



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

**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**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σταμάτιος Δ. Κασμάς

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

Ανέστης Αναστασιάδης
Υ.Δ. Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2009



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

**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**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σταμάτιος Δ. Κασμάς

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

Ανέστης Αναστασιάδης
Υ.Δ. Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 8^η Ιουλίου 2009.

.....
Ν. Χατζηαργυρίου
Καθηγητής ΕΜΠ

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

.....
Σ. Καβατζά
Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2009

.....

Σταμάτιος Δ. Κασμάς

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

Copyright © Σταμάτιος Κασμάς, 2009.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία γίνεται μία προσπάθεια μοντελοποίησης συστημάτων διεσπαρμένης παραγωγής με τεχνολογίες συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού και τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα μικροδίκτυο με πραγματικά δεδομένα. Παράλληλα εξετάζεται και η επίδραση της φορολογίας του άνθρακα στη λειτουργία του μικροδικτύου.

Η διεσπαρμένη παραγωγή ορίζεται ως η παραγωγή ενέργειας από πολλές μικρές μονάδες που είναι διασυνδεδεμένες στο δίκτυο διανομής και βρίσκονται κοντά στο σημείο κατανάλωσης. Η συνεργασία αυτών των μονάδων για την κάλυψη του φορτίου ενός ή μιας ομάδας καταναλωτών αποτελεί ένα μικροδίκτυο. Παράλληλα η εξέλιξη των μικροδικτύων με την εγκατάσταση εξελιγμένων συστημάτων μέτρησης και επικοινωνίας οδηγεί στα έξυπνα δίκτυα.

Στις τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής ανήκουν μονάδες εσωτερικής καύσης, αεριοστρόβιλοι καθώς και νεότερες τεχνολογίες όπως οι κυψέλες καυσίμου και οι μικροτουρμπίνες αλλά και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ορισμένες από αυτές τις τεχνολογίες έχουν τη δυνατότητα συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού. Πολύ σημαντική είναι η συμβολή αυτών των τεχνολογιών σε ένα μικροδίκτυο καθώς πραγματοποιείται η κάλυψη ηλεκτρικών αλλά ταυτόχρονα θερμικών και ψυκτικών φορτίων χωρίς την κατανάλωση επιπλέον ενέργειας. Έτσι επιτυγχάνεται μεγάλη εξοικονόμηση σε κόστος αλλά και σε εκπομπές ρύπων. Ακόμη οι τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας βοηθούν στην οικονομικότερη κάλυψη του φορτίου και με την προϋπόθεση της μείωσης του κόστους τους φαίνονται να είναι πολλά υποσχόμενες. Υπάρχουν αρκετές τεχνολογίες αποθήκευσης, όμως εδώ χρησιμοποιήθηκαν μόνο μπαταρίες οξέως – μολύβδου που είναι οι πλέον κατάλληλες για εφαρμογή σε μικροδίκτυα.

Για να μοντελοποιηθούν όλα αυτά τα συστήματα έγινε χρήση του μοντέλου DER-CAM. Το μοντέλο αυτό αναπτύχθηκε για πρώτη φορά στα εργαστήρια του Berkeley και εξελίσσεται συνεχώς. Ουσιαστικά αποτελείται από ένα κώδικα βελτιστοποίησης γραμμένο στο πρόγραμμα GAMS στο οποίο εισάγουμε δεδομένα για τα φορτία καθώς και τεχνοοικονομικά δεδομένα για τον εξοπλισμό και μας δίνει σαν αποτέλεσμα την οικονομικότερη λύση για την κάλυψη του φορτίου.

Για να αναδειχθεί όσο το δυνατόν καλύτερα η επίδραση των τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής και αποθήκευσης δημιουργήθηκαν πολλά σενάρια που περιελάμβαναν διάφορους συνδυασμούς των τεχνολογιών. Παράλληλα εξετάστηκαν και δύο διαφορετικές τιμολογιακές πολιτικές. Επίσης εξετάστηκε η επίδραση της φορολογίας του άνθρακα με στόχο την εύρεση εκείνης της λύσης που θα εξασφάλιζε τη μείωση των εκπομπών του CO₂.

Σκοπός της συγκεκριμένης μελέτης είναι να αναδείξει τα οφέλη που μπορούν να προκύψουν με τη χρήση τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής και αποθήκευσης από οικονομική αλλά και περιβαλλοντολογική σκοπιά.

Λέξεις κλειδιά: μικροδίκτυο, έξυπνο δίκτυο, διεσπαρμένη παραγωγή, συμπαραγωγή, αποθήκευση, φορολογία άνθρακα, DER-CAM, GAMS.

ABSTRACT

This work is an attempt of modeling distributed energy resources with technologies of combined heat and power and electricity storage technologies to a microgrid with real data. At the same time the impact of carbon taxation is examined on the functioning of the microgrid.

Distributed generation is defined as the production of energy from a lot of small units that are connected to the distribution system and are located near the load. The cooperation of those units to meet the load of one or more consumers constitutes a microgrid. Moreover the development of the microgrids with the installation of advanced metering and communication systems leads to the concept of smart grids.

Units or internal combustion, gas turbines, newer technologies like fuel cells and microturbines and renewable energy sources are included in the distributed energy resources. Some of those technologies have the possibility of combined heat and power generation. The contribution of those technologies in a microgrid is very important as they are able of covering electrical as well as heating and cooling loads at the same time without the consumption of additional energy. In this way we achieve significant savings in cost and carbon emissions. The electricity storage technologies help in meeting the load more economically too. Reducing their cost, they will be a lot promising. There are plenty of those technologies but in this study we use only lead-acid batteries which are the most suitable for applications to microgrids.

In order to model those systems we use the DER-CAM (Distributed Energy Resources – Customer Adoption Model). This model was developed for the first time in the Berkeley National Laboratory and it develops continuously. It is mainly a code of optimization written in GAMS (Generic Algebraic Modeling System), in which we import data for the load as well as techno-economical data for the available equipment and we receive the most economical solution to meet the load.

To revile the effects of distributed energy resources and storage technologies a lot of scenarios were created, involving various combinations of the technologies. At the same time two different pricing policies were examined. The effects of carbon taxation were also examined in order to find a solution that would ensure the biggest reduction in carbon emissions.

The purpose of this study is to highlight the benefits of using distributed energy resources and electricity storage technologies from economic but also environmental viewpoint.

Keywords: microgrid, smart grid, distributed generation, cogeneration, storage, carbon taxation, DER-CAM, GAMS

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στη σημερινή εποχή γίνεται ολοένα και περισσότερο λόγος για ενεργειακά – περιβαλλοντικά θέματα. Οι φυσικοί πόροι αρχίζουν να μειώνονται σημαντικά και η μόλυνση του περιβάλλοντος εντείνεται συνεχώς. Γίνονται συνεχώς προσπάθειες για βελτίωση της λειτουργίας των ηλεκτρικών δικτύων με κύριο άξονα την εξοικονόμηση ενέργειας. Παράλληλα με την ραγδαία αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης προκύπτουν θέματα αξιοπιστίας παροχής της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι τεχνολογικές εξελίξεις στον ενεργειακό τομέα συμβάλλουν τα μέγιστα γι' αυτό το σκοπό. Υπάρχει μεγάλη ανάγκη για εκσυγχρονισμό των υπαρχόντων δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας τόσο για να μπορούν να καλύπτουν αξιόπιστα όλα τα φορτία αλλά και για να γίνουν φιλικότερα προς το περιβάλλον επιτρέποντας τη διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Την ίδια στιγμή χρειάζεται και αλλαγή στη φιλοσοφία του καθενός από εμάς στον τρόπο που καταναλώνουμε την ενέργεια. Έτσι στα πλαίσια της διπλωματικής μου εργασίας προσπάθησα να αναδείξω ότι χρησιμοποιώντας νέες τεχνολογίες και ιδέες υπάρχει τρόπος για να περιοριστεί το λεγόμενο ενεργειακό πρόβλημα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία αποτελεί τη Διπλωματική μου Εργασία στα πλαίσια των σπουδών μου στο τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ υπό την επίβλεψη του καθηγητή του τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος, κ. Νικόλαο Δ. Χατζηαργυρίου, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεση της εργασίας. Με την ευκαιρία αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Ανέστη Αναστασιάδη, για τη βοήθεια, τις πολύτιμες συμβουλές, την υποστήριξη και την καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Τέλος, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου που με στήριζαν και με συμβούλευαν σε κάθε βήμα της φοιτητικής μου ζωής.

Αθήνα, Ιούλιος 2009

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ABSTRACT.....	7
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	8
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	9
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	10
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	13
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	15
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΩΝΥΜΩΝ	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ	17
1.1 Εισαγωγή.....	17
1.2 Έλεγχος των μικροδικτύων	18
1.3 Μικροδίκτυα και περιβάλλον	19
1.4 Μικροδίκτυα στην Ελλάδα	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΞΥΠΝΑ ΔΙΚΤΥΑ	22
2.1 Εισαγωγή.....	22
2.2 Ορισμός - Χαρακτηριστικά.....	23
2.3 Παράγοντες που οδηγούν στην ανάπτυξη των έξυπνων δικτύων στην Ευρώπη ...	24
2.4 Η μετάβαση από το σήμερα στο αύριο	24
2.5 Δημιουργία έξυπνων δικτύων	27
2.6 Έξυπνοι μετρητές	29
2.7 Μοντέλο ίντερνετ	30
2.8 Επενδύσεις για την ανάπτυξη των έξυπνων δικτύων	30
2.9 Τα έξυπνα δίκτυα ανά τον κόσμο.....	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ.....	33
3.1 Εισαγωγή.....	33
3.2 Τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής.....	34
3.3 Περιγραφή τεχνολογιών που χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα μελέτη	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	40
4.1 Εισαγωγή.....	40
4.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της συμπαραγωγής	42
4.3 Τεχνικές συμπαραγωγής	45
4.4 Περιγραφή τεχνολογιών CHP που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη μελέτη	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	54
5.1 Εισαγωγή.....	54
5.2 Μπαταρίες	56
5.2.1 Μπαταρίες οξέως μολύβδου	57
5.2.2 Μπαταρίες νικελίου-καδμίου (Ni-Cd).....	59
5.2.3 Μπαταρίες και φωτοβολταϊκά	59
5.2.4 Μπαταρίες ροής	61
5.2.5 Μπαταρίες λιθίου-ιόντος (Li-Ion)	62
5.2.6 Μπαταρίες θειούχου νατρίου (NaS)	63

5.2.7 Μπαταρίες μετάλλου-αέρος (metal-air)	63
5.3 Στρεφόμενες μάζες-σφόνδυλοι (flywheels)	64
5.4 Υπερπυκνωτές (super-capacitors)	65
5.5 Αντλησιοταμίευση (pumped hydro storage)	65
5.6 Συστήματα συμπιεσμένου αέρα (CAES)	66
5.7 Υπεραγώγιμα υλικά – μαγνητική αποθήκευση (SMES).....	66
5.8 Σύγκριση των διαφόρων μεθόδων αποθήκευσης.....	67
5.9 Άλλες μορφές αποθήκευσης	70
5.9.1 Θερμική αποθήκευση	70
5.9.2 Αποθήκευση υδρογόνου σε κυψέλες καυσίμου	71
5.10 Ηλεκτρική αποθήκευση στην Ελλάδα	71
5.10.1 Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ.....	72
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ	74
6.1 Εισαγωγή.....	74
6.2 Το φαινόμενο του θερμοκηπίου	75
6.3 Χημική σύσταση και ιδιότητες CO ₂	77
6.4 Συμβολή της ηλεκτροπαραγωγής στο φαινόμενο του θερμοκηπίου	78
6.5 Συμβολή διεσπαρμένης παραγωγής και συμπαραγωγής στη μείωση των εκπομπών CO ₂	79
6.6 Προσέγγιση στη συγκεκριμένη μελέτη	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: DER – CAM / GAMS.....	81
7.1 DER – CAM.....	81
7.2 GAMS	84
7.2.1 Γενικά στοιχεία.....	84
7.2.2 Δομή ενός προγράμματος στο GAMS.....	87
7.2.3 Διασύνδεση GAMS με άλλα προγράμματα	88
7.2.4 Επιλογή GAMS για τη δημιουργία του συγκεκριμένου μοντέλου	89
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.....	91
8.1 Εισαγωγή.....	91
8.2 Μοντελοποίηση ηλεκτρικής αποθήκευσης	91
8.3 Υποθέσεις και περιορισμοί του προγράμματος	92
8.4 Μαθηματική διατύπωση.....	93
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	105
9.1 Φορτία	105
9.1.1 Εισαγωγή	105
9.1.2 Επιλογή του πελάτη.....	105
9.1.3 Προσαρμογή των δεδομένων και του κώδικα	106
9.2 Τεχνολογίες	111
9.2.1 Τεχνολογίες παραγωγής	111
9.2.2 Τεχνολογίες αποθήκευσης.....	112
9.3 Τιμολογιακά δεδομένα	113
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	115
10.1 Σενάρια.....	115
10.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων	117

