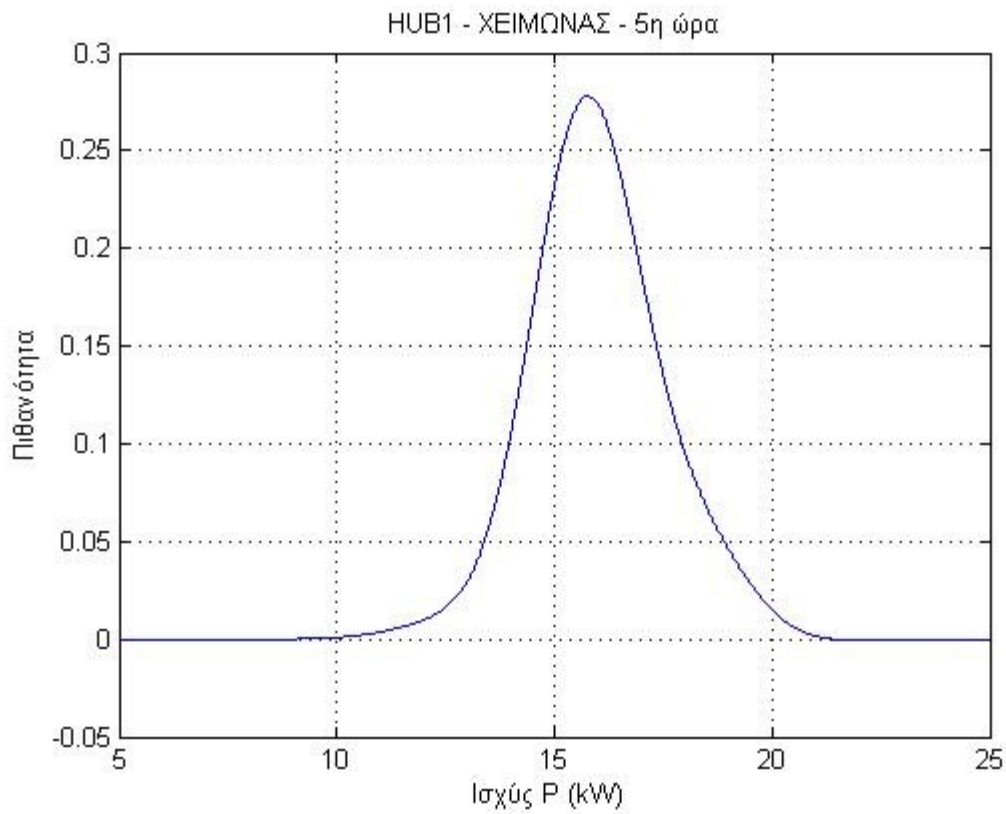
Μήνας	Στοχαστικό	Ντετερμινιστικό
1	12908,10343	13305,44602
2	13544,24537	13971,46021
3	10291,45396	10623,24619
4	10806,42018	11141,646
5	11920,15337	12271,75689
6	13321,79107	13732,30464
7	13777,43405	14193,9525
8	12426,38887	12795,6529
9	11795,92079	12166,2842
10	11042,68129	11376,15465
11	11553,549	11913,11474
12	13853,1716	14288,94166
<b>άθροισμα</b>	147241,313	151779,9606
<b>απόλυτη</b>	<b>διαφορά (€) :</b>	4538,647607
<b>σχετική</b>	<b>διαφορά (%) :</b>	2,990281187

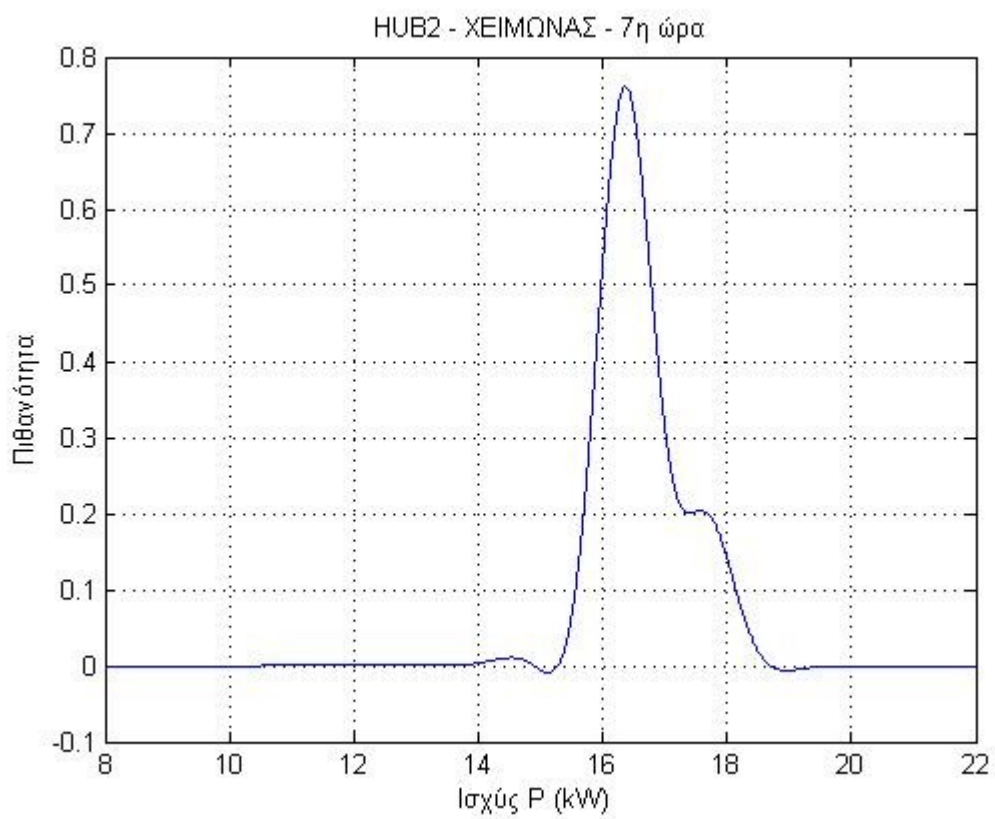
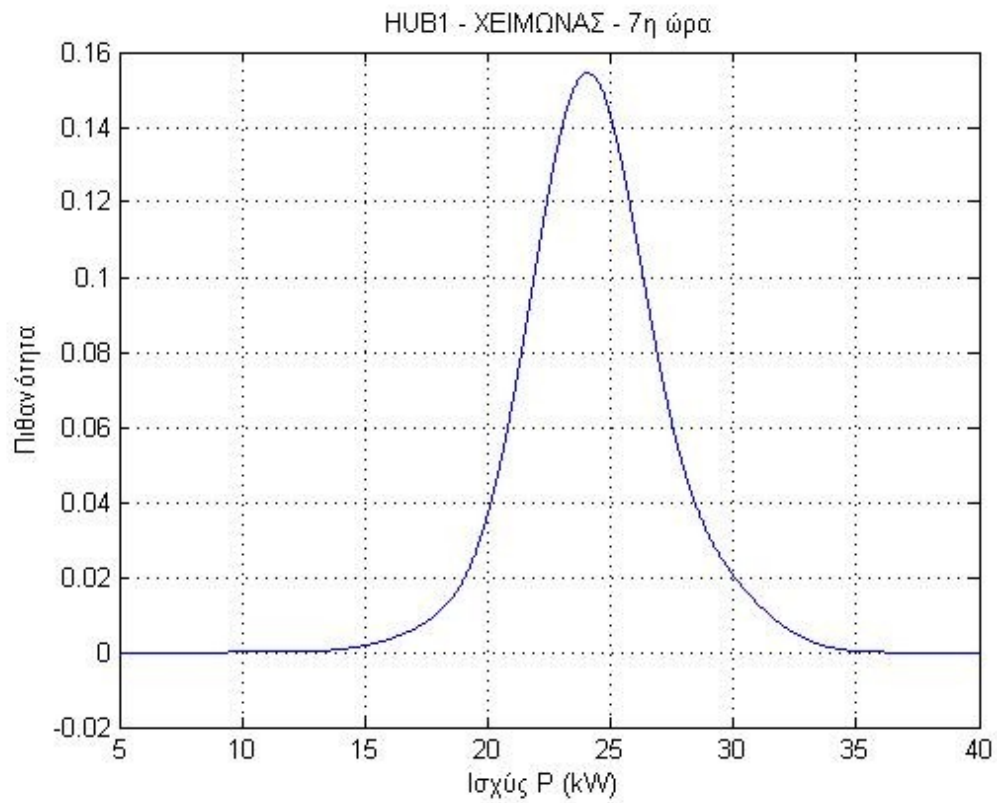
## 10.4 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΟΥ CHP

Για τις τέσσερις εποχές του έτους για κάποιες χαρακτηριστικές ώρες ανά εποχή χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Gram-Charlier για την εύρεση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της ισχύος που παράγει το CHP ανάλογα με τη θερμική και ηλεκτρική ζήτηση του ζυγού και ανάλογα με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

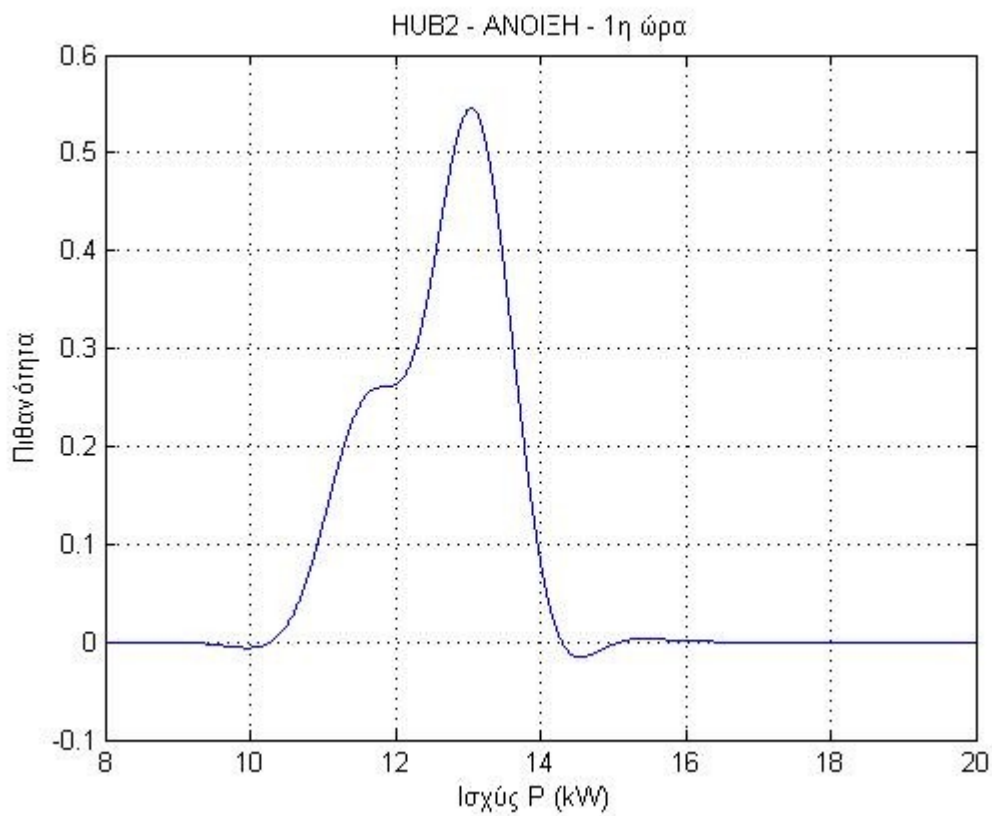
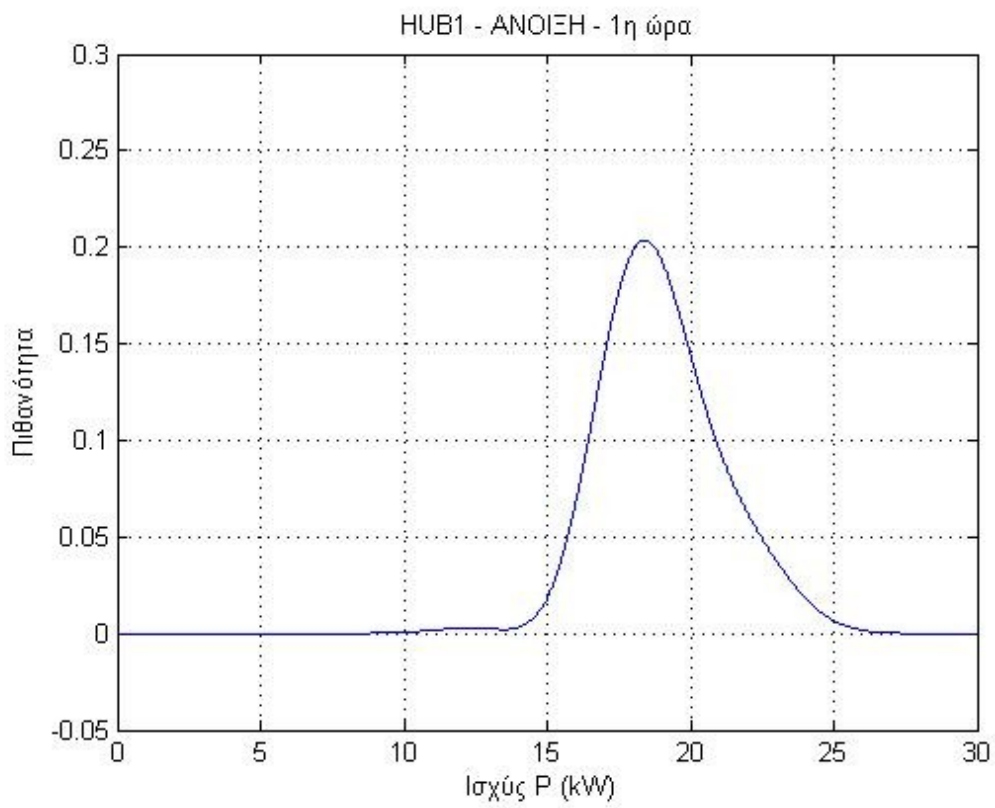
Παραθέτουμε ενδεικτικά κάποια διαγράμματα:

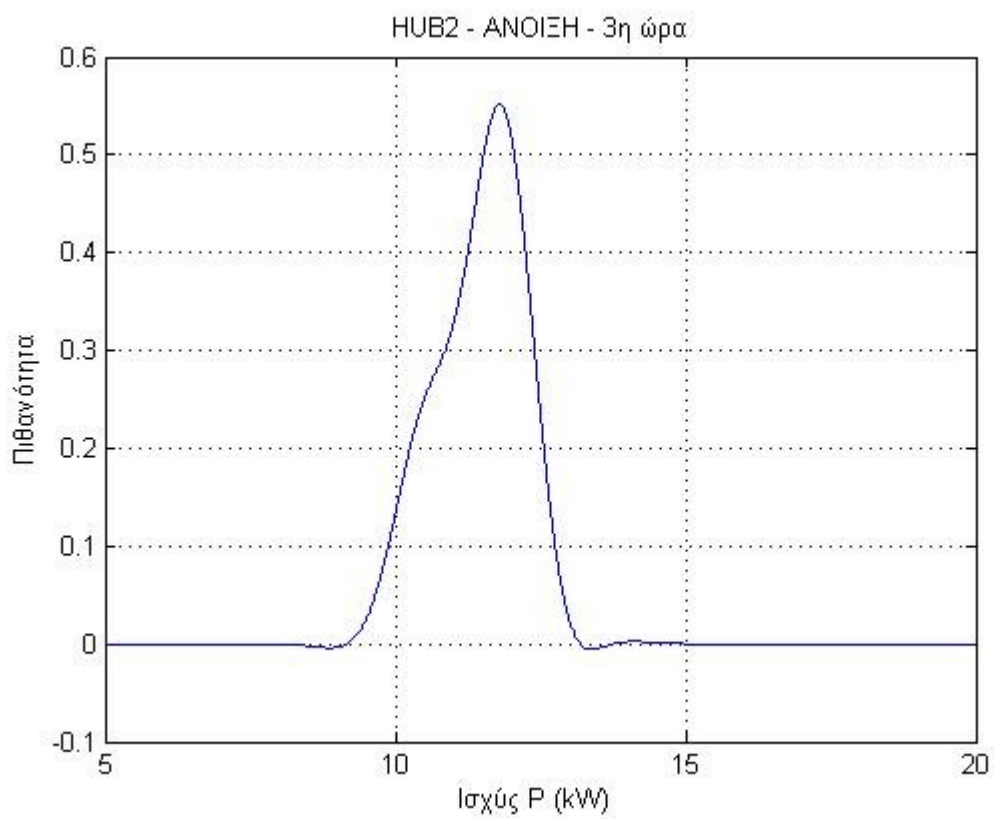
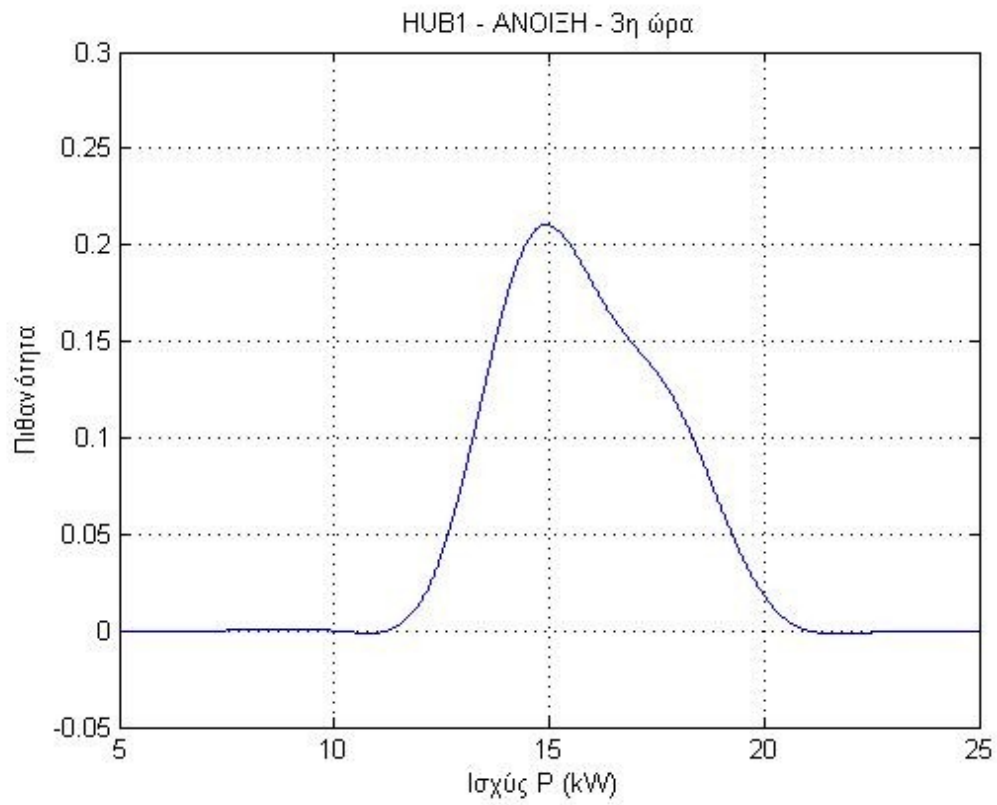


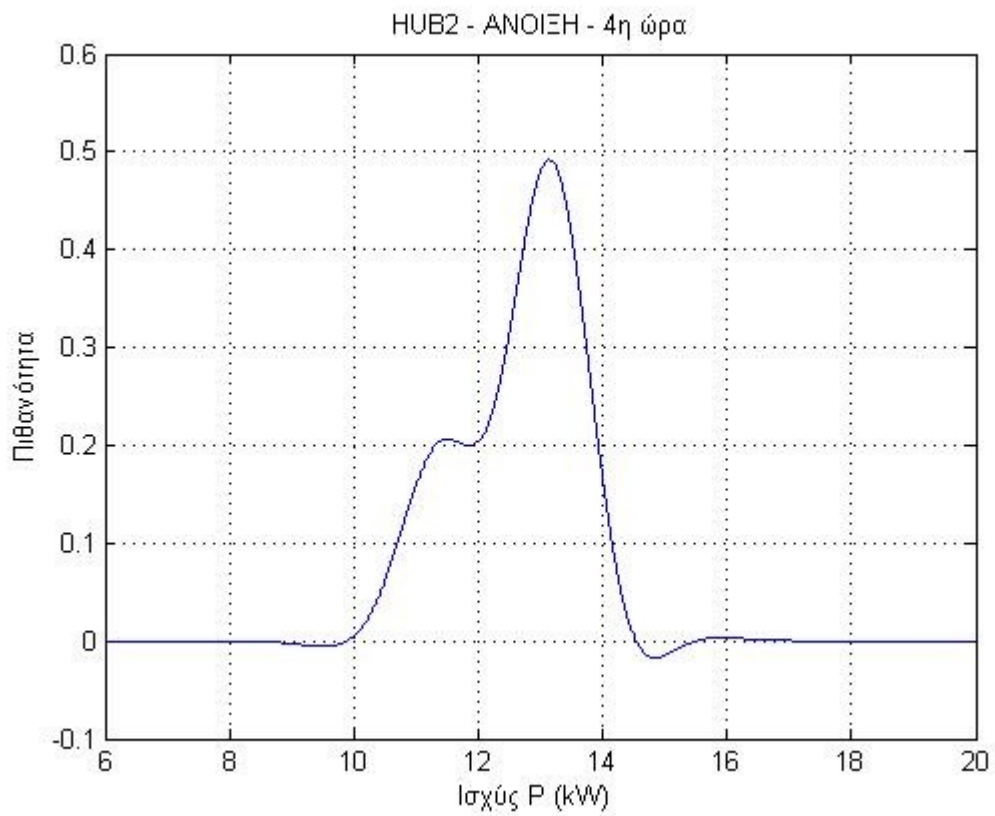
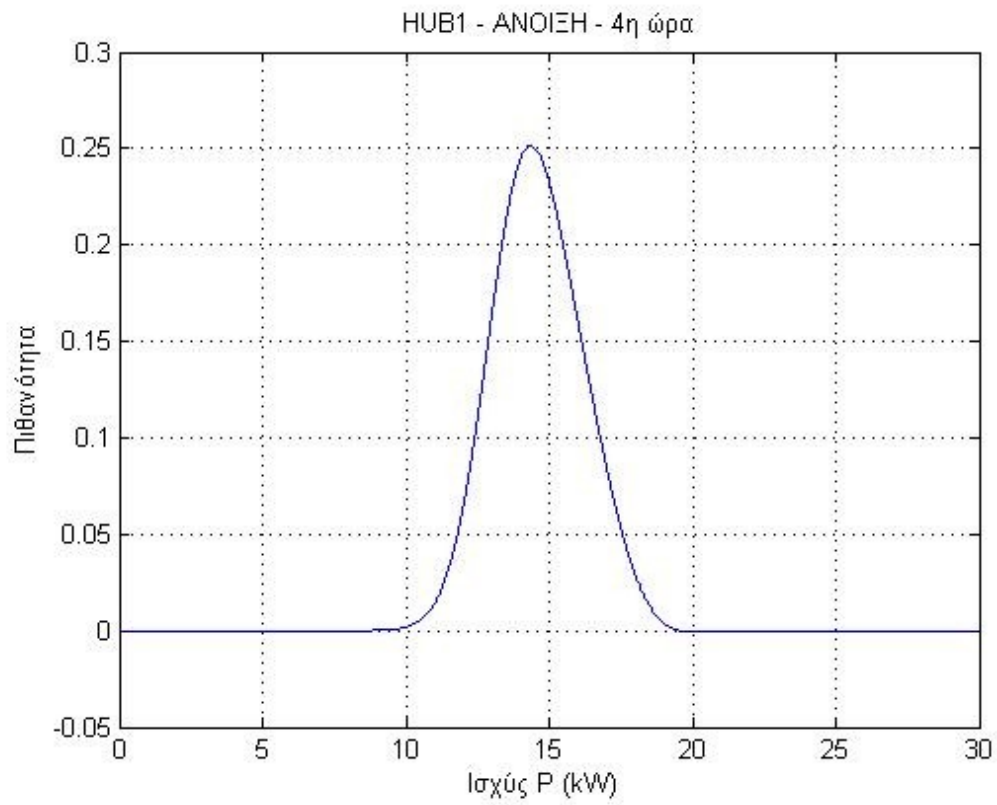


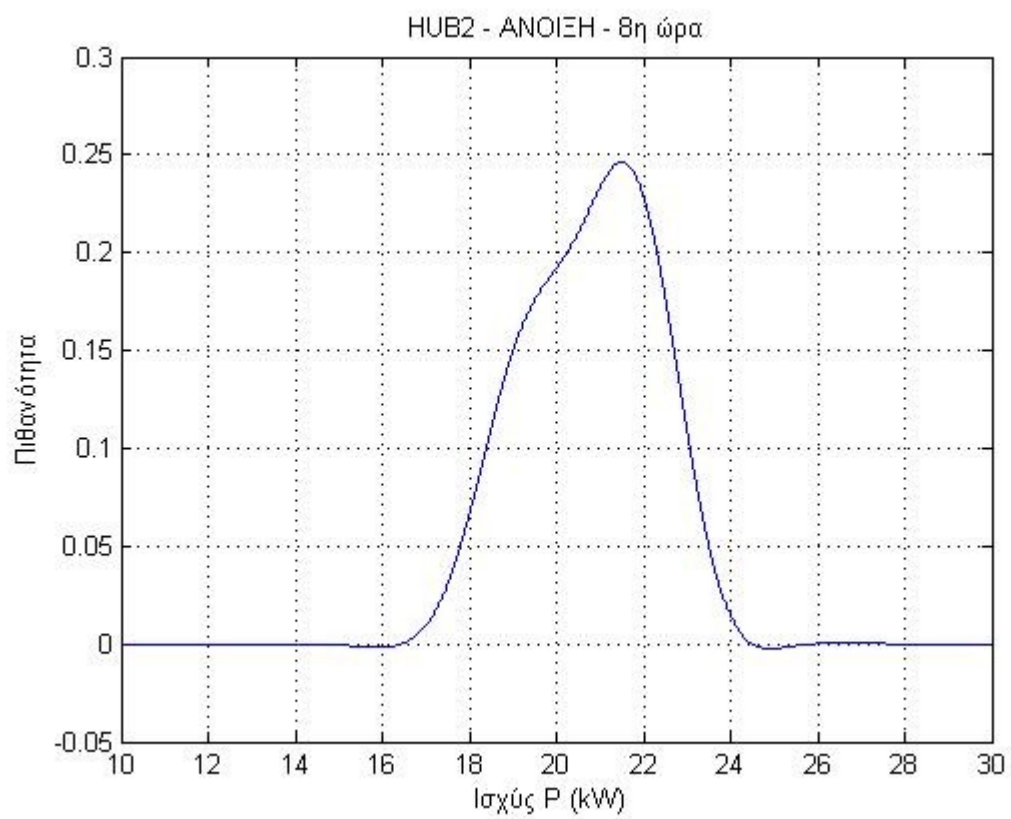
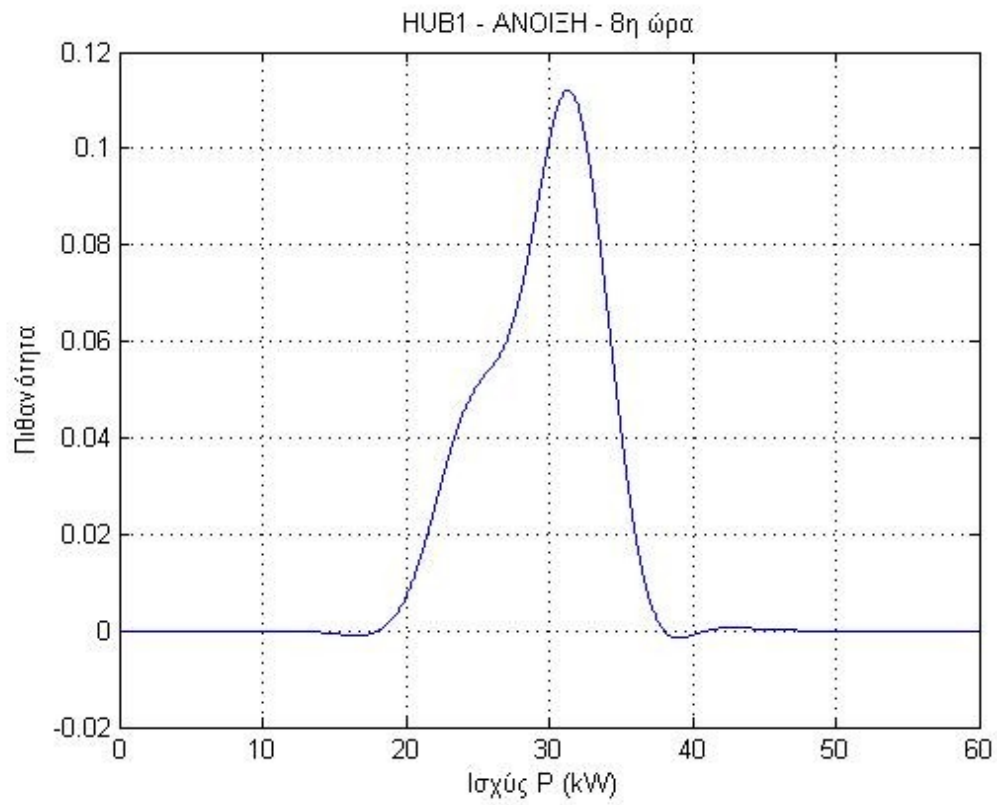












## 10.5 ΜΕΛΕΤΗ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ ΔΙΑΦΟΡΑ ΜΕΓΕΘΗ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

### 10.5.1 Τι και Πως θα εξεταστεί

Λόγω της μεγάλης ποσότητας των πληροφοριών που αντλήθηκαν κατά την μελέτη του μικροδικτύου, παρουσία ηλεκτρικών οχημάτων, επιλέγονται τρεις (3) μήνες του χρόνου όπου θα αναλυθούν εντατικά ενώ τα αποτελέσματα κόστους, συνολικά με τα αντίστοιχα διαγράμματα και τις αντίστοιχες καμπύλες ζήτησης φορτίου (για μία τυπική ημέρα) απεικονίζονται στο τέλος αυτής της διπλωματικής στο αντίστοιχο παράρτημα.

Οι μήνες που επιλέχθηκαν να εξεταστούν είναι οι Φεβρουάριος, Μάιος και Οκτώβριος. Επιλέχθηκαν βάσει των ακραίων τιμών κόστους που λαμβάνουν σε συγκεκριμένες ημέρες του εκάστοτε μήνα αλλά και διότι αντικατοπτρίζουν διαφορετικές εποχές, με διαφορετική παραγωγή ΑΠΕ και διαφορετική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας συνθέτοντας μία πιο γενική εικόνα για το σύστημα μας. Οι μήνες αυτοί θα εξεταστούν ως προς συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Αρχικά θα περιοριστούμε μόνο στο σενάριο του μικροδικτύου που είναι και το πιο ενδιαφέρον και στην συνέχεια θα εξετάσουμε δύο διαφορετικά επίπεδα διείσδυσης ΑΠΕ. Το πρώτο βήμα διείσδυσης (στην ουσία χωρίς βήμα διείσδυσης καθώς είναι η αρχική εγκατεστημένη ισχύς) αντιστοιχεί στην αρχική εγκατεστημένη ισχύ ΑΠΕ σε PV και ανεμογεννήτρια που ισούται με 28kW (15kW στην ανεμογεννήτρια, 10kW στο PV του ζυγού 6 και 3kW στο PV του ζυγού 4). Το δεύτερο βήμα διείσδυσης (δηλαδή με βήμα διείσδυσης υποδηλώνοντας αυξημένη διείσδυση σε σχέση με την αρχική) αντιστοιχεί στο διπλάσιο περίπου της προαναφερθείσας εγκατεστημένης ισχύς με εγκατεστημένη ισχύ που φτάνει τα 59,5kW (30kW στην ανεμογεννήτρια, 17,5kW στο PV του ζυγού 6 και 12kW στο PV του ζυγού 4). Για κάθε έναν από τους μήνες και για κάθε ένα από τα βήματα διείσδυσης που αναφέρθηκαν αναλύονται τα εξής παρακάτω μεγέθη :

- i. Έλεγχος τάσεων και ρευμάτων στο δίκτυο που συνιστά το μικροδίκτυο
- ii. Μελέτη κόστους συνολικά ανά μήνα
- iii. Μελέτη κόστους κατά τις ώρες φόρτισης των EVs και πως η παρουσία τους επηρεάζει το κόστος
- iv. Μελέτη της καμπύλης ζήτησης φορτίου (παρουσία EVs) για την 8<sup>η</sup> ημέρα του εκάστοτε μήνα και σύγκριση αυτής με την αντίστοιχη απουσία EVs
- v. Μελέτη ορισμένων συσχετίσεων και εξαγωγή συμπερασμάτων αναφορικά με την συσχέτιση των παρακάτω μεγεθών όπως για παράδειγμα πως το συνολικό κόστος συσχετίζεται με την παραγωγή της ανεμογεννήτριας ή πως η ζήτηση ισχύος με σκοπό την φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων συσχετίζεται με την παραγωγή του κάθε ένα από τα δύο φωτοβολταϊκά.

Είναι κατανοητό επομένως γιατί επιλέχθηκαν μόνο τρεις μήνες και όχι όλοι οι μήνες καθώς στα χρονικά πλαίσια αυτής της διπλωματικής δεν ήταν δυνατό να παρουσιαστεί τέτοια εκτενής ανάλυση για όλους τους μήνες παρ' όλο που έχει πραγματοποιηθεί με την βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος MATLAB. Παρακάτω ακολουθεί η ανάλυση ανά μήνα, ανά εξεταζόμενο χαρακτηριστικό ανάλογα πάντα με το αντίστοιχο βήμα διείσδυσης ΑΠΕ.

## 10.5.2 Έλεγχος Τάσεων και Ρευμάτων

Ο έλεγχος που αφορούσε τις τάσεις ήταν ιδιαίτερα αυστηρός καθώς είχε δοθεί ένα μικρό εύρος μέσα στο οποίο επιτρεπόταν να κινηθεί η τάση. Αυτό το εύρος είχε οριστεί στο  $\pm 3\%$ . Αν η τάση ξεπέρανε αυτό το εύρος (το άνω ή το κάτω όριο) αμέσως χτύπαγε και σημειωνόταν ένα “flag” το οποίο δεν ήταν τίποτε παραπάνω παρά ένας ανιχνευτής σφαλμάτων. Τα δεδομένα των γραμμών που χρησιμοποιήσαμε ταυτίζονταν με συγκεκριμένες γραμμές οι οποίες προμηθεύονται από την Δ.Ε.Η. Α.Ε. και μπορούν να βρεθούν στις ιστοσελίδες του Internet. Τα χαρακτηριστικά των γραμμών ήταν τα παρακάτω :

nl	nr	Bus bus p.u.	R p.u.	X p.u.	1/2 B p.u.	= 1 for lines > 1 or < 1 tr. tap at bus nl
1	2	0.0001	0.0001	0.000	1	
2	3	0.0125	0.00375	0.000	1	
3	4	0.0125	0.00375	0.000	1	
4	5	0.0125	0.00375	0.000	1	
5	6	0.0125	0.00375	0.000	1	
3	7	0.021875	0.004375	0.000	1	
1	8	0.033125	0.00875	0.000	1	
1	9	0.0075	0.005	0.000	1	
9	10	0.015	0.010625	0.000	1	
10	11	0.02125	0.005625	0.000	1	
11	12	0.02125	0.005625	0.000	1	
9	13	0.010625	0.005625	0.000	1	
13	14	0.010625	0.005625	0.000	1	
10	15	0.023125	0.00625	0.000	1	
15	16	0.023125	0.00625	0.000	1	
17	1	0.0025	0.01	0.000	1	

Παραπάνω παρουσιάζονται (όπως ακριβώς απεικονίζεται στον κώδικα της διπλωματικής) τα στοιχεία των γραμμών προσδιορίζονται τις γραμμές ανάλογα με την θέση των κόμβων nl (node-left) ή nr (node-right). Ως όριο των γραμμών τέθηκαν τα 210A συνθήκη που εκ των υστέρων άλλαξε μόνο για την γραμμή που συνδέει το δίκτυο μας με το ανάντη δίκτυο. Με την βοήθεια αυτών των “flag” δημιουργήθηκε ένας πίνακας βάσει του οποίου απεικονίζεται ποιος ζυγός έχει πρόβλημα. Το πρόβλημα είναι πάντα η τάση (καθώς τα 210 A ήταν κάτι παραπάνω από αρκετά για τις ισχείς που διακινούνται στο σύστημα μας) και συνεπώς μπορούμε να παρουσιάσουμε έναν λιγότερο αναλυτικό πίνακα που απλά παρουσιάζει το αν υπάρχει σφάλμα ή όχι και δεν εξειδικεύει αν είναι σφάλμα στην τάση ή στο ρεύμα :

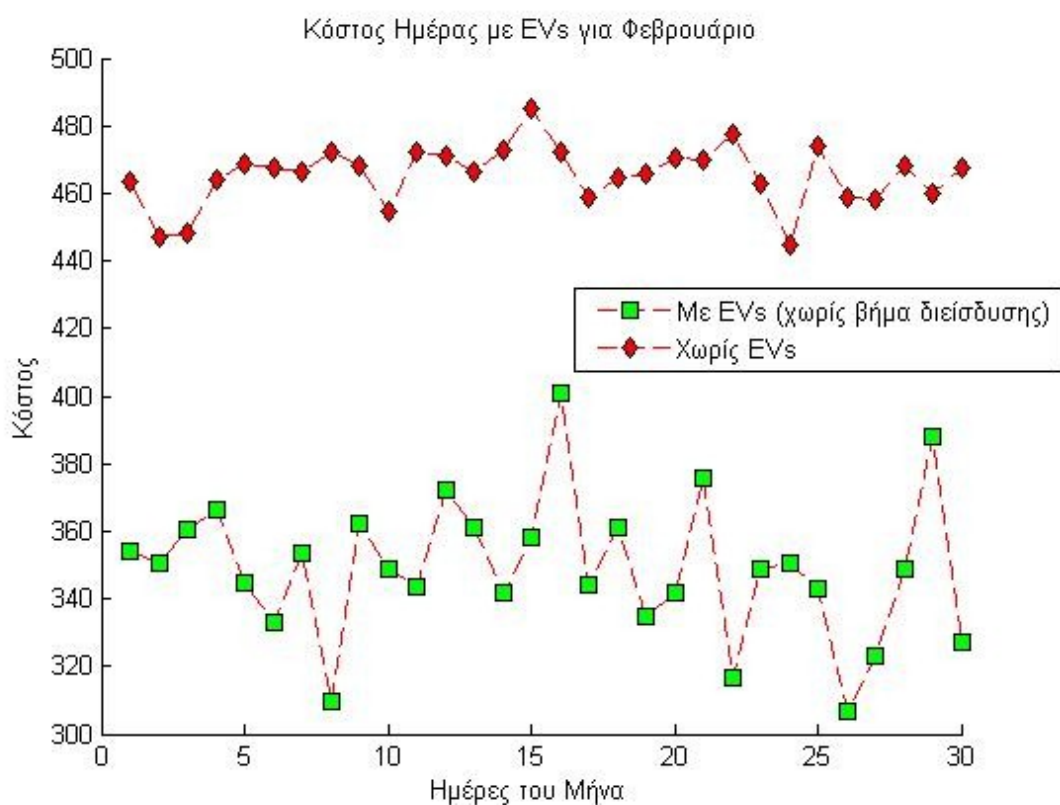
Ζυγοί																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
<b>ΧΩΡΙΣ ΒΗΜΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ</b>																	
<b>February</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-
<b>May</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-
<b>October</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-
<b>ΜΕ ΒΗΜΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ</b>																	
<b>February</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-
<b>May</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-
<b>October</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-

Παρατηρούμε πως οι τάσεις (γιατί για τα ρεύματα αναφέραμε παραπάνω πως δεν τίθεται θέμα σφάλματος) παρουσιάζουν προβλήματα στους ζυγούς 1-11 είτε εξετάζουμε την περίπτωση χωρίς βήμα διείσδυσης (δηλαδή εγκατεστημένη ΑΠΕ ίση με 28kW) είτε με βήμα διείσδυσης (δηλαδή εγκατεστημένη ΑΠΕ ίση με 59,5kW). Έπειτα από παρατήρηση των τάσεων, των γωνιών τους και της ισχύος που μεταφερόταν παρατηρήθηκε πως εμφανίζονται προβλήματα τάσεων διότι το δίκτυο εμφανίζει πτώσεις τάσεων μεγαλύτερες το -3% στους ζυγούς που ήταν απομακρυσμένοι από τις παραγωγές (που είναι κατά κύριο λόγο στον αριστερό κλάδο εκτός των CHP που βρίσκονται στα HUBs των ζυγών 8 και 9) ενώ είχαμε ανυψώσεις τάσεων στους κόμβους που είναι οι παραγωγές. Σε καμία περίπτωση όπως δεν παραβιαζόταν το όριο του  $\pm 5\%$  με ακρίβεια έξι (6) δεκαδικών ψηφίων και συνεπώς κρίνεται προτιμότερο να ληφθεί ένας τέτοιος περιορισμός ή να εγκατασταθούν γραμμές διπλού κυκλώματος όπως έγινε και σε επόμενο βήμα αυτής της διπλωματικής. Με την εγκατάσταση διπλών γραμμών εξαλείφονται τα προβλήματα τάσης ακόμα και με τον αυστηρό όρο της μεταβολής μόνον  $\pm 3\%$  εκτός από τον κόμβο που συνδέει το δίκτυο μας με το ανάντη δίκτυο.