10.3 Συγκρίσεις αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα	131
10.4 Οικονομική αξιολόγηση επένδυσης για το σενάριο A2.....	136
ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	138
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	139

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1. Σχηματική αναπαράσταση ενός μικροδικτύου.....	17
Εικόνα 1.2. Διάγραμμα ροής μικροδικτύου.....	19
Εικόνα 1.3. Πιλοτικό μικροδίκτυο Κύθνου	21
Εικόνα 2.1. Δίκτυα του σήμερα και του αύριο	26
Εικόνα 2.2. Έξυπνο δίκτυο	27
Εικόνα 2.3. Επενδύσεις για τις υποδομές στον τομέα παροχής ενέργειας	31
Εικόνα 2.4. Έξυπνο σπίτι (smart home)	31
Εικόνα 3.1. Διεσπαρμένη παραγωγή	33
Εικόνα 3.2. Αύξηση της αξιοπιστίας παροχής από την διεσπαρμένη παραγωγή.....	34
Εικόνα 3.3. Αρχή λειτουργίας φωτοβολταϊκών.....	38
Εικόνα 4.1. Σύγκριση συμβατικού συστήματος παραγωγής με ένα σύστημα συμπαραγωγής.....	41
Εικόνα 4.2. Παλινδρομική μηχανή εσωτερικής καύσης.....	48
Εικόνα 4.3. Διάγραμμα ροής παλινδρομικής γεννήτριας	49
Εικόνα 5.1. Τεχνολογίες αποθήκευσης.....	56
Εικόνα 5.2. Διάρκεια ζωής συναρτήσει του βάθους εκφόρτισης των μπαταριών οξέως- μολύβδου	57
Εικόνα 5.3. Εγκατάσταση μπαταριών οξέως – μολύβδου στην Καλιφόρνια.....	57
Εικόνα 5.4. Διάταξη μπαταρίας ροής	61
Εικόνα 5.5. Συστήματα μπαταριών ροής στην Ιαπωνία	62
Εικόνα 5.6. Εγκαταστάσεις μπαταριών θειούχου νατρίου	63
Εικόνα 5.7. Τυπική μορφή αντλησιοταμιευτικού συστήματος	65
Εικόνα 5.8. Σύστημα συμπιεσμένου αέρα	66
Εικόνα 5.9. Εξομάλυνση αιχμών της καμπύλης διάρκειας φορτίου μέσω της ηλεκτρικής αποθήκευσης.....	68
Εικόνα 5.10. Κάλυψη φορτίου από ΑΠΕ σε συνδυασμό με αποθήκευση	72
Εικόνα 5.11. Κάλυψη οικιακού φορτίου από Φ/Β σε συνδυασμό με αποθήκευση.....	73
Εικόνα 6.1. Εκπομπές ρύπων στην ηλεκτροπαραγωγή	74
Εικόνα 6.2. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου	75
Εικόνα 6.3. Χημική σύσταση CO ₂	77
Εικόνα 7.1. Δομή μοντέλου DER-CAM.....	82
Εικόνα 7.2. Ενεργειακή ροή από την παραγωγή στην κατανάλωση με το DER-CAM ..	83
Εικόνα 10.1. Ενεργειακό ισοζύγιο υπό μορφή διαγράμματος Sankey	119
Διάγραμμα 6.1. Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στην ΕΕ	76
Διάγραμμα 6.2. Συνεισφορά αερίων θερμοκηπίου	77
Διάγραμμα 6.3. Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου των ανεπτυγμένων χωρών που σχετίζονται με την καύση ορυκτών καυσίμων ανά τομέα το 2004	78
Διάγραμμα 9.1. Μέσο ηλεκτρικό φορτίο	108
Διάγραμμα 9.2. Μέσο θερμικό φορτίο	108
Διάγραμμα 9.3. Μέσο φορτίο κλιματισμού	109

Διάγραμμα 9.4. Συνολικό φορτίο για τυπική μέρα Ιανουαρίου	109
Διάγραμμα 9.5. Συνολικό φορτίο για τυπική μέρα Ιουλίου	110
Διάγραμμα 10.1. Κάλυψη ηλεκτρικού φορτίου για τυπική μέρα Ιανουαρίου.....	119
Διάγραμμα 10.2. Κάλυψη φορτίου κλιματισμού για τυπική μέρα Ιανουαρίου.....	120
Διάγραμμα 10.3. Κάλυψη θερμικού φορτίου για τυπική μέρα Ιανουαρίου	121
Διάγραμμα 10.4. Κάλυψη συνολικού φορτίου για τυπική μέρα Ιανουαρίου	121
Διάγραμμα 10.5. Κάλυψη ηλεκτρικού φορτίου για τυπική μέρα Ιουλίου.....	122
Διάγραμμα 10.6. Κάλυψη φορτίου κλιματισμού για τυπική μέρα Ιουλίου.....	122
Διάγραμμα 10.7. Κάλυψη φορτίου ηλεκτρισμού και κλιματισμού για τυπική μέρα Ιουλίου.....	123
Διάγραμμα 10.8. Κάλυψη θερμικού φορτίου για τυπική μέρα Ιουλίου	124
Διάγραμμα 10.9. Κάλυψη συνολικού φορτίου για τυπική μέρα Ιουλίου	124
Διάγραμμα 10.10. Κάλυψη συνολικού φορτίου για τυπική μέρα Ιουλίου με φόρο άνθρακα 0,9 \$/kg	129
Διάγραμμα 10.11. Αντικειμενική συνάρτηση (συνολικό κόστος).....	131
Διάγραμμα 10.12. Ποσοστό κάλυψης του φορτίου από τις εγκατεστημένες μονάδες.	132
Διάγραμμα 10.13. Αγορές ηλεκτρισμού από το μακροδίκτυο	132
Διάγραμμα 10.14. Αγορές φυσικού αερίου από το μακροδίκτυο.....	133
Διάγραμμα 10.15. Συνολικά εγκατεστημένη ισχύς εντός του μικροδικτύου	133
Διάγραμμα 10.16. Συνολικές εκπομπές CO ₂	134
Διάγραμμα 10.17. Χωρητικότητα εγκατεστημένων μπαταριών οξέως-μολύβδου.....	134
Διάγραμμα 10.18. Σύγκριση με το σενάριο ‘do nothing’ για την τιμολογιακή πολιτική Α	135

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1. Χαρακτηριστικά τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής.....	35
Πίνακας 3.2. Διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής στις ΗΠΑ.....	36
Πίνακας 4.1. Χαρακτηριστικά τεχνολογιών συμπαραγωγής.....	48
Πίνακας 5.1. Διατάξεις αποθήκευσης.....	55
Πίνακας 5.2. Παράμετροι μπαταριών που χρησιμοποιήθηκαν στον κώδικα	56
Πίνακας 5.3. Βασικά χαρακτηριστικά και κόστη μπαταριών.....	64
Πίνακας 5.4. Σύγκριση τεχνολογιών αποθήκευσης.....	69
Πίνακας 5.5. Παράμετροι θερμικής αποθήκευσης	70
Πίνακας 6.1. Ιδιότητες CO ₂	78
Πίνακας 7.1. Δομή ενός μοντέλου GAMS	88
Πίνακας 9.1. Τύποι ημερών ανά μήνα	106
Πίνακας 9.2. Τεχνολογίες παραγωγής	112
Πίνακας 9.3. Χαρακτηριστικά μπαταριών οξέως - μολύβδου.....	112
Πίνακας 9.4. Τιμολόγιο TOUT2B.....	113
Πίνακας 9.5. Χρεώσεις φυσικού αερίου	113
Πίνακας 9.6. Τιμή καυσίμων	114
Πίνακας 10.1. Αποτελέσματα για χρεώσεις με προκαθορισμένο τιμολόγιο	117
Πίνακας 10.2. Αποτελέσματα για το τιμολόγιο CalPX	125
Πίνακας 10.3. Αποτελέσματα για προκαθορισμένο τιμολόγιο με φόρο άνθρακα 0,27 \$/kg	126
Πίνακας 10.4. Αποτελέσματα για προκαθορισμένο τιμολόγιο με φόρο άνθρακα 0,9 \$/kg	128
Πίνακας 10.5. Αποτελέσματα ειδικών σεναρίων.....	131

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΩΝΥΜΩΝ

- AC** alternating current – εναλλασσόμενο ρεύμα
AML algebraic modeling language – αλγεβρική γλώσσα μοντελοποίησης
ΑΠΕ – Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
CERTS Consortium for Electric Reliability Technology Solutions
CHP combined heat and power – συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού
COP coefficient of performance – συντελεστής απόδοσης θερμικής μετατροπής
DC direct current – συνεχές ρεύμα
DER distributed energy resources – διεσπαρμένες πηγές ενέργειας
DER-CAM Distributed Energy Resources Customer Adoption Model – Μοντέλο υιοθέτησης Διεσπαρμένων Πηγών Ενέργειας από των καταναλωτή
DG distributed generation – διεσπαρμένη παραγωγή
GAMS General Algebraic Modeling System – Γενικό Αλγεβρικό Σύστημα Μοντελοποίησης
HVAC Heating Ventilating Air Conditioning – Θέρμανση Εξαερισμός Κλιματισμός
kW kilowatt (ισχύς)
kWh kilowatt hour (ενέργεια)
LHV lower heating value – κατώτερη θερμογόνο δύναμη
μGrid microgrid – μικροδίκτυο
MIP Mixed-Integer Programming – Προγραμματισμός Μεικτού Ακεραίου
MWe megawatt ηλεκτρικό
MWth megawatt θερμικό
NG natural gas – φυσικό αέριο
O&M operation and maintenance – λειτουργία και συντήρηση
PEMFC proton exchange membrane fuel cells – κυψέλες καυσίμου ανταλλαγής πρωτονίου
PQR power quality and reliability – ποιότητα και αξιοπιστία ισχύος
PV photovoltaic - φωτοβολταϊκό
PX Power Exchange market in California – Αγορά ισχύος της California
SCE Southern California Edison – Εταιρεία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στη Νότια Καλιφόρνια
ΣΗΘ συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού
SOFC solid oxide fuel cells – κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου
Φ/B φωτοβολταϊκό

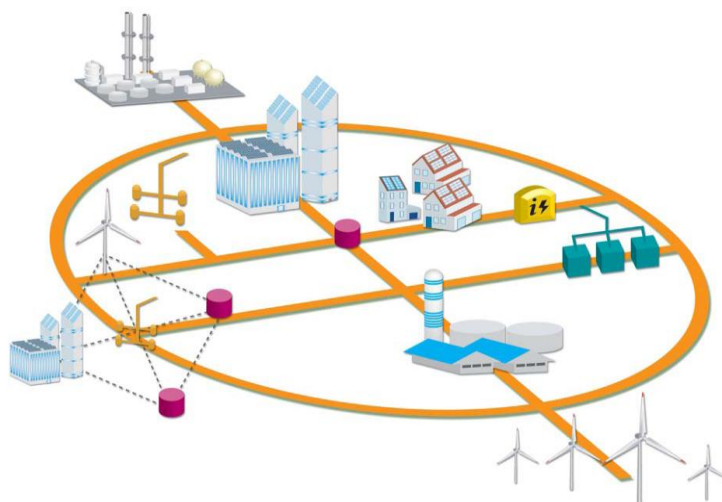
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ

1.1 Εισαγωγή

Ένα μικροδίκτυο είναι ουσιαστικά η διασύνδεση μικρών μονάδων παραγωγής με συσκευές αποθήκευσης ενέργειας και ελεγχόμενα φορτία σε δίκτυα διανομής ΧΤ. Τα μικροδίκτυα έχουν την δυνατότητα να λειτουργούν διασυνδεδεμένα με το δίκτυο ΜΤ, αλλά και απομονωμένα (νησιδοποιημένα), με οργανωμένο και ελεγχόμενο τρόπο [10].