### 10.5.3 Μελέτη Κόστους Συνολικά ανά Μήνα – Πως τα EVs επηρεάζουν το κόστος

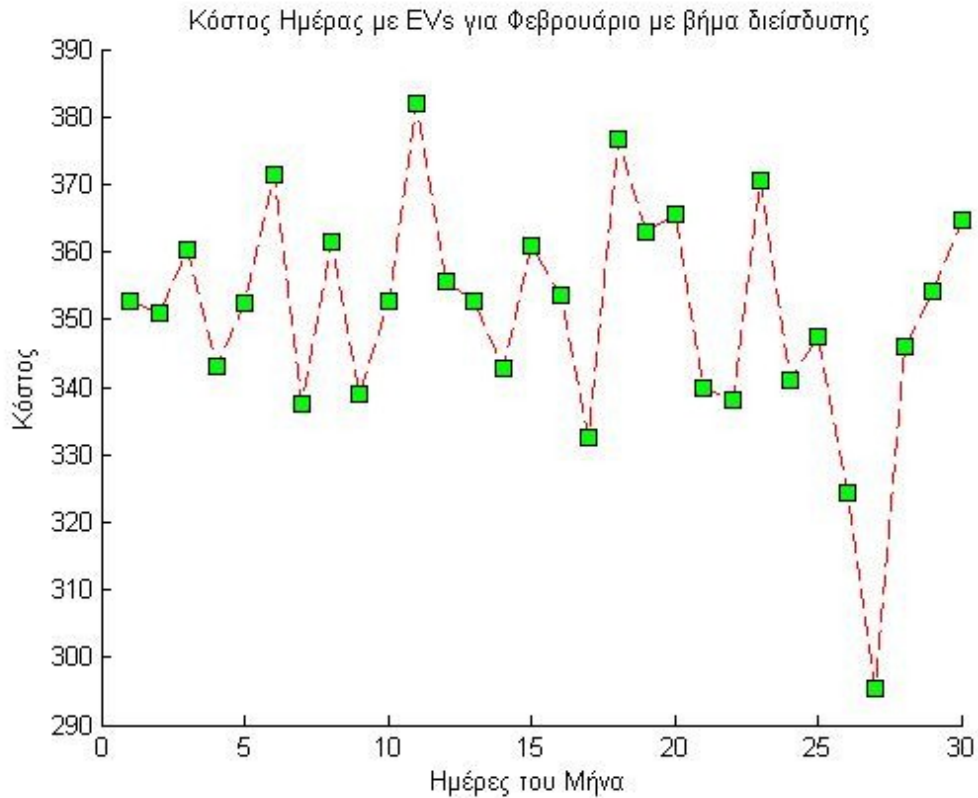
Όπως έχει περιγραφεί και παραπάνω στο κεφάλαιο 9 κατά την περιγραφή του προβλήματος κύριος σκοπός μας είναι η μελέτη κόστους στο σενάριο του μικροδικτύου παρουσία ηλεκτρικών οχημάτων. Εξετάζουμε πρώτα τον Φεβρουάριο για τις δύο περιπτώσεις που περιγράφουν την διείσδυση των ΑΠΕ (28kW εγκατεστημένη για 1<sup>ο</sup> βήμα και 59,5kW για το 2<sup>ο</sup> βήμα όπως αναφέρθηκε παραπάνω). Στο 1<sup>ο</sup> διάγραμμα κάθε μήνα γίνεται μία σύγκριση μεταξύ κόστους απουσίας ηλεκτρικών οχημάτων και κόστους με την παρουσία ηλεκτρικών οχημάτων (χωρίς βήμα διείσδυσης). Το 2<sup>ο</sup> διάγραμμα απεικονίζει το κόστος με βήμα διείσδυσης παρουσία ηλεκτρικών οχημάτων.

Έτσι η καμπύλη κόστους για τον μήνα Φεβρουάριο είναι η ακόλουθη :



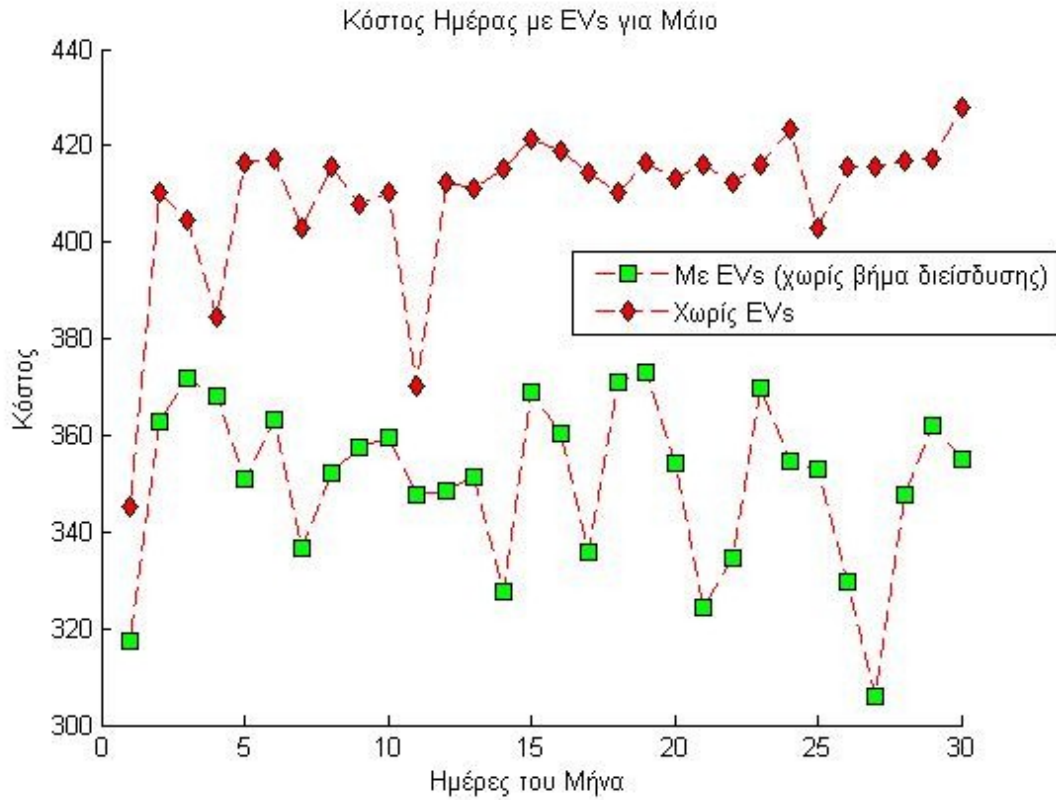
Η συγκεκριμένη καμπύλη φαίνεται να έχει μεγάλες διακυμάνσεις αλλά στην πραγματικότητα δεν ισχύει κάτι τέτοιο καθώς το ‘παράθυρο’ της καμπύλης έχει υποστεί αρκετά μεγάλη εστίαση (zoom) για να εμφανίζονται οι λεπτομέρειες ανά ημέρα. Οι διακυμάνσεις αυτές ανάλογα με την ημέρα εξηγούνται παρακάτω όταν αναλύονται οι γραμμικές συσχετίσεις μεταξύ μεγεθών του δικτύου και του κόστους. Το συνολικό κόστος (παρουσία EVs) και χωρίς βήμα διείσδυσης (παρά μόνον με την αρχική εγκατεστημένη ισχύ των 28kW) ανέρχεται στα 10.474€ την στιγμή που χωρίς EVs το κόστος για όλο τον μήνα ανέρχεται στα 13.961€ παρουσιάζοντας ένα κέρδος ίσο με 3.487€ που είναι εξαιρετικά σημαντικό. Η αντίστοιχη καμπύλη κόστους με βήμα διείσδυσης (δηλαδή με εγκατεστημένη ισχύ ΑΠΕ 59,5kW) παρουσιάζεται παρακάτω :



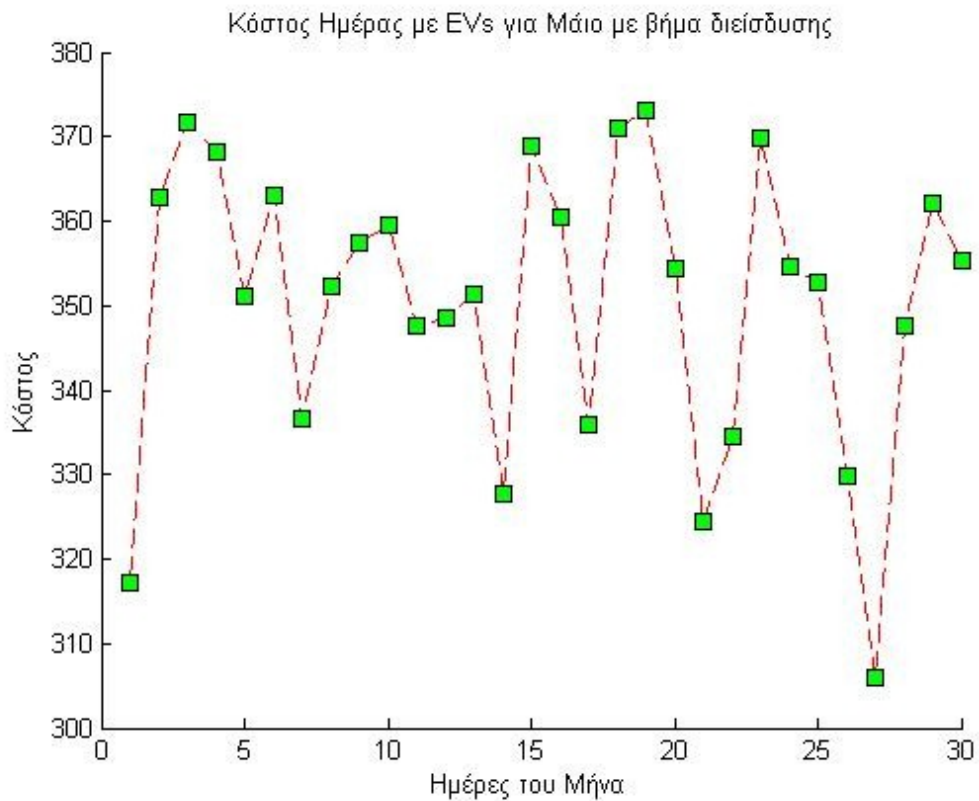


Παρατηρώντας την παραπάνω καμπύλη είναι κατανοητό πως έχει επηρεαστεί το κόστος από την αυξημένη διείσδυση των ΑΠΕ. Το κόστος για τον συγκεκριμένο μήνα ανέρχεται στα 10.529 € αυξημένο μόνο κατά 55€ σε σύγκριση με την παραπάνω καμπύλη που απεικόνιζε το κόστος του Φεβρουαρίου χωρίς αυξημένη διείσδυση ΑΠΕ. Το κόστος αυτό αν και μικρό για έναν μήνα αθροιστικά για όλο τον χρόνο θα μπορούσε να δημιουργήσει μία σεβαστή διαφορά.

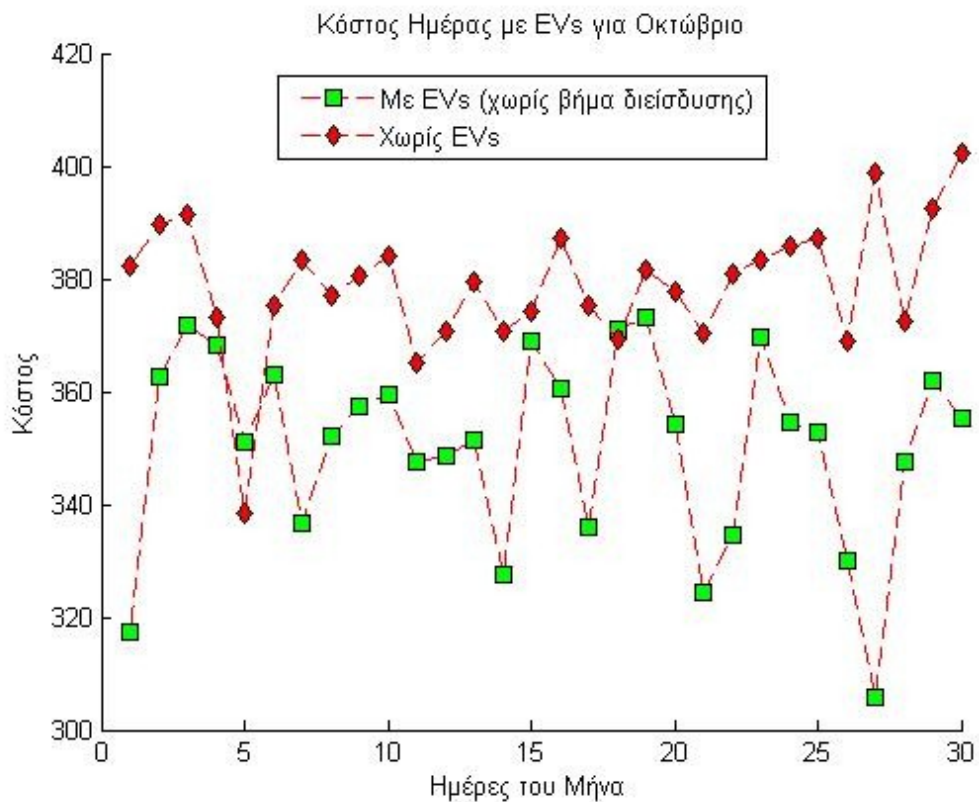
Στην συνέχεια ακολουθεί η καμπύλη για τον μήνα Μάιο με τα αντίστοιχα διαγράμματα : χωρίς και με αυξημένη διείσδυση ΑΠΕ



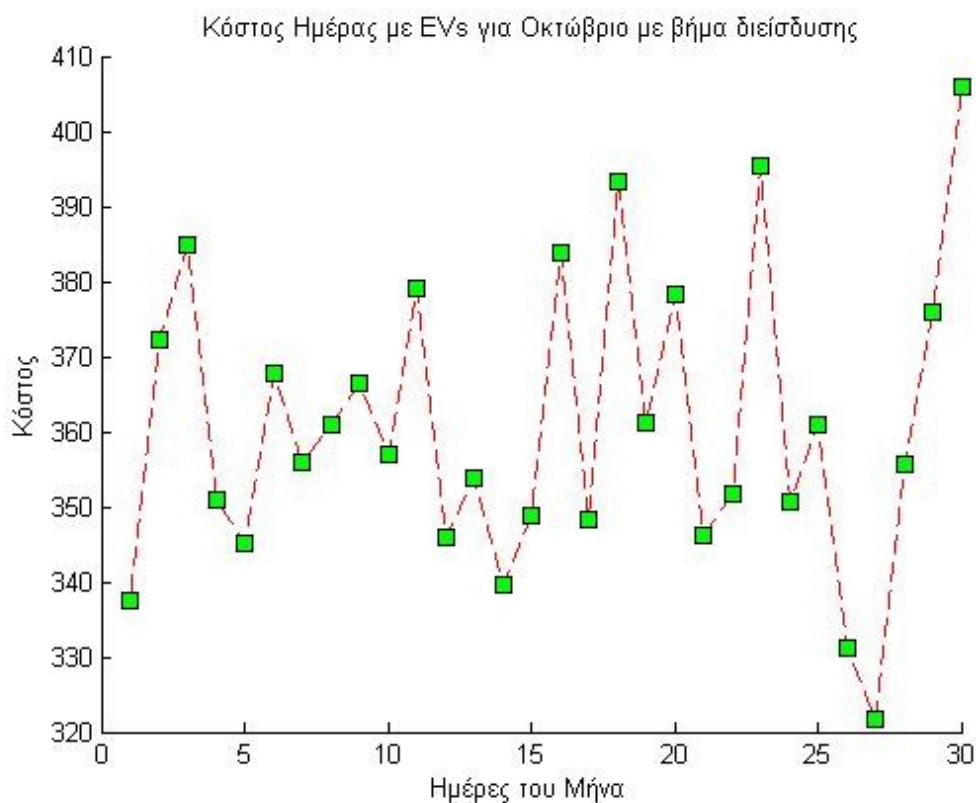
Με το κόστος να ανέρχεται στα 10.516€ παρουσία των EVs ενώ το κόστος με απουσία EVs ανέρχεται στα 12.282€. Συνεπώς η παρουσία των ηλεκτρικών οχημάτων εξοικονομεί ένα ποσό ίσο με 1.766€ για τον μήνα Μάιο που επίσης είναι αρκετά σεβαστό ποσό για χρονική διάρκεια ενός μήνα. Η καμπύλη με βήμα διείσδυσης είναι η ακόλουθη :



Και με το κόστος να ανέρχεται στα 10.446€ μειωμένο κατά 50€ εν αντιθέσει με τον Φεβρουάριο που ήταν αυξημένο το κόστος από μήνα χωρίς βήμα διείσδυσης σε μήνα με βήμα διείσδυσης. Στην συνέχεια έχουμε τα αντίστοιχα διαγράμματα για τον μήνα Οκτώβριο



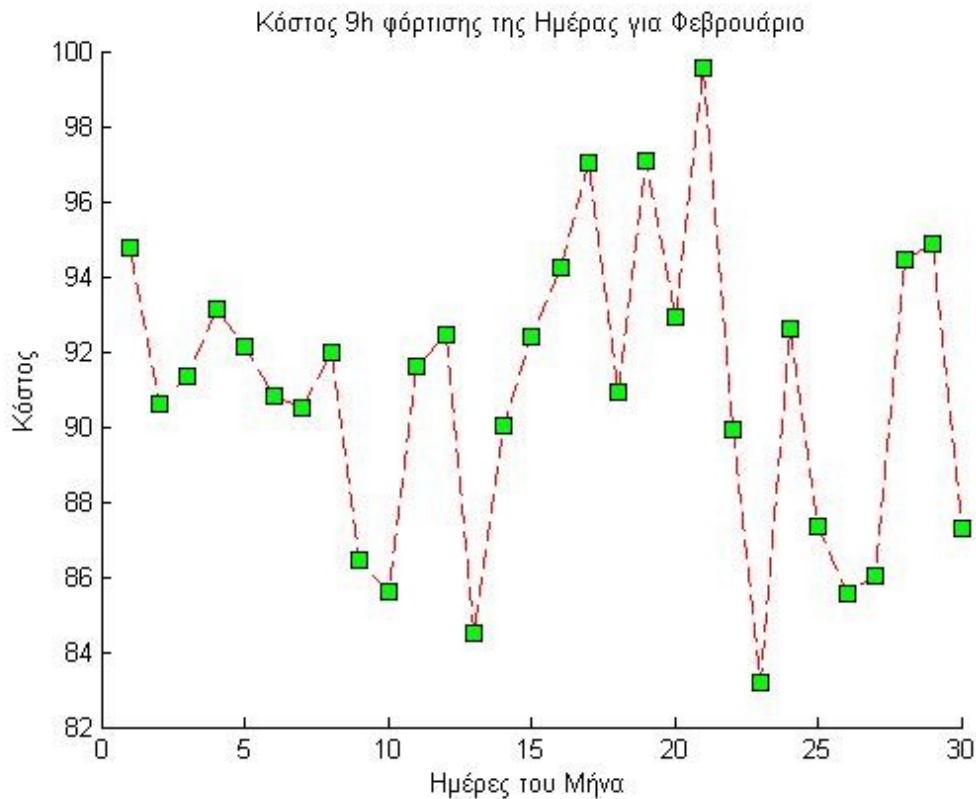
Το κόστος για τον μήνα Οκτώβριο χωρίς βήμα διείσδυσης είναι 10.827€ παρουσία EVs ενώ το αντίστοιχο κόστος απουσία EVs είναι ίσο με 11.368€ προσφέροντας ένα κέρδος το οποίο ισούται με 541€. Στην συνέχεια παρουσιάζεται το κόστος με βήμα διείσδυσης το οποίο είναι ακριβώς ίδιο με το παραπάνω κόστος (παρουσία EVs χωρίς βήμα διείσδυσης). Δηλαδή η αυξημένη διείσδυση στο μήνα Οκτώβριο φαίνεται να μην επηρεάζει το κόστος ούτε κατά ένα ευρώ παρουσιάζοντας για την κάθε ημέρα το ίδιο σημείο βέλτιστου κόστους όπως και η καμπύλη χωρίς το βήμα διείσδυσης όπως φαίνεται και από το παρακάτω διάγραμμα.



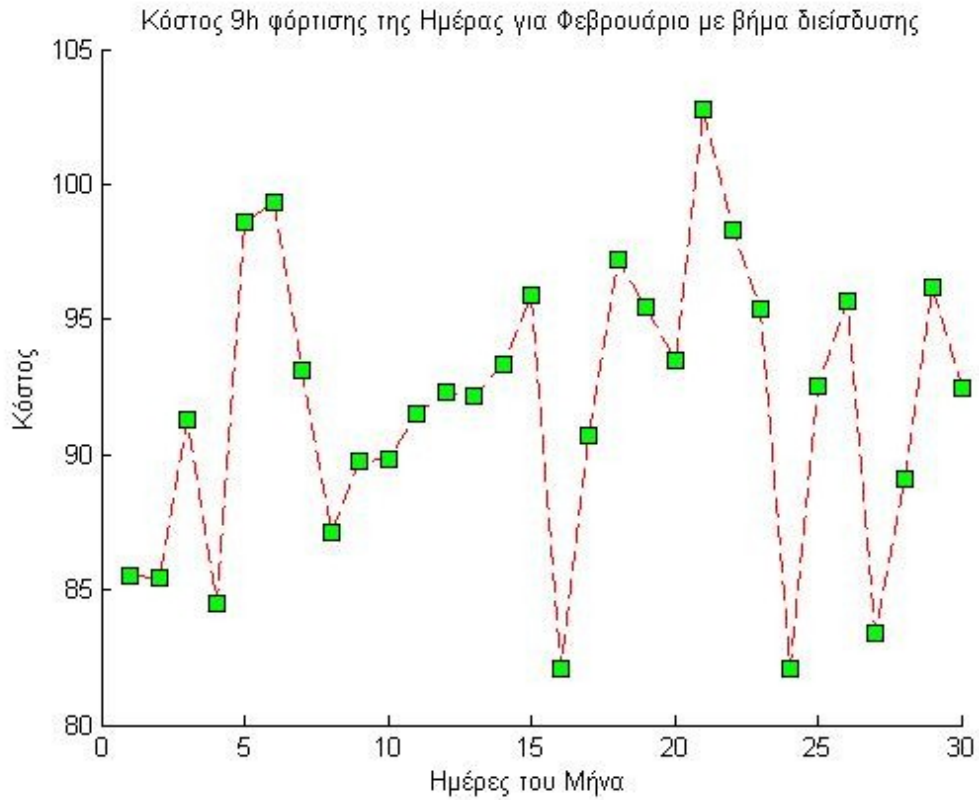
Το κόστος είναι και εδώ ακριβώς 10.827€ όντας ανεπηρέαστο από την αυξημένη διείσδυση των ΑΠΕ. Παρακάτω τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην συσχέτιση επιβεβαιώνουν ότι το δίκτυο μένει ανεπηρέαστο από την αυξημένη διείσδυση και επαληθεύουν τα παραπάνω διαγράμματα – αποτελέσματα.

#### 10.5.4 Μελέτη κόστους κατά τις ώρες φόρτισης των EVs και πως η παρουσία τους επηρεάζει το κόστος

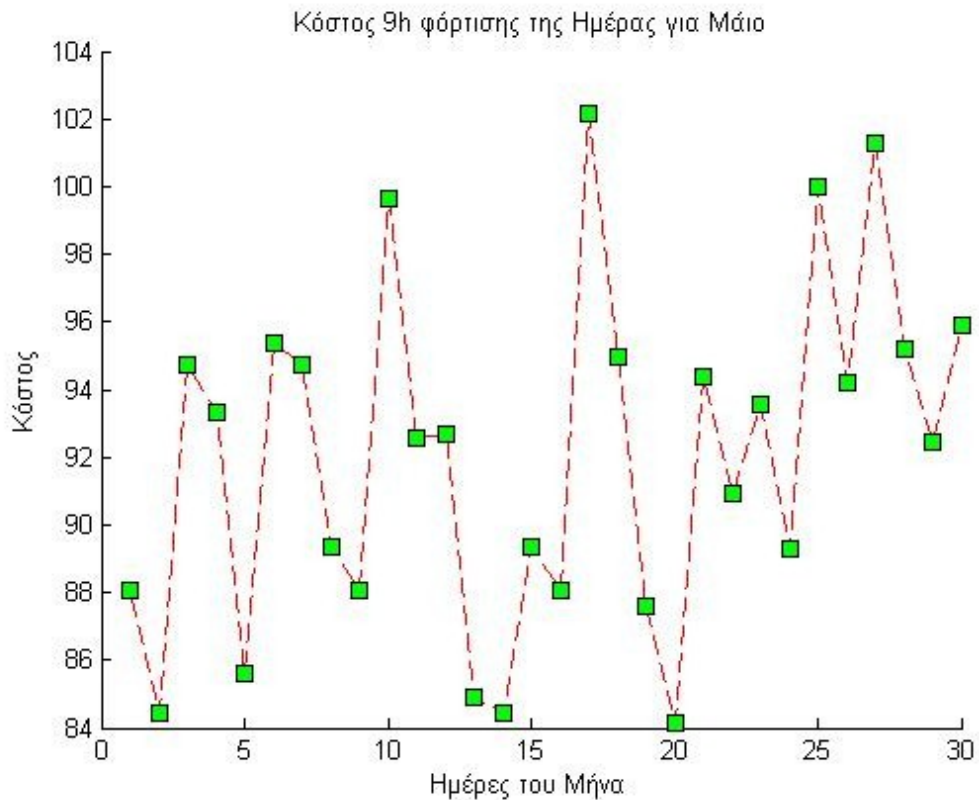
Παρακάτω παρουσιάζονται τα δύο διαγράμματα κόστους για κάθε ημέρα του εκάστοτε μήνα, ένα χωρίς βήμα διείσδυσης και ένα με το βήμα διείσδυσης ΑΠΕ, εξετάζοντας όμως μόνο το κόστος των ωρών κατά τις οποίες φορτίζουν τα ηλεκτρικά οχήματα. Δηλαδή για κάθε ημέρα του μήνα παρουσιάζεται το κόστος μόνον των εννέα πρώτων ωρών (κατά τις οποίες φορτίζουν τα οχήματα θεωρώντας την 10<sup>η</sup> ώρα ως ώρα από-σύνδεσης) δημιουργώντας έτσι μία καμπύλη. Παρακάτω παρουσιάζεται για τον μήνα Φεβρουάριο :



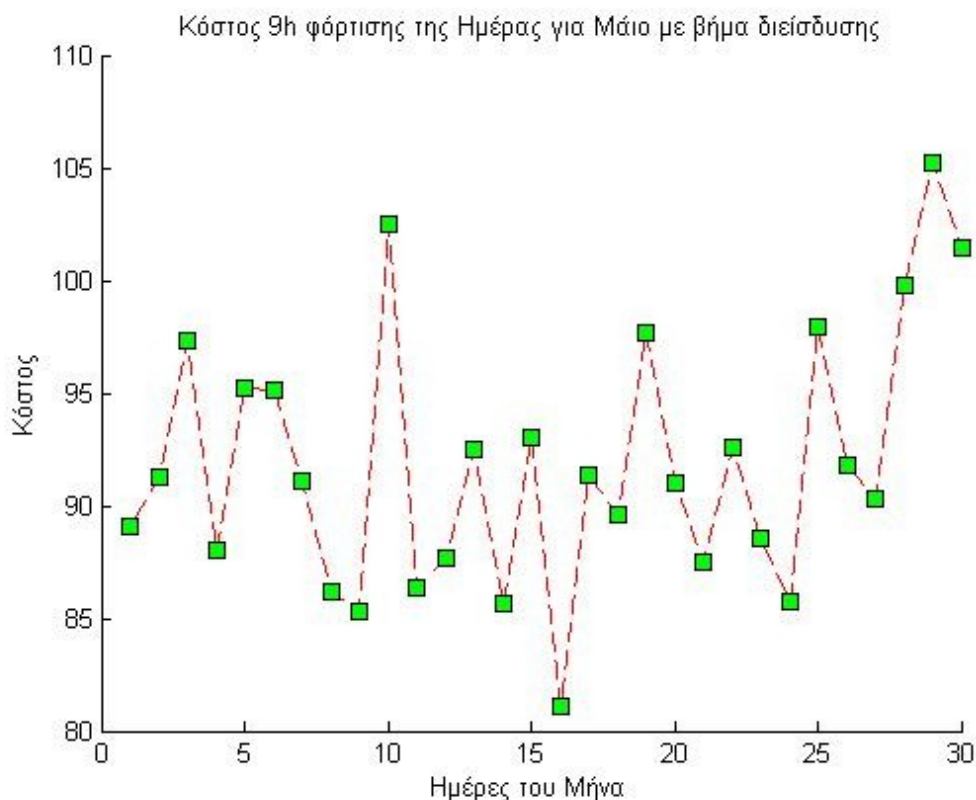
Το κόστος αθροιστικά για όλο τον μήνα όσο αναφορά αυτές τις εννέα πρώτες ώρες της φόρτισης (συμβατικά τις θεωρούμε 10 ώρες) ανέρχεται στα 2.731€ χωρίς βήμα διείσδυσης. Αυτά τα 2.731€ αντιστοιχούν στο 26,07% του συνολικού κόστους του μήνα όπως παρουσιάστηκε παραπάνω. Στην συνέχεια ακολουθεί το διάγραμμα με το βήμα διείσδυσης :



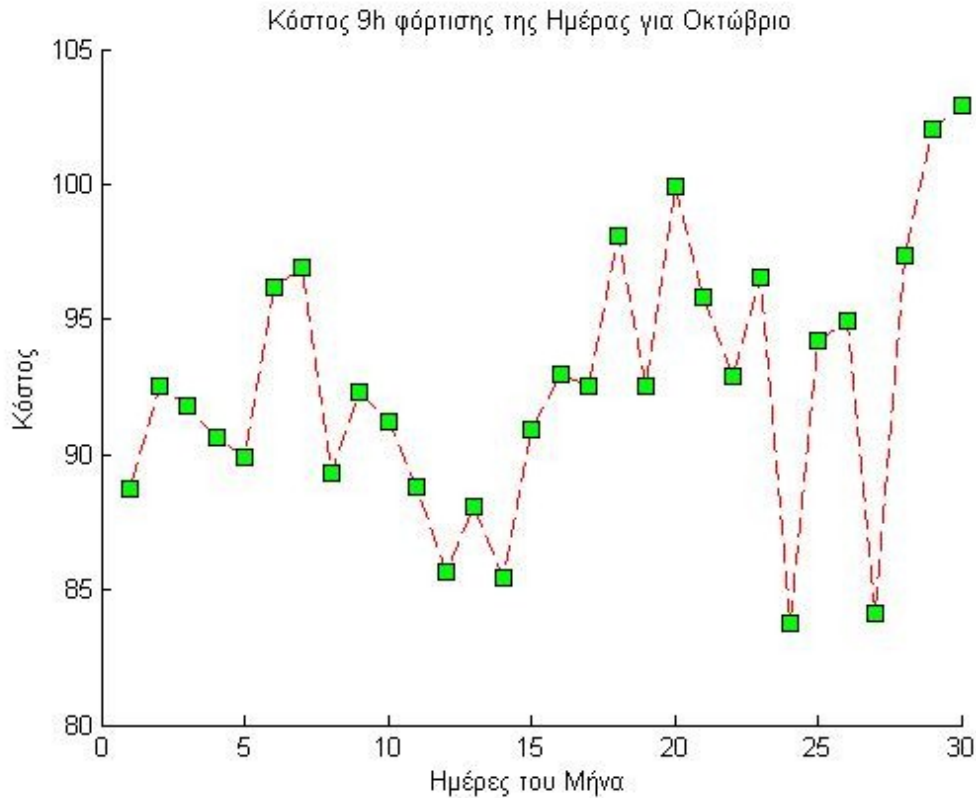
Το κόστος στην περίπτωση αυτή ανέρχεται στα 2.757€ (με βήμα διείσδυσης). Αυτά τα 2.757€ αντιστοιχούν στο 26,18% του συνολικού κόστους του μήνα όπως παρουσιάστηκε παραπάνω. Η διαφορά ανέρχεται σε μόλις 26€ αύξηση. Ακολουθούν τα διαγράμματα για τον μήνα Μάιο :



Το κόστος εδώ, χωρίς βήμα διείσδυσης ανέρχεται στα 2.758€ ή στο για αυτές τις εννιά πρώτες ώρες κάθε ημέρας αθροιστικά ενώ η καμπύλη με βήμα διείσδυσης είναι η παρακάτω :



Και το κόστος με το βήμα διείσδυσης ανέρχεται στα 2.714€ ή στο 25,94% του συνολικού κόστους όντας μειωμένο κατά 44€. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για τον μήνα Οκτώβριο. Όπως θα παρατηρήσουμε και στα δύο διαγράμματα είτε με είτε χωρίς βήμα διείσδυσης εμφανίζεται ακριβώς το ίδιο κόστος όπως και στα διαγράμματα συνολικού κόστους μήνα που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Αυτό όπως αναφέραμε και παραπάνω θα επαληθευτεί και πιο κάτω όταν θα αναλύονται ορισμένες συσχετίσεις μεγεθών. Το γεγονός ότι προκύπτουν ακριβώς ίδιες τιμές με βήμα διείσδυσης και χωρίς βήμα διείσδυσης δεν θα πρέπει να φανεί περίεργο καθώς δεν είναι μόνο ο μήνας Οκτώβριος που εμφανίζει τέτοια αποτελέσματα αλλά και άλλοι μήνες όπως για παράδειγμα ο Σεπτέμβριος που δεν παρουσιάζεται σε αυτή την διπλωματική. Ακόμα ένα στοιχείο που επιβεβαιώνει πως δεν είναι περίεργο, αυτό το γεγονός, είναι πως μεταξύ των διαγραμμάτων με βήμα διείσδυσης και χωρίς βήμα διείσδυσης για τους υπόλοιπους μήνες η διαφορά ανέρχεται σε μερικές δεκάδες ευρώ καθιστώντας την αρκετά μικρή.

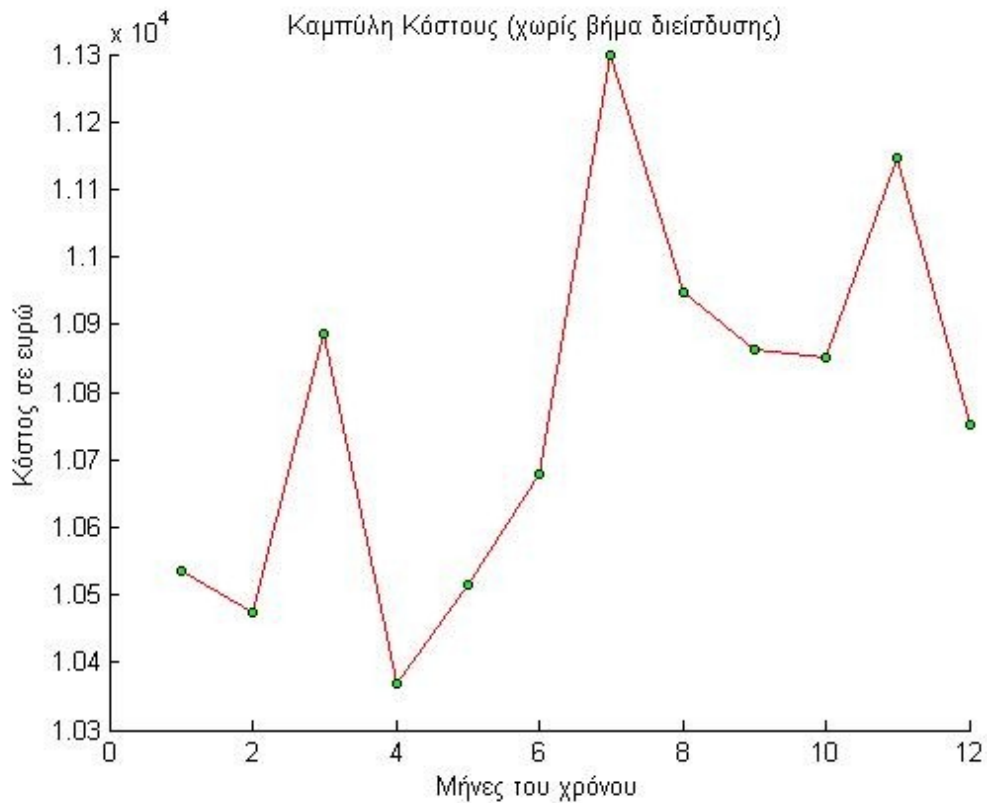


Το κόστος για αυτές τις ώρες φόρτισης χωρίς βήμα διείσδυσης αλλά και με βήμα διείσδυσης είναι ίδιο και για τις δύο περιπτώσεις και είναι ίσο με 2.779€. Το κόστος αυτό είναι ίσο με το 25,67% του συνολικού κόστους για τον μήνα Οκτώβριο (είτε εξετάζεται με βήμα διείσδυσης είτε χωρίς όπως έχει εξηγηθεί καθώς είναι ίδια). Η καμπύλη με βήμα διείσδυσης είναι ακριβώς ίδια με την παραπάνω χωρίς καμία διαφορά, και συνεπώς κρίνεται περιττό να τοποθετηθεί μία όμοια καμπύλη επιπρόσθετα.