Ένα τυπικό μικροδίκτυο αποτελείται από διάφορες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, συνολικής ισχύος μέχρι λίγα MW. Τυπικές πηγές ενός μικροδικτύου είναι οι γεννήτριες ντίζελ ή φυσικού αερίου, συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας (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, βιοντίζελ ή οποιαδήποτε άλλη πηγή ενέργειας. Ένα μικροδίκτυο μπορεί να εγκατασταθεί εκεί όπου υπάρχει διαθέσιμη μια από τις παραπάνω 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 ντίζελ 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. Στην εικόνα 1 δίνεται η σχηματική αναπαράσταση ενός τυπικού μικροδικτύου.



Εικόνα 1.1. Σχηματική αναπαράσταση ενός μικροδικτύου

Ένα μικροδίκτυο μπορεί να έχει δυνατότητα διασύνδεσης με το κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Σε μια τέτοια παραλληλισμένη λειτουργία είναι δυνατή η ανταλλαγή ενέργειας. Παροχή πλεονάζουσας ενέργειας σ' αυτό, ή απορρόφηση ενέργειας όταν οι μονάδες του μικροδικτύου δεν επαρκούν να καλύψουν τη ζήτηση. Ακόμη σε περίπτωση μόνιμα διασυνδεδεμένης λειτουργίας είναι δυνατή η αξιόπιστη τροφοδότηση του μικροδικτύου από τις δικές του μονάδες σε περίπτωση κατάρρευσης του κεντρικού δικτύου. Δεδομένης της μικρής ισχύος των περισσότερων μονάδων ενός μικροδικτύου, η παραγωγή και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι προτιμότερο να γίνεται στην χαμηλή τάση καθώς δεν απαιτείται η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Το μέγεθος δηλαδή των μονάδων παραγωγής είναι ουσιαστικά αυτό που καθορίζει την στάθμη λειτουργίας. Το μέγεθός του συνολικά, μονάδων παραγωγής και φορτίων, καθορίζει εξάλλου και τον τρόπο διασύνδεσής του με άλλα μικροδίκτυα ή με το κεντρικό δίκτυο, στην μέση ή στην χαμηλή τάση. Προφανώς μεγάλη ισχύς απαιτεί διασύνδεση στη μέση τάση. Πρέπει να τονιστεί ότι σε περιπτώσεις παραλληλισμένης λειτουργίας με το κεντρικό δίκτυο, αυτό που πρωτίστως επιδιώκεται είναι να μην προκαλεί το μικροδίκτυο προβλήματα. Η ποιότητα της τάσης πρέπει να ανταποκρίνεται στις προδιαγραφές του δικτύου, η απορροφούμενη ενέργεια να μην ξεπερνά τις απαιτήσεις ενός τυπικού καταναλωτή.

Σε ένα δεύτερο στάδιο, ένα μικροδίκτυο μπορεί να συμπεριφερθεί σαν μέσο υποστήριξης του κεντρικού δικτύου. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να συμβαίνει αν το μικροδίκτυο ρυθμιζόταν ώστε να μπορεί να υποστηρίξει το κεντρικό δίκτυο, π.χ. να παρέχει ή να απορροφά ενεργό ή άεργο ισχύ όταν απαιτείται, ακόμη και σε μικρά χρονικά διαστήματα. Στην δεύτερη αυτή περίπτωση απαιτείται προφανώς και μια μορφή επικοινωνίας μεταξύ των κέντρων ελέγχου μικροδικτύου και κεντρικού δικτύου.

Και πάλι νέες τεχνολογίες υπόσχονται πολλά στην διαχείριση των μεταβατικών φαινομένων. Για την κάλυψη υψηλών αιχμών ζήτησης (π.χ. εκκίνηση μεγάλων κινητήρων, ψυγείων) και την αποθήκευση περισσευούμενης ενέργειας. Ένα μικροδίκτυο, ιδιαίτερα όταν βρίσκεται σε απομονωμένη λειτουργία, μπορεί να χρησιμοποιεί ενέργεια που έχει αποθηκευθεί.

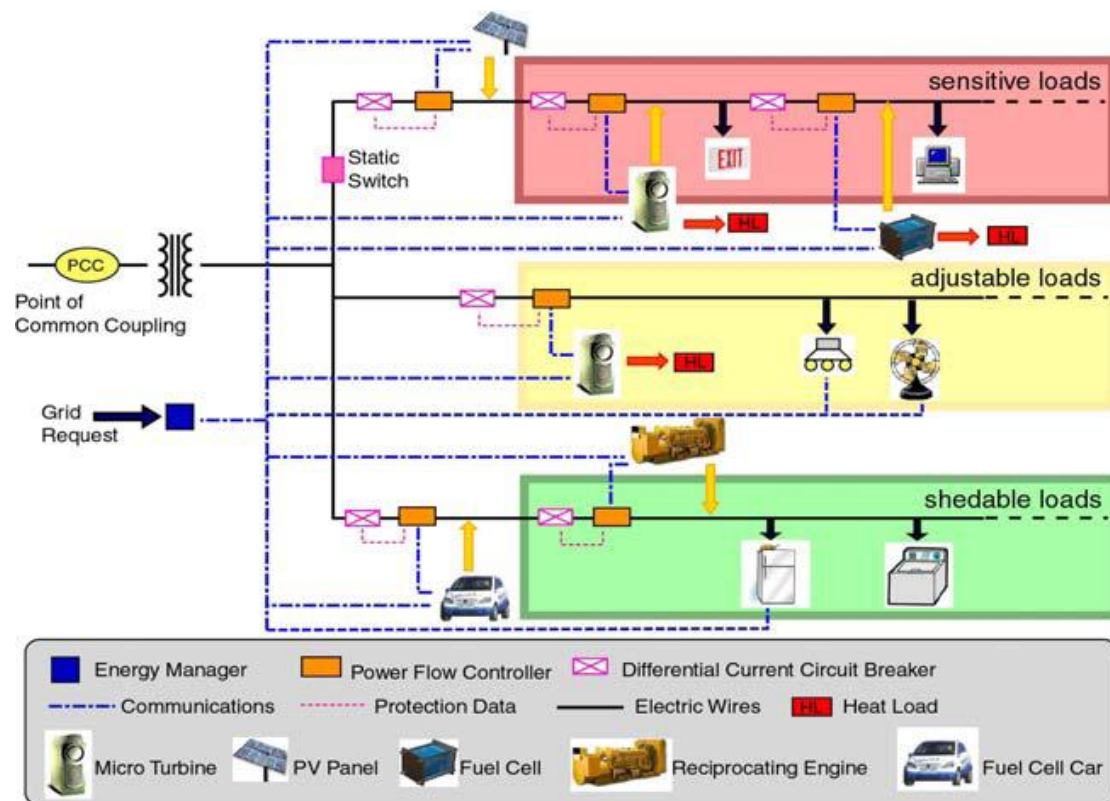
1.2 Έλεγχος των μικροδικτύων

Η σχεδίαση και λειτουργία των μικροδικτύων απαιτεί νέες ικανότητες και τεχνολογίες στους τομείς των ΣΗΕ, στα ηλεκτρονικά ισχύος, στα αναλογικά και ψηφιακά ηλεκτρονικά και στον έλεγχο, ενώ καθοριστικός στην ανάπτυξή τους είναι ο ρόλος των επικοινωνιακών συστημάτων και των δικτύων υπολογιστών. Επομένως το τελικό αποτέλεσμα με τη χρήση των μικροδικτύων είναι να μετατρέψουμε τα δίκτυα διανομής από παθητικά σε ενεργά. Αυτό θα οδηγήσει μελλοντικά και στην ανάπτυξη των «ευφυών» δικτύων (smart-grids), όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο.

Τρία είναι τα κύρια σημεία που απαιτείται έλεγχος εντός του μικροδικτύου. Έλεγχος συχνότητας, τάσης και ποιότητας ισχύος. Γενικά καλό θα ήταν η συχνότητα του

μικροδικτύου όταν πρόκειται να συνδεθεί με το κεντρικό δίκτυο (μακροδίκτυο) να είναι ίση με αυτή του δεύτερου, συνήθως 50 Hz. Μία απόκλιση των $\pm 0,5$ Hz είναι αποδεκτή. Η τυπική μέθοδος ελέγχου συχνότητας στις σύγχρονες μηχανές είναι ο έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής του ρότορα των γεννητριών που παρέχουν ηλεκτρική ισχύ στο μικροδίκτυο. Στην περίπτωση των ασύγχρονων γεννητριών γίνεται χρήση αντιστροφών για τον έλεγχο της συχνότητας [2]. Ο έλεγχος τάσης του μικροδικτύου γίνεται αρχικά από την τάση των γεννητριών αλλά και με έλεγχο ροής της αέργου ισχύος. Ο έλεγχος της ποιότητας ισχύος έχει τη μεγαλύτερη σημασία για ένα μικροδίκτυο. Η πτώση τάσης, τα φλίκερ, οι αρμονικές κλπ είναι φαινόμενα που έχουν υψίστη σημασία κυρίως σε ένα δίκτυο με ελάχιστες γεννήτριες. Οι ηλεκτρονικοί αντιστροφείς δεν βοηθούν μόνο στον έλεγχο συχνότητας αλλά μπορούν επίσης να παράγουν άεργο ισχύ για να καλύπτουν τις ανάγκες των φορτίων του μικροδικτύου καθώς και αρμονικά ρεύματα που χρειάζονται για να καλύψουν τα μη γραμμικά φορτία.

Ενδεικτικά στη εικόνα 2 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής ενός μικροδικτύου, όπου είναι εμφανής η απαραίτητη εγκατάσταση ελεγκτών και διακοπών.



Εικόνα 1.2. Διάγραμμα ροής μικροδικτύου

1.3 Μικροδίκτυα και περιβάλλον

Γενικά η λειτουργία των μικροδικτύων συμβάλει στη μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων. Αυτό γιατί οι περισσότερες από τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται, όπως είναι οι τεχνολογίες συμπαραγωγής και η ΑΠΕ, είναι από τη φύση τους λιγότερο ρυπογόνες. Παράλληλα με τα μικροδίκτυα, όπως έχει αναφερθεί μειώνονται οι απώλειες μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας αφού η παραγωγή γίνεται κοντά στο σημείο κατανάλωσης.

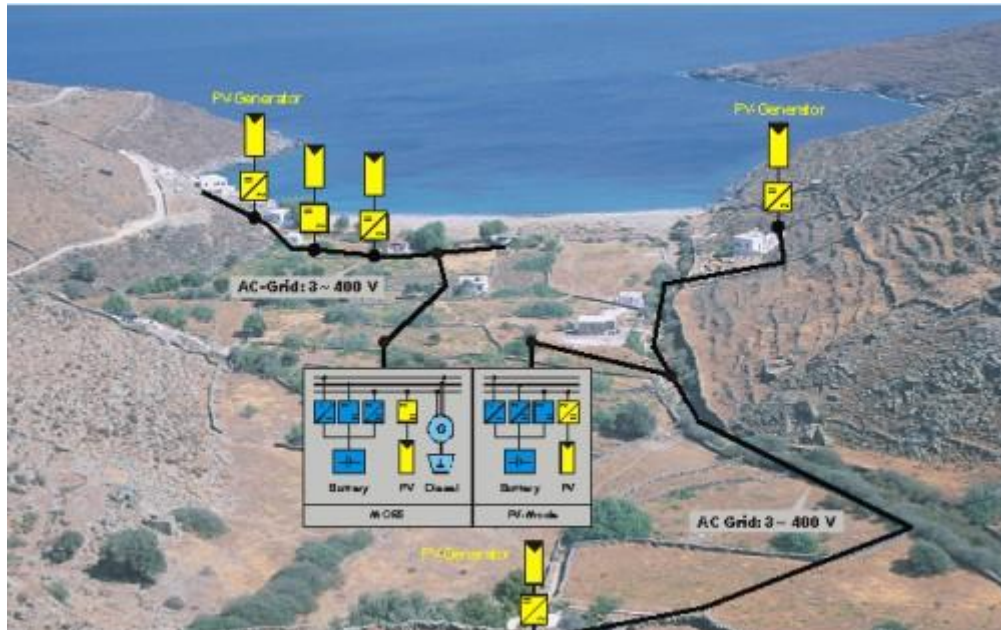
Έτσι για την κάλυψη του ίδιου φορτίου απαιτείται η παραγωγή μικρότερης ποσότητας ενέργειας και κατά συνέπεια έχουμε μειωμένες εκπομπές ρύπων.