### 10.5.5 Παρουσίαση γραφικών συνολικού κόστους

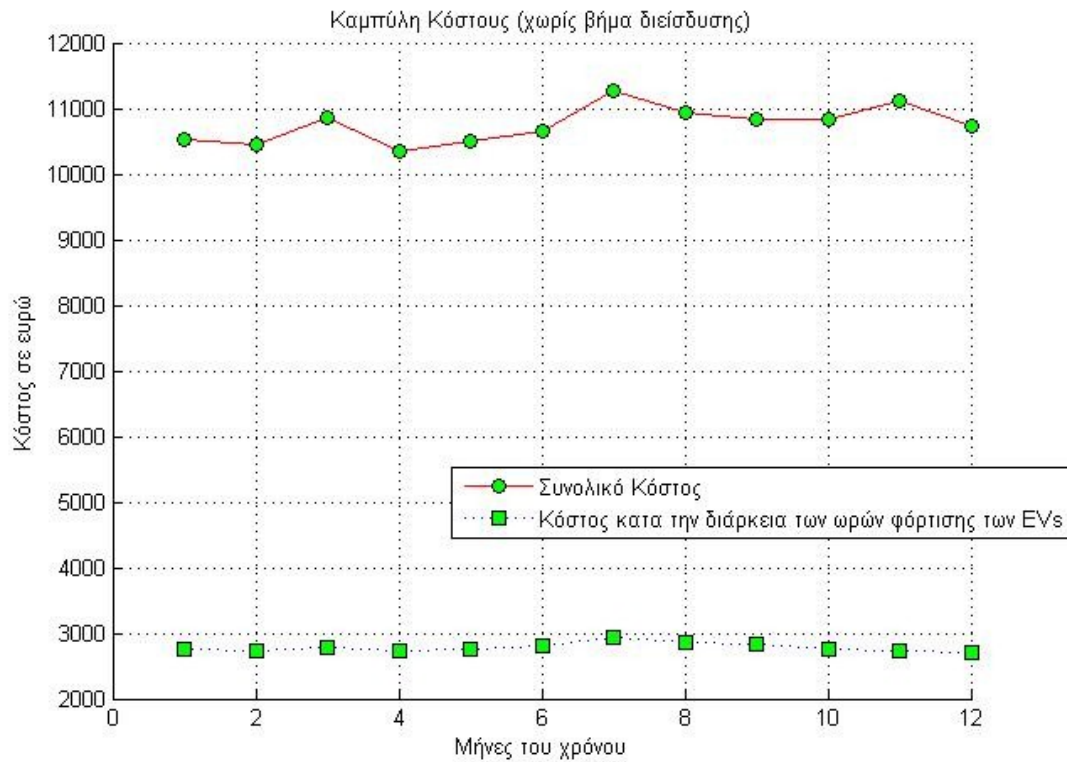
Παρακάτω παρουσιάζεται μία γραφική με το συνολικό κόστος για όλους τους μήνες του έτους και πως αυτό μεταβάλλεται καθώς και ένα διάγραμμα το οποίο παρουσιάζει το συνολικό κόστος για όλους τους μήνες του έτους μαζί με το κόστος των ωρών κατά τις οποίες φορτίζουν τα ηλεκτρικά οχήματα. Πρωτίστως παρουσιάζονται τα διαγράμματα χωρίς βήμα διείσδυσης :



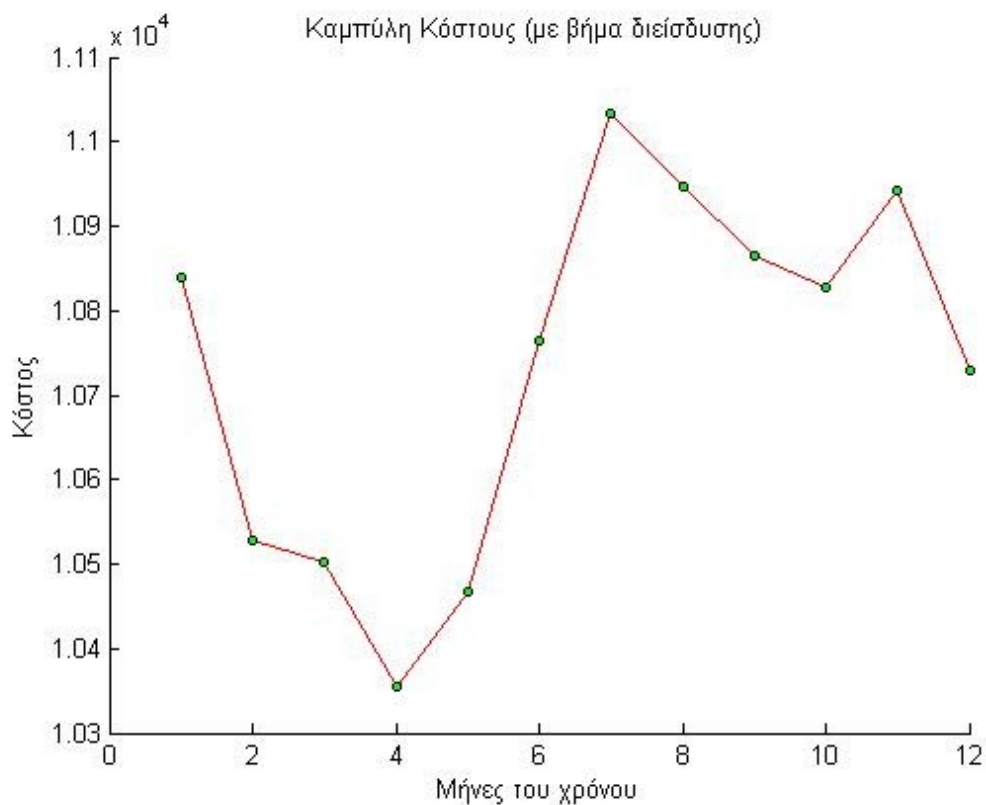


Παρατηρούμε πως υπάρχει μία αύξηση κατά τους θερινούς μήνες λόγω αυξημένης ζήτησης φορτίων με σκοπό την ψύξη καθώς και διάφορες άλλες λειτουργίες ενώ σημαντική μείωση παρουσιάζεται κατά τον Απρίλιο που λόγω καλού καιρού τα ηλεκτρικά φορτία θέρμανσης- ψύξης περιορίζονται στο ελάχιστο.

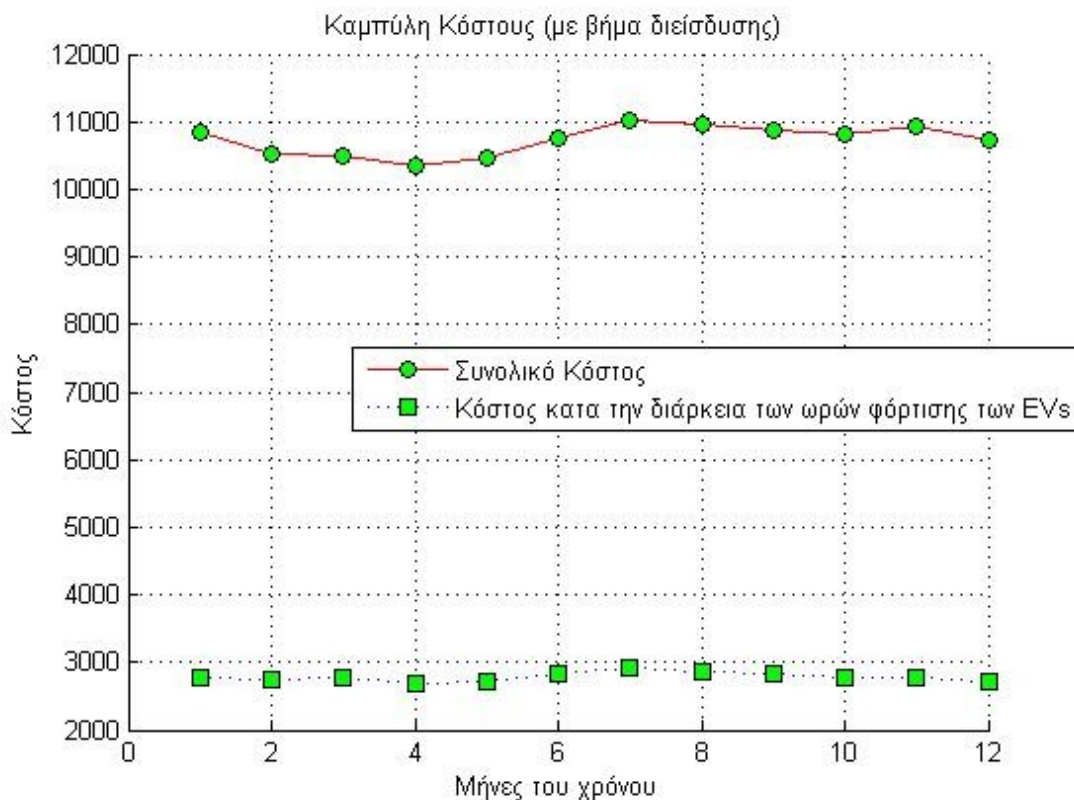
Παρακάτω παρουσιάζεται μία καμπύλη που παρουσιάζει το συνολικό κόστος για όλους τους μήνες του έτους μαζί με το κόστος των ωρών κατά τις οποίες φορτίζουν τα ηλεκτρικά οχήματα.



Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι αντίστοιχες καμπύλες με βήμα διείσδυσης. Δεν τοποθετήθηκαν στο ίδιο διάγραμμα διότι το διάγραμμα θα ήταν εξαιρετικά δυσανάγνωστο. Παρακάτω ακολουθούν οι καμπύλες με βήμα διείσδυσης :

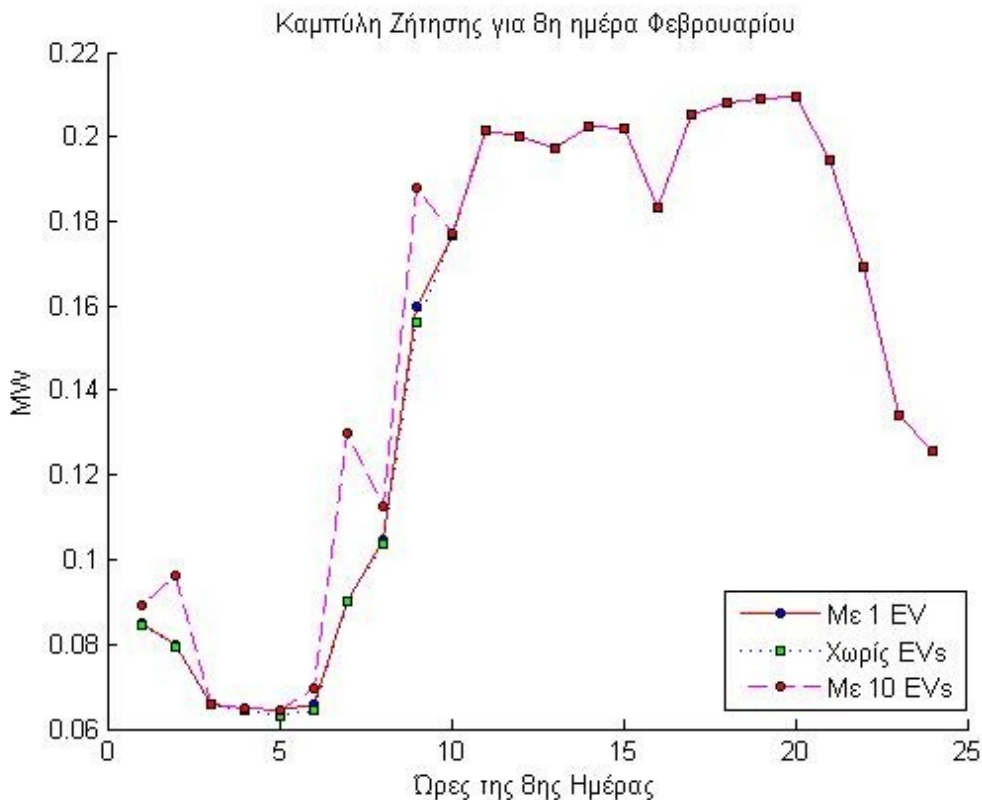


Παρατηρούμε πως σε σχέση με το διάγραμμα που παρουσιάζει το κόστος χωρίς βήμα διείσδυσης έχουμε σημαντικές διαφορές στο κόστος κατά τους μήνες Ιανουάριο, Φεβρουάριο, Μάρτιο και ιδίως Ιανουάριο ενώ για τους μήνες Αύγουστο και Ιούνιο το κόστος είναι μειωμένο με την αυξημένη διείσδυση ΑΠΕ στο σύστημα. Εδώ πρέπει να σημειωθεί πως το κόστος εξαρτάται από πολλές μεταβλητές που επηρεάζουν την βελτιστοποίηση του. Το γεγονός ότι αυξάνεται η εγκατεστημένη ισχύς των ΑΠΕ δεν σημαίνει απαραίτητα πως αυτή η εγκατεστημένη ισχύς θα είναι διαθέσιμη χωρίς περιορισμούς. Είναι κατανοητό πως είναι σχεδόν αδύνατο να παραχθεί η εγκατεστημένη ισχύς σε όλες τις μονάδες ΑΠΕ ταυτόχρονα καθώς για παράδειγμα όταν φυσάει μπορεί να μην υπάρχει ικανοποιητική ηλιακή ένταση ή το αντίστροφο. Ακόμα ανάλογα με την ζήτηση του δικτύου για ηλεκτρική ενέργεια αλλά και για θερμική δημιουργούνται επιπρόσθετοι περιορισμοί που αναγκάζουν το κόστος να διακυμανθεί ανάλογα με τα δεδομένα της εκάστοτε ώρας. Τονίζεται πως το κόστος και το δίκτυο σαν σύνολο αντιμετωπίζεται και επιλύεται ανά αλλά δεν είναι δυνατή η αναλυτική παρουσίαση του ανά ώρα διότι για τις 10 πρώτες ώρες της ημέρας (που φορτίζουν τα ηλεκτρικά οχήματα) επιστρέφεται από το πρόγραμμα ένα συνολικό κόστος και άρα δεν γίνεται να παραχθεί διάγραμμα ανά ώρα της ημέρας. Ακόμα αν η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γινόταν ανά ημέρα η παρουσιαζόμενη πληροφορία θα ήταν υπερβολικά μεγάλη και δύσκολη προς μελέτη για την εξαγωγή κάποιων γενικών συμπερασμάτων. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα διάγραμμα που απεικονίζει μαζί το συνολικό κόστος του μήνα και το κόστος κατά την διάρκεια των ωρών φόρτισης των EVs :

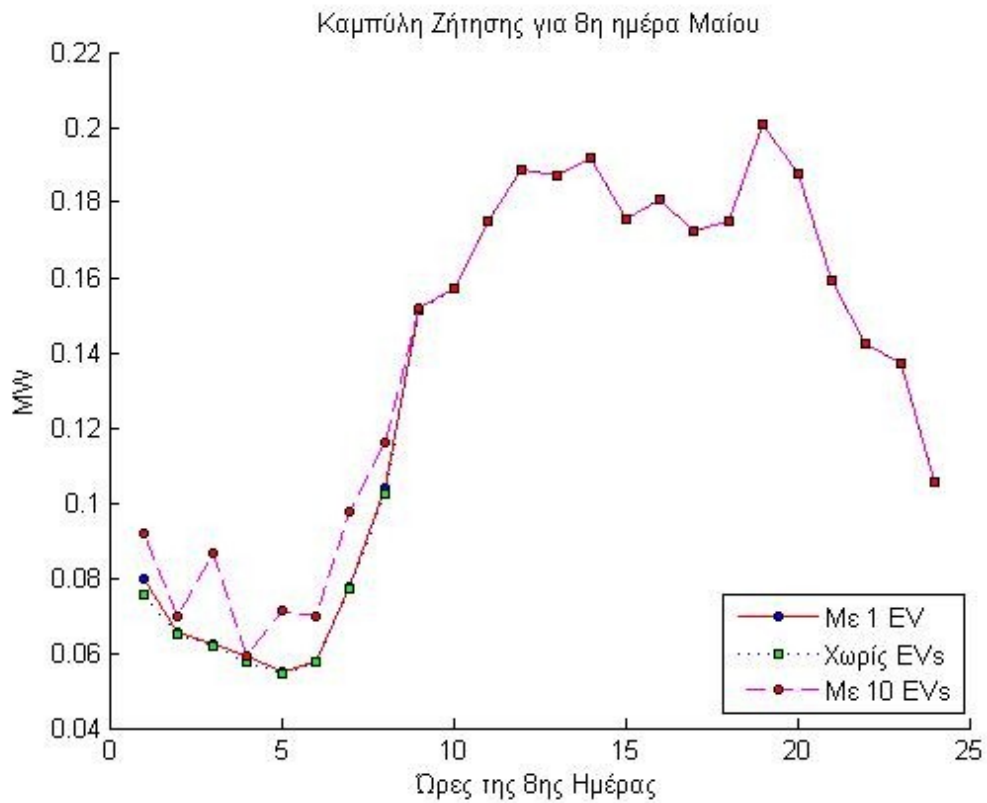


### 10.5.6 Μελέτη της καμπύλης ζήτησης φορτίου (παρουσία EVs) για την 8<sup>η</sup> ημέρα του εκάστοτε μήνα και σύγκριση αυτής με την αντίστοιχη απουσία EVs

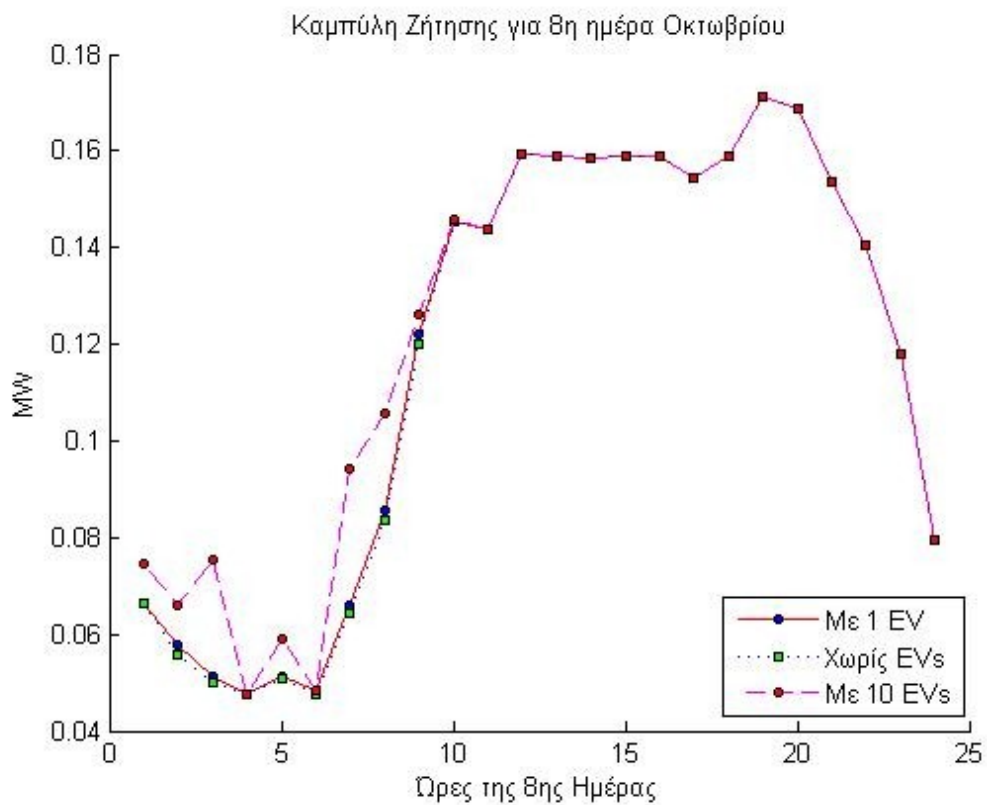
Εδώ θα παρουσιαστούν τρεις γραφικές παραστάσεις για τους τρεις μήνες που εξετάζονται. Σε κάθε γραφική θα παρουσιάζονται τρεις (3) καμπύλες οι οποίες θα αντιπροσωπεύουν την καμπύλη ζήτησης φορτίου για τρεις περιπτώσεις. Η πρώτη περίπτωση είναι χωρίς ηλεκτρικά οχήματα, η δεύτερη περίπτωση με ένα μόνο ηλεκτρικό όχημα ενώ η τρίτη με δέκα ηλεκτρικά οχήματα. Παρακάτω παρουσιάζεται η καμπύλη για τον μήνα Φεβρουάριο :



Παρατηρούμε πως δεν γεμίζει η κοιλάδα έστω και λίγο με τα 10 ηλεκτρικά οχήματα. Αυτό συμβαίνει διότι η βελτιστοποίηση γίνεται με κριτήριο το κόστος και την βελτιστοποίηση αυτού και όχι με ενεργειακά κριτήρια που θα επιτρέπουν την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος. Έτσι κρίνεται πιο συμφέρον να χρησιμοποιηθούν συμβατικές μονάδες κατά την 6<sup>η</sup> και 8<sup>η</sup> ώρα (που δημιουργούν τις αιχμές), που είναι πρωινές ώρες με χαμηλή οριακή τιμή, παρά να γίνει φόρτιση κατά την διάρκεια της νύχτας. Το φαινόμενο αυτό θα μπορούσε να περιοριστεί και να συνεισφέρει στα ενεργειακά κριτήρια που επιθυμούμε να λειτουργούν τα ηλεκτρικά οχήματα με έναν περιορισμό στις ώρες φόρτισης από 9 ώρες (δηλαδή από τις 12 το βράδυ έως τις 9 το πρωί) στις 5 ώρες, δηλαδή έως τις 5 το πρωί καλύπτοντας αναγκαστικά την κοιλάδα. Μία ανάλογη προσομοίωση γίνεται για λόγους πληρότητας για τον μήνα Μάιο στο τέλος αυτού του υποκεφαλαίου. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι καμπύλες για τον μήνα Μάιο.



Ακολουθεί το διάγραμμα με τις καμπύλες για τον μήνα Οκτώβριο :

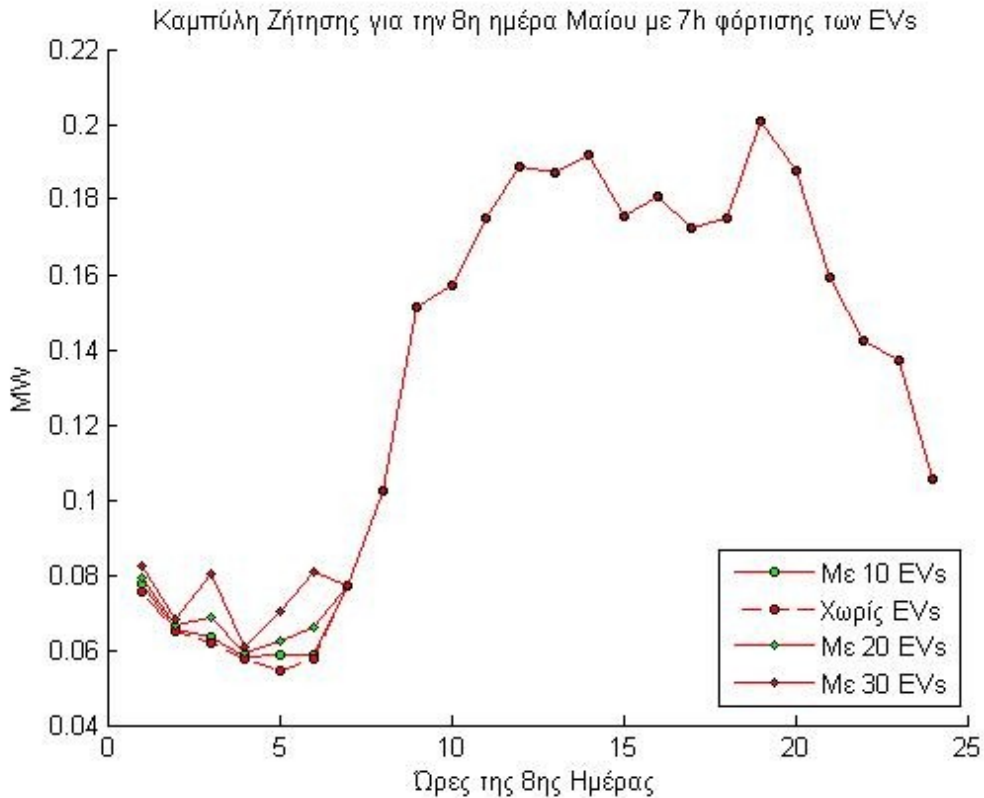


Παρατηρούμε πως και εδώ για τους μήνες Μάιο και Οκτώβριο έχουμε αιχμές που καλύπτουν καλύτερα την κοιλάδα. Συμπεραίνουμε επομένως πως κρίθηκε πιο συμφέρον οικονομικά να γίνει ένα σημαντικό ποσοστό της φόρτισης το βράδυ γεμίζοντας κατά ένα αρκετά μεγάλο μέρος την κοιλάδα ζήτησης ιδίως όσο αναφορά τον μήνα του Μαΐου. Όσο αναφορά τον μήνα του Οκτωβρίου ναι μεν καλύπτει καλύτερα την κοιλάδα σε σχέση με τον μήνα Φεβρουάριο αλλά στην 3<sup>η</sup> ώρα δημιουργεί ζήτηση που ξεπερνάει το ύψος της κοιλάδας. Για την συγκεκριμένη ώρα, για να συμβεί κάτι τέτοιο θα πρέπει αφενός μεν η οριακή τιμή να είναι αρκετά χαμηλή και αφετέρου θα πρέπει η παραγωγή από ΑΠΕ (και συγκεκριμένα την ανεμογεννήτρια καθώς είναι νύχτα) να είναι μειωμένη.

#### **10.5.6.1 Καμπύλη για Μήνα Μάιο με φόρτιση EVs εντός 7h αντί 9h και παρατήρηση της κοιλάδας ζήτησης**

Σε αυτό το υποκεφάλαιο κρίθηκε αναγκαίο να παρουσιαστούν κάποιες προσομοιώσεις που έγιναν με σκοπό να παρουσιαστεί πως θα μπορούσε μία βελτιστοποίηση κόστους να βοηθήσει και σε ενεργειακά θέματα βελτιστοποίησης όπως για παράδειγμα είναι το γέμισμα της κοιλάδας ζήτησης κατά τις νυχτερινές ώρες. Επειδή σε αυτή την διπλωματική ο αλγόριθμος που έχει δημιουργηθεί βελτιστοποιεί κόστος ο μόνος τρόπος για να μελετηθεί το παραπάνω φαινόμενο ήταν με το να περιοριστούν οι ώρες φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Έτσι αντί για τις 10 ώρες φόρτισης (9 ώρες ουσιαστικά φόρτιση και 1 ώρα σύνδεση-αποσύνδεση) έχουμε 7 ώρες φόρτισης (6 ώρες ουσιαστικής φόρτισης και 1 ώρα σύνδεση-αποσύνδεση). Τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν έγιναν μόνο για τον μήνα Μάιο και χωρίς βήμα διείσδυσης.

Παρουσιάζονται τέσσερις καμπύλες κατά τις οποίες η πρώτη είναι χωρίς ηλεκτρικά οχήματα, ως καμπύλη αναφοράς, η δεύτερη είναι με 10 ηλεκτρικά οχήματα, η Τρίτη με 20 ηλεκτρικά οχήματα και τέλος η τέταρτη με 30 ηλεκτρικά οχήματα. Όπως θα φανεί και από την καμπύλη από την 7<sup>η</sup> ώρα και μετά όλες οι καμπύλες ταυτίζονται καθώς παύει η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων. Οι καμπύλες έχουν παρθεί για την 8<sup>η</sup> ημέρα του μήνα Μαΐου όπως και οι καμπύλες που παρουσιάστηκαν παραπάνω για τις 10 ώρες τις φόρτισης που εξεταζόταν. Ακολουθούν οι καμπύλες όλες μαζί συγκεντρωμένες σε ένα διάγραμμα για καλύτερη σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών περιπτώσεων.



Παρατηρούμε πως και εδώ δημιουργούνται αιχμές κάτι αναμενόμενο εφόσον είναι βελτιστοποίηση κόστους και όχι βελτιστοποίηση της σχέσης παραγωγή-ζήτηση. Παρατηρούμε πως εξαναγκάζοντας τα ηλεκτρικά οχήματα να φορτίσουν σε συντομότερο χρονικό διάστημα καλύπτεται καλύτερα η κοιλάδα. Αυτό όμως έχει το κόστος του. Ο μήνας Μάιος χωρίς βήμα διείσδυσης με ηλεκτρικά οχήματα είχε κόστος ίσο με 10.516€ αφήνοντας τα οχήματα να φορτίσουν βέλτιστα σε 10 ώρες που είχαν διαθέσιμες. Ο μήνας Μάιος χωρίς βήμα διείσδυσης αλλά με περιορισμό από 10 ώρες σε 7 ώρες για τα ηλεκτρικά οχήματα έχει κόστος ίσο με 10.889€ ήτοι 373€ παραπάνω μόνο για 3 ώρες φόρτισης ημερησίως. Το ποσό θα μπορούσε να θεωρηθεί ως μικρό αλλά είναι συγκρίσιμο με τα κέρδη που αποκομίζονται από την αυξημένη διείσδυση ΑΠΕ στο σύστημα μας. Για καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων παρακάτω παρουσιάζονται κάποιοι πίνακες που συγκεντρώνουν τα κόστη που εξετάστηκαν. Έτσι είναι πιο εύκολη η άμεση σύγκριση των μεγεθών και η εξαγωγή συμπερασμάτων με το τι είναι συμφέρον και τι όχι.

### 10.5.7 Συγκεντρωτικοί πίνακες κόστους

Μήνας	Χωρίς βήμα διείσδυσης (€)	Με βήμα διείσδυσης (€)	Διαφορά (€)
Ιαν	10537	10.838	301
Φεβ	10474	10.529	55
Μαρ	10886	10.502	-384
Απρ	10368	10.355	-13
Μάιος	10516	10.466	-50
Ιουν	10679	10.764	85
Ιουλ	11299	11.033	-266
Αυγ	10947	10.947	0
Σεπ	10864	10.864	0
Οκτ	10827	10.827	0
Νοεμ	11145	10943	-202
Δεκ	10752	10730	-22
<b>Σύνολο</b>	<b>129.317</b>	<b>128.799</b>	<b>-518</b>

Το (-) υποδηλώνει κέρδος ενώ θετικά νούμερα στην διαφορά φανερώνουν αύξηση στο κόστος.

Μήνας	Χωρίς βήμα διείσδυσης (€)	Με βήμα διείσδυσης (€)	Διαφορά (€)	χωρίς Evs	Διαφορά (€)
Φεβ	10474	10.529	55	13961	3487
Μάιος	10516	10.466	-50	12282	1766
Οκτ	10827	10.827	0	11368	541

Είναι προφανές από τον παραπάνω πίνακα πως η παρουσία ηλεκτρικών οχημάτων μειώνει σε σημαντικό βαθμό το κόστος.



### 10.5.8 Παρουσίαση ορισμένων συσχετίσεων μεγεθών

Χρησιμοποιώντας τον τύπο της συσχέτισης που δίνεται παρακάτω λάβαμε τα παρακάτω αποτελέσματα που παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στους πίνακες. Ο τύπος είναι ο ακόλουθος :

$$\rho = \frac{Cov(X,Y)}{\sqrt{Var(X) \cdot Var(Y)}}$$

Όπου X,Y χρονοσειρές ίδιου μεγέθους και όπου Cov είναι Covariance ενώ όπου Var είναι Variance. Covariance είναι ένα στατιστικό μέτρο της διακύμανσης των δύο τυχαίων μεταβλητών που έχουν παρατηρηθεί ή έχουν μετρηθεί στο ίδιο μέσο χρονικό διάστημα (αντιστοιχία των χρονοσειρών τους). Το μέτρο αυτό είναι ίσο με το γινόμενο των αποκλίσεων από τις αντίστοιχες μέσες τιμές των δύο μεταβλητών. Αντίστοιχα Variance είναι η μεταβλητότητα των χρονοσειρών αυτών και ισούται με το τετράφωνο των κανονικών αποκλίσεων των αντίστοιχων χρονοσειρών. Αν λοιπόν το ρ είναι 1 έχουμε πλήρη συσχέτιση. Την συσχέτιση εμείς θα την εκφράσουμε ποσοστοιαία και συνεπώς το ρ πολλαπλασιάζεται επί 100% έτσι ώστε να προκύψει το αντίστοιχο ποσοστό. Παρακάτω παρουσιάζονται 6 πίνακες (2 για κάθε μήνα) για τους αντίστοιχους 3 μήνες που αναλύθηκαν παραπάνω.

	Συνολικό κόστος	
	Φεβρουάριος	Φεβρουάριος (με βήμα διεύσδυσης)
<b>Κόστος ωρών φόρτισης EVs</b>	35,18%	28,73%
<b>Ανεμογεννήτρια</b>	16,47%	15,31%
<b>Ζήτηση</b>	2,44%	24,05%
<b>Οριακή Τιμή</b>	3,85%	2,64%
<b>PVa</b>	14,69%	25,32%
<b>PVb</b>	5,21%	20,25%

Παρατηρούμε πως η συσχέτιση με το βήμα διεύσδυσης όσο αναφορά το κόστος φόρτισης κατά τις ώρες φόρτισης των EVs, την παραγωγή της ανεμογεννήτριας, την οριακή τιμή και το ένα φωτοβολταϊκό (PVa) μειώνεται ενώ αυξάνεται εξαιρετικά πολύ η συσχέτιση της χρονοσειράς με την χρονοσειρά της ζήτησης και του φωτοβολταϊκού PVa.

	Ζήτηση Ισχύος για φόρτιση EVs	
	Φεβρουάριος	Φεβρουάριος (με βήμα διεύσδυσης)
<b>Ανεμογεννήτρια</b>	19,15%	25,28%
<b>PVa</b>	32,15%	4,96%
<b>PVb</b>	0,44%	13,23%

Παρατηρούμε πως η συσχέτιση αυξήθηκε στην ανεμογεννήτρια και στο PVb (που είναι στον ζυγό 4) αλλά μειώθηκε η συσχέτιση με την παραγωγή του φωτοβολταϊκού PVa. Μία εξήγηση μπορεί να δοθεί είναι πως από τον παραπάνω πίνακα που αυξήθηκε η συσχέτιση του κόστους με την χρονοσειρά της παραγωγής του PVa δημιούργησε ως αποτέλεσμα να μειωθεί η συσχέτιση με την ζήτηση ισχύος για φόρτιση των EVs.

Ακολουθούν οι πίνακες για τον μήνα Μάιο :

	Συνολικό Κόστος	
	Μάιος	Μάιος (με βήμα διεύσδυσης)
<b>Κόστος ωρών φόρτισης EVs</b>	24,59%	23,63%
<b>Ανεμογεννήτρια</b>	1,28%	11,41%
<b>Ζήτηση</b>	13,19%	42,14%
<b>Οριακή Τιμή</b>	19,59%	11,91%
<b>PVa</b>	10,89%	18,69%
<b>PVb</b>	5,16%	10,44%

Παρατηρούμε πως στον μήνα Μάιο, εν αντιθέσει με τον μήνα Φεβρουάριο, η συσχέτιση του συνολικού κόστους με την παραγωγή των φωτοβολταϊκών και της ανεμογεννήτριας αυξήθηκε όταν υπήρξε αυξημένο βήμα διεύσδυσης. Και εδώ η συσχέτιση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας με το συνολικό κόστος αυξήθηκε αρκετά όπως και στον Φεβρουάριο.

	<b>Ζήτηση Ισχύος για φόρτιση EVs</b>	
	<b>Μάιος</b>	<b>Μάιος (με βήμα διεύσδυσης)</b>
<b>Ανεμογεννήτρια</b>	35,23%	63,85%
<b>PVa</b>	16,03%	27,48%
<b>PVb</b>	8,72%	6,18%

Εδώ ένα αξιοσημείωτο γεγονός είναι πως η συσχέτιση των χρονοσειρών μεταξύ της παραγωγής της ανεμογεννήτριας και της ζήτησης ισχύος για φόρτιση των EVs από 35,23% (απουσία βήματος διεύσδυσης) αυξήθηκε στα 63,85% (παρουσία βήματος διεύσδυσης) κάτι που συνιστά καλή ένδειξη πως η ισχύς παραγόμενη από τις ΑΠΕ απορροφάται σε μεγάλο ποσοστό για την φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων. Ακόμα αρκετά μεγάλη αύξηση στην συσχέτιση παρουσιάζει και το φωτοβολταϊκό PVa που από 16,03% πήγε σε ένα ποσοστό ίσο με 27,48%.