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

1.4 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 ντιζελογεννήτρια καθώς και ο υπολογιστής ελέγχου και το υλικό επικοινωνίας.



Εικόνα 1.3. 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 [23].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΞΥΠΤΝΑ ΔΙΚΤΥΑ

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 [9].

Ο τομέας της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη αντιμετωπίζει νέες ευκαιρίες και προκλήσεις και πρέπει να ανταποκριθεί σε ένα νέο όραμα το οποίο περιλαμβάνει:

- Χρηστοκεντρική 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.

- Αξιοπίστα, 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 [30].

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 CO₂ 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 [16].

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 [10].

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:

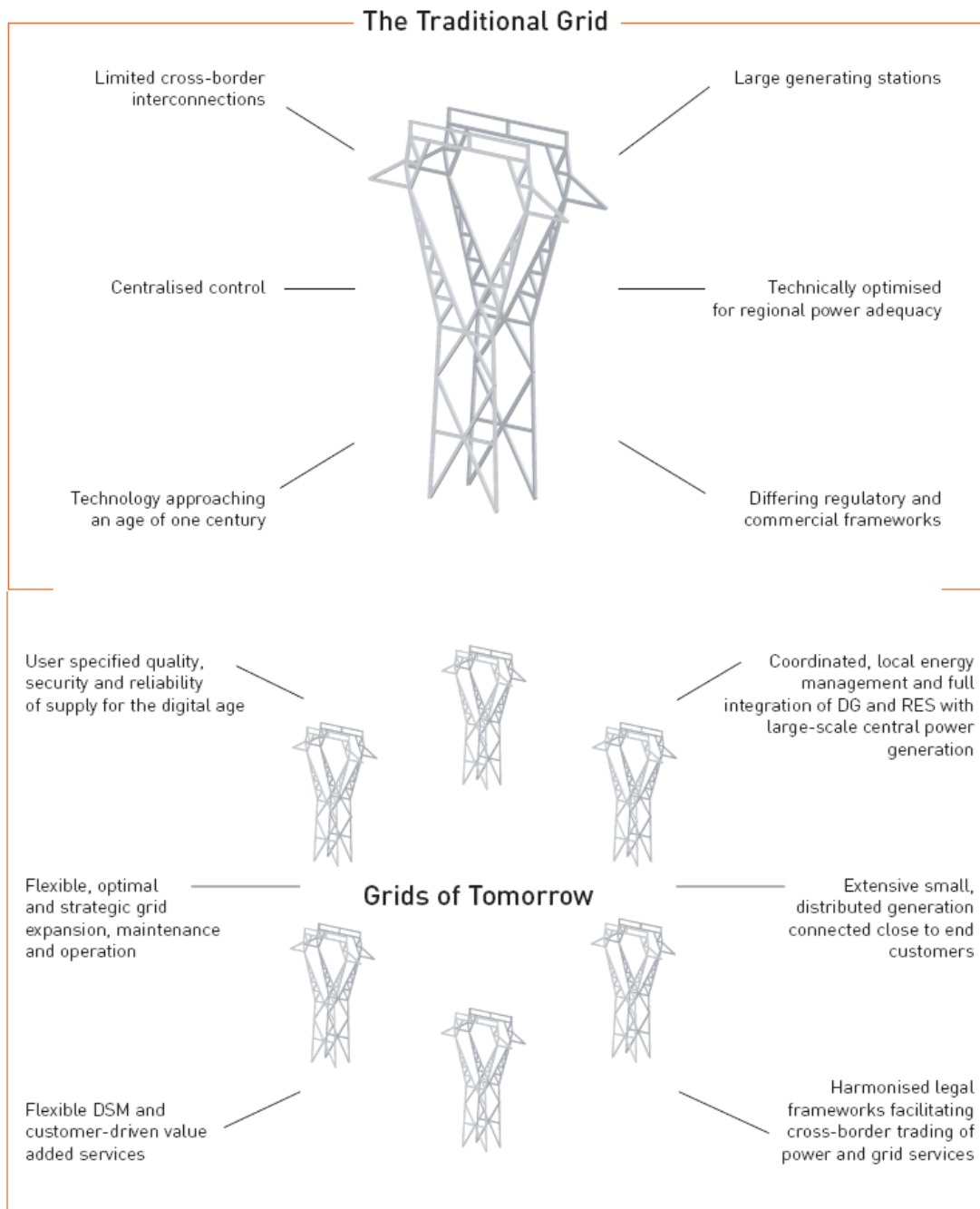
- Την Ευρωπαϊκή εσωτερική αγορά. Η εξέλιξη της αγοράς σε συνδυασμό με ένα αποδοτικό νομοθετικό πλαίσιο θα βοηθήσει στην οικονομική εξέλιξη της Ευρώπης. Ο αυξανόμενος ανταγωνισμός θα οδηγήσει σε νέες τεχνολογικές εξελίξεις και καινοτομίες. Έτσι η εσωτερική αγορά της Ευρώπης αναμένεται να παρέχει πολλά 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.

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 κα 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.



Εικόνα 2.1. 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.



Εικόνα 2.2. Έξυπνο δίκτυο

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 ανταμειβεται. 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 αντλιοσταμίες). 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 υπεραγωγία 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.

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 βασισόμενη 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.

2.7 Μοντέλο ίντερνετ

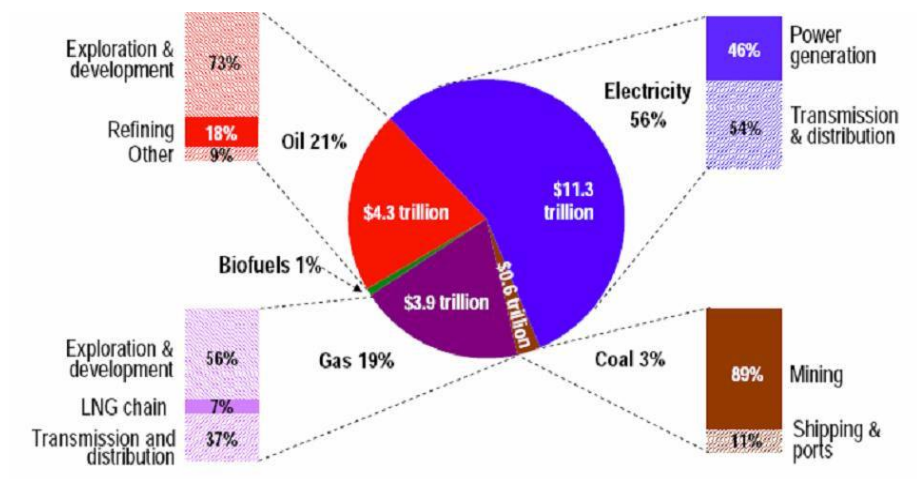
Ένα πιθανό μοντέλο ανάπτυξης των ηλεκτρικών δικτύων του μέλλοντος είναι ανάλογο με αυτό του διαδικτύου, με την έννοια ότι η λήψη αποφάσεων είναι κατανομημένη και ότι υπάρχει ροή προς όλες τις κατευθύνσεις. Έτσι όχι μόνο ο πάροχος ηλεκτρικής ενέργειας για έναν καταναλωτή μπορεί να ποικίλει από τη μία 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 συνεχή έλεγχος ροής ισχύος και έλεγχος τάσης καθώς και νέα εξελιγμένα συστήματα επικοινωνίας.

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 [16]. Στην εικόνα 3 φαίνεται αναλυτικά πως θα καταναλωθούν αυτά τα κεφάλαια.



Εικόνα 2.3. Επενδύσεις για τις υποδομές στον τομέα παροχής ενέργειας

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 στην εικόνα 4.



Εικόνα 2.4. 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 [24].

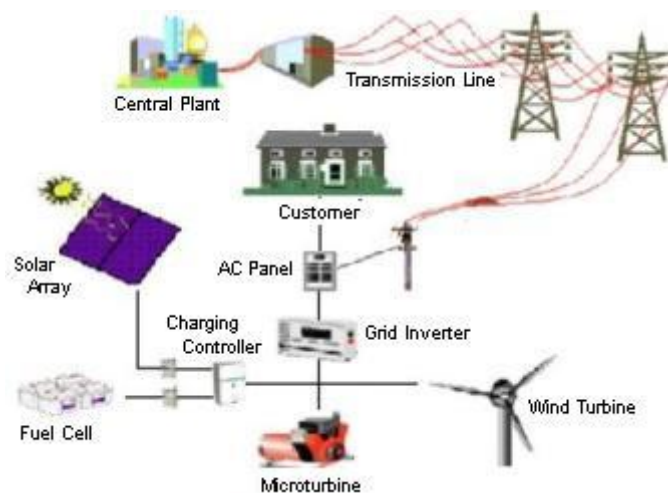
Και άλλες πόλεις ανά τον κόσμο έχουν δραστηριοποιηθεί στον τομέα των έξυπνων δικτύων. Το πρώτο και μεγαλύτερο παράδειγμα είναι στην Ιταλία όπου ολοκληρώθηκε το 2005. Το έργο αυτό στο οποίο για πρώτη φορά χρησιμοποιήθηκαν σε εμπορική κλίμακα οι τεχνολογίες των έξυπνων δικτύων εξοικονομεί ετησίως 500 εκατομμύρια € 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 [26]. Προσπάθειες ανάπτυξης έξυπνου δικτύου γίνονται και στο Οντάριο του Καναδά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

3.1 Εισαγωγή

Ο όρος διεσπαρμένη παραγωγή (DG – Distributed Generation) χρησιμοποιείται για μονάδες παραγωγής ενέργειας που είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο διανομής και όχι στο δίκτυο μεταφοράς υψηλής τάσης [20]. Πιο απλά όταν αναφερόμαστε στη διεσπαρμένη παραγωγή εννοούμε ότι μονάδες παραγωγής ενέργειας έχουν εγκατασταθεί κοντά στο σημείο κατανάλωσης (φορτίο). Η ισχύς αυτών των μονάδων δεν υπερβαίνει τα 50 – 100 MW αλλά συνήθως είναι της τάξης των kW.



Εικόνα 3.1. Διεσπαρμένη παραγωγή

Οι λόγοι που οδήγησαν στη διεσπαρμένη παραγωγή έχουν να κάνουν με τις ανάγκες για:

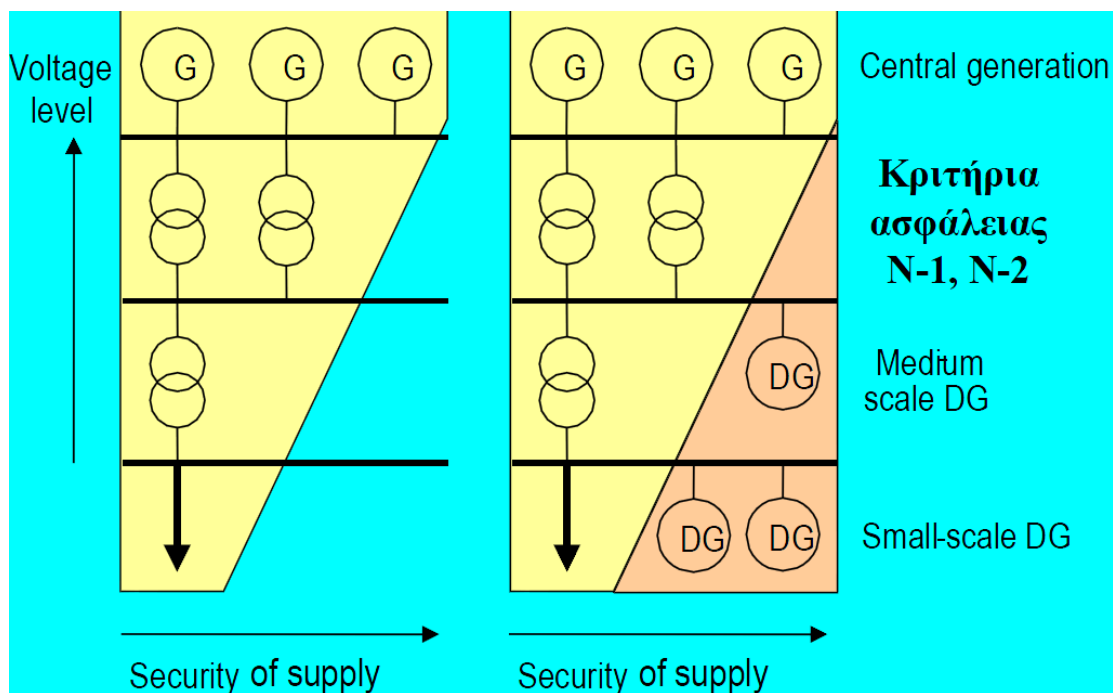
- Ύπαρξη εγκατεστημένης ισχύος για παροχή εφεδρείας σε περίπτωση διακοπής τροφοδοσίας ή και για ψαλιδισμό αιχμών του καταναλωτή.
- Αυξημένη αξιοπιστία και βελτίωση της παρεχόμενης ποιότητας ισχύος σε τοπικό επίπεδο.
- Μείωση των απωλειών κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από ένα απομακρυσμένο 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.
- Μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και εξευγενισμένων καυσίμων.