Ακολουθούν οι πίνακες για τον μήνα Οκτώβριο :

	<b>Συνολικό κόστος</b>	
	<b>Οκτώβριος</b>	<b>Οκτώβριος (με βήμα διεύσδυσης)</b>
<b>Κόστος ωρών φόρτισης EVs</b>	61,37%	61,37%
<b>Ανεμογεννήτρια</b>	3,27%	3,27%
<b>Ζήτηση</b>	1,55%	1,55%
<b>Οριακή Τιμή</b>	47,08%	47,08%
<b>PVa</b>	8,36%	8,36%
<b>PVb</b>	4,98%	4,98%

Είχαμε αναφέρει πως το κόστος για τον μήνα Οκτώβριο με βήμα διεύσδυσης και χωρίς βήμα διεύσδυσης ήταν ακριβώς το ίδιο. Όπως φαίνεται και από τα παραπάνω αποτελέσματα για τον μήνα Οκτώβριο το βήμα διεύσδυσης που αυξάνει τη εγκατεστημένη ισχύ των ΑΠΕ δεν έχει απολύτως καμία επίδραση στα μεγέθη που εξετάζονται και παρουσιάζονται σε αυτή την διπλωματική εργασία. Το κόστος ανά ημέρα είναι διαφορετικό για τον Οκτώβριο χωρίς βήμα διεύσδυσης και για τον Οκτώβριο με βήμα διεύσδυσης αλλά ο μήνας εξεταζόμενος στο σύνολο του ως μήνας δεν παρουσιάζει καμία απολύτως διαφορά είτε έχει βήμα διεύσδυσης είτε όχι. Ο πίνακας που ακολουθεί το επιβεβαιώνει για ακόμα μία φορά :

	Ζήτηση Ισχύος για φόρτιση EVs	
	Οκτώβριος	Οκτώβριος (με βήμα διείσδυσης)
<b>Ανεμογεννήτρια</b>	32,25%	32,25%
<b>PVa</b>	2,21%	2,21%
<b>PVb</b>	58,26%	58,26%

### 10.5.9 Πρόταση για περαιτέρω βελτίωση – Φαινόμενο του συντονισμού

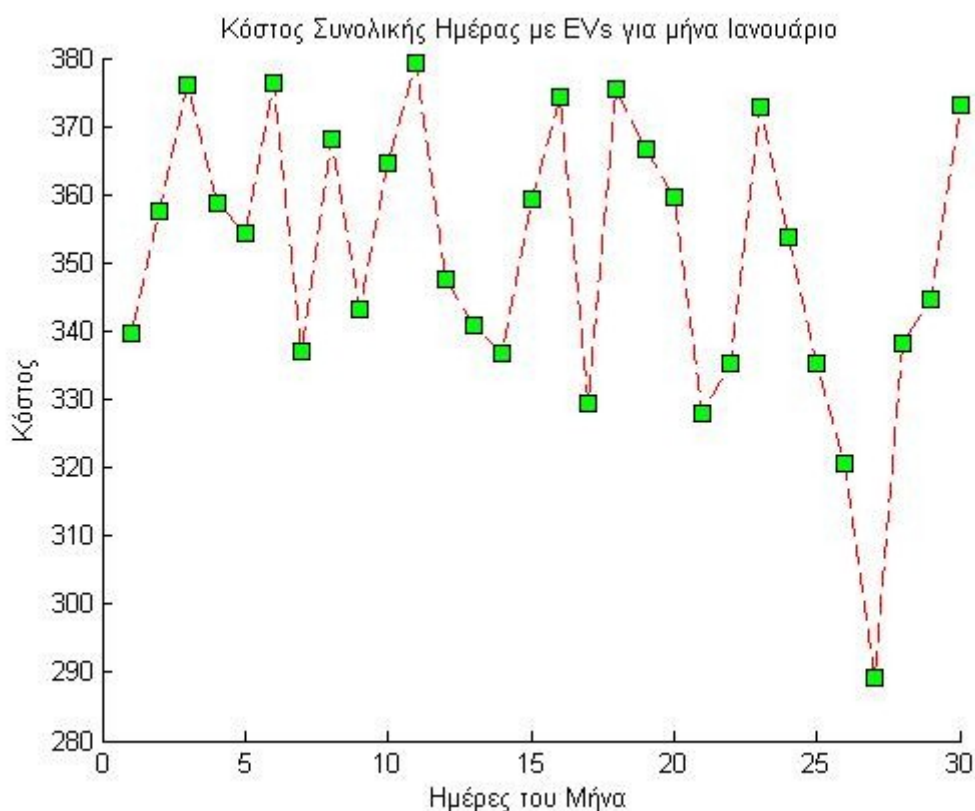
Σε αυτή την διπλωματική έγινε μία προσπάθεια να εξεταστούν όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά και ενεργειακά ζητήματα έχοντας ως κύριο στόχο βελτιστοποίησης το κόστος. Έγινε εισαγωγή της αέργου ισχύος στο μικροδίκτυο και μπήκαν περιορισμοί και δυναμικοί έλεγχοι. Προστέθηκαν μονάδες συμπαραγωγής και έγινε βελτιστοποίηση αυτών όπως και με τα ηλεκτρικά οχήματα που προστέθηκαν μετέπειτα. Όλα τα συστήματα που λειτουργούν στο μικροδίκτυο έχουν την δυνατότητα να παράγουν από μικρές έως σημαντικές ποσότητες αέργου ισχύος. Παρ' όλα αυτά όμως ένα αρκετά μεγάλο ποσό αέργου ισχύος αναγκαστικά εισάγεται από το ανάντη δίκτυο. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος θα μπορούσαν να εγκατασταθούν στατοί πυκνωτές σε συγκεκριμένα σημεία του δικτύου κάνοντας την απαραίτητη αντιστάθμιση. Όμως εδώ δημιουργείται ένα πρόβλημα καθώς όλα τα συστήματα που υπάρχουν στο μικροδίκτυο στην συντριπτική τους πλειοψηφία χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά ισχύος όπως αντιστροφείς, εκκινήτες και άλλα που προκαλούν προβλήματα με την έγχυση αρμονικών στο μικροδίκτυο. Ακόμα το μικροδίκτυο μας είναι χαμηλής τάσης κάτι που σημαίνει πως τα προβλήματα που προκαλούνται από τις αρμονικές είναι ακόμα πιο έντονα και πιο δυσχερή ως προς την αντιμετώπιση τους. Πρόταση για μελέτη είναι να ληφθούν τα απαραίτητα δεδομένα-μετρήσεις (που παρ' όλη την επικοινωνία μας με αρμόδιους φορείς δεν μπορούσαν να μας τα παρέχουν) έτσι ώστε να γίνει ένα μοντέλο προσομοίωσης για την βέλτιστη τοποθέτηση των πυκνωτών και την προστασία του συστήματος από συντονισμό, φαινόμενο που με τα υπάρχοντα δεδομένα και την πληθώρα των ηλεκτρονικών ισχύος είναι πολύ πιθανό.

## Παράρτημα

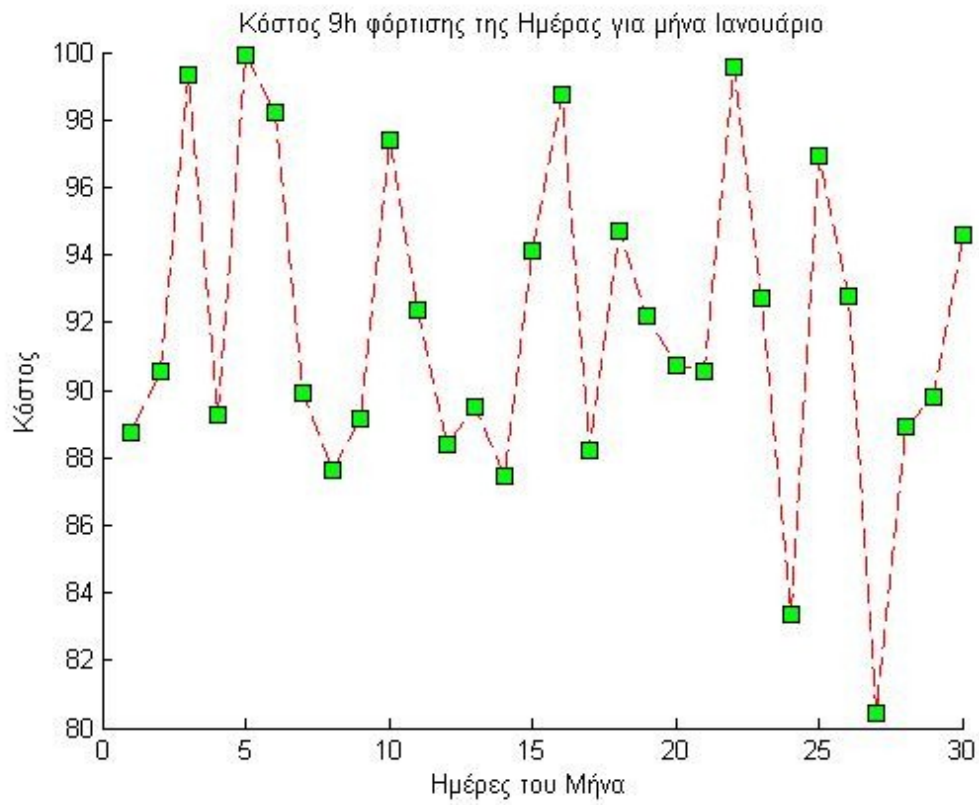
### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΟΛΟ ΤΟ ΧΡΟΝΟ (ΟΤΣ 2008) ΧΩΡΙΣ/ΜΕ ΑΥΞΗΜΕΝΗ ΔΙΕΥΣΔΕΙΣΗ

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλα τα αποτελέσματα για τους μήνες που εξετάστηκαν κατά την παρούσα διπλωματική. Τα παρακάτω αποτελέσματα εμπεριέχουν την φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων ενώ διευκρινίζεται στον τίτλο κάθε διαγράμματος αν είναι με βήμα διείσδυσης (και συνεπώς αυξημένη παραγωγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα 59,5kW) ή χωρίς βήμα διείσδυσης δηλαδή με τα αρχικά 28kW εγκατεστημένης ισχύος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Με την σειρά παρουσιάζονται οι μήνες του χρόνου. Για κάθε μήνα παρουσιάζεται το διάγραμμα του συνολικού κόστους ανά ημέρα του μήνα, του κόστους ανά ημέρα του μήνα αποκλειστικά για το κόστος του δικτύου που προκύπτει κατά τις 10 ώρες φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων (9 ώρες φόρτισης και μία ώρα από-σύνδεσης) ενώ ο μήνας ολοκληρώνεται από μία καμπύλη ημερήσιας ζήτησης. Αυτή η καμπύλη ζήτησης είναι για την 8<sup>η</sup> ημέρα του εκάστοτε μήνα και η επιλογή της συγκεκριμένης ημέρας έγινε αυθαίρετα.

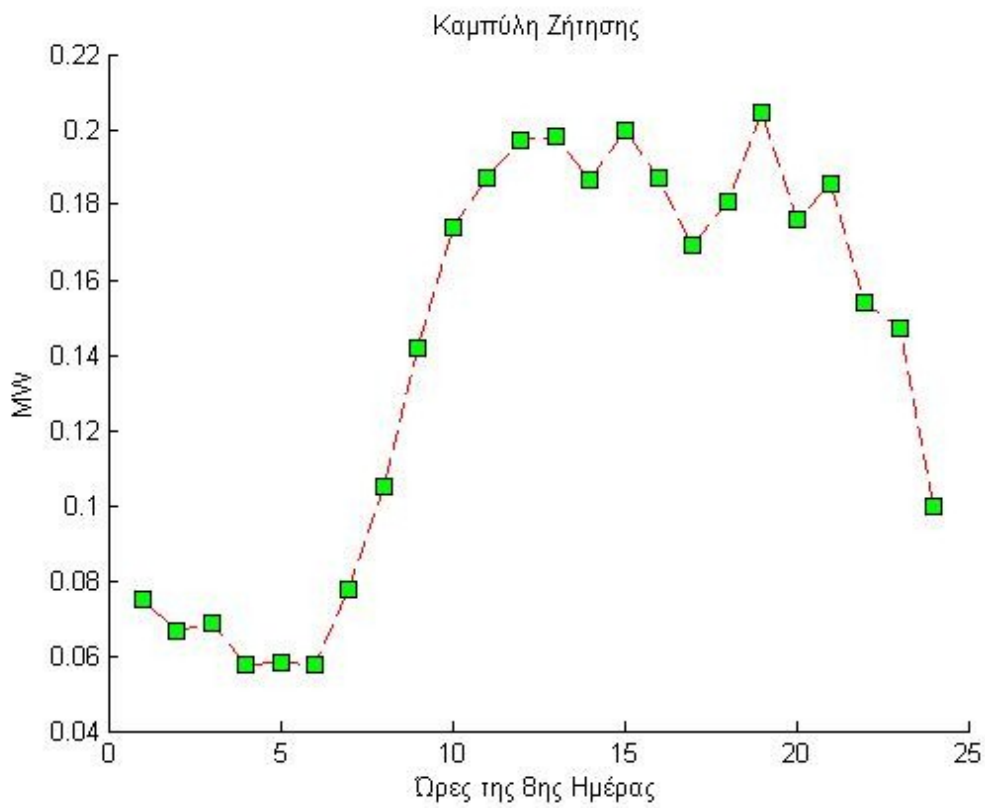
Αρχικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα χωρίς αυξημένο βήμα διείσδυσης, δηλαδή με εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών και ανεμογεννητριών ίση με 28kW.



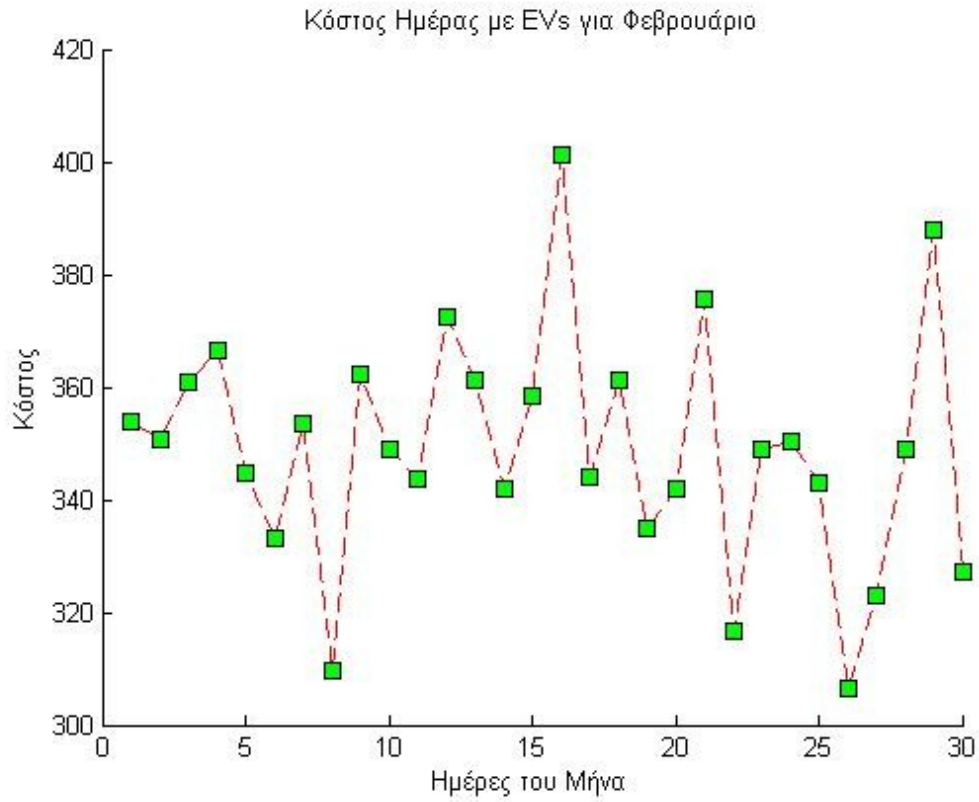
Διάγραμμα Π1.1



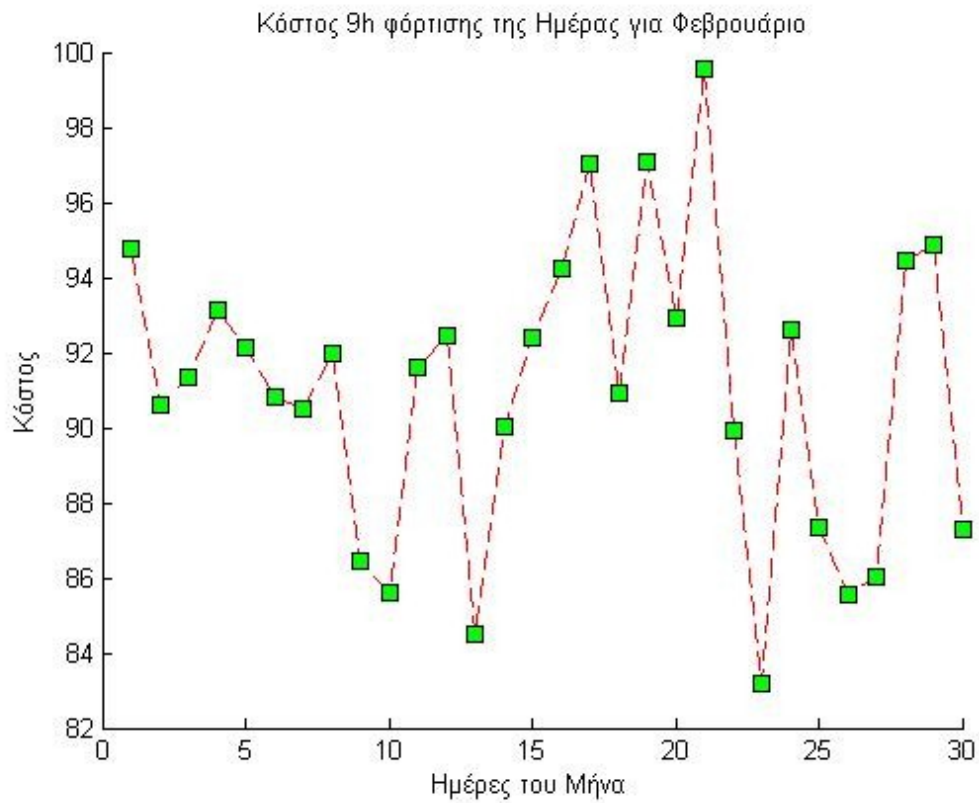
Διάγραμμα Π1.2



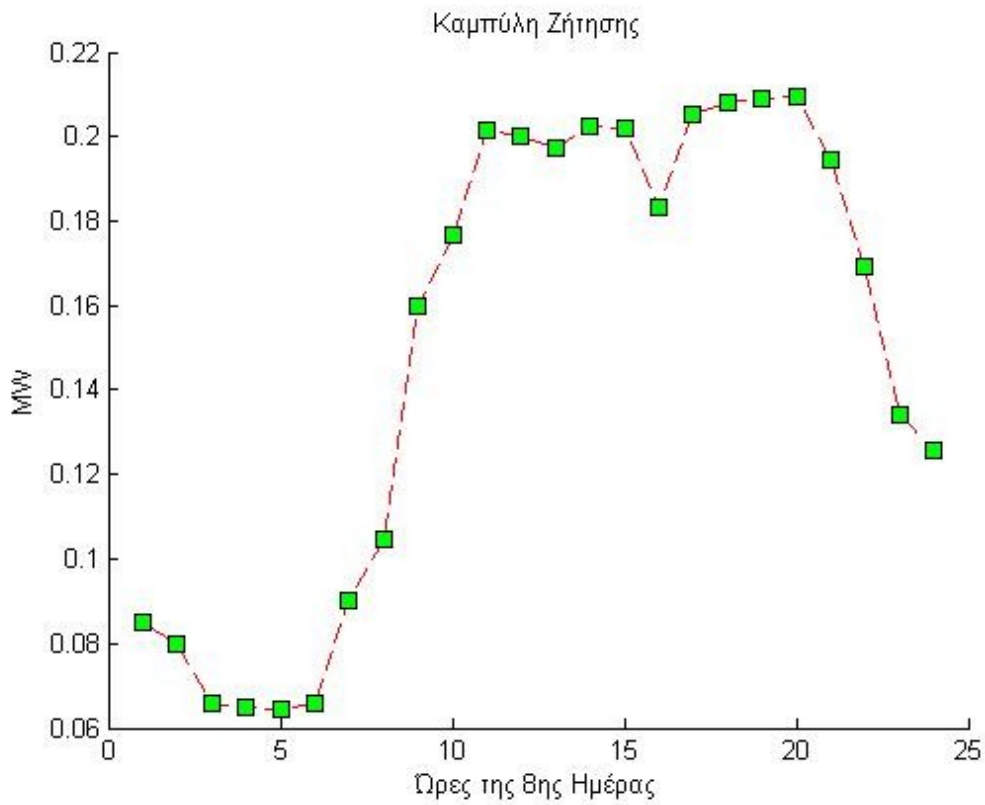
Διάγραμμα Π1.3



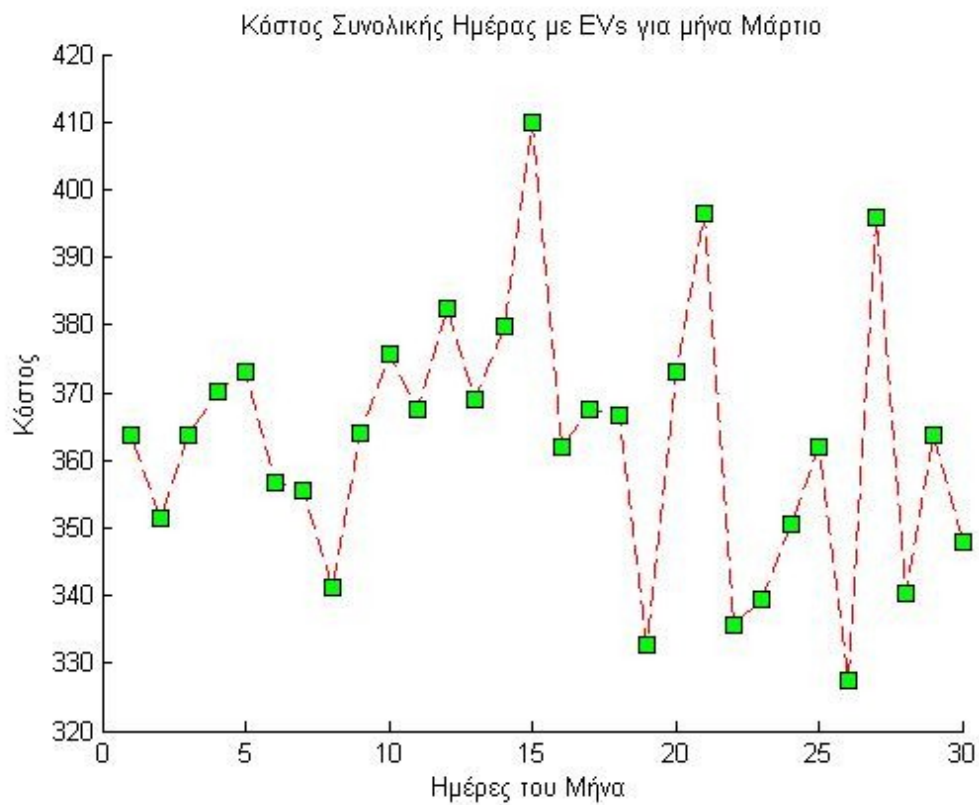
Διάγραμμα Π1.4



Διάγραμμα Π1.5

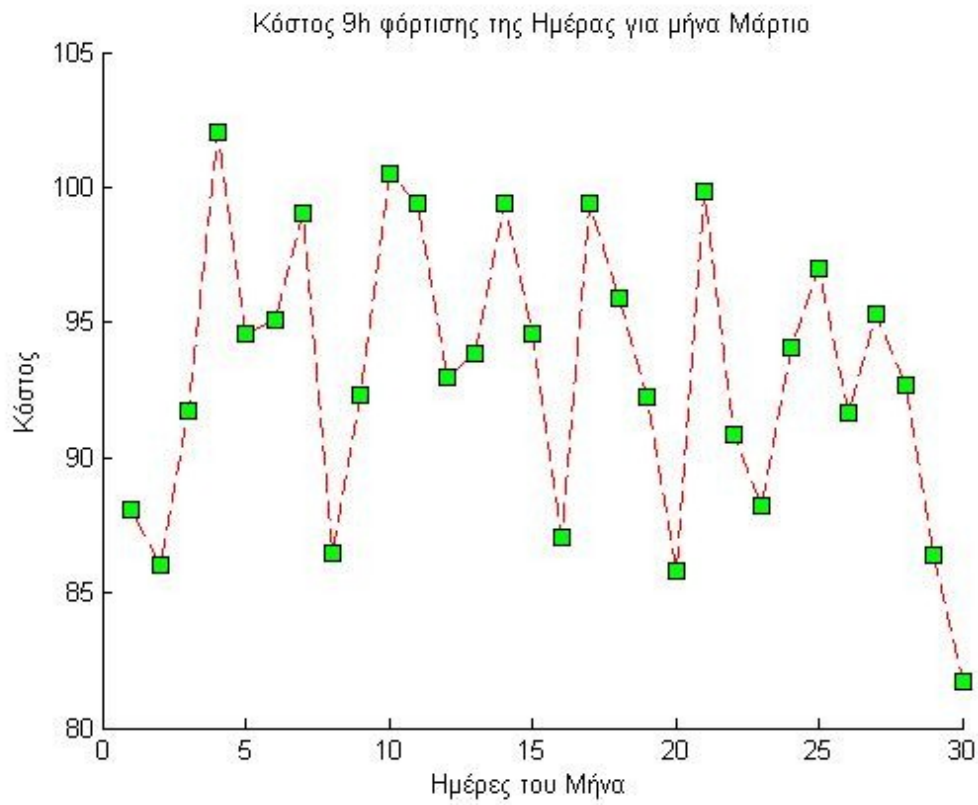


Διάγραμμα Π1.6

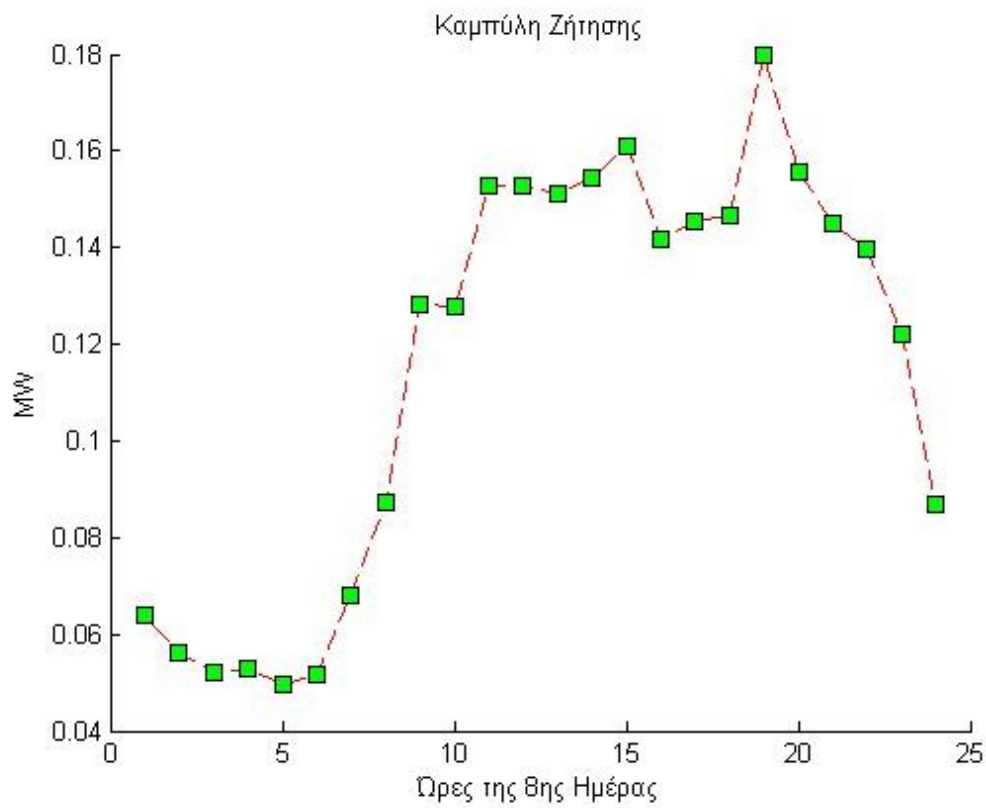


Διάγραμμα Π1.7

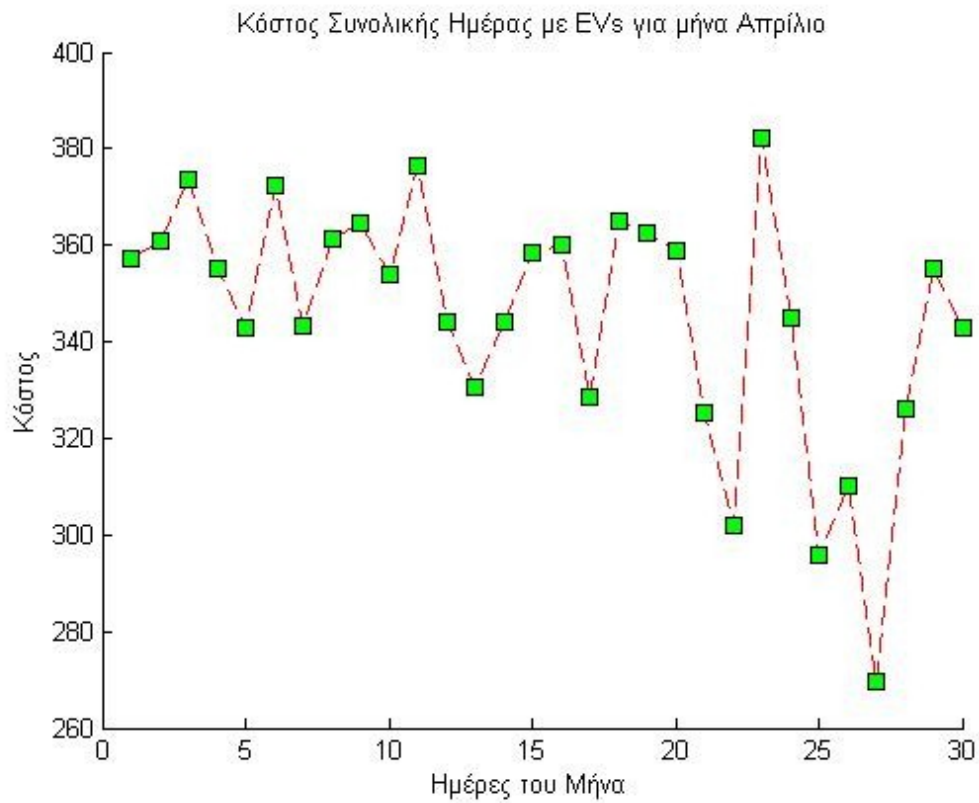




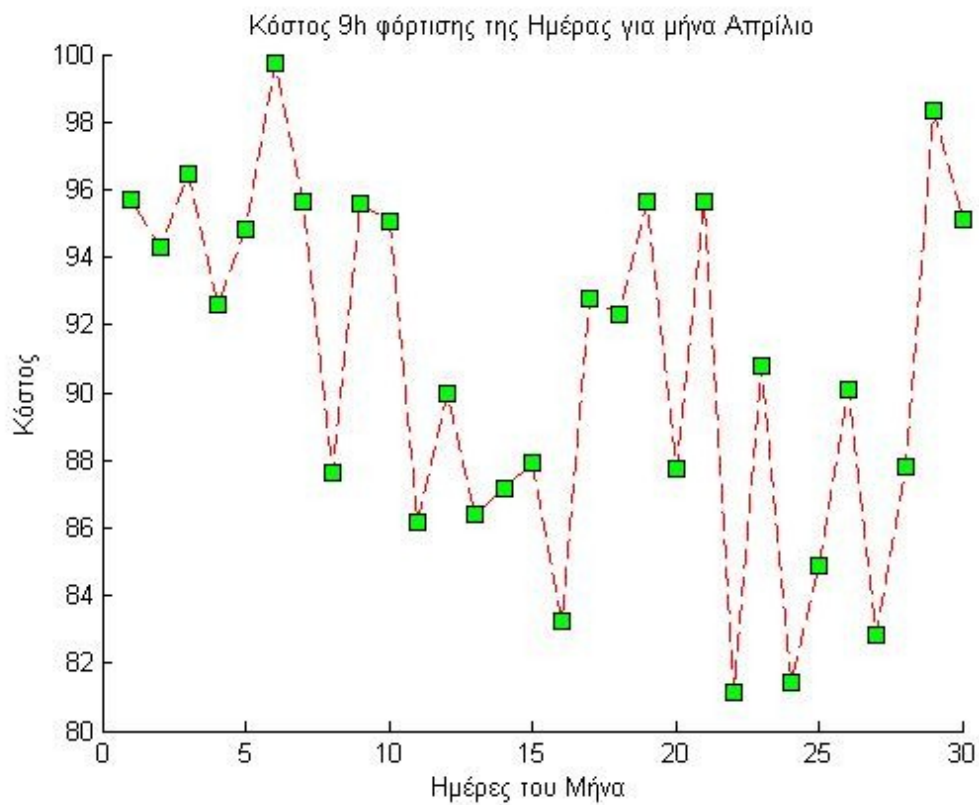
Διάγραμμα Π1.8



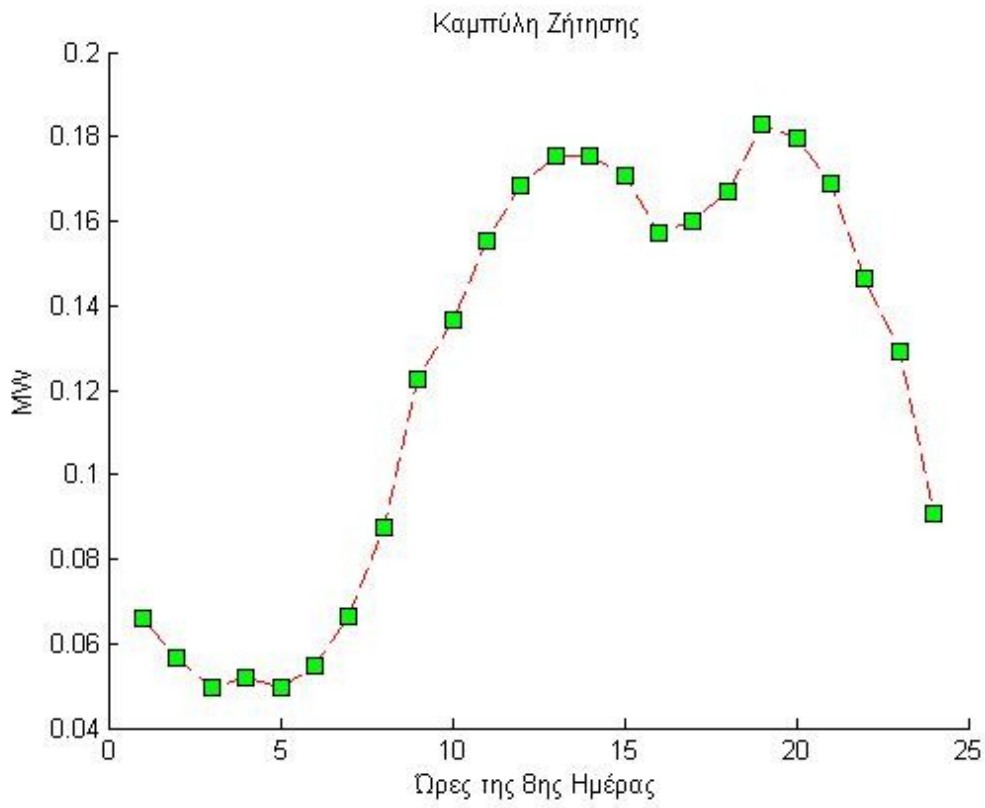
Διάγραμμα Π1.9



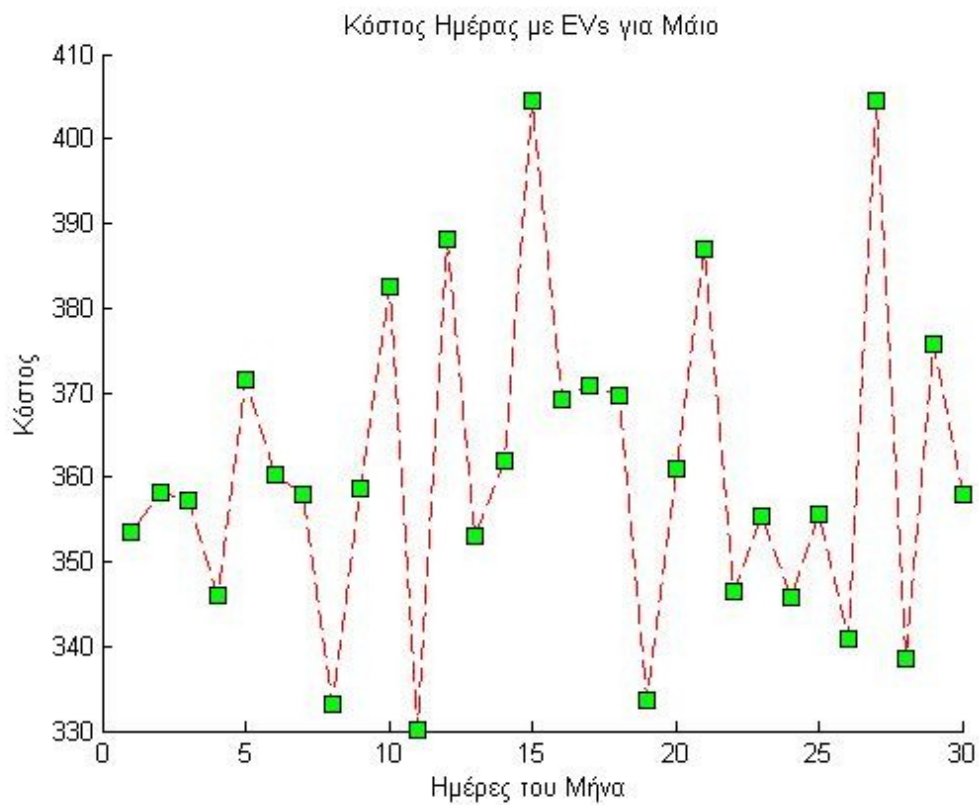
Διάγραμμα Π1.10



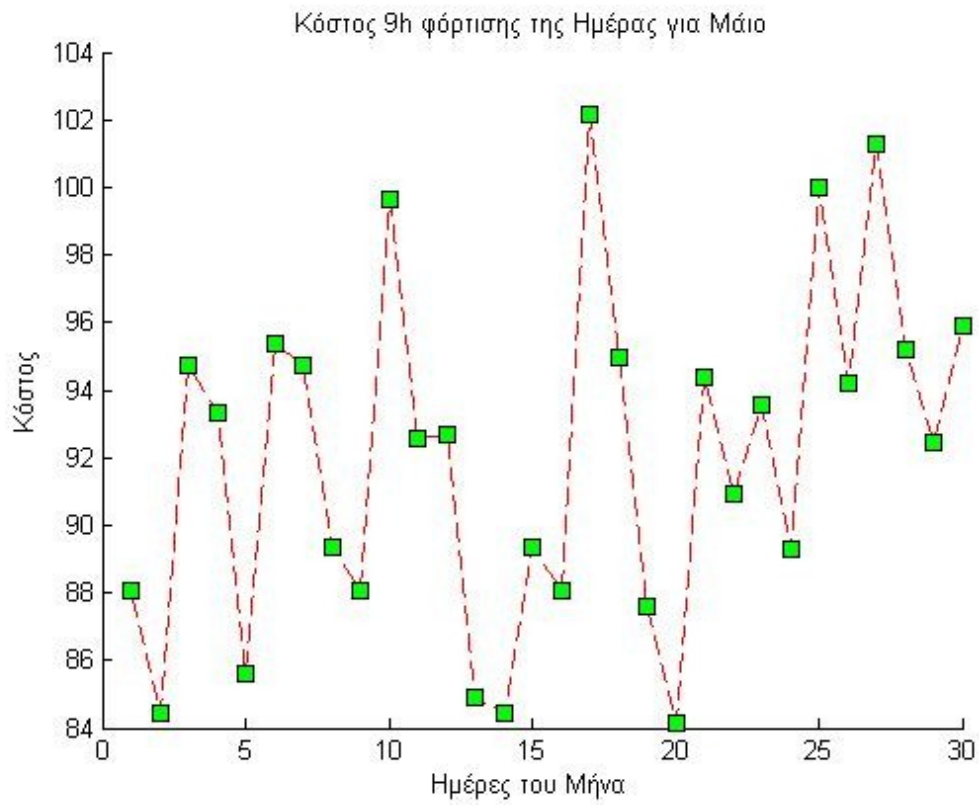
Διάγραμμα Π1.11



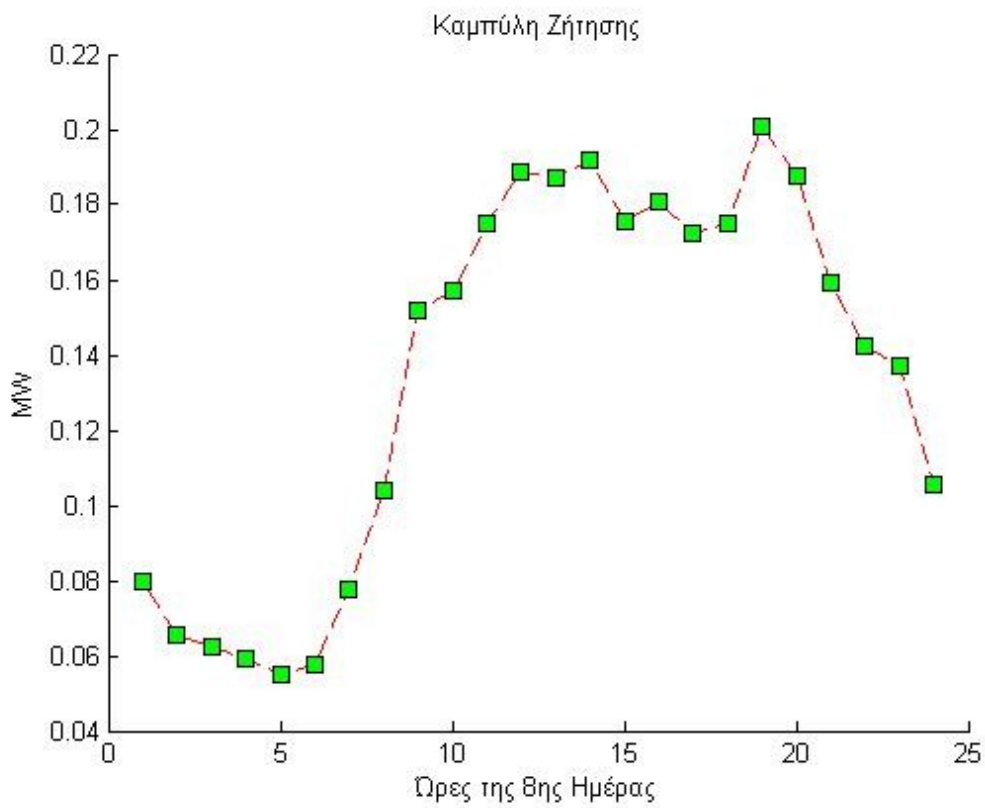
Διάγραμμα Π1.12



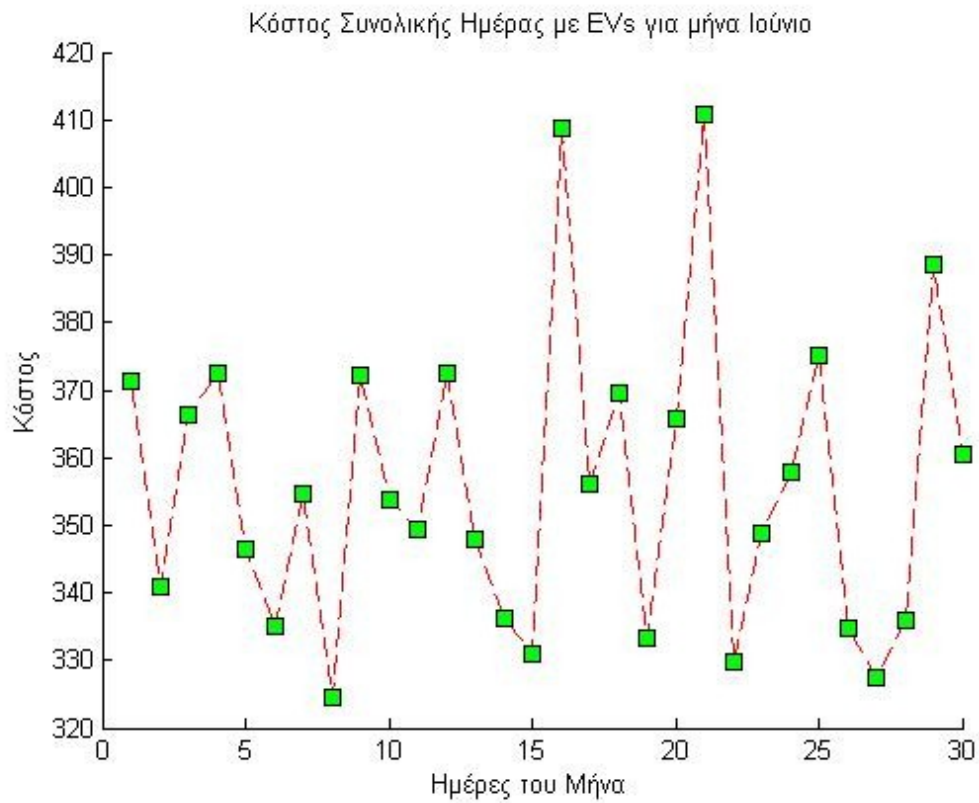
Διάγραμμα Π1.13



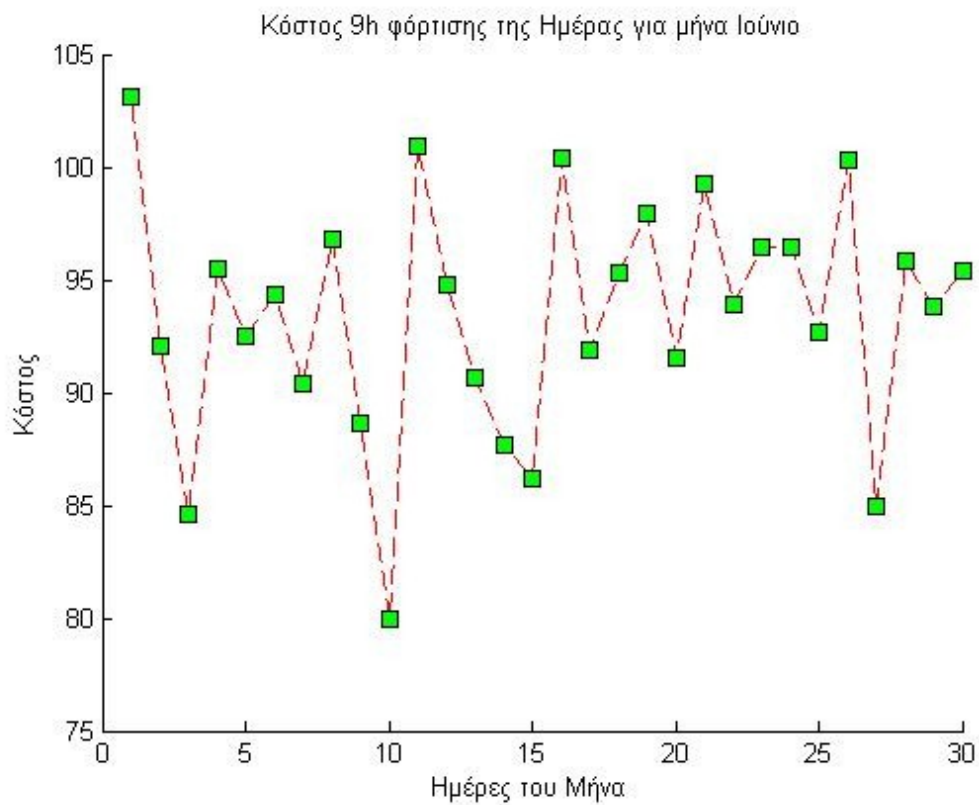
Διάγραμμα Π1.14



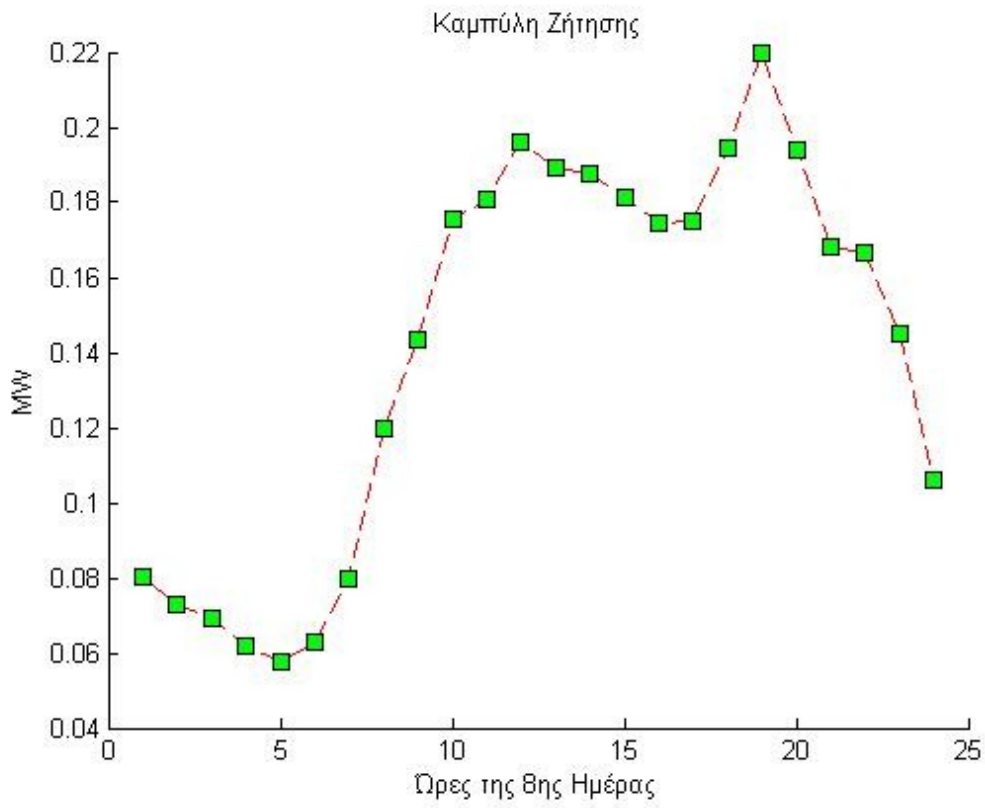
Διάγραμμα Π1.15



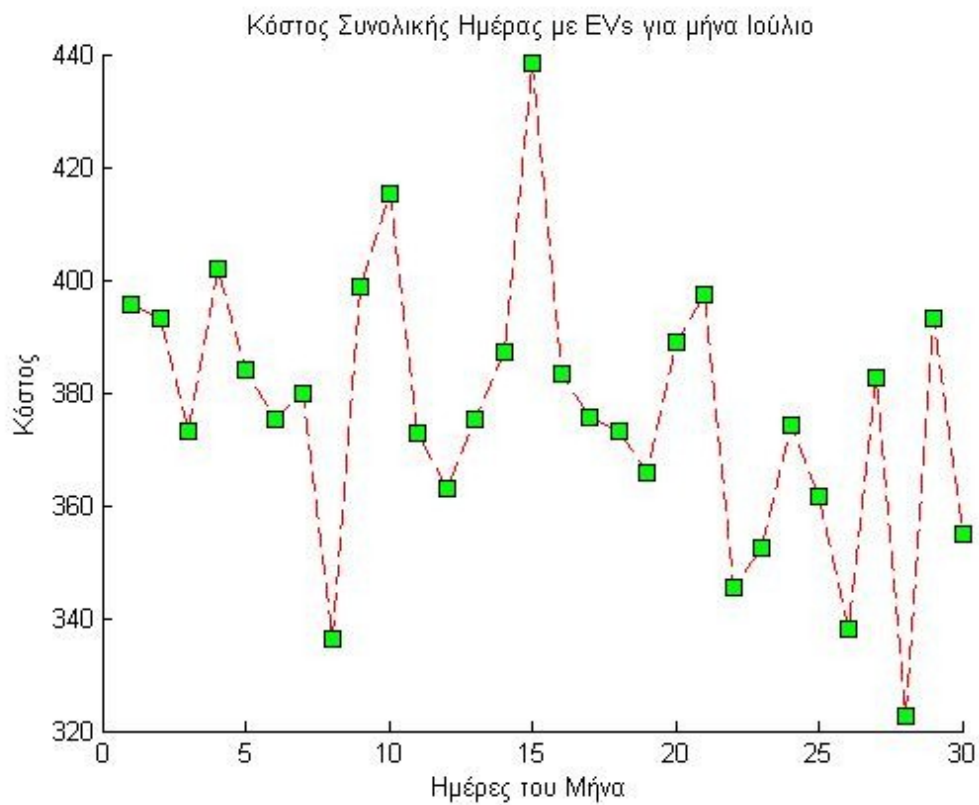
Διάγραμμα Π1.16



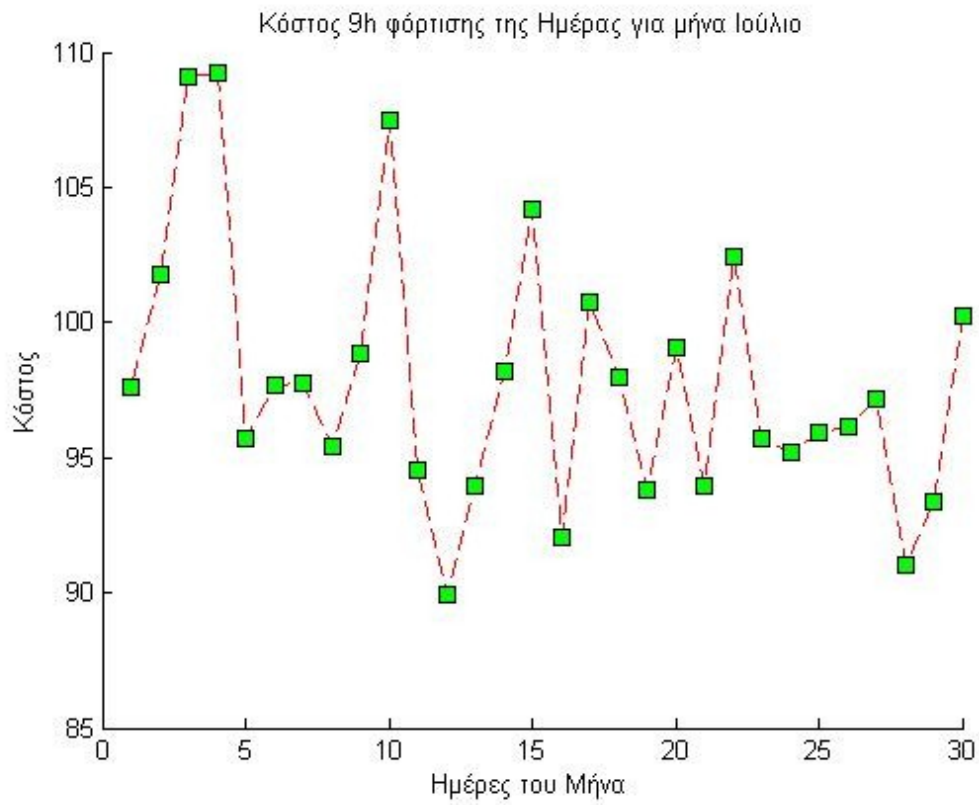
Διάγραμμα Π1.17



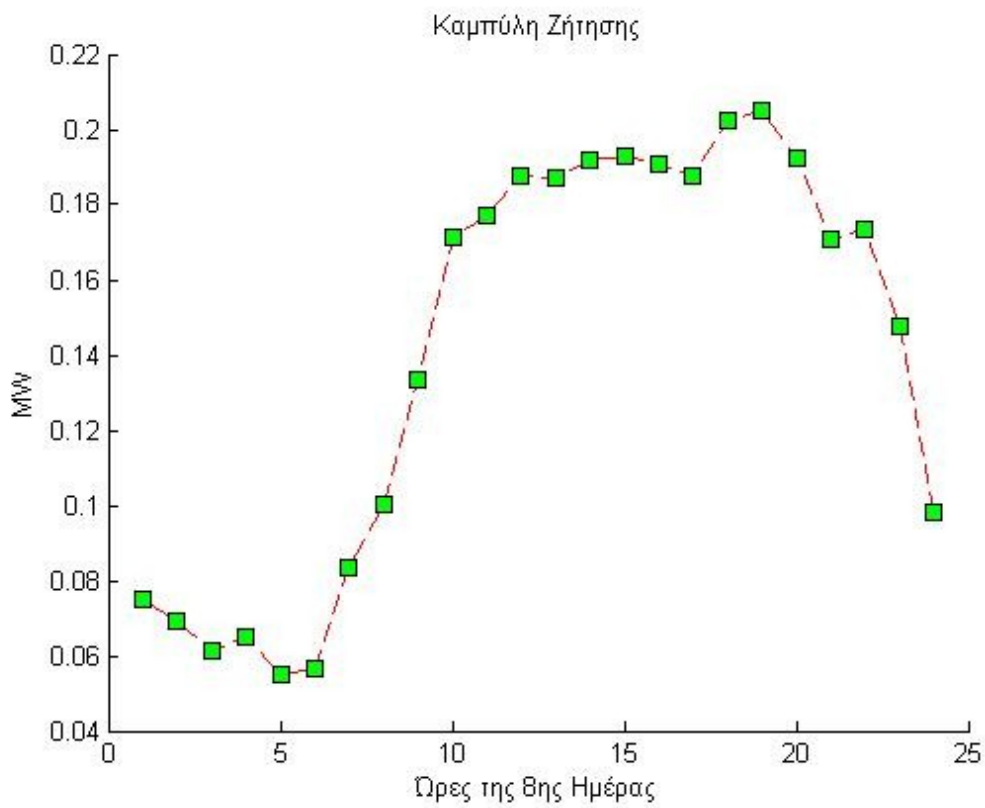
Διάγραμμα Π1.18



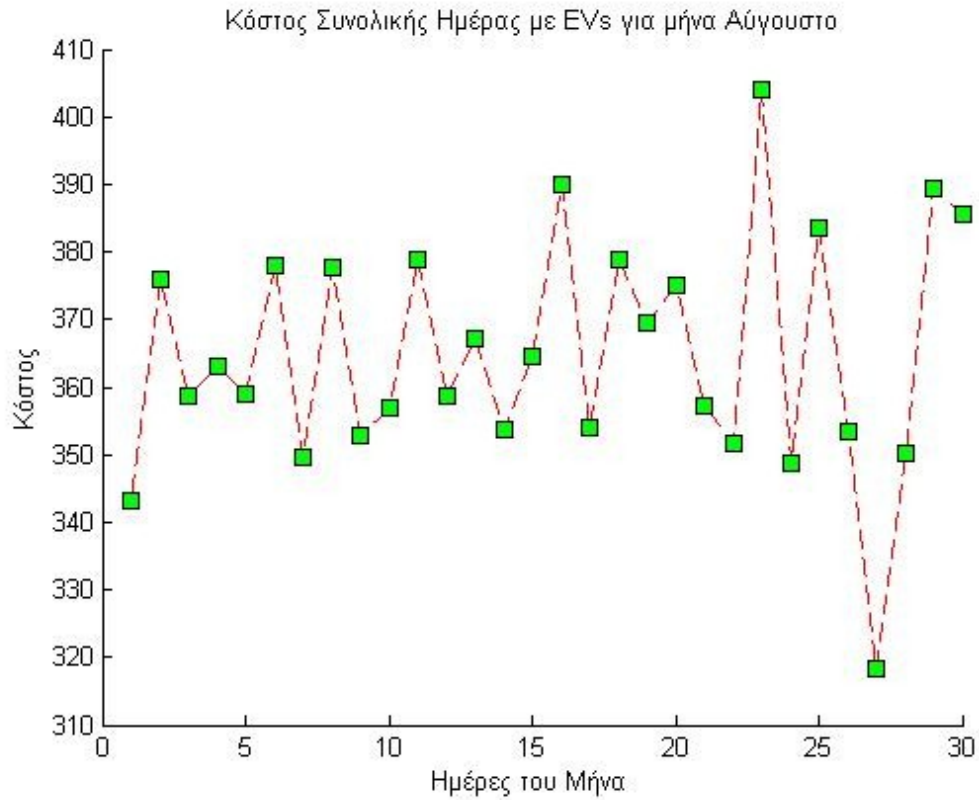
Διάγραμμα Π1.19



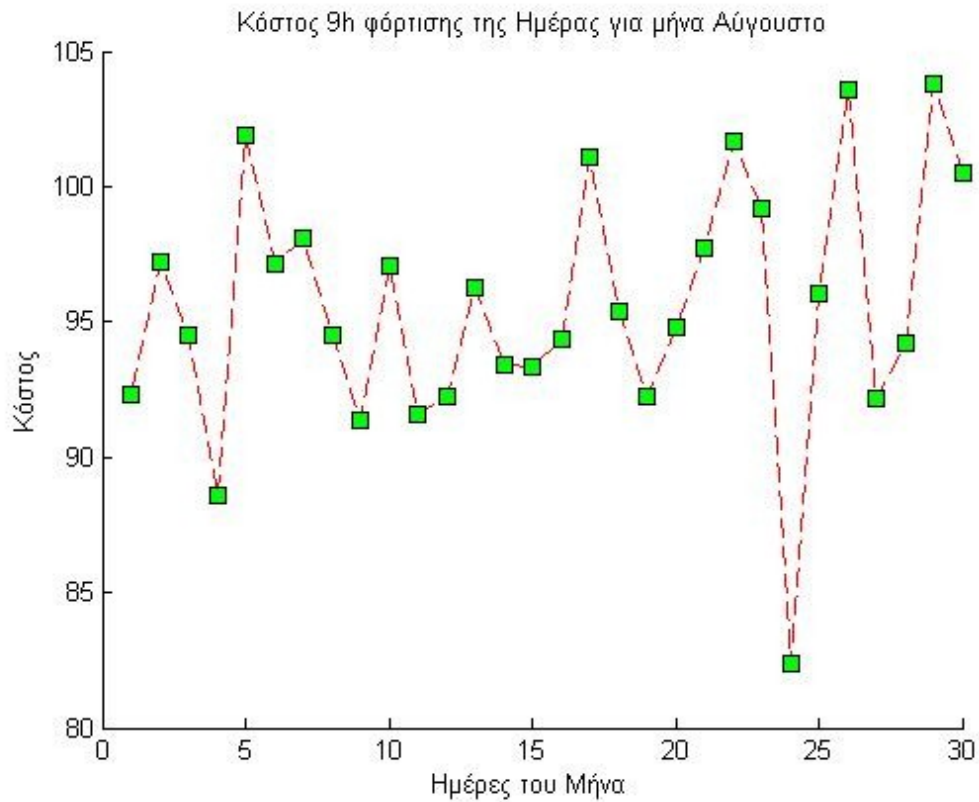
Διάγραμμα Π1.20



Διάγραμμα Π1.21

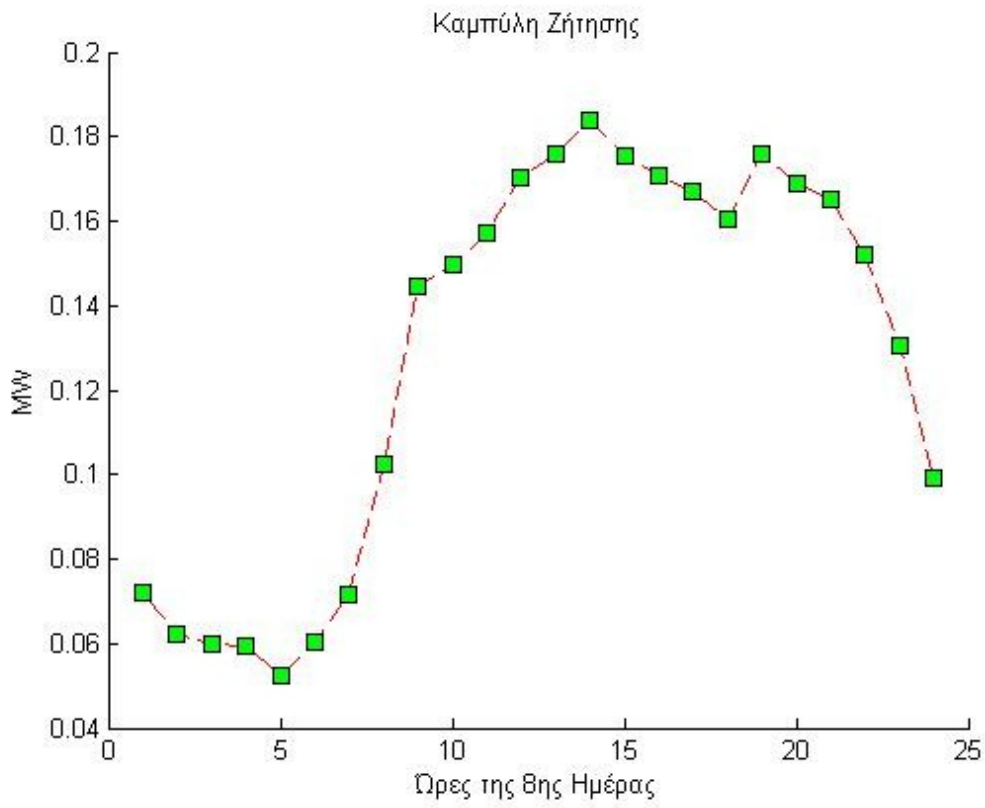


Διάγραμμα Π1.22

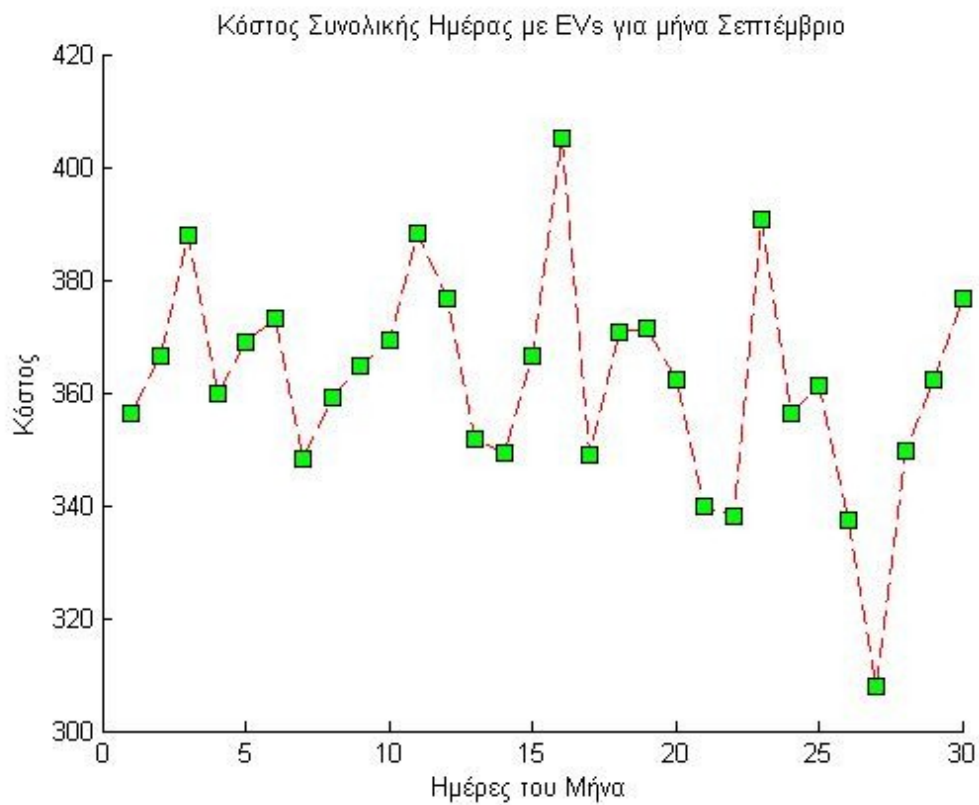


Διάγραμμα Π1.23

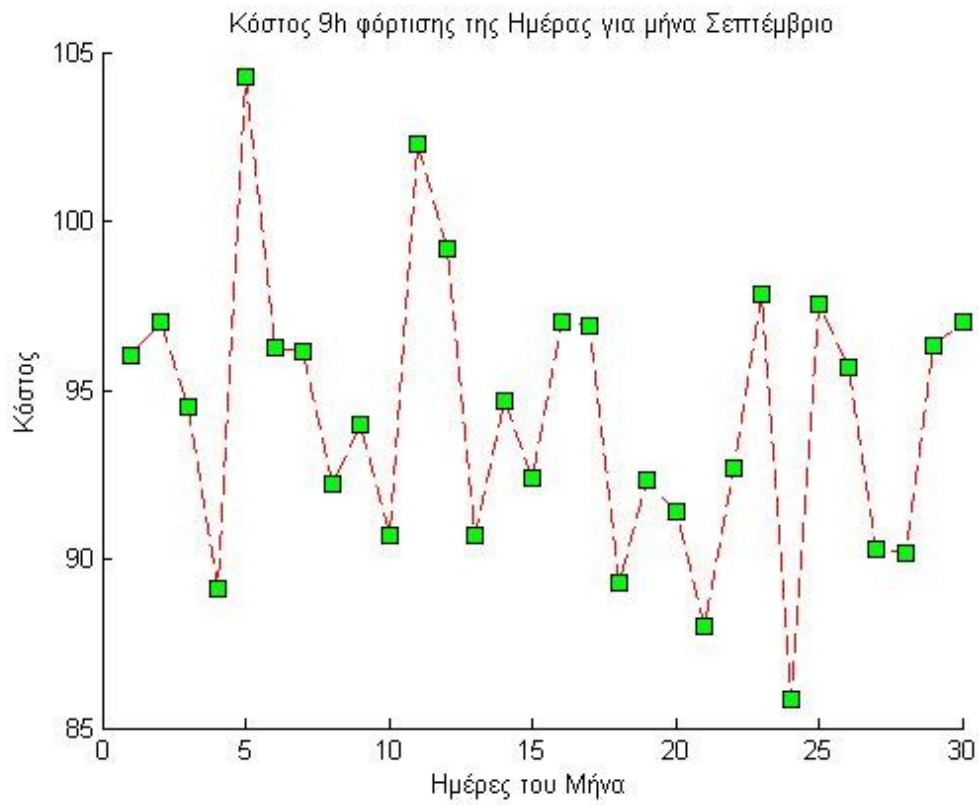




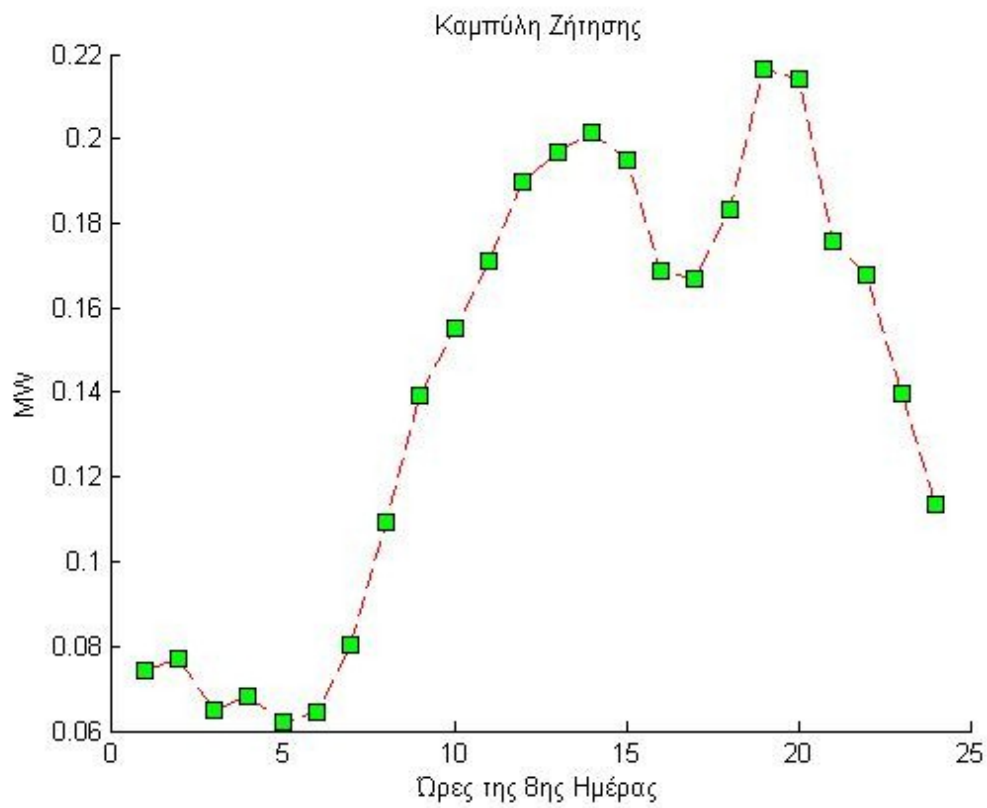