Τα πλεονεκτήματα της διεσπαρμένης παραγωγής είναι τα εξής:

- Μείωση της συνολικής πρωτογενούς ενεργειακής κατανάλωσης.
- Μικρότερη επίδραση στο περιβάλλον.
- Βελτίωση της αξιοπιστίας παροχής ενέργειας και ποιότητας ισχύος.
- Πλεονεκτήματα στην λειτουργία του δικτύου (απώλειες, συμφορήσεις, επαναφορά κλπ).
- Πιο αποδοτικές στρατηγικές επενδύσεων κεφαλαίου για την αντικατάσταση παλαιωμένου εξοπλισμού [10].

Στην εικόνα 2 φαίνεται ενδεικτικά η συμβολή της διεσπαρμένης παραγωγής στη αύξηση της αξιοπιστίας παροχής [10].



Εικόνα 3.2. Αύξηση της αξιοπιστίας παροχής από την διεσπαρμένη παραγωγή.

3.2 Τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής

Οι τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής χωρίζονται ανάλογα με το είδος καυσίμου που χρησιμοποιούν. Έτσι υπάρχουν τεχνολογίες με συμβατικά καύσιμα και τεχνολογίες με μη συμβατικά καύσιμα. Στις πρώτες ανήκουν οι μονάδες εσωτερικής καύσης και οι αεριοστρόβιλοι καθώς και νεότερες τεχνολογίες όπως οι κυψέλες καυσίμου και οι

μικροτουρμπίνες. Στις δεύτερες ανήκουν οι ανεμογεννήτριες, τα μικρά υδροηλεκτρικά, τα φωτοβολταϊκά και οι λοιπές ΑΠΕ.

Τα τελευταία χρόνια, παρατηρείται σε παγκόσμιο επίπεδο, μια αυξανόμενη τάση ανάπτυξης των ΑΠΕ. Η διείσδυση των ΑΠΕ, γίνεται με γοργούς ρυθμούς, καθώς νέου τύπου ανεμογεννήτριες εγκαθίσταται βελτιώνοντας αισθητά την απόδοση των αιολικών πάρκων και μειώνοντας τα προβλήματα διασύνδεσής τους με το δίκτυο, τα φωτοβολταϊκά συστήματα γνωρίζουν μία εντυπωσιακή άνοδο με αισθητή μείωση του κόστους επένδυσης, τα υδροηλεκτρικά παραμένουν μία σταθερή αξία στην ανανεώσιμη ηλεκτροπαραγωγή, η βιοενέργεια παρέχει λύσεις για θέρμανση, ισχύ και καύσιμα μεταφορών, και τέλος η γεωθερμία χρησιμοποιείται σε ποικίλες εφαρμογές θέρμανσης και ηλεκτρισμού [11].

Για τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής με συμβατικά καύσιμα το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι το φυσικό αέριο όπου είναι διαθέσιμο ή πετρέλαιο diesel. Για διαφορετικό καύσιμο, άνθρακα, λιγνίτη ή πυρηνική ενέργεια τα μεγέθη εγκατάστασης είναι πολύ μεγαλύτερα, επομένως τέτοιου είδους μονάδες δεν εμπίπτουν στην διεσπαρμένη παραγωγή. Στις μονάδες νέων τεχνολογιών το καύσιμο είναι στις περισσότερες περιπτώσεις το φυσικό αέριο. Για τις κυψέλες καυσίμου το υδρογόνο προέρχεται από κατάλληλη επεξεργασία του φυσικού αερίου ή από ηλεκτρόλυση του νερού. Αν το υδρογόνο παράγεται από διαδικασίες παραγωγής με τη βοήθεια ΑΠΕ τότε μπορούμε αυτές τις πηγές να τις κατατάξουμε ακόμη και στις ΑΠΕ. Αν στις μικροτουρμπίνες χρησιμοποιείται ως καύσιμο το βιοαέριο, τότε επίσης μπορούμε να τις κατατάξουμε στις μονάδες ΑΠΕ.

Στον πίνακα 1 δίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που χρησιμοποιούνται στη διεσπαρμένη παραγωγή [25].

	Παλινδρομικές μηχανές (Diesel)	Παλινδρομικές μηχανές (NG)	Μικροστρόβιλοι	Αεριοστρόβιλοι	Κυψέλες καυσίμου
Ηλεκτρική ισχύς	30kW - 6+MW	30kW - 6+MW	30-400kW	0.5 - 30+MW	100-3000kW
Κόστος κεφαλαίου (\$/kW)	600-1000	700-1200	1200-1700	400-900	4000-5000
Ηλεκτρική απόδοση	30-43%	30-42%	14-30%	21-40%	36-50%
Κόστη συντήρησης (\$/kWh)	0.005 - 0.015	0.007-0.020	0.008-0.015	0.004-0.010	0.0019-0.0153
Μέγεθος (sqft/kW)	0.22-0.31	0.28-0.37	0.15-0.35	0.02-0.61	0.9

Πίνακας 3.1. Χαρακτηριστικά τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής

Τα τελευταία χρόνια η διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής γίνεται όλο και πιο έντονη. Ενδεικτικά στον πίνακα 2 δίνονται τα μεγέθη εγκατεστημένων μονάδων

δισεπαρμένης παραγωγής στις ΗΠΑ από το 2001 έως σήμερα σε διάφορους τομείς της αγοράς [25].

Τομέας Αγοράς	Εφαρμογή	Χωρητικότητα (MW)	Αριθμός μονάδων (σε χιλιάδες)
Βιομηχανικός	<i>Συνεχής παροχή ισχύος</i>	900	3
	<i>Συμπαραγωγή</i>	9000	35
	<i>Εξομάλυνση αιχμών φορτίου</i>	500	2
	<i>Εφεδρεία</i>	5000	100
	<i>Ποιότητα ισχύος</i>	8000	30
Εμπορικός	<i>Εφεδρεία</i>	15000	300
	<i>Ποιότητα ισχύος</i>	30000	600
Οικιακός	<i>Κυψέλες καυσίμου</i>	3500	500

Πίνακας 3.2. Διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής στις ΗΠΑ

3.3 Περιγραφή τεχνολογιών που χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα μελέτη

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η διεσπαρμένη παραγωγή επιτρέπει να εκμεταλλευτούμε στο μέγιστο τα πλεονεκτήματα της συμπαραγωγής. Γι' αυτό το λόγο οι περισσότερες που χρησιμοποιήθηκαν στη μοντελοποίηση του μικροδικτύου ήταν τεχνολογίες συμπαραγωγής και περιγράφονται στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Παράλληλα χρησιμοποιήθηκαν και μηχανές εσωτερικής καύσης με φυσικό αέριο ή diesel χωρίς την δυνατότητα συμπαραγωγής καθώς και φωτοβολταϊκά. Άλλες μορφές ΑΠΕ δεν ήταν δυνατόν να χρησιμοποιηθούν στη συγκεκριμένη εφαρμογή, αφού το μικροδίκτυο αποτελείται ουσιαστικά από μία ξενοδοχειακή μονάδα σε αστική περιοχή όπου δεν υπάρχει η δυνατότητα εγκατάστασης ανεμογεννητριών, μικρών υδροηλεκτρικών ή άλλων ΑΠΕ.

Μηχανές εσωτερικής καύσης

Αυτές οι μηχανές στηρίζουν τη λειτουργία τους στην παραγωγή μηχανικού έργου από την κίνηση εμβόλων μέσα σε κυλίνδρους. Διατίθενται σε πληθώρα μεγεθών από μερικές εκατοντάδες W, έως μερικές δεκάδες MW, ενώ πάρα πολλοί κατασκευαστές ανά τον κόσμο ασχολούνται με την κατασκευή τους, την εξέλιξη των τεχνικών τους χαρακτηριστικών, αλλά και τη μείωση της όχλησης που προκαλεί η λειτουργία τους. Συνάμα και ειδικά για τις μικρότερες σε ισχύ μονάδες υπάρχουν χιλιάδες σημεία πώλησης ακόμη και σε σχετικά απομακρυσμένα σημεία ενώ αρκετοί τεχνικοί μπορούν να συμβάλλουν στη συντήρησή τους. Οι περισσότερες μηχανές χρησιμοποιούν

κλάσματα της απόσταξης του πετρελαίου, από βενζίνη για τις μικρότερες, πετρέλαιο diesel για τις λίγο μεγαλύτερες, έως και μαζούτ για μεγέθη που χρησιμοποιούνται για ηλεκτροπαραγωγή σε αυτόνομα νησιά. Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούν φυσικό αέριο ή προπάνιο ως καύσιμο προκειμένου να μειωθούν οι εκπεμπόμενοι ρύποι. Αρνητική επίπτωση στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, έχει και η ανάγκη λίπανσης του κινητήρα, λόγω της πιθανής ανάμειξης λιπαντικών με το καύσιμο [11].

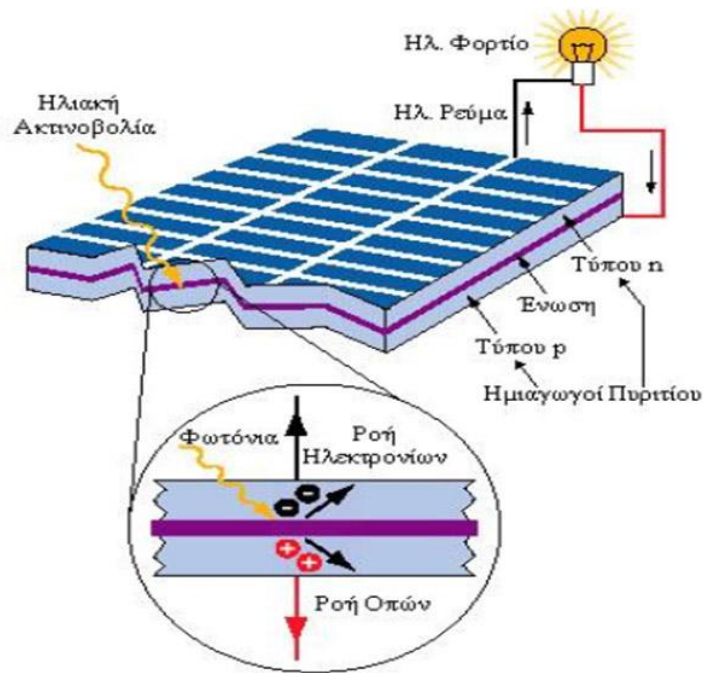
Φωτοβολταϊκά

Το 1839 ο Γάλλος φυσικός Έντμουντ Μπεκερέλ ανακάλυψε ότι ορισμένα υλικά παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα όταν εκτεθούν στο φως. Το 1940 όταν η επιστήμη των υλικών εξελίχθηκε αναπτύχθηκε η διαδικασία για τη δημιουργία κρυσταλλικής σιλικόνης. Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιήθηκε το 1954 για τη δημιουργία ενός φωτοβολταϊκού κελιού από κρυσταλλική σιλικόνη.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι ευρέως γνωστά ως ηλιακά πάνελ. Μία συστοιχία από Φ/Β αποτελείται από Φ/Β πάνελ τα οποία με τη σειρά τους αποτελούνται από Φ/Β πλαίσια τα οποία περιλαμβάνουν Φ/Β στοιχεία. Τα Φ/Β στοιχεία παράγουν συνεχές ρεύμα (DC) το οποίο στη συνέχεια μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο (AC). Ο μέγιστος θεωρητικός βαθμός απόδοσης που μπορεί να έχει ένα Φ/Β είναι 0,3, ενώ στην πράξη φθάνει το 0,1.

Η ηλιακή μόνωση (insolation) είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια που μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρισμό. Οι παράγοντες που την επηρεάζουν είναι η ένταση του φωτός και η θερμοκρασία λειτουργίας του Φ/Β στοιχείου. Η ένταση του φωτός εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος και τις κλιματολογικές συνθήκες της κάθε περιοχής και γενικά αυξάνεται όσο πιο κοντά βρισκόμαστε στον ισημερινό.

Η αρχή λειτουργίας των φωτοβολταϊκών φαίνεται στην εικόνα 3.



Εικόνα 3.3. Αρχή λειτουργίας φωτοβολταϊκών

Η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στο Φ/Β με τη μορφή φωτονίων. Τα φωτόνια όταν προσπίπτουν σε μια διάταξη Φ/Β κελιού περνούν αδιατάραχτα την επαφή τύπου n και χτυπούν τα άτομα της περιοχής τύπου p. Τα ηλεκτρόνια της περιοχής τύπου p αρχίζουν και κινούνται μεταξύ των οπών ώσπου τελικά φτάνουν στην περιοχή της διόδου όπου και έλκονται πλέον από το θετικό πεδίο της εκεί περιοχής.

Αφού ξεπεράσουν το ενεργειακό χάσμα αυτής της περιοχής μετά είναι αδύνατον να επιστρέψουν. Στο κομμάτι της επαφής n πλέον έχουμε μια περίσσεια ηλεκτρονίων που μπορούμε να εκμεταλλευτούμε. Αυτή η περίσσεια των ηλεκτρονίων μπορεί να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα εάν τοποθετήσουμε μια διάταξη όπως ένας μεταλλικός αγωγός στο πάνω μέρος της επαφής n και στο κάτω της επαφής p και ένα φορτίο ενδιάμεσα με τέτοιο τρόπο ώστε να κλείσει ένας αγωγίμος δρόμος για το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται. Αυτή είναι απλοποιημένα η γενική αρχή λειτουργίας του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών είναι τα εξής:

- Δεν καταναλώνουν καύσιμο.
- Δεν έχουν κινούμενα μέρη και παράγουν ισχύ αθόρυβα.
- Δεν ρυπαίνουν το περιβάλλον με αέρια ή με άλλα κατάλοιπα.
- Μπορούν να λειτουργήσουν αυτόνομα και αξιόπιστα χωρίς την παρουσία κάποιου χειριστή.
- Μπορούν να εγκατασταθούν σε απομονωμένες περιοχές.

- Μπορούν εύκολα να λειτουργήσουν παράλληλα με άλλα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Είναι επεκτάσιμα ανάλογα με τις ανάγκες σε φορτίο.
- Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής (τουλάχιστον 20 ή 30 χρόνια).

Τα βασικά τους μειονεκτήματα είναι το αρχικό κόστος κεφαλαίου και η μικρή απόδοση. Το δεύτερο έχει σαν αποτέλεσμα την ανάγκη κάλυψης μεγάλων εκτάσεων όταν το φορτίο που πρέπει να τροφοδοτεί μία Φ/Β συστοιχία είναι μεγάλο. Η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού κυμαίνεται μεταξύ 8 και 12 % ανάλογα με την τεχνολογία ενώ το κόστος εγκατάστασης ανέρχεται στα 4200-7000 €/kW.

Μερικές εφαρμογές των Φ/Β συστημάτων είναι:

- Τροφοδότηση καταναλωτών μικρής κλίμακας ισχύος όπως τροχόσπιτα, σκάφη αναψυχής, εξωτερικό φωτισμό κήπων.
- Τροφοδότηση απομονωμένων συστημάτων δηλαδή κατοικιών ή άλλων εγκαταστάσεων που χρειάζονται ηλεκτρικό ρεύμα και δεν είναι συνδεδεμένοι με το δίκτυο όπως είναι συστήματα τηλεπικοινωνιών, πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου κλπ.
- Μεγάλοι Φ/Β σταθμοί παραγωγής μεγέθους 50kW έως μερικά MW που διοχετεύουν την παραγόμενη ενέργεια απευθείας στο δίκτυο.
- Οικιακά Φ/Β συστήματα μεγέθους 1,5kW έως 20kW, εγκαταστημένα σε στέγες ή προσόψεις κατοικιών, τροφοδοτούν τις ανάγκες του κτιρίου σε ηλεκτρικό ρεύμα και διοχετεύουν την πλεονάζουσα ενέργεια πίσω στο δίκτυο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

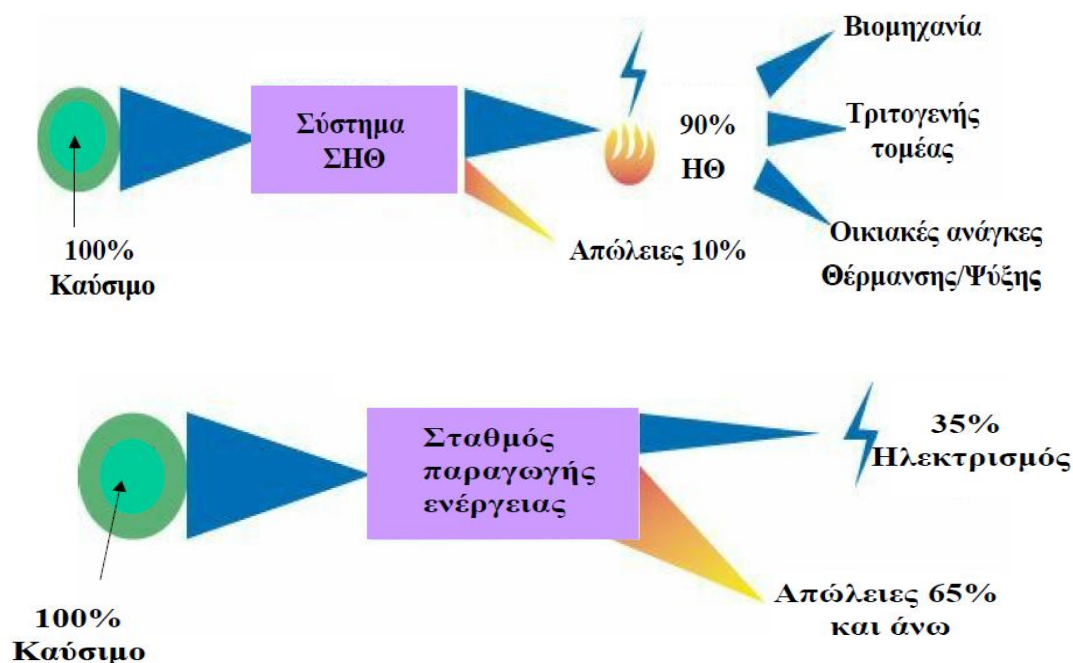
ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

4.1 Εισαγωγή

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

Συμπαράγωγή είναι η συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρικής (ή μηχανικής) και θερμικής ενέργειας από την ίδια αρχική πηγή ενέργειας. Διευκρινίζεται ότι η θερμική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για θέρμανση όσο και για ψύξη ή κλιματισμό. Η ψύξη ή ο κλιματισμός επιτυγχάνονται με μηχανές απορρόφησης, που λειτουργούν με ατμό ή θερμό νερό.

Η ιδέα της συμπαράγωγής είναι αρκετά παλαιά και αναπτύχθηκε λόγω του χαμηλού βαθμού απόδοσης των συμβατικών συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής. Τα συστήματα συμπαράγωγής έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό τους την ανάκτηση του μεγαλύτερου μέρους της παραγόμενης θερμικής ενέργειας, η οποία αν δεν μεσολαβήσει κάποια άλλη διεργασία, αποτελεί απλώς απώλεια προς το περιβάλλον, επιτυγχάνοντας με τον τρόπο αυτόν εξοικονόμηση πόρων και βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά τη λειτουργία ενός συμβατικού θερμοηλεκτρικού σταθμού, μεγάλα ποσά θερμότητας αποβάλλονται στο περιβάλλον είτε μέσω των ψυκτικών κυκλωμάτων (συμπυκνωμάτων ατμού, πύργων ψύξης, ψυγείων νερού κινητήρων Diesel, κ.λπ.) είτε μέσω των καυσαερίων (αεριοστροβίλων, κινητήρων Diesel, κινητήρων Otto, κ.λπ.). Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της θερμότητας μπορεί να ανακτηθεί και να χρησιμοποιηθεί ωφέλιμα. Έτσι, ενώ οι συμβατικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής έχουν βαθμό απόδοσης 30-45%, ο βαθμός απόδοσης των συστημάτων συμπαράγωγής φθάνει το 80-85%. Μια τυπική σύγκριση, ως προς τον βαθμό απόδοσης, της συμπαράγωγής με τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας παρουσιάζει η εικόνα 1 [12].



Εικόνα 4.1. Σύγκριση συμβατικού συστήματος παραγωγής με ένα σύστημα συμπαραγωγής

Η Συμπαραγωγή 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 συμπαραγωγής. Αναφέρεται χαρακτηριστικά ότι περίπου το 58% του ηλεκτρισμού, που παραγόταν σε βιομηχανίες των Η.Π.Α. στις αρχές του αιώνα, προερχόταν από μονάδες συμπαραγωγής .

Κατόπιν ακολούθησε κάμψη στη χρήση των συστημάτων συμπαραγωγής 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 συμπαραγωγή μειώθηκε στο 15% του όλου δυναμικού ηλεκτροπαραγωγής μέχρι το 1950 και έπεσε στο 5% μέχρι το 1974. 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 συμπαραγωγής συνοδεύτηκε και από αξιοσημείωτη πρόοδο της σχετικής τεχνολογίας. Οι βελτιώσεις και εξελίξεις συνεχίζονται και νέες τεχνικές αναπτύσσονται και δοκιμάζονται, αλλά ήδη η συμπαραγωγή έχει φθάσει σε επίπεδο ωριμότητας με αποδεδειγμένη αποδοτικότητα και αξιοπιστία. Μια μεγάλη ποικιλία συστημάτων, από πλευράς είδους, μεγέθους και λειτουργικών χαρακτηριστικών, είναι διαθέσιμη.

Η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, που επιτυγχάνεται με τη συμπαραγωγή, συντελεί, εν γένει, σε μείωση και των εκπεμπόμενων ρύπων. Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι ενδεχόμενη η αύξηση των ρύπων σε τοπική κλίμακα, γεγονός το οποίο επιβάλλει ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή του είδους της μονάδας και του πρόσθετου εξοπλισμού της.

Οι εφαρμογές της συμπαραγωγής διακρίνονται σε τέσσερις κύριους τομείς: σύστημα ηλεκτρισμού της χώρας, βιομηχανικός, εμπορικός -κτιριακός και αγροτικός τομέας. Η συμπαραγωγή στον τομέα των μεταφορών είναι πλέον κάτι αυτονόητο: π.χ., ο κινητήρας ενός αυτοκινήτου ή πλοίου καλύπτει τις ανάγκες σε μηχανικό έργο, ηλεκτρισμό και θερμότητα, η οποία ανακτάται από τα ψυκτικά κυκλώματα ή και τα καυσαέρια.

Η εξοικονόμηση ενέργειας και η μείωση (τουλάχιστον σε σφαιρική κλίμακα) των ρύπων ίσως δεν είναι αρκετά κίνητρα για μια επένδυση σε σύστημα συμπαραγωγής, εάν και η ίδια η επένδυση δεν είναι οικονομικά βιώσιμη.

Η μεγάλη σημασία που έχει η συμπαραγωγή στην εξοικονόμηση φυσικών και οικονομικών πόρων αλλά και το γεγονός ότι η λειτουργία των συστημάτων έχει άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις στο σύστημα ηλεκτρισμού μιας χώρας, είναι αιτίες ώστε η συμπαραγωγή να αποτελεί αντικείμενο νομοθετικών, οικονομικών, και άλλων ρυθμίσεων εκ μέρους της πολιτείας.

Από την άλλη πλευρά, η εξεύρεση πόρων για τις σχετικές επενδύσεις και οι οικονομικές συνθήκες, κάτω από τις οποίες θα λειτουργήσει μια μονάδα συμπαραγωγής, είναι κρίσιμης σημασίας για την οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης.

4.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της συμπαραγωγής

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.

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.).

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.

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.

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.

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.

Κοινωνία και 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.

4.3 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 αμοστρόβιλο 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.