Διάγραμμα Π1.24



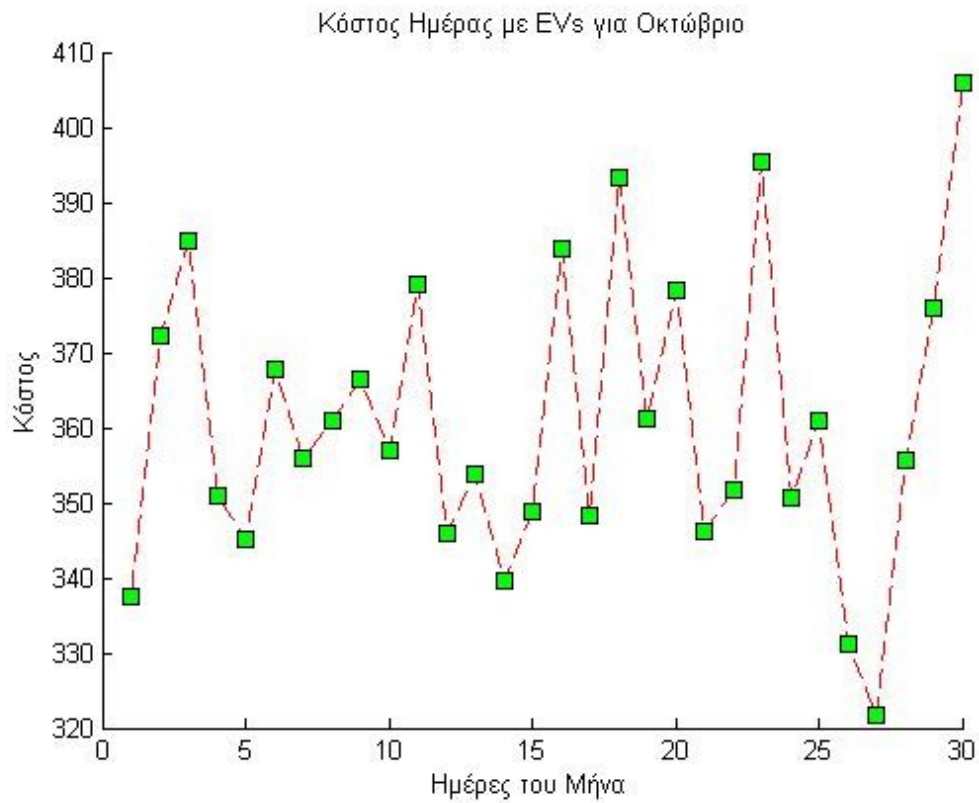
Διάγραμμα Π1.25



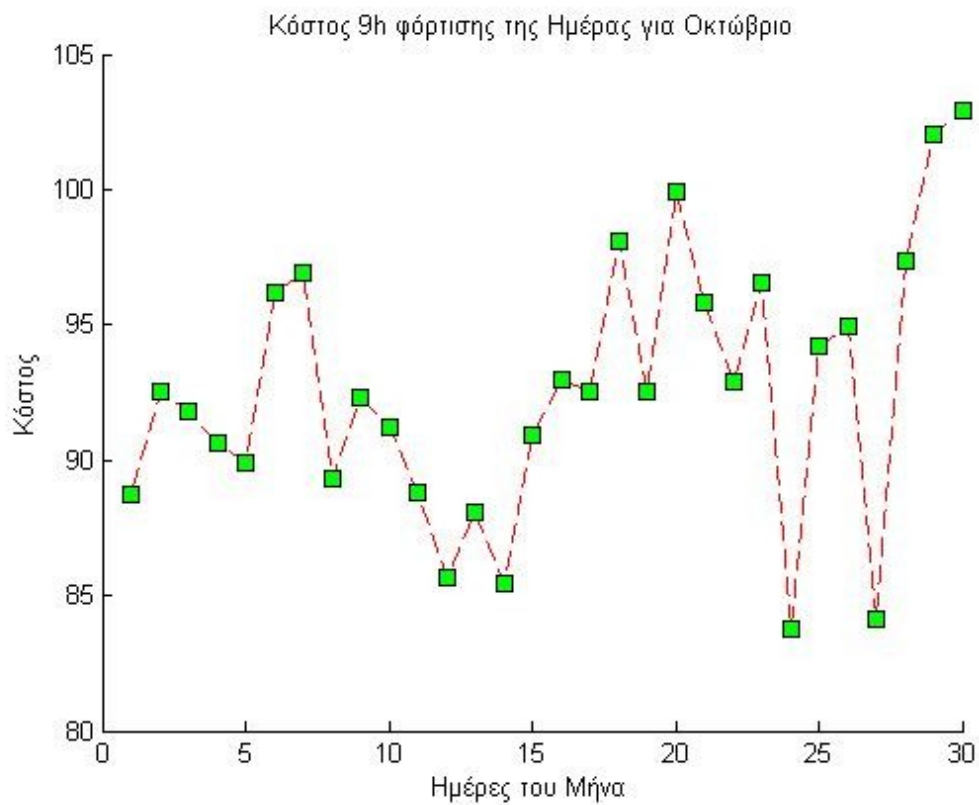
Διάγραμμα Π1.26



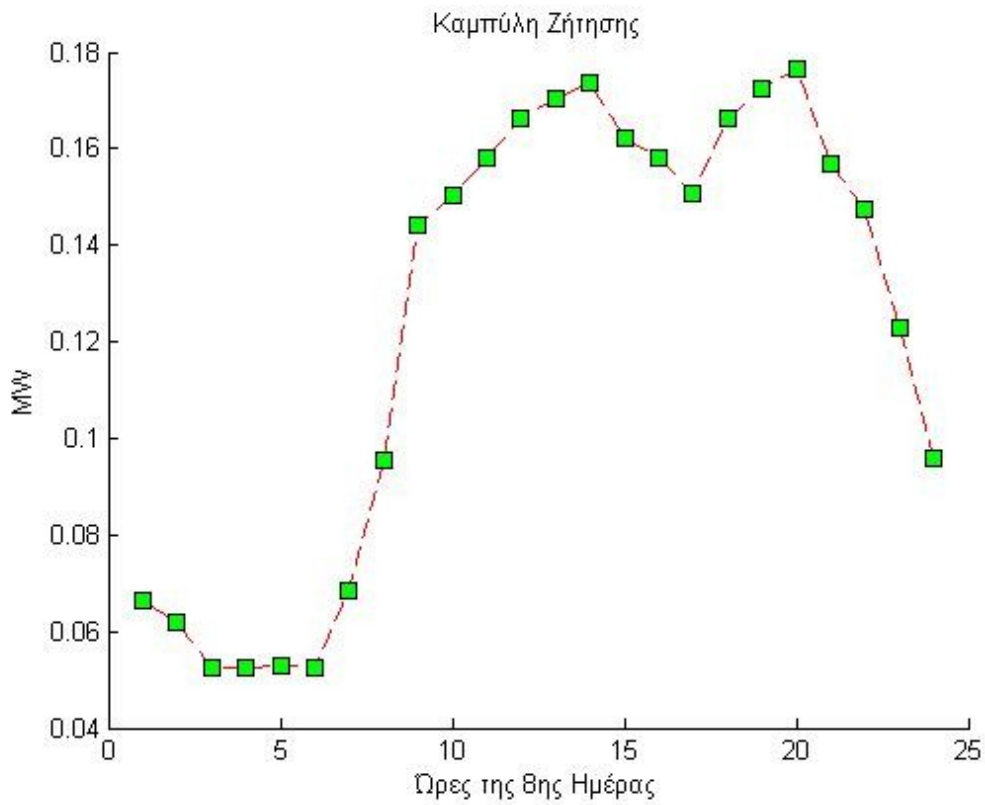
Διάγραμμα Π1.27



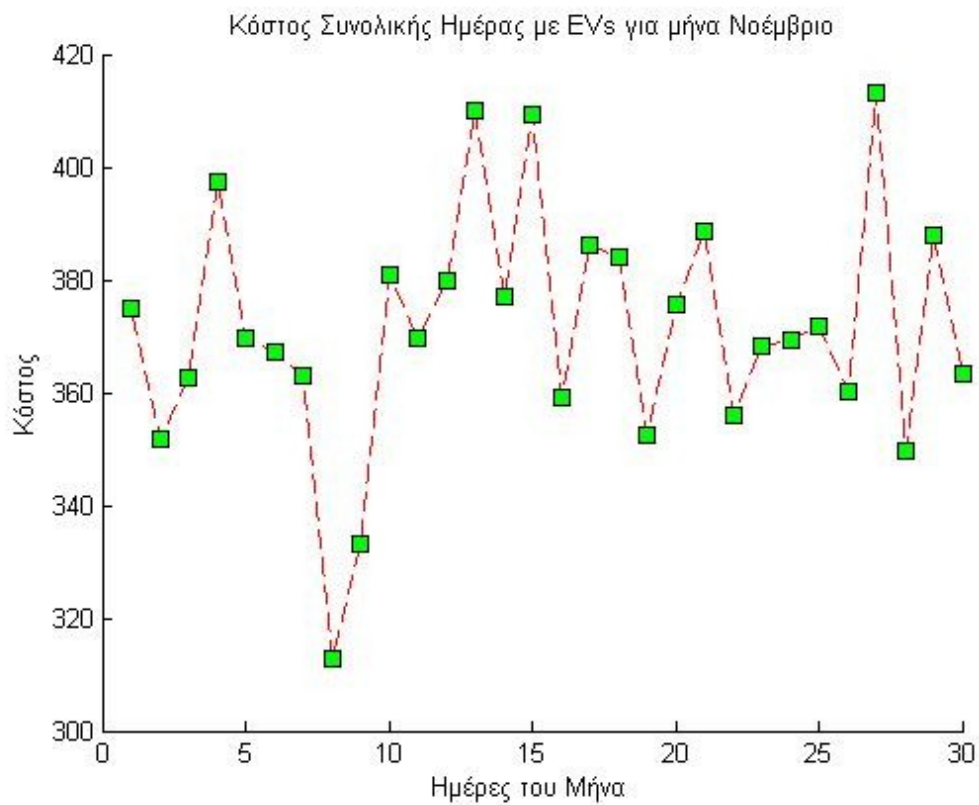
Διάγραμμα Π1.28



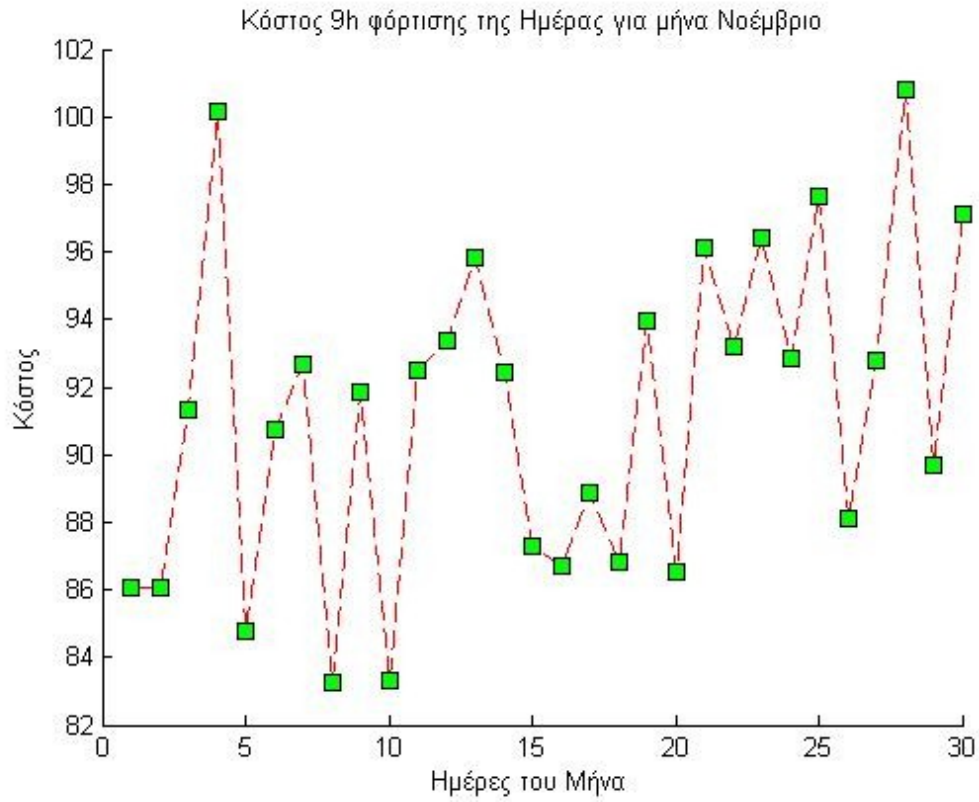
Διάγραμμα Π1.29



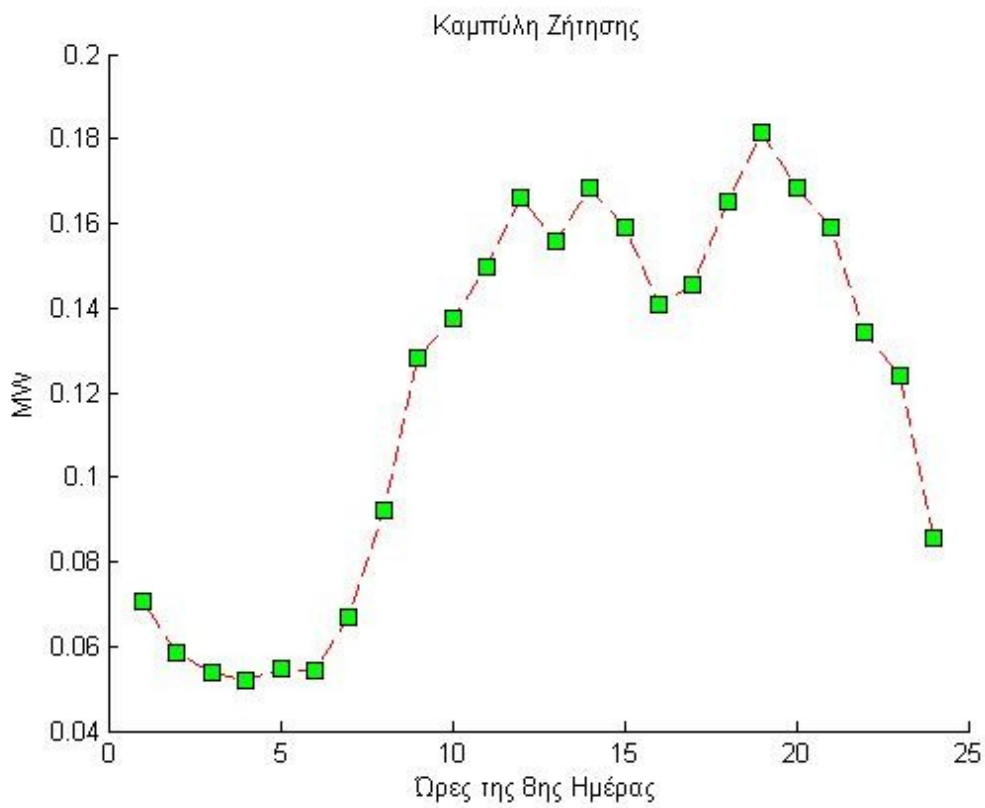
Διάγραμμα Π1.30



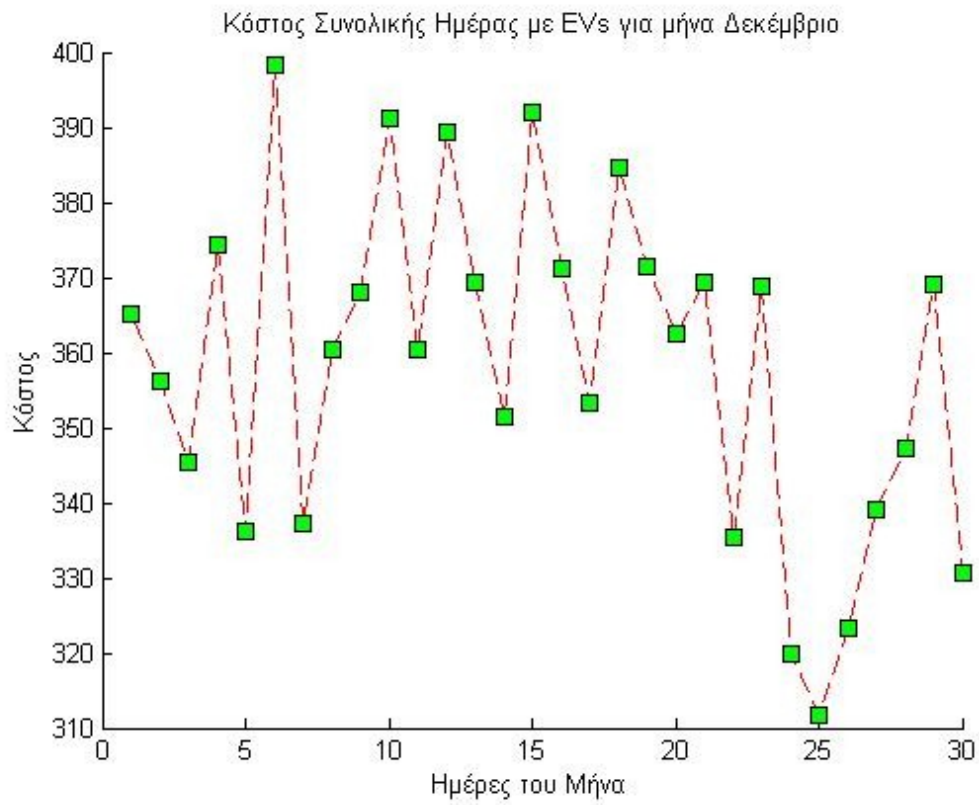
Διάγραμμα Π1.31



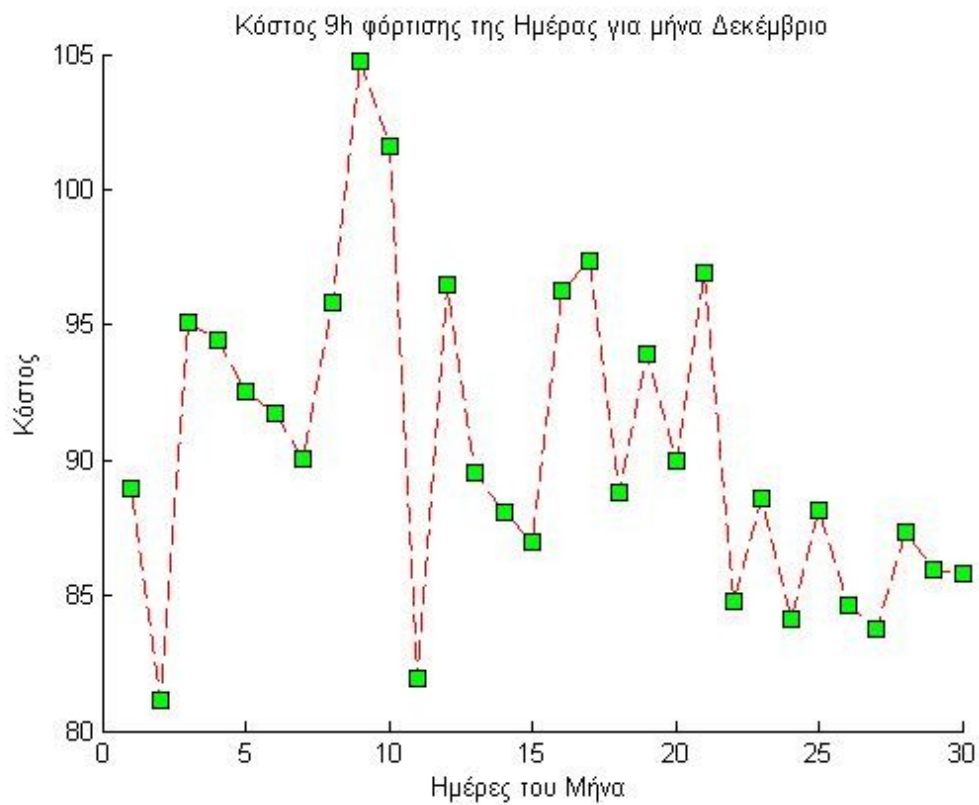
Διάγραμμα Π1.32



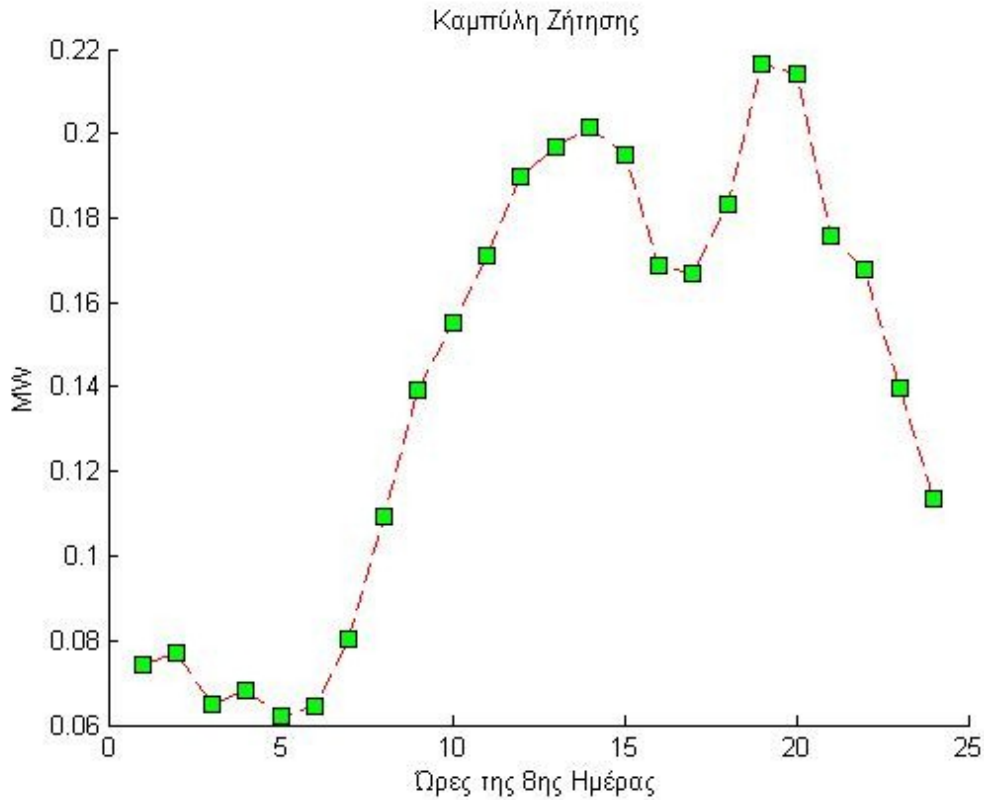
Διάγραμμα Π1.33



Διάγραμμα Π1.34



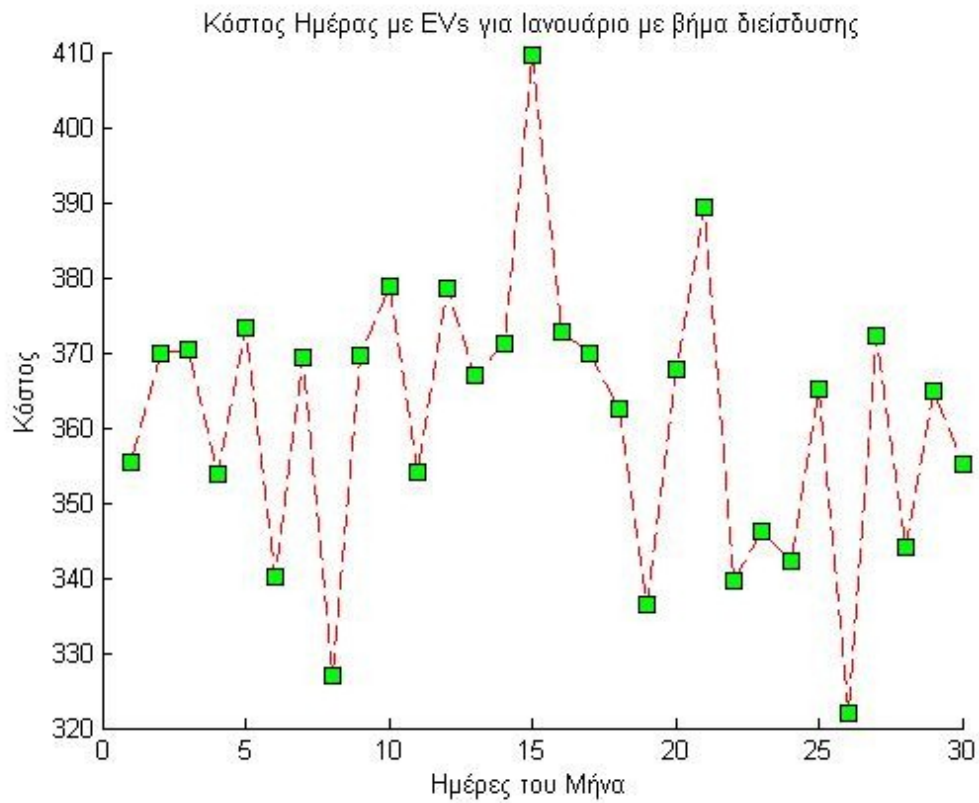
Διάγραμμα Π1.35



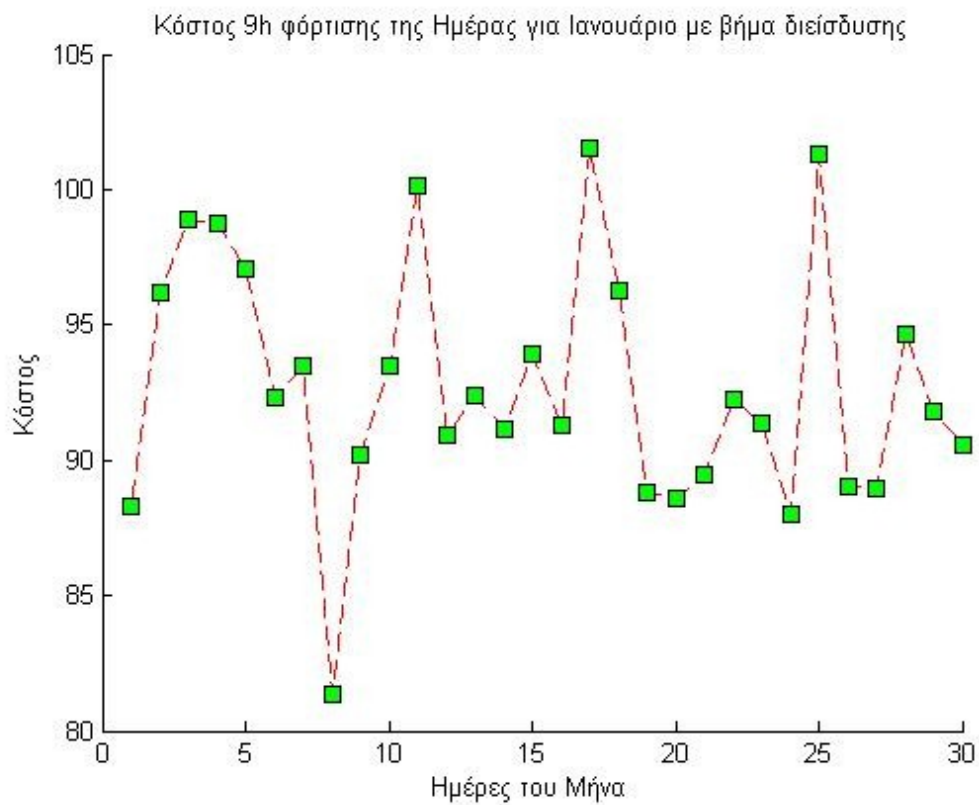
Διάγραμμα Π1.36

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για τους 12 μήνες του χρόνου με αυξημένο βήμα διείσδυσης. Δηλαδή από τα 28kW εγκατεστημένης πηγαίνουμε στα 59,5kW εγκατεστημένης, που είναι σχεδόν το διπλάσιο μέγεθος εγκατεστημένης ισχύος σε σχέση με την αρχική τιμή. Πάλι όπως και παραπάνω παρουσιάζονται με την σειρά :

- 1) Συνολικό κόστος ανά ημέρα για όλες τις ημέρες του μήνα παρουσία EVs
- 2) Συνολικό κόστος μόνο των ωρών κατά τις οποίες φορτίζουν τα EVs ανά ημέρα για όλες τις ημέρες του μήνα. Υπενθυμίζουμε πως οι πραγματικές ώρες φόρτισης είναι 9 και γίνονται 10 στο σύνολο τους προσθέτοντας μία ώρα για από-σύνδεση
- 3) Καμπύλη ζήτησης φορτίου για την 8<sup>η</sup> ημέρα κάθε μήνα