Για την περιγραφή της ενεργειακής συμπεριφοράς αυτών των συστημάτων χρησιμοποιούνται οι εξής συμβολισμοί και δείκτες:

W: ηλεκτρική (ή μηχανική) ισχύς,

Q: θερμική ισχύς,

$H_{f\sigma}$: ισχύς καυσίμου που καταναλίσκεται από το σύστημα συμπαραγωγής:

$$H_{f\sigma} = m_{f\sigma} \cdot H_u$$

$m_{f\sigma}$: παροχή καυσίμου,

H_u : κατώτερη θερμογόνος ικανότητα καυσίμου,

H_{fW} : ισχύς καυσίμου για την χωριστή παραγωγή ηλεκτρικής ή μηχανικής ισχύος W,

H_{fQ} : ισχύς καυσίμου για την χωριστή παραγωγή θερμότητας Q,

H_{fX} : ολική ισχύς καυσίμου για την χωριστή παραγωγή των W και Q (χωρίς συμπ/γή).

$$H_{fX} = H_{fW} + H_{fQ} = (m_{f\sigma} \cdot H_u)_W + (m_{f\sigma} \cdot H_u)_Q$$

Ηλεκτρικός (ή μηχανικός) βαθμός απόδοσης:

$$n_e = W / H_{f\sigma}$$

Θερμικός βαθμός απόδοσης:

$$n_h = Q / H_{f\sigma}$$

Ολικός ενεργειακός βαθμός απόδοσης:

$$n = n_e + n_h$$

Λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα (power to heat ratio):

$$PHR = W / Q = n_e / n_h$$

Λόγος εξοικονομήσεως ενέργειας καυσίμου (fuel energy savings ratio):

$$FESR = (H_{fX} - H_{f\sigma}) / H_{fX}$$

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

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 (Μ.Ε.Κ.)
- Κινητήρες Diesel
- Συστήματα συνδυασμένου κύκλου
- Συστήματα συμπαραγωγής μικρής κλίμακας (μικρού «πακέτου»)
- Κυψέλες καυσίμου
- Μηχανές Stirling

Στον πίνακα 1 δίνονται τα χαρακτηριστικά των βασικότερων συστημάτων συμπαραγωγής [12].

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

Κυψέλες καυσίμου	0,04 – 50	90 – 92	37 – 45	37 – 45	85 – 90	0,8 – 1
Μηχανές Stirling	0,003 – 1,5	85 – 90	35 – 50	34 – 49	60 – 80	1,2 – 1,7

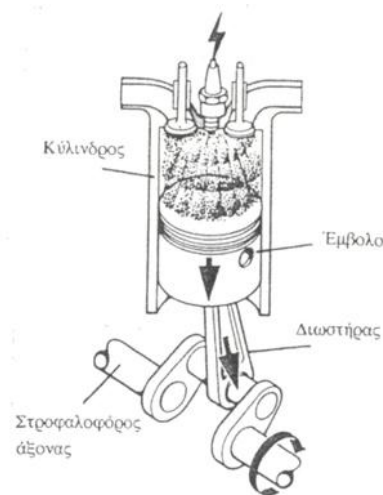
Πίνακας 4.1. Χαρακτηριστικά τεχνολογιών συμπαραγωγής

4.4 Περιγραφή τεχνολογιών CHP που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη μελέτη

Η παρούσα εργασία αναφορικά με τις τεχνολογίες συμπαραγωγής εστιάζει στην εγκατάσταση τέτοιων τεχνολογιών σε ένα μικροδίκτυο. Έτσι οι τεχνολογίες που χρησιμοποιήθηκαν είναι μικρής ονομαστικής ισχύος και αποτελούνται από παλινδρομικές μηχανές, μικροστρόβιλους, κυψέλες καυσίμου και τεχνολογίες με ψυχαντήρα απορρόφησης.

Παλινδρομικές μηχανές

Στις εμβολοφόρες ή παλινδρομικές μηχανές η θερμική ενέργεια του καυσίμου αξιοποιείται για την παραγωγή της ευθύγραμμης παλινδρομικής κίνησης του εμβόλου μέσα στον κύλινδρο. Αυτή μετατρέπεται σε περιστροφική από το μηχανισμό του διωστήρα-στροφαλοφόρου άξονα, όπως φαίνεται στην εικόνα 2 [12].



Εικόνα 4.2. Παλινδρομική μηχανή εσωτερικής καύσης

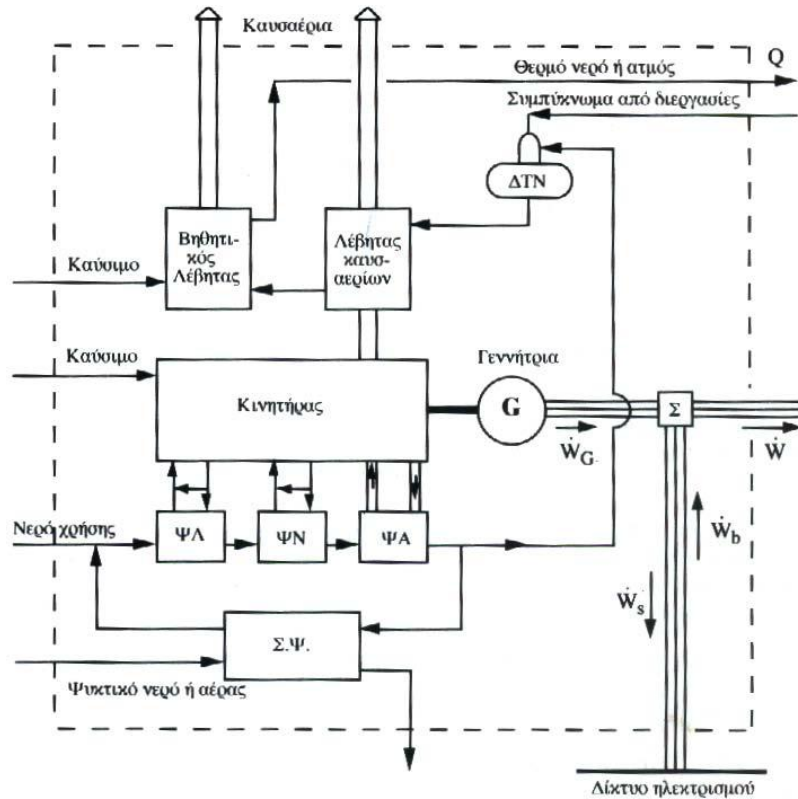
Διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- i. Μονάδες μικρής κλίμακας με αεριομηχανή (15-1000 kW) ή κινητήρα Diesel (75- 1000 kW),
- ii. Συστήματα μέσης ισχύος (1000-6000 kW) με αεριομηχανή ή κινητήρα Diesel,
- iii. Συστήματα μεγάλης ισχύος (άνω των 6000 kW) με κινητήρα Diesel.

Μηχανές αερίου (Gas Engines) ονομάζονται οι παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης που λειτουργούν με αέριο καύσιμο, π.χ., φυσικό αέριο, βιοαέριο, κ.λπ.

Η εικόνα 3 παρουσιάζει ένα γενικό διάγραμμα ροής της λειτουργίας μιας παλινδρομικής μηχανής. Ο κινητήρας κινεί τη γεννήτρια. Τέσσερις εναλλάκτες ανακτούν θερμότητα

από ρευστά που έχουν σχέση λειτουργία της μηχανής: ψυγείο λαδιού, ψυγείο νερού (του κλειστού κυκλώματος του κινητήρα), ψυγείο αέρα υπερπλήρωσης και εναλλάκτης ανακομιδής θερμότητας από τα καυσαέρια του κινητήρα (ή λέβητας καυσαερίων). Με τη θερμότητα αυτή θερμαίνεται το νερό που προορίζεται για διάφορες χρήσεις. Σε συστήματα μέσης και μεγάλης ισχύος, η θερμότητα επαρκεί και για την παραγωγή ατμού. Οι μικροί κινητήρες δεν έχουν ψυγείο λαδιού.



Εικόνα 4.3. Διάγραμμα ροής παλινδρομικής γεννήτριας

Με ανάκτηση θερμότητας από τα τρία ψυγεία, το νερό θερμαίνεται μέχρι τους 75-80 °C. Κατόπιν έρχεται στον εναλλάκτη ανακομιδής θερμότητας των καυσαερίων, όπου θερμαίνεται μέχρι τους 85-90 °C ή και ατμοποιείται. Μονάδες μεσαίου μεγέθους παράγουν κορεσμένο ατμό 180-200 °C, ενώ μεγάλες μονάδες μπορούν να δώσουν υπέρθερμο ατμό με πίεση 15-20 bar και θερμοκρασία 250-350 °C. Η ελάχιστη επιτρεπτή θερμοκρασία των καυσαερίων στην έξοδο του εναλλάκτη εξαρτάται από την περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο. Για καύσιμο Diesel, το όριο είναι 160-170 °C, ενώ για φυσικό αέριο είναι 90-100 °C.

Ο βαθμός απόδοσης μικρών και μεσαίων κινητήρων είναι 35-45%, ενώ σε σύγχρονους μεγάλους κινητήρες φθάνει το 50%. Ο βαθμός απόδοσης ενός συστήματος συμπαραγωγής με εμβολοφόρο κινητήρα εσωτερικής καύσης βρίσκεται στην περιοχή του 80%.

Η διάρκεια ζωής είναι 15-20 έτη και εξαρτάται από το μέγεθος της μονάδας, την ποιότητα του καυσίμου και την ποιότητα της συντήρησης. Οι παλινδρομικοί κινητήρες απαιτούν τακτική συντήρηση με αποτέλεσμα μικρότερη μέση ετήσια διαθεσιμότητα (80-90%).

Μικροστροβίλοι (μικροτουρπίνες)

Είναι περιστροφικές μηχανές που παράγουν ενέργεια από τη ροή αερίου υπό πίεση. Έχουν εύρος ονομαστικής ισχύος 25-30 kW. Αποτελούνται από έναν συμπιεστή που συνδέεται με μια τουρμπίνα μέσω ενός θαλάμου καύσης. Οι μικροτουρμπίνες μπορούν να λειτουργήσουν με τη μέθοδο του απλού κύκλου ή της ανάκτησης θερμότητας. Σε έναν στροβίλο απλού κύκλου μέσα στον καυστήρα προστίθεται ενέργεια στο ρεύμα αερίου, αέρας αναμιγνύεται με το 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 μονάδες ανάκτησης θερμότητας χρησιμοποιούν έναν εναλλάκτη θερμότητας 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 χρησιμοποιείται έπειτα στη διαδικασία καύσης. Η προθέρμανση του αέρα, μειώνει την ποσότητα των απαιτούμενων καυσίμων για την αύξηση της θερμοκρασίας του στο απαραίτητο επίπεδο στην είσοδο του στροβίλου [13].

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματά τους είναι τα εξής:

- Μεγάλος βαθμός απόδοσης.
- Χαμηλά επίπεδα εκπομπών ρύπων.
- Υψηλή αξιοπιστία και έτσι μικρές ανάγκες για συντήρηση.
- Προκαλούν ελάχιστη ηχορύπανση.
- Μικρό μέγεθος που τις καθιστά κατάλληλες για εφαρμογές σε μικροδίκτυα.

Εφαρμογές των μικροστροβίλων συναντώνται στη διανεμημένη παραγωγή, στην παραγωγή ισχύος καλύτερης ποιότητας και αξιοπιστίας, στην παραγωγή ισχύος εφεδρείας και σε περίπτωση αυξημένης ζήτησης (αιχμή). Η σημαντικότερη εφαρμογή τους είναι η συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας.

Κυψέλες καυσίμου

Η κυψέλη καυσίμου (fuel cell) είναι μια ηλεκτροχημική συσκευή που μετατρέπει τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε ηλεκτρισμό χωρίς τη μεσολάβηση της καύσης. Στη βασική της μορφή, λειτουργεί ως εξής: υδρογόνο και οξυγόνο αντιδρούν με την παρουσία ηλεκτρολύτη και παράγουν νερό, ενώ ταυτόχρονα αναπτύσσεται ένα ηλεκτροχημικό δυναμικό που προκαλεί ροή ηλεκτρικού ρεύματος στο εξωτερικό κύκλωμα (φορτίο). Καθώς η αντίδραση είναι εξώθερμη, παράγεται θερμότητα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ωφέλιμα.