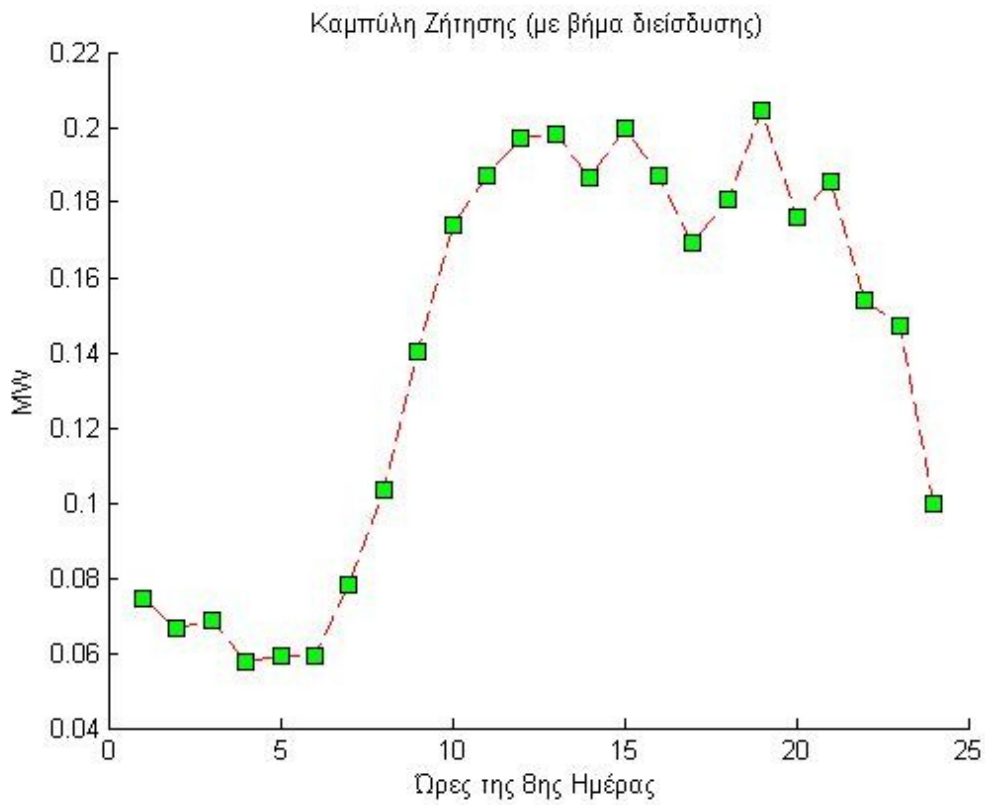


Διάγραμμα Π2.1

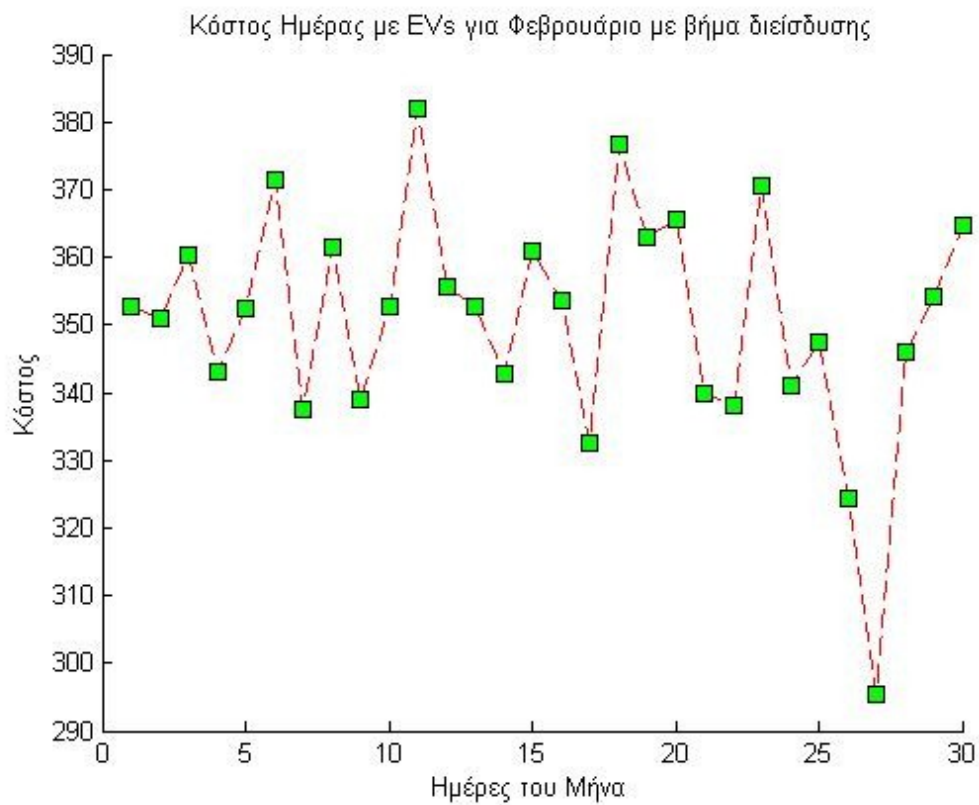


Διάγραμμα Π2.2

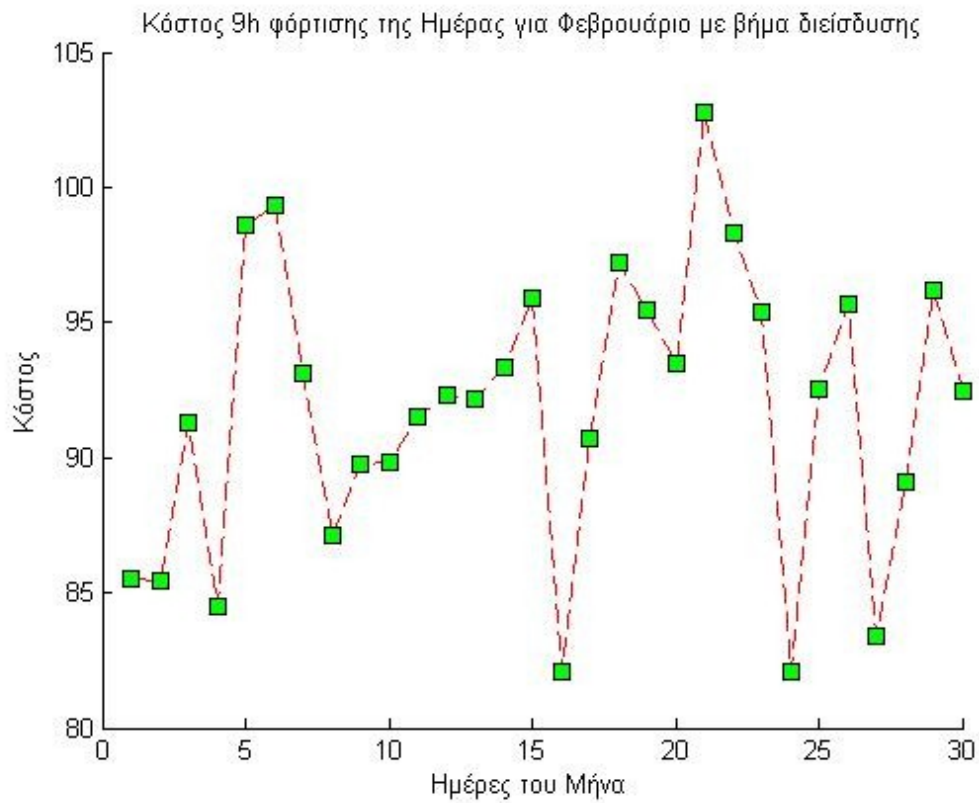




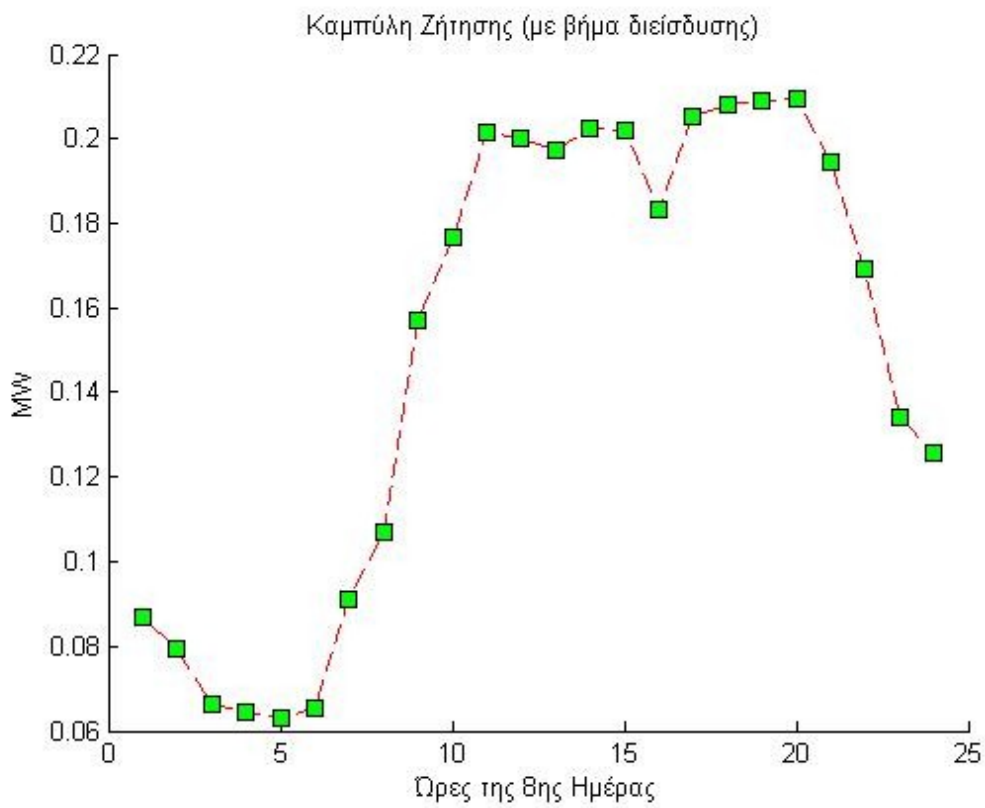
Διάγραμμα Π2.3



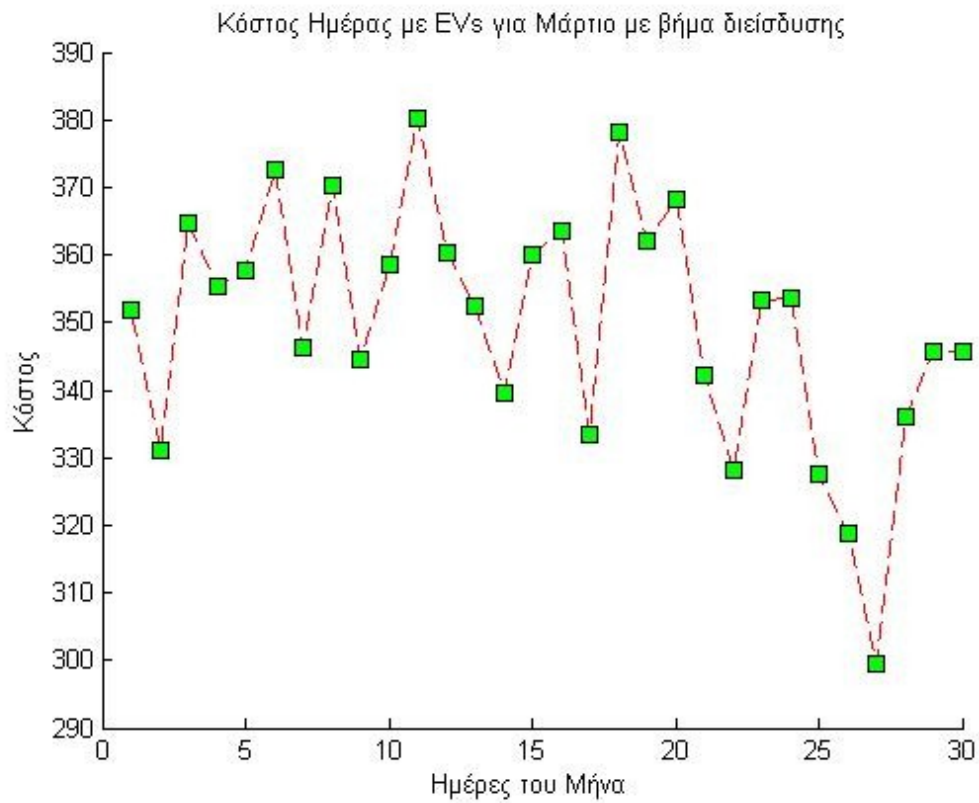
Διάγραμμα Π2.4



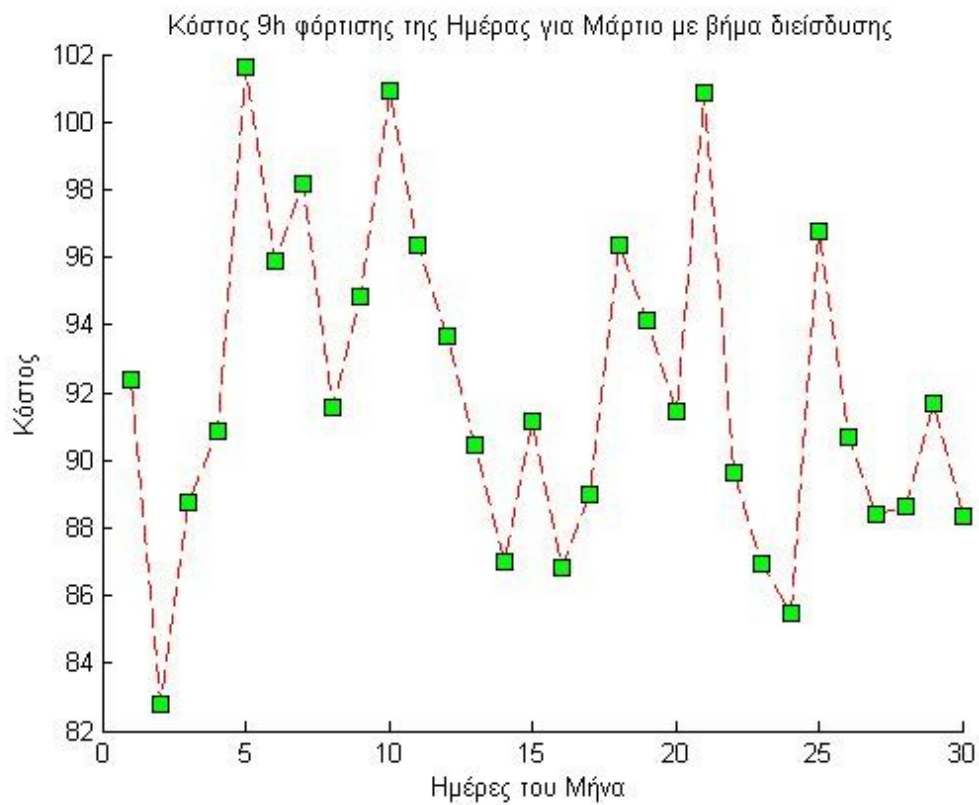
Διάγραμμα Π2.5



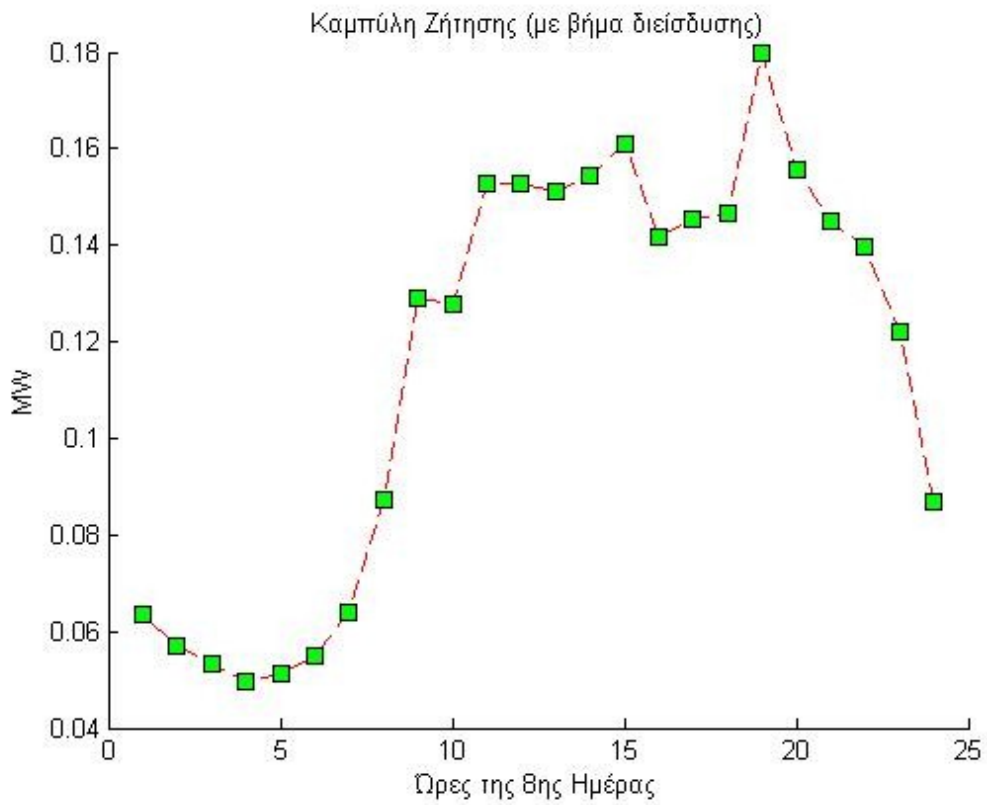
Διάγραμμα Π2.6



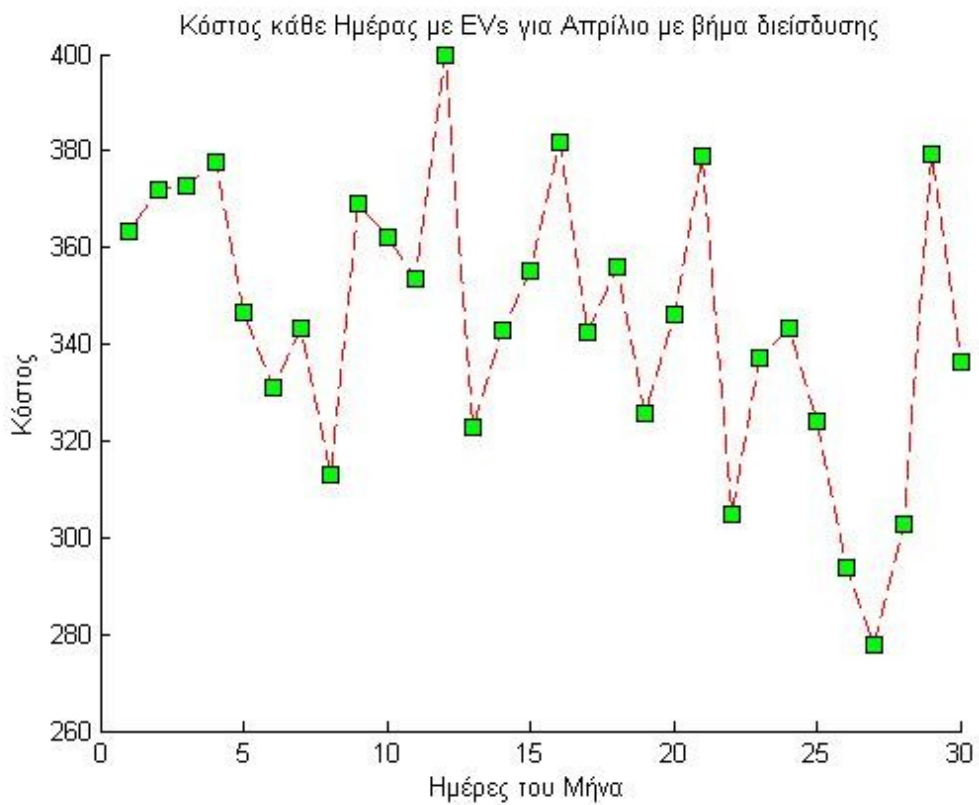
Διάγραμμα Π2.7



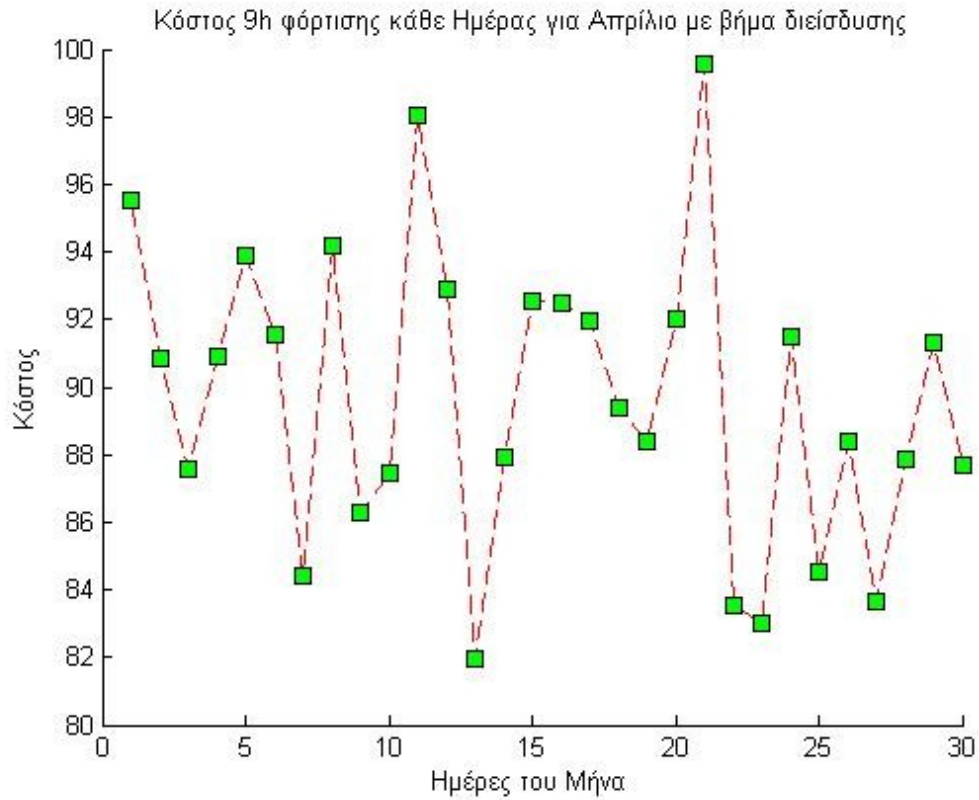
Διάγραμμα Π2.8



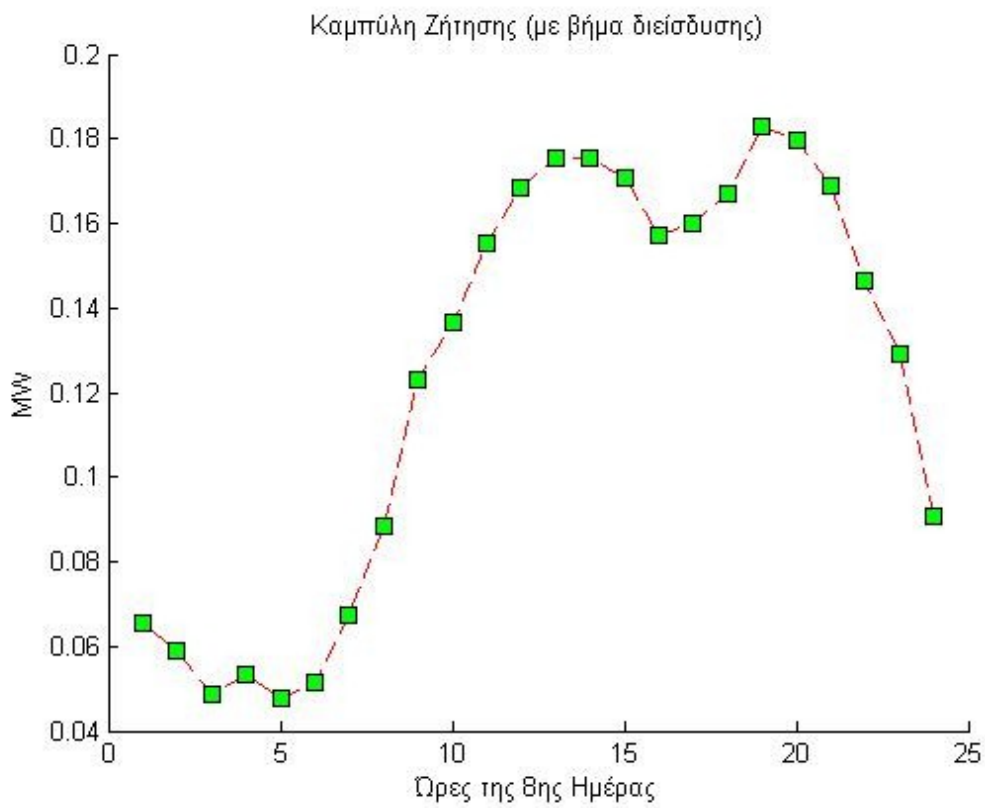
Διάγραμμα Π2.9



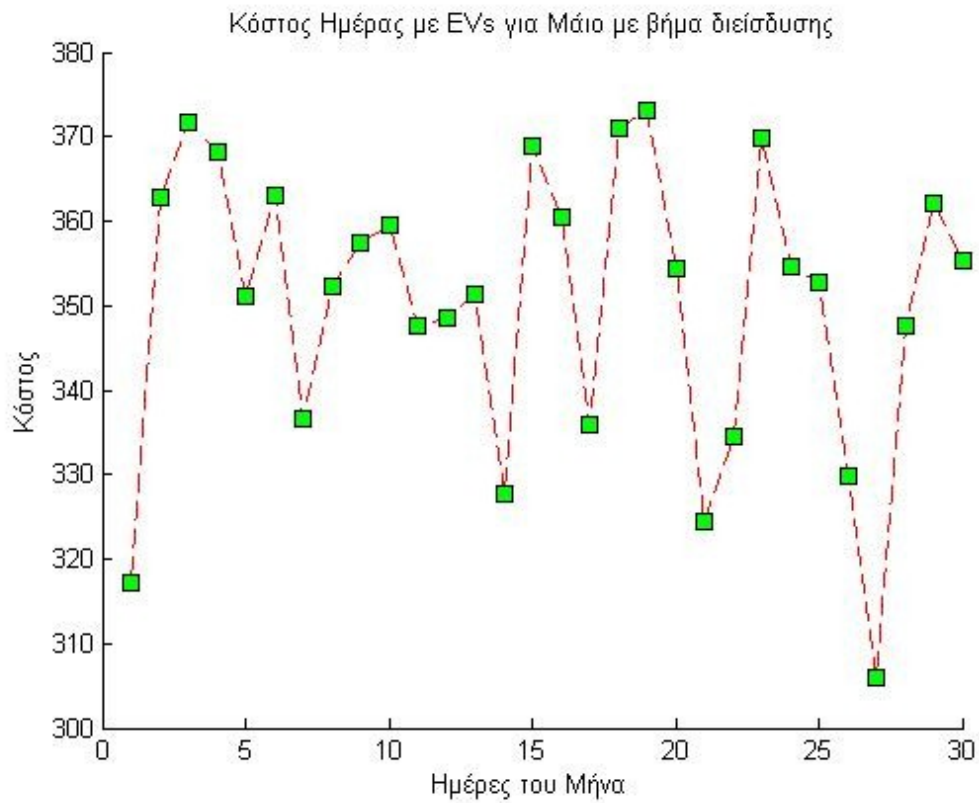
Διάγραμμα Π2.10



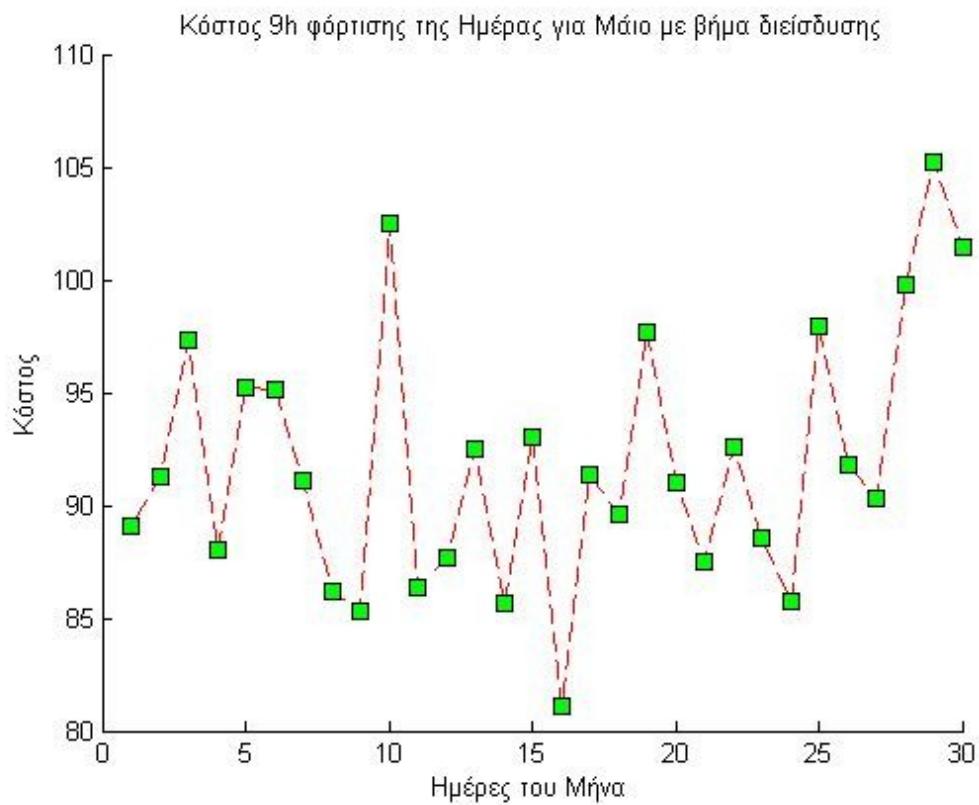
Διάγραμμα Π2.11



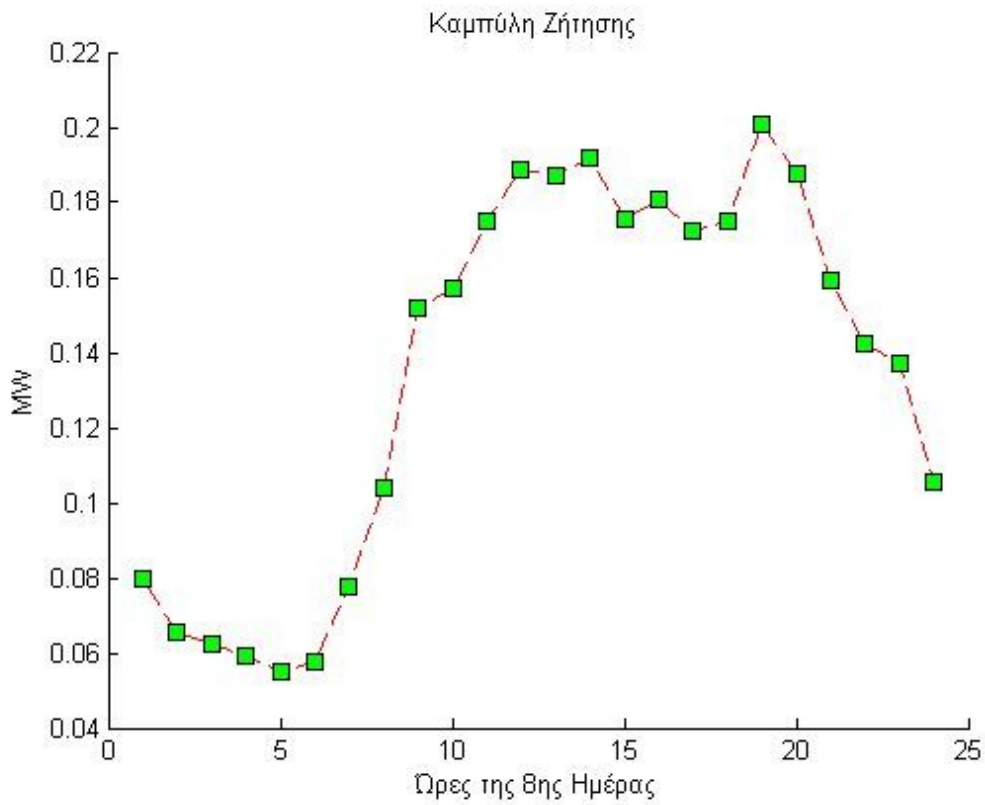
Διάγραμμα Π2.12



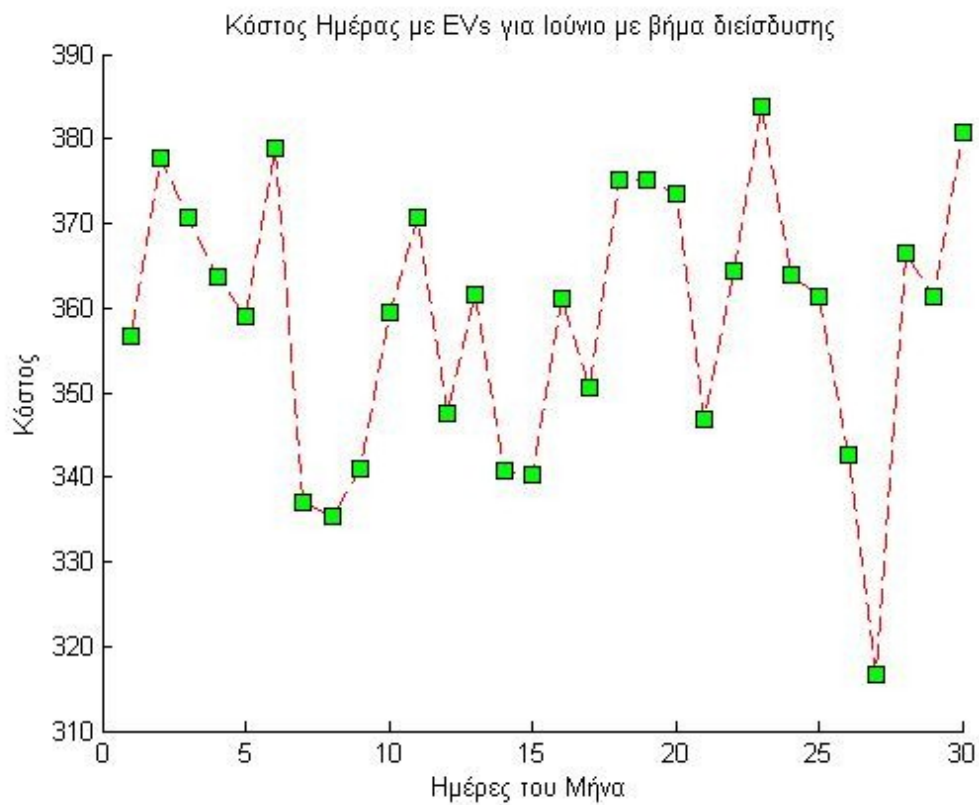
Διάγραμμα Π2.13



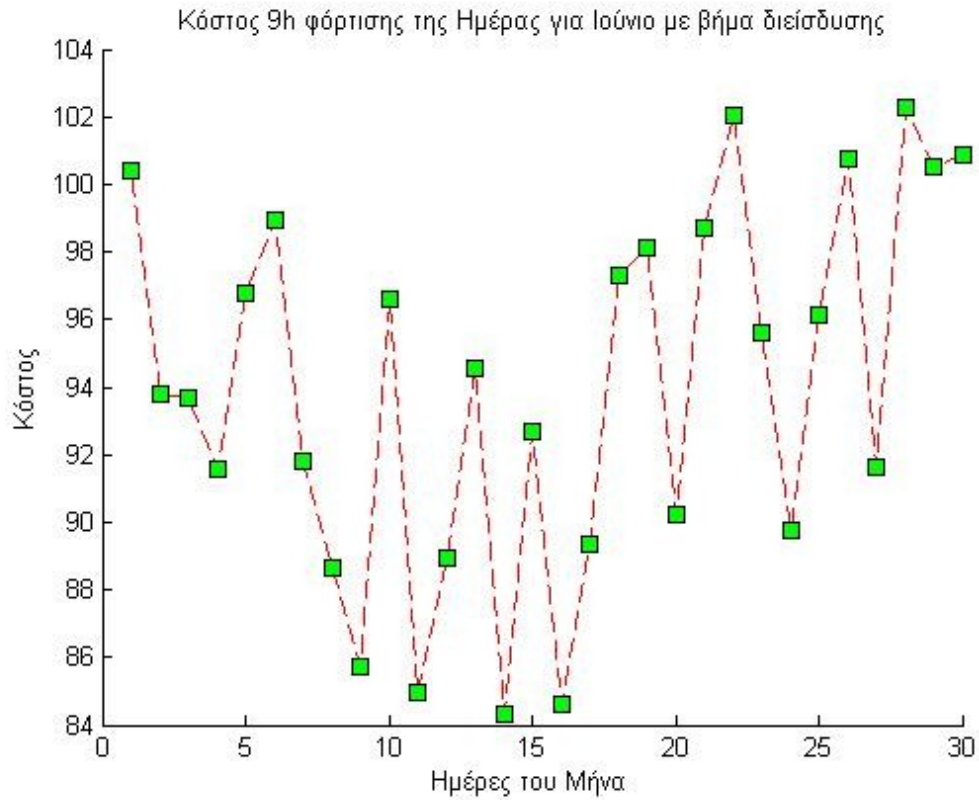
Διάγραμμα Π2.14



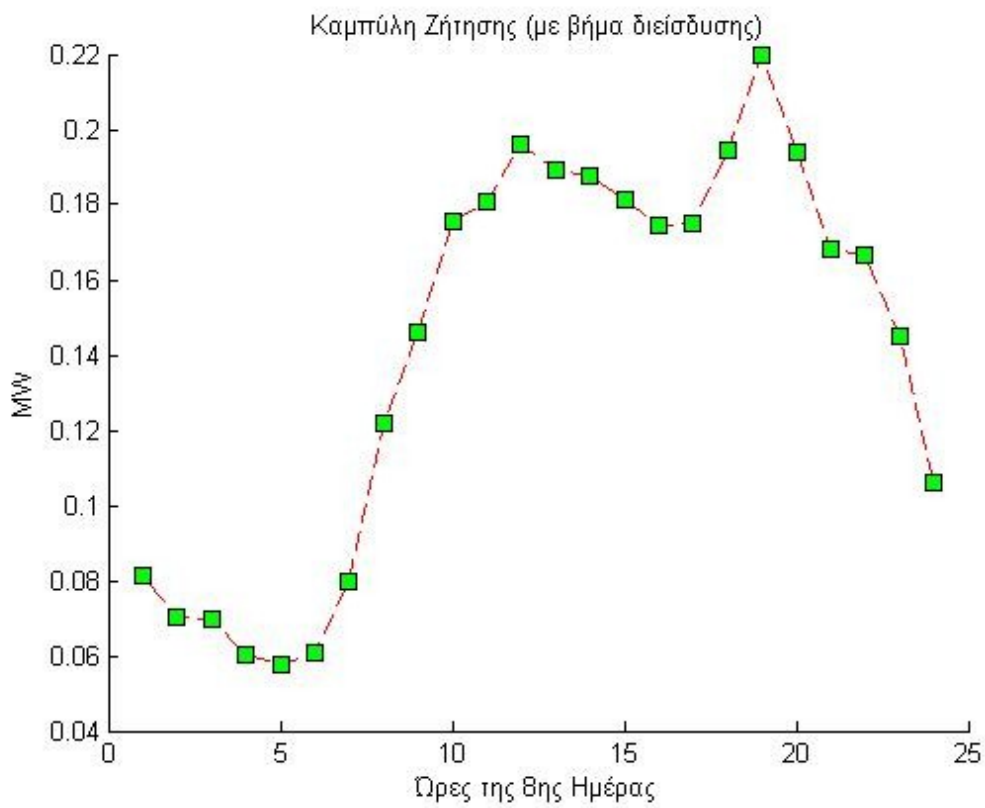
Διάγραμμα Π2.15



Διάγραμμα Π2.16

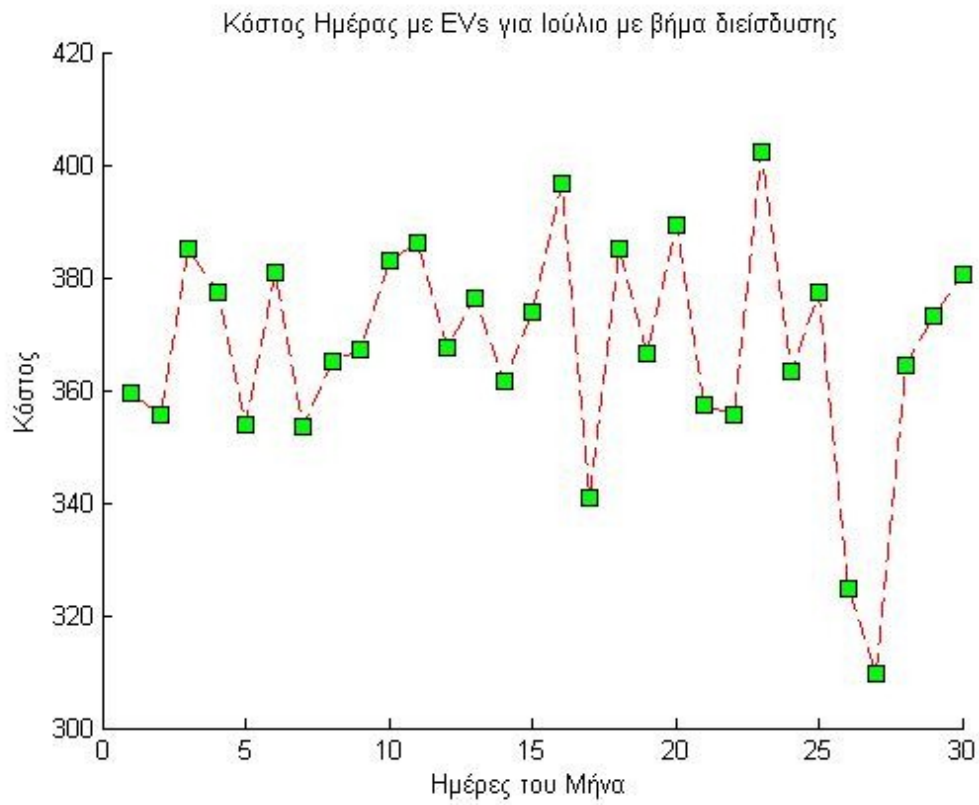


Διάγραμμα Π2.17

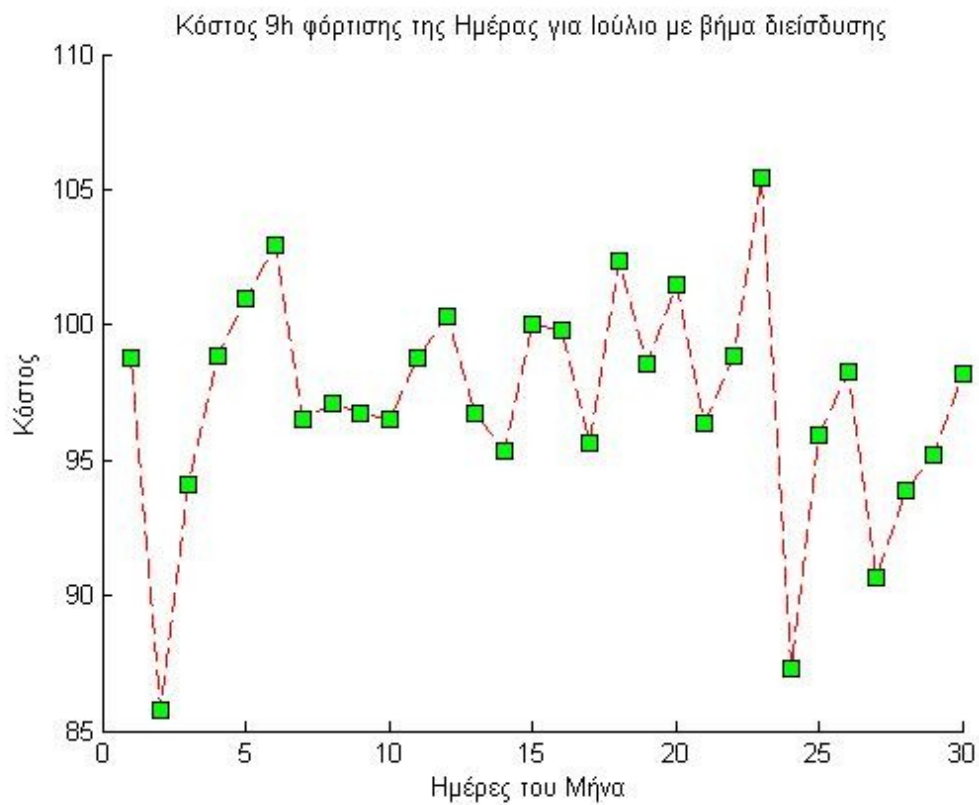


Διάγραμμα Π2.18

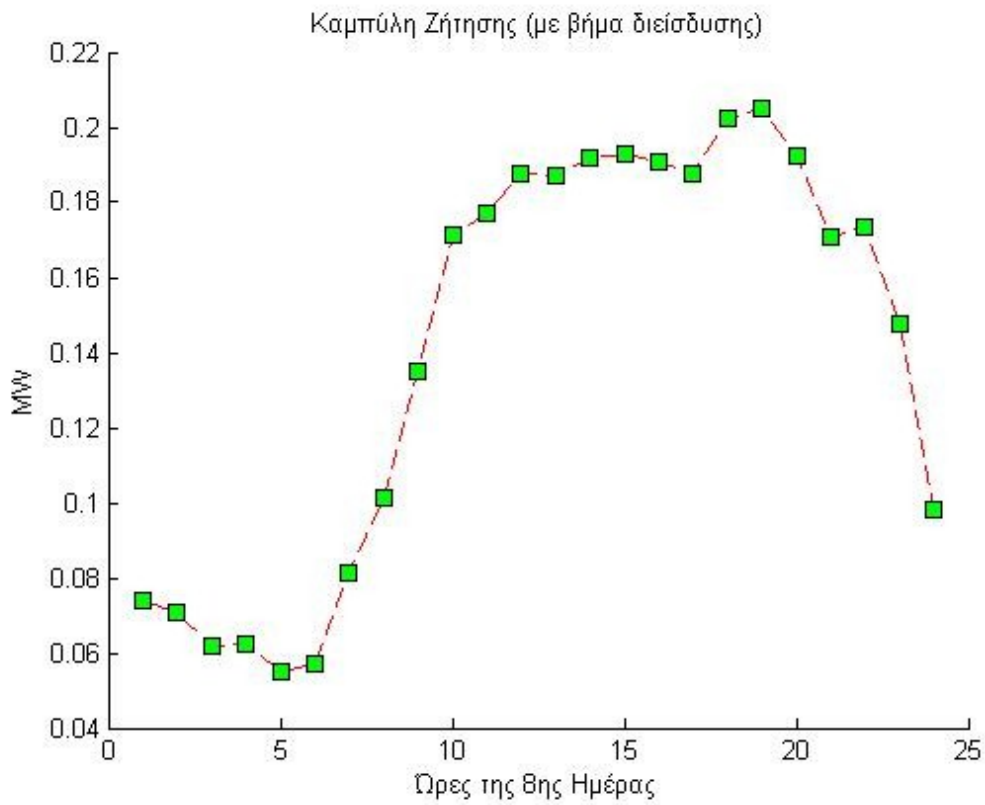




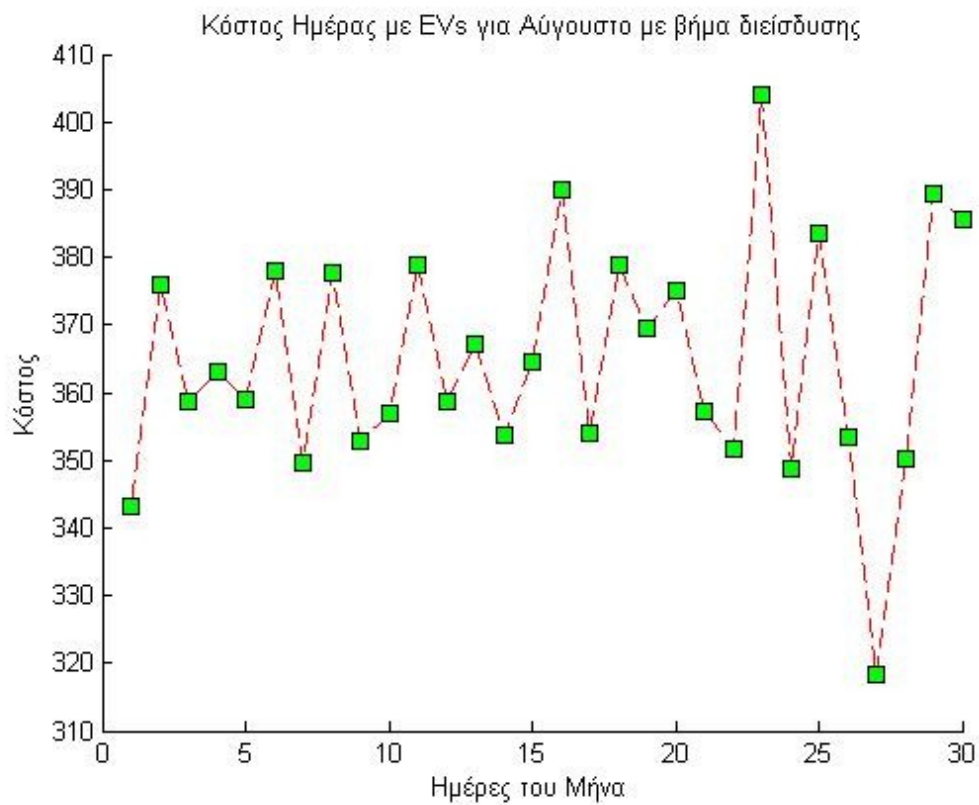
Διάγραμμα Π2.19



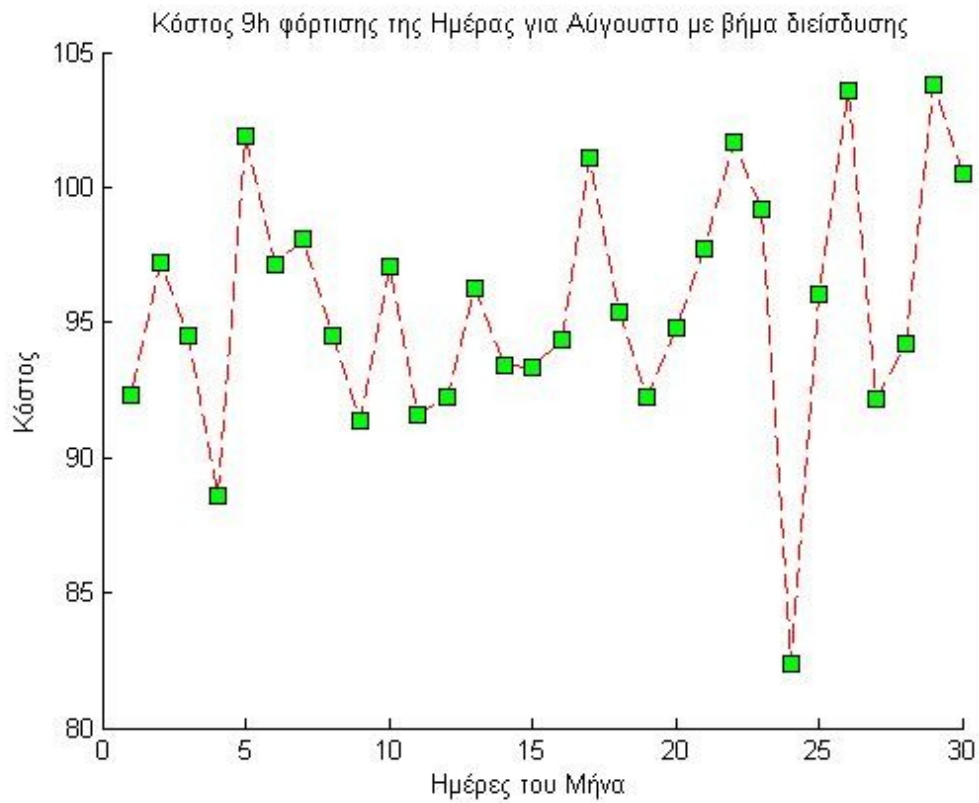
Διάγραμμα Π2.20



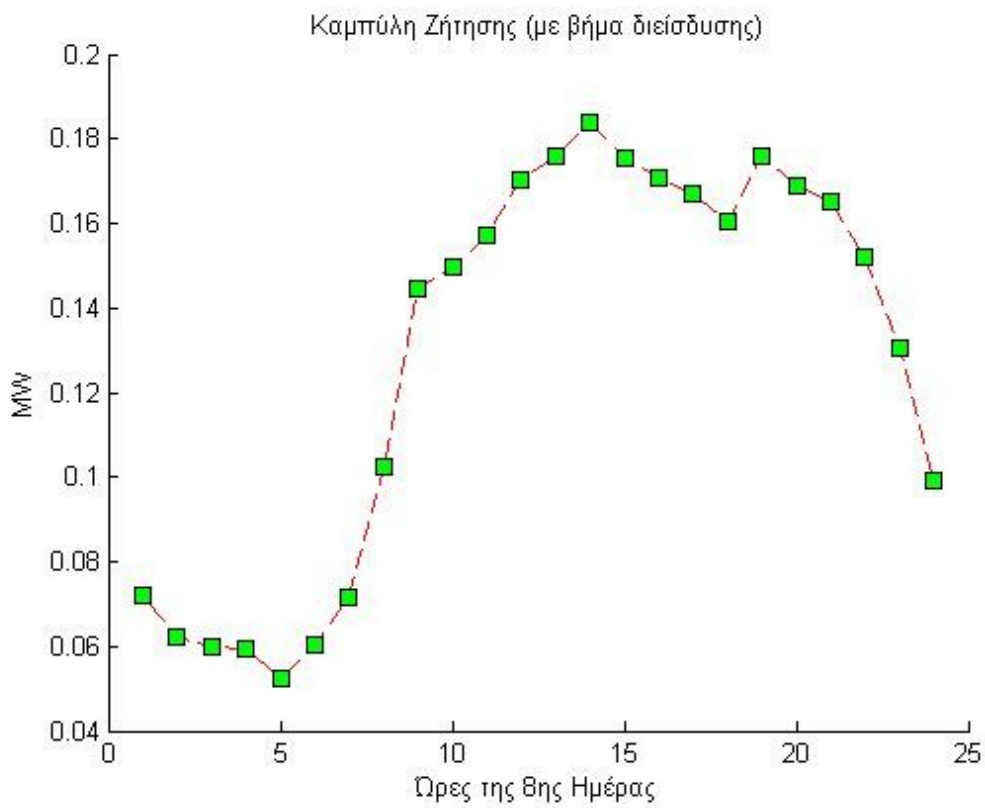
Διάγραμμα Π2.21



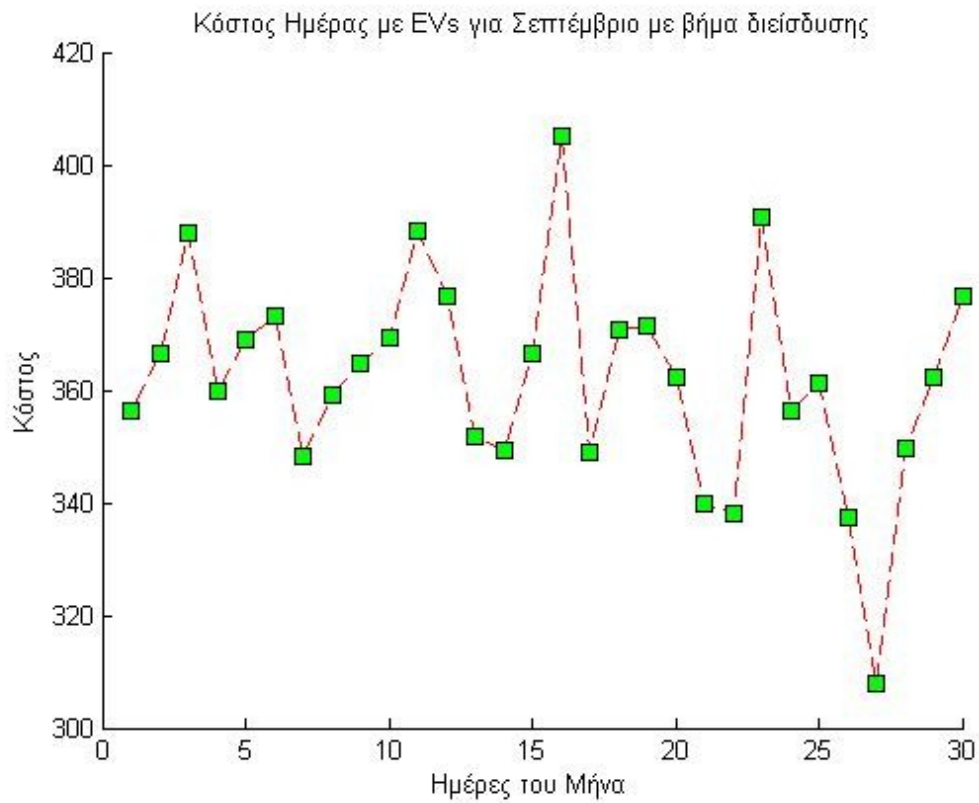
Διάγραμμα Π2.22



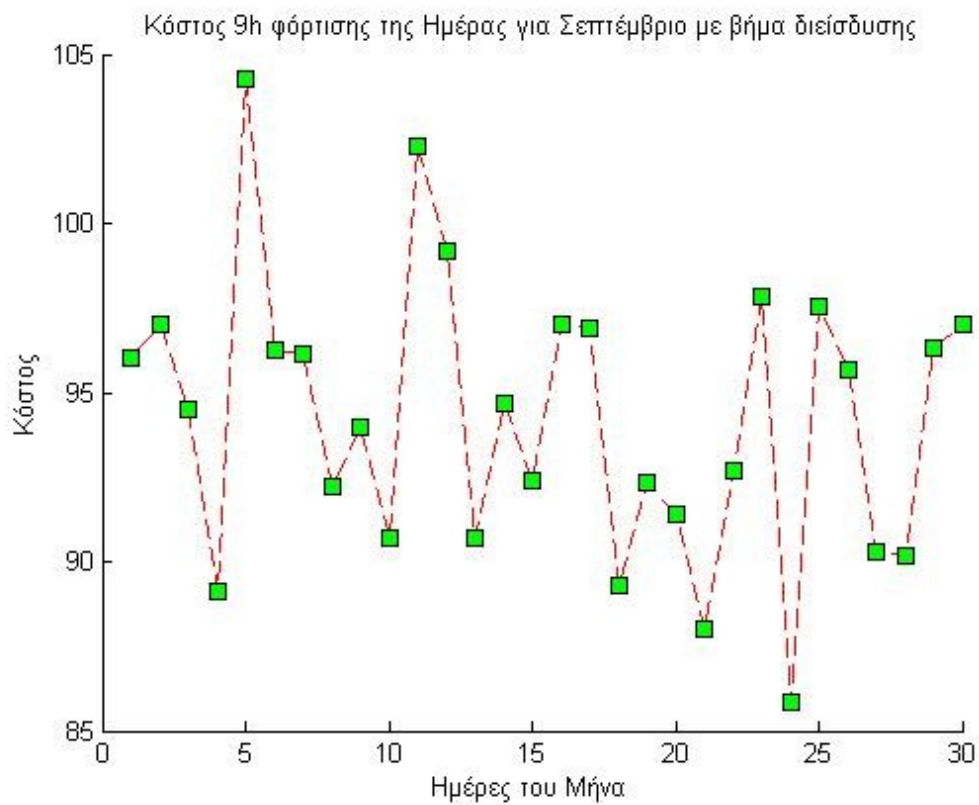
Διάγραμμα Π2.23



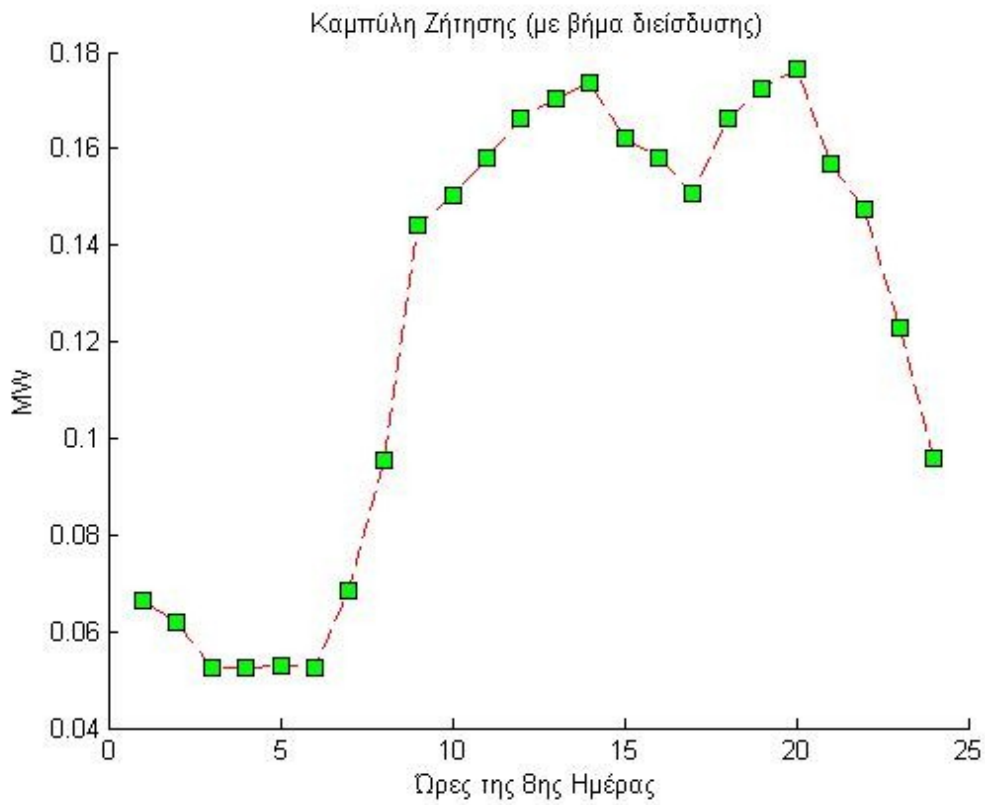
Διάγραμμα Π2.24



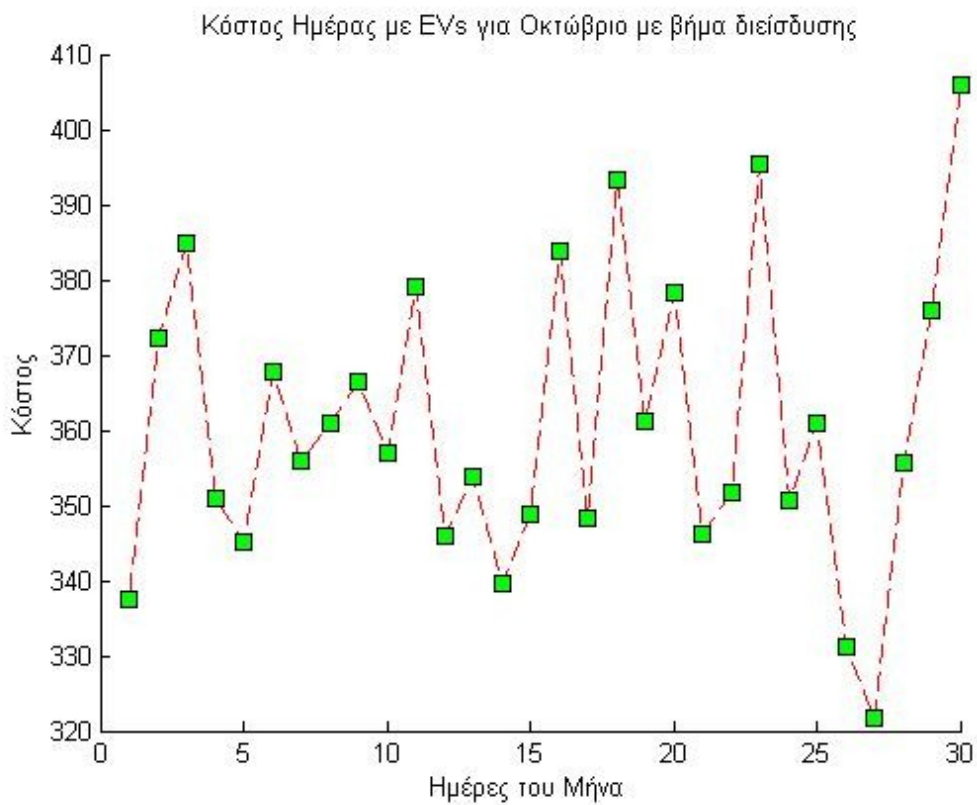
Διάγραμμα Π2.25



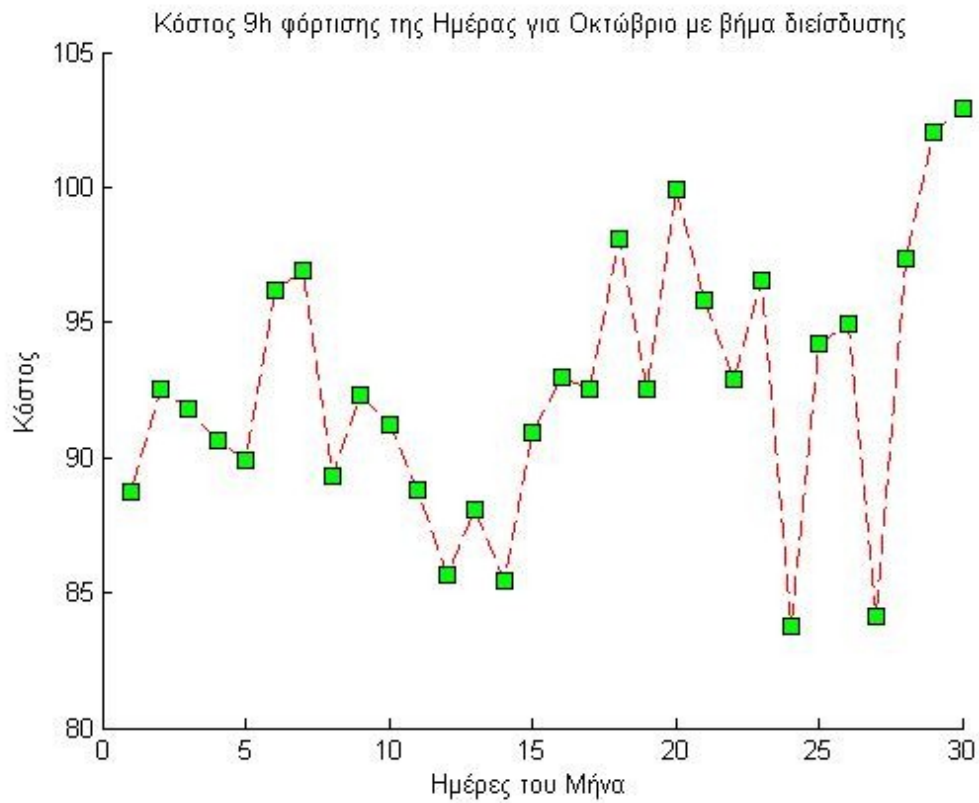
Διάγραμμα Π2.26



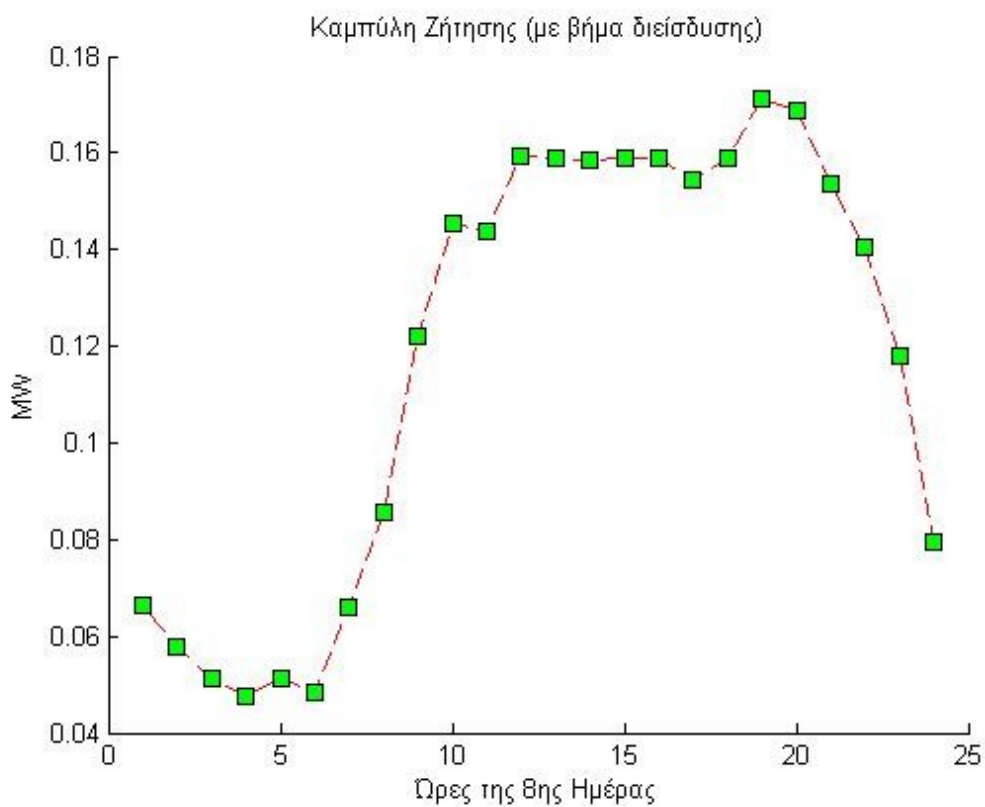
Διάγραμμα Π2.27



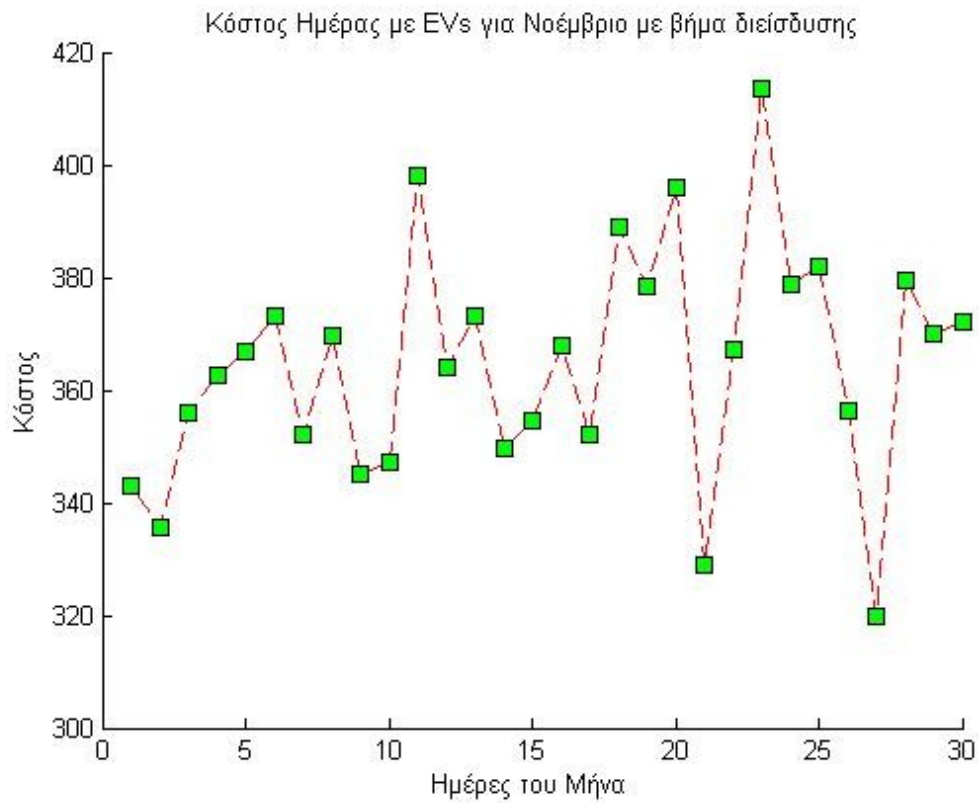
Διάγραμμα Π2.28



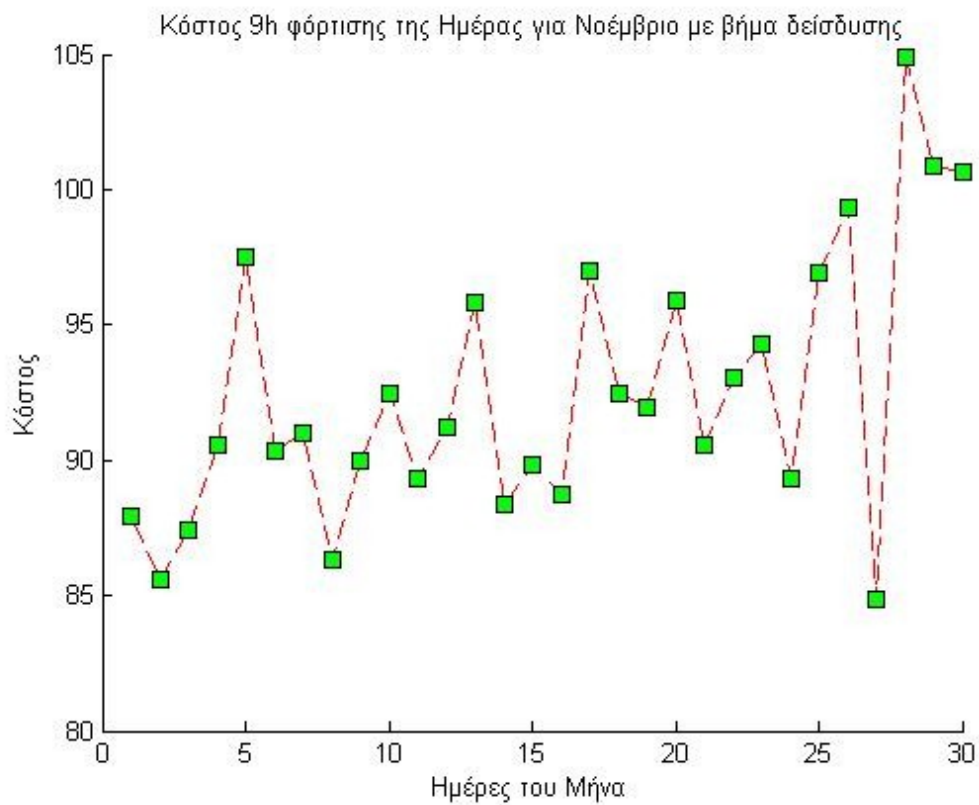
Διάγραμμα Π2.29



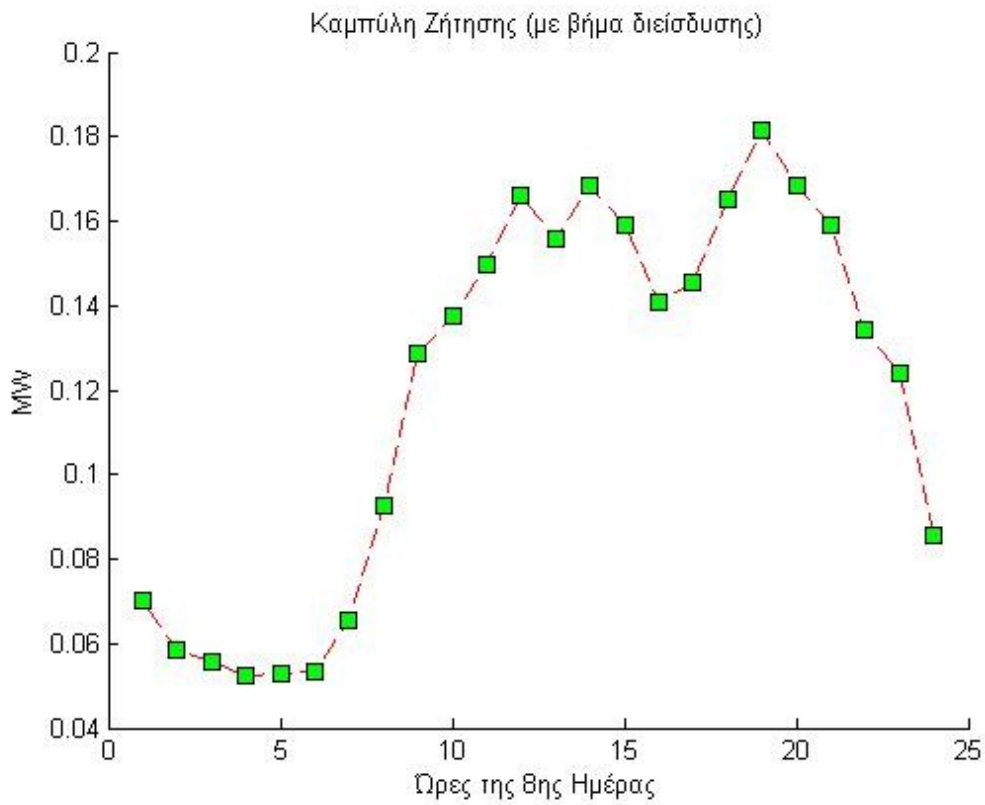
Διάγραμμα Π2.30



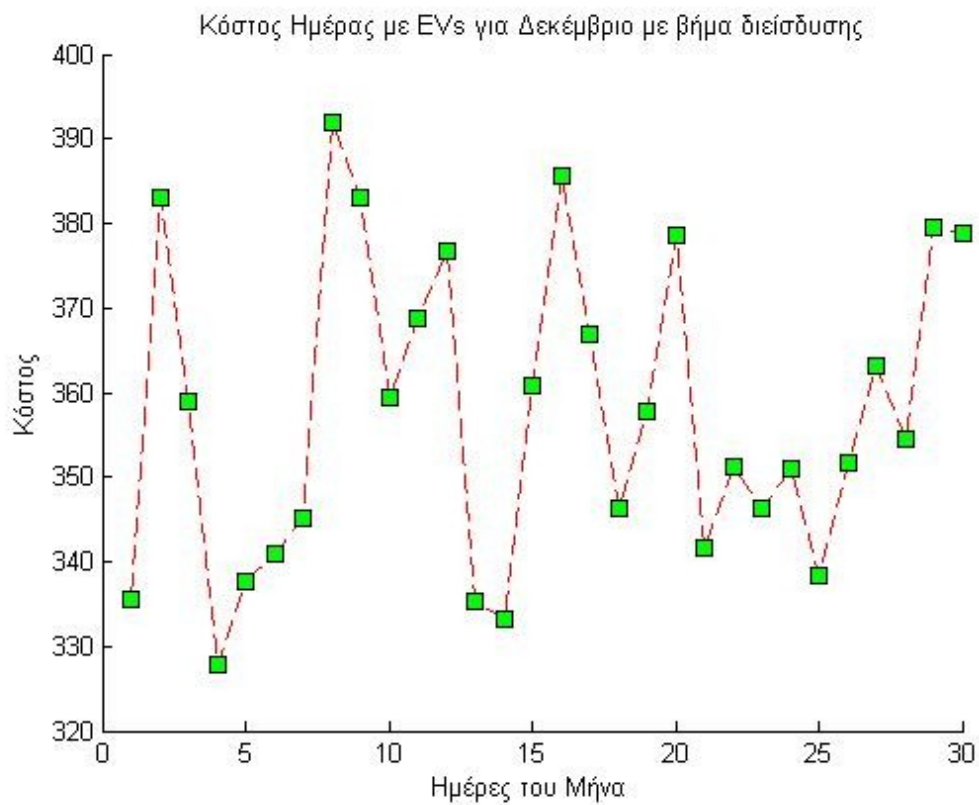
Διάγραμμα 2.31



Διάγραμμα 2.32

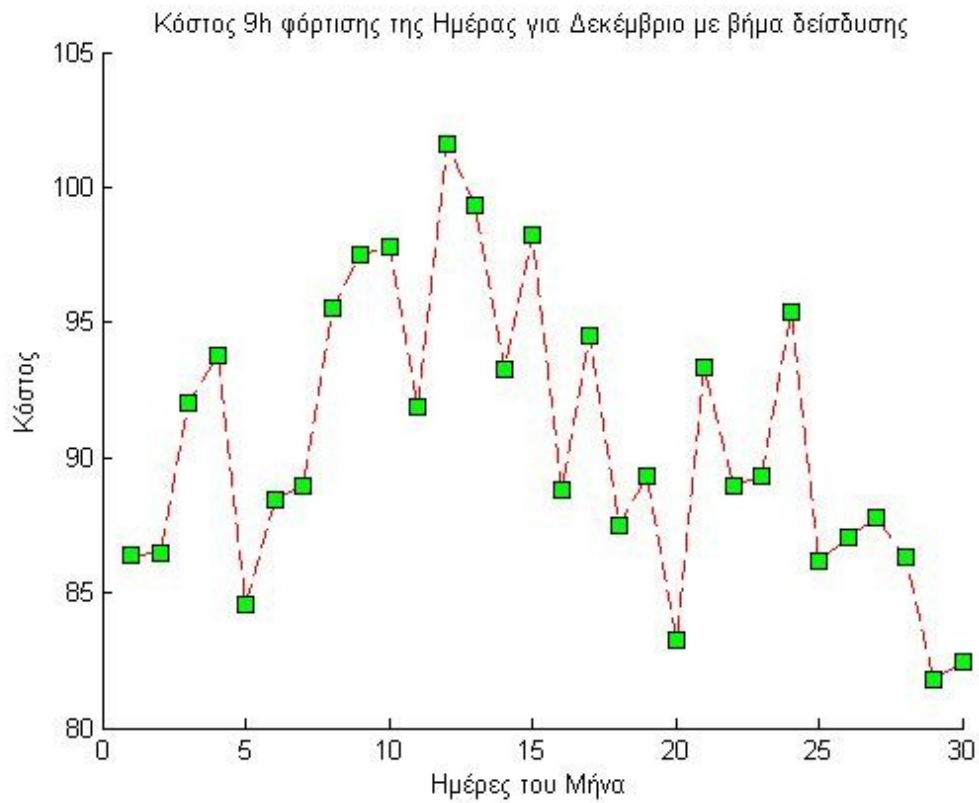


Διάγραμμα 2.33

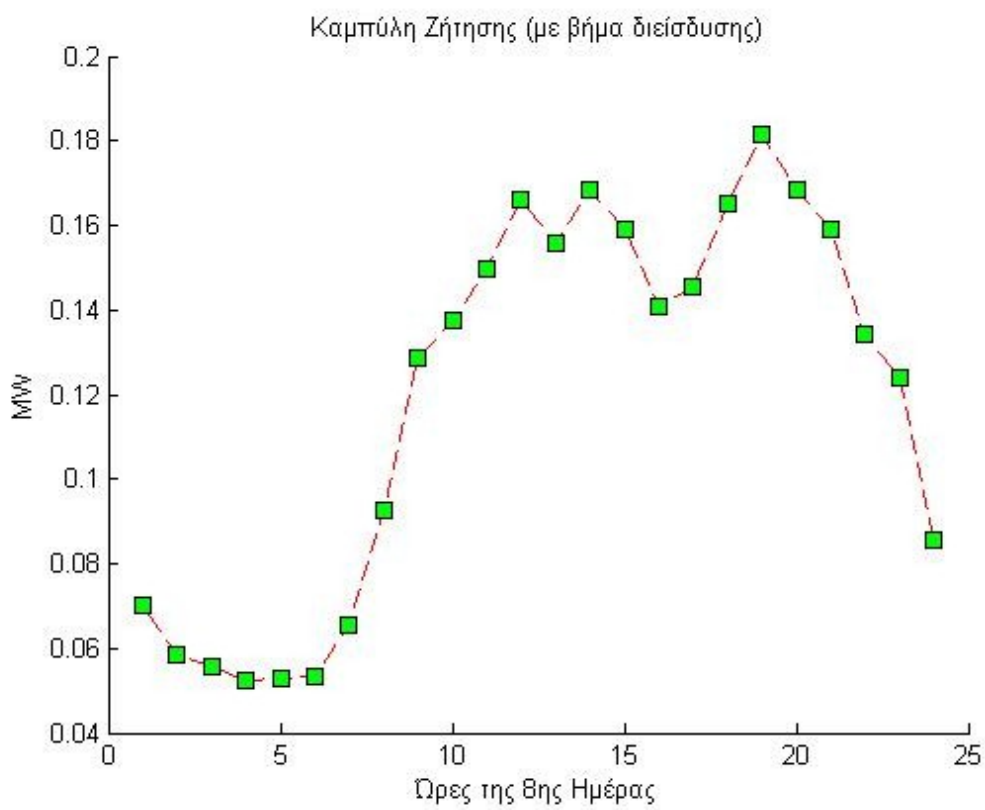


Διάγραμμα 2.34





Διάγραμμα 2.35



Διάγραμμα 2.36

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. Hadi Saadat, Power system analysis, PSA Publishing, 2004
- [2]. EURELECTRIC (Smart Grids and Networks of the future): <http://www2.eurelectric.org>
- [3]. Kang Seok Lee, Zong Woo Geem, A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: harmony search theory and practice, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Volume 194, Issues 36-38, 23 September 2005, Pages 3902-3933, ISSN 0045-7825, 10.1016/j.cma.2004.09.007.  
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045782504004682>)
- [4]. Kang Seok Lee, Zong Woo Geem, A new structural optimization method based on the harmony search algorithm, Computers & Structures, Volume 82, Issues 9-10, April 2004, Pages 781-798, ISSN 0045-7949, 10.1016/j.compstruc.2004.01.002.  
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004579490400029X>)
- [5]. Β. Παπαδιάς, Ανάλυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Ε.Μ.Π, 1985, vol.1.
- [6]. Κ. Βουρνάς and Γ. Κονταξής, Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. ΕΜΠ, 2001.
- [7]. Μ. Παπαδόπουλος, Παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Ε.Μ.Π, 1997.
- [8]. T. Weise, Global Optimization Algorithms– Theory and Application, 2nd ed.
- [9]. 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. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V4S-4G9GN5F-1/2/36a8498a8cf61517562aeaf2c8b2906d>
- [10]. <http://www.distributed-generation.com/technologies.htm>
- [11]. European SmartGrids Technology Platform. [www.smartgrids.eu/documents/vision.pdf](http://www.smartgrids.eu/documents/vision.pdf).
- [12]. [www.hachp.gr](http://www.hachp.gr), Ελληνικός Σύνδεσμος Συμπαράγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας
- [13]. G.Tao, M.I. Henwood, M. van Ooijen, An algorithm for combined heat and power economic dispatch, IEEE Trans. Power Syst. 11 (4) (1996) 1778-1784
- [14]. W. El-Khattan, M.M.A. Salama. "Distributed Generation Technologies, definitions and benefits". Electric Power Systems Research 71, pp. 119-128. 2004.
- [15]. Β.Κ. Παπαδιάς, Κ. Βουρνάς, Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και έλεγχος συχνότητας και τάσεως, εκδόσεις Συμμετρία, 1991
- [16]. Αντώνιος Γ.Τσικαλάκης, «Συμβολή στον προγραμματισμό λειτουργίας δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με μεγάλη διεύθυνση διεσπαρμένης και ανανεώσιμης παραγωγής και συσκευών αποθήκευσης», Διδακτορική διατριβή Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Ιούλιος 2008
- [17]. Estimating the Costs and Benefits of the Smart Grid  
A Preliminary Estimate of the Investment Requirements and the Resultant Benefits of a Fully Functioning Smart Grid, 2011 Technical Report, EPRI
- [18]. Αικατερίνη Βαλαλάκη, Επίδραση της τιμολόγησης των ΑΠΕ στα Μικροδίκτυα, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Απρίλιος 2010.
- [19]. 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.
- [20]. P.S.Rao, Combined heat and power economic dispatch: a direct solution, *Elect. Power Components Syst.* 34 (9) (2006) 1043-1056
- [21]. Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας & Δημοσίων Έργων, «Εθνικό Σχέδιο Κατανομής Δικαιωμάτων Εκπομπών (ΕΣΚΔΕ) για την Περίοδο 2005 - 2007 - Τελικό Σχέδιο προς της ΕΕ (30/12/2004)». Διαθέσιμο: <http://www.minenv.gr/4/41/g4107.html>
- [22]. Thomas Ackermann, Göran Andersson, Lennart Söder, Distributed generation: a definition, *Electric Power Systems Research*, Volume 57, Issue 3, 20 April 2001, Pages 195-204, ISSN 0378-7796, 10.1016/S0378-7796(01)00101-8.
- [23]. 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.
- [24]. European SmartGrids Technology Platform, Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future, 2006
- [25]. <http://en.wikipedia.org>
- [26]. Α. Καρακυριάκου. Βέλτιστος Προγραμματισμός Λειτουργίας Υβριδικού Συστήματος Φωτοβολταϊκών και Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας με Βάση την Ανάλυση Διακύμανσης του Ηλεκτρικού Φορτίου, διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ιούλιος 2009
- [27]. Σ. Κασμάς, Η επίδραση των συστημάτων διεσπαρμένης παραγωγής με τεχνολογίες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού – θερμότητας και αποθήκευσης καθώς και της φορολογίας άνθρακα σε ένα μικροδίκτυο βάσει του μοντέλου DER-CAM, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ιούλιος 2009.
- [28]. M. Fesanghary, M.M. Ardehali, A novel meta-heuristic optimization methodology for solving various types of economic dispatch problem, *Energy*, Volume 34, Issue 6, June 2009, Pages 757-766, ISSN 0360-5442, 10.1016/j.energy.2009.02.007. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544209000462>)
- [29]. M. Mahdavi, M. Fesanghary, E. Damangir, An improved harmony search algorithm for solving optimization problems, *Applied Mathematics and Computation*, Volume 188, Issue 2, 15 May 2007, Pages 1567-1579, ISSN 0096-3003, 10.1016/j.amc.2006.11.033. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0096300306015098>)
- [30]. 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.
- [31]. 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. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431108002330>)
- [32]. A.Vasebi, M. Fesanghary, S.M.T. Bathae, Combined heat and power economic dispatch by harmony search algorithm, *International Journal of Electrical Power & Energy*

- Systems, Volume 29, Issue 10, December 2007, Pages 713-719, ISSN 0142-0615, 10.1016/j.ijepes.2007.06.006.
- [33]. Mahamed G.H. Omran, Mehrdad Mahdavi, Global-best harmony search, Applied Mathematics and Computation, Volume 198, Issue 2, 1 May 2008, Pages 643-656, ISSN 0096-3003, 10.1016/j.amc.2007.09.004.
- [34]. Chia-Ming Wang, Yin-Fu Huang, Self-adaptive harmony search algorithm for optimization, Expert Systems with Applications, Volume 37, Issue 4, April 2010, Pages 2826-2837, ISSN 0957-4174, 10.1016/j.eswa.2009.09.008.
- [35]. Kaveh, S. Talatahari, Particle swarm optimizer, ant colony strategy and harmony search scheme hybridized for optimization of truss structures, Computers & Structures, Volume 87, Issues 5-6, March 2009, Pages 267-283, ISSN 0045-7949, 10.1016/j.compstruc.2009.01.003.
- [36]. Majid Jaberipour, Esmail Khorram, Two improved harmony search algorithms for solving engineering optimization problems, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, Volume 15, Issue 11, November 2010, Pages 3316-3331, ISSN 1007-5704, 10.1016/j.cnsns.2010.01.009.
- [37]. Guy Newman, Characterisation of virtual power plants, PhD thesis, University of Manchester, 2010
- [38]. Paulo Moisés Costa, Manuel A. Matos, J.A. Peças Lopes, Regulation of microgeneration and microgrids, Energy Policy, Volume 36, Issue 10, October 2008, Pages 3893-3904, ISSN 0301-4215, 10.1016/j.enpol.2008.07.013.
- [39]. Kai Zou, A.P. Agalgaonkar, K.M. Muttaqi, S. Perrera, Distribution System Planning with Incorporating DG Reactive Capability and system uncertainties, IEEE PES Trans. Sustainable Energy, 2011
- [40]. R. J. Konopinski, P. Vijayan, and V. Ajjarapu. "Extended reactive capability of DFIG wind parks for enhanced system performance". IEEE Trans. Power Syst. , vol. 24, pp. 1346-1355, Aug. 2009
- [41]. T. Lund, P. Sorensen, and J Eek, "Reactive power capability of a wind turbine with doubly fed induction generator", Wind Energy, vol. 10, pp. 379-394, Apr. 2007
- [42]. Κ. Τσατσάκης, Μελέτη μικροδικτύου με αυξημένη διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων, μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σεπτέμβριος 2010.
- [43]. Ιωάννα Φάμπιου, Βέλτιστη Ροής Ισχύος σε Δίκτυα Ηλεκτρικής Ενέργειας και σε Υβριδικούς Ενεργειακούς Διανομείς, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σεπτέμβριος 2008
- [44]. Ε. Μαριδάκη, Επίλυση Βέλτιστης Ροής Φορτίου σε Σ.Η.Ε υπό τον Περιορισμό των Εκπομπών NO<sub>x</sub> με την τεχνική του Διαδοχικού Γραμμικού Προγραμματισμού, Διπλωματική εργασία, , Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Οκτώβριος 2008
- [45]. Martin Geidl, Integrated Modeling and Optimization of Multi-Carrier Energy Systems, PhD dissertation, ETH Zurich, 2007
- [46]. ETSAP, Energy Technology systems analysis programme, © IEA ETSAP - Technology Brief E04 – May 2010 - www.etsap.org

- [47]. Vlachogiannis, J.G., Probabilistic Constrained Load Flow Considering Integration of Wind Power Generation and Electric Vehicles, Volume: 24 Issue:4, pages 1808 – 1817, ISSN: 0885-8950, Oct. 2009
- [48]. G. Anastasiadis, E. Voreadi, and N. D. Hatziargyriou, 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
- [49]. Hellenic Transmission System Operator S.A., [www.desmie.gr](http://www.desmie.gr)
- [50]. UNITED STATES OF AMERICA, FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION, 18 CFR Part 35, (Docket No. RM05-4-001; Order No. 661-A), Interconnection for Wind Energy, (Issued December 12, 2005)
- [51]. Κ.Θ.Δέρβος, Εισαγωγή στα ημιαγώγιμα υλικά και φωτοβολταϊκές διατάξεις, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2009
- [52]. <http://www.teslamotors.com/>
- [53]. <http://www.toyota.com/prius-hybrid/>
- [54]. <http://www.gartner.com/technology/home.jsp>
- [55]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Charging\\_station](http://en.wikipedia.org/wiki/Charging_station)
- [56]. Α. Βήχος, Σχεδίαση και βελτιστοποίηση κινητήρα μόνιμων μαγνητών για εφαρμογή ηλεκτροκίνησης, διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ιούνιος 2009
- [57]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Tesla\\_Roadster](http://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Roadster)
- [58]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Toyota\\_Prius](http://en.wikipedia.org/wiki/Toyota_Prius)
- [59]. Optimization Toolbox, Users Guide, Mathworks INC.
- [60]. C.C. Chan , K.T. Chau, Modern electric vehicle technology, University of Hong Kong, Oxford University Press.
- [61]. Neodymium magnet: History and manufacturing techniques. Wikipedia  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Neodymium\\_magnet](http://en.wikipedia.org/wiki/Neodymium_magnet)
- [62]. F. Libert, J. Soulard, “Design Study of Different Direct-Driven Permanent-Magnet Motors for a Low Speed Application”, Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics Trondheim, Norway, 2004.
- [63]. R. H. Staunton, S.C. Nelson et. Al. , “PM motor parametric design analyses for a Hybrid Electric Vehicle traction drive application” , Oak Ridge national laboratory, September 2004.
- [64]. K. Laskaris and A. Kladas, “High Torque Internal Permanent Magnet Motor for Electric Traction Applications”, Proceedings of the XVIII International Conference on Electrical Machines, Vilamoura, Portugal, 6-9 September 2008, Paper ID 1428.
- [65]. Ν. Γ. Μαράτος, Τεχνικές βελτιστοποιήσεως (Σημειώσεις), Αθήνα, 1990, Ε.Μ.Π.
- [66]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel\\_cell](http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell)
- [67]. <http://www.microturbine.com/>

- [68]. Jeremy Harrison, Distributed Generation Manager, Micro CHP (Combined Heat & Power) and its relevance to the gas industry, EA Technology
- [69]. <http://www.bcg.com/documents/file15404.pdf>
- [70]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Pareto\\_efficiency#Pareto\\_frontier](http://en.wikipedia.org/wiki/Pareto_efficiency#Pareto_frontier)
- [71]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Simplex\\_algorithm](http://en.wikipedia.org/wiki/Simplex_algorithm)
- [72]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Stochastic\\_optimization](http://en.wikipedia.org/wiki/Stochastic_optimization)
- [73]. <http://en.wikipedia.org/wiki/Heuristic>
- [74]. <http://en.wikipedia.org/wiki/Metaheuristic>
- [75]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Swarm\\_intelligence](http://en.wikipedia.org/wiki/Swarm_intelligence)
- [76]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Goal\\_programming](http://en.wikipedia.org/wiki/Goal_programming)
- [77]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Genetic\\_algorithms#The\\_building\\_block\\_hypothesis](http://en.wikipedia.org/wiki/Genetic_algorithms#The_building_block_hypothesis)
- [78]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Harmony\\_search](http://en.wikipedia.org/wiki/Harmony_search)