Το απαιτούμενο υδρογόνο παράγεται από ορυκτά καύσιμα και συνήθως μεθάνιο (CH₄) που αποτελεί το κύριο συστατικό του φυσικού αερίου. Ορισμένοι τύποι κυψελών μπορούν να λειτουργήσουν επίσης και με μονοξείδιο του άνθρακα ή υδρογονάνθρακες.

Επιδεικτικές μονάδες ισχύος έχουν κατασκευασθεί σε διάφορες Ευρωπαϊκές χώρες, στις Η.Π.Α. και στην Ιαπωνία. Η συνήθης θερμοκρασία λειτουργίας τους (περίπου 200 °C) περιορίζει τη θερμοκρασία της ανακτώμενης θερμότητας. Υπάρχουν σήμερα τυποποιημένες μονάδες συμπαραγωγής με θερμότητα που είναι διαθέσιμη σε θερμοκρασία 80-90 °C, αλλά και πειραματικές διατάξεις υψηλότερων θερμοκρασιών.

Οι κυψέλες καυσίμου είναι κατάλληλες για συμπαραγωγή στο βιομηχανικό και εμπορικό-κτιριακό τομέα (ιδιαίτερα σε συνδυασμό με το φυσικό αέριο). Κύρια πλεονεκτήματά τους είναι τα ακόλουθα:

- Αρθρωτή δομή, που διευκολύνει την κατασκευή μονάδων με την επιθυμητή ισχύ.
- Διατήρηση υψηλού ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης ακόμη και σε μερικό φορτίο (δηλ. φορτίο μικρότερο του ονομαστικού).
- Ευκολία αυτοματισμού.
- Χαμηλές εκπομπές ρύπων.
- Χαμηλή στάθμη θορύβου.

Χάρη στον υψηλό βαθμό απόδοσης και τα καθαρά καύσιμα που χρησιμοποιούνται, οι εκπομπές CO₂ και SO₂ είναι κατά 10-100 φορές χαμηλότερες από εκείνες άλλων συστημάτων. Ειδικότερα, επειδή οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι σημαντικά μικρότερες από εκείνες της καύσης, οι εκπομπές NO_x είναι μικρότερες κατά μία τάξη μεγέθους από τις εκπομπές των συστημάτων που στηρίζονται στην καύση. Οι χαμηλές εκπομπές ρύπων και η χαμηλή στάθμη θορύβου κάνουν τις κυψέλες καυσίμου πιο κατάλληλες από άλλα συστήματα για εγκατάσταση και λειτουργία σε κατοικημένες περιοχές και σε κτίρια όπως ξενοδοχεία, νοσοκομεία, κλπ. Μειονεκτήματα, που εμποδίζουν προς το παρόν την πλατιά διάδοσή τους είναι το υψηλό κόστος κατασκευής τους και η μικρή διάρκεια ζωής.

Μπορούν να ταξινομηθούν βάσει του τύπου του ηλεκτρολύτη τον οποίο χρησιμοποιούν. Το πιο γνωστό είδος είναι η κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίου (PEM). Η δομή και η αρχή λειτουργίας του αντιπροσωπευτικού αυτού τύπου κυψέλης καυσίμου έχει ως εξής:

Δύο ηλεκτρόδια διαχωρίζονται από μία μεμβράνη η οποία έχει το ρόλο του ηλεκτρολύτη. Μεταξύ αυτής της πολυμερισμένης μεμβράνης και των ηλεκτροδίων υπάρχει ένα στρώμα καταλύτη. Το υδρογόνο τροφοδοτεί την άνοδο της κυψέλης, το αρνητικό ηλεκτρόδιο, το οποίο ερχόμενο σε επαφή με τον καταλύτη διαχωρίζεται σε θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου και ηλεκτρόνια. Η άνοδος και ο καταλύτης είναι τέτοιας κατασκευής ώστε η διάχυση των ατόμων του υδρογόνου να γίνεται με ομογενή τρόπο. Τα ηλεκτρόνια τα οποία απελευθερώθηκαν μεταφέρονται μέσω εξωτερικού

ηλεκτρικού κυκλώματος προς την άνοδο δημιουργώντας ηλεκτρισμό αφού η μεμβράνη αποτρέπει τη διέλευση τους μέσω αυτής. Για αυτό το λόγο άνοδος και καταλύτης διαλέγονται αγώγιμα υλικά. Τα θετικά φορτισμένα ιόντα του υδρογόνου (στην ουσία αναφερόμαστε σε μεμονωμένα πρωτόνια) διαπερνούν τη μεμβράνη και ενώνονται με το οξυγόνο το οποίο τροφοδοτεί την κάθοδο, το θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο, και παράγεται νερό. Όπως και πριν, την ομογενή διάχυση του οξυγόνου στον καταλύτη εξασφαλίζει η κατασκευή του ηλεκτροδίου. Ο καταλύτης αναλαμβάνει την επιτάχυνση της δημιουργίας του νερού από τα συστατικά του. Στο σχηματισμό του νερού συμμετέχουν εκτός των μορίων του οξυγόνου και των ιόντων του υδρογόνου, τα ηλεκτρόνια τα οποία διοχετεύτηκαν μέσω του εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος στην κάθοδο, στην αρχή της διαδικασίας. Τα δύο στρώματα καταλύτη χρησιμεύουν στην αύξηση της ταχύτητας των αντιδράσεων διάσπασης του μορίου του υδρογόνου και της ένωσης υδρογόνου οξυγόνου για τη δημιουργία νερού, στην άνοδο και στην κάθοδο αντίστοιχα. Συνήθως αποτελείται από ένα πολύ λεπτό στρώμα λευκόχρυσου πάνω σε επιφάνεια άνθρακα. Το στρώμα αυτό είναι και το μέρος του καταλύτη το οποίο βρίσκεται σε επαφή με τη μεμβράνη. Ο καταλύτης είναι τραχύς και πορώδης ώστε να μεγιστοποιεί η εκτεθειμένη επιφάνεια του.

Ψυκραντήρες απορρόφησης

Με τους ψυκραντήρες απορρόφησης πραγματοποιείται μετατροπή της θερμότητας σε ψύξη. Οι τεχνολογίες της ψύξης απορρόφησης βρίσκουν επιτυχή εφαρμογή στις περιπτώσεις όπου υπάρχει διαθέσιμη θερμότητα και δεν υπάρχουν ανάγκες για θερμότητα αλλά υπάρχουν ανάγκες για ψύξη. Τέτοια παραδείγματα είναι τα συστήματα συμπαραγωγής, στα οποία η συμπαραγόμενη θερμότητα κατά τη διάρκεια του χειμώνα χρησιμοποιείται για τη θέρμανση χώρων (π.χ. ξενοδοχεία, νοσοκομεία, μεγάλα δημόσια κτίρια κλπ.), ενώ το καλοκαίρι διοχετεύεται σε ψύκτες απορρόφησης, οι οποίοι παράγουν ψύξη για τον κλιματισμό των χώρων.

Σε γενικές γραμμές, ο κύκλος απορρόφησης αποτελείται από τέσσερα βασικά στάδια:

- 1.** Το ψυκτικό μέσο που χρησιμοποιείται είναι το νερό. Με τον ψεκασμό του νερού σε ένα δοχείο, στο οποίο υπάρχουν συνθήκες κενού και την εξάτμισή του, προκαλείται πτώση της θερμοκρασίας.
- 2.** Οι υδρατμοί που παράγονται απορροφούνται από ένα διαλυτικό μέσο απορρόφησης. Τα απορροφητικά μέσα που χρησιμοποιούνται είναι το Βρωμιούχο Λίθιο (LiBr) και η αμμωνία. Το διάλυμα αμμωνίας χρησιμοποιείται για να επιτευχθούν χαμηλότερες θερμοκρασίες, ενώ αποφεύγεται η τοποθέτηση τέτοιων ψυκτών σε κλειστούς χώρους.
- 3.** Το κορεσμένο διάλυμα αναγεννάτε από μια πηγή θερμότητας (νερό θερμοκρασίας μεγαλύτερης από 70°C ή ατμό χαμηλής πίεσης) και ελευθερώνονται οι υδρατμοί.

4. Οι υδρατμοί συμπυκνώνονται από ένα κατάλληλο ρευστό ψύξης (νερό θερμοκρασίας μικρότερης από 35 °C).

Ο βαθμός απόδοσης (Coefficient of Performance) ενός ψυχαντήρα απορρόφησης δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$COP = \text{αποδιδόμενη ψύξη} / \text{καταναλισκόμενη θερμική ενέργεια}$

Ο βαθμός απόδοσης ενός ψύκτη είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας θερμού νερού που προσάγεται για την αναγέννηση του διαλύματος. Για τους ψύκτες απορρόφησης οι τιμές κυμαίνονται από 0,5 (για θερμό νερό 70 °C) έως και 1,1 (για ατμό). Υπάρχει και η δυνατότητα άμεσης παραγωγής ψύξης από συμβατικό καύσιμο (π.χ. φυσικό αέριο) σε ψύκτες απορρόφησης άμεσης καύσης. Η διαφορά με τους προαναφερόμενους ψύκτες είναι ότι η αναγέννηση του διαλύματος (στάδιο 3) επιτυγχάνεται με τη θερμότητα καύσης φυσικού αερίου και όχι από θερμό νερό ή ατμό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

5.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας γίνονται προσπάθειες εξέλιξης των τεχνολογιών αποθήκευσης της ενέργειας με σκοπό ο τομέας αυτός να γίνει περισσότερο αποδοτικός. Η μέχρι πριν λίγα χρόνια φιλοσοφία αυτού του τομέα βασιζόταν σε τρία στοιχεία: στην παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, στα συστήματα διανομής και στους καταναλωτές. Το νέο στοιχείο που έχει τώρα προστεθεί είναι η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας με την οποία επιτυγχάνεται εξοικονόμηση καυσίμων, μείωση εκπομπών ρύπων και καλύτερη λειτουργία των μονάδων παραγωγής βοηθώντας στην αποφυγή καταστάσεων υπολειτουργίας ή υπερλειτουργίας τους.

Η ηλεκτρική αποθήκευση έχει ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών το οποίο κυμαίνεται από εφαρμογές ποιότητας ισχύος για την διασφάλιση της αξιοπιστίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι εφαρμογές διαχείρισης ενέργειας για την μεγιστοποίηση του κέρδους. Αυτές οι εφαρμογές απαιτούν χρόνους εκφόρτισης από κλάσματα του δευτερολέπτου για εφαρμογές ισχύος μέχρι μερικές ώρες για εφαρμογές ενέργειας.

Γενικά η ηλεκτρική αποθήκευση είναι συμφέρουσα όταν το οριακό κόστος του ηλεκτρισμού είναι μεγαλύτερο από τα κόστη για την αποθήκευση και την ανάκτηση της ενέργειας μαζί με το κόστος της ενέργειας που χάνεται κατά τη διαδικασία.

Η ζήτηση ηλεκτρισμού ποικίλει κατά τη διάρκεια της ημέρας και από εποχή σε εποχή. Βάσει αυτής της λογικής αποθηκεύεται ενέργεια χαμηλού κόστους κατά τη διάρκεια της νύχτας κυρίως και στη συνέχεια αποδίδεται στο δίκτυο τις ώρες αιχμής που η ζήτηση είναι πολύ μεγάλη και η ενέργεια ακριβότερη.

Πιθανές εφαρμογές των συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι:

- i. Χρήση αποθηκευμένης ενέργειας σε περιπτώσεις που οι μονάδες παραγωγής δεν μπορούν να καλύψουν τη ζήτηση.
- ii. Παροχή στρεφόμενης εφεδρείας (παροχή ισχύος σε έκτατες περιπτώσεις).
- iii. Καλύτερη λειτουργία των ΑΠΕ αποθηκεύοντας την περίσσεια ενέργειας που μπορεί να παράγεται και παροχή της στο δίκτυο όταν δεν θα υπάρχει παραγωγή (κυρίως όταν δεν το επιτρέπουν οι κλιματολογικές συνθήκες).

- iv. Επίτευξη κέρδους για τους αυτόνομους παραγωγούς αποθηκεύοντας ηλεκτρική ενέργεια τις ώρες χαμηλού κόστους και χρησιμοποιώντας την τις ώρες υψηλού κόστους.
- v. Αδιάλειπτη παροχή ισχύος.
- vi. Εξασφάλιση ποιότητας ισχύος κυρίως σε περίπτωση σφάλματος λόγω της γρήγορης απόκρισης των μονάδων αποθήκευσης.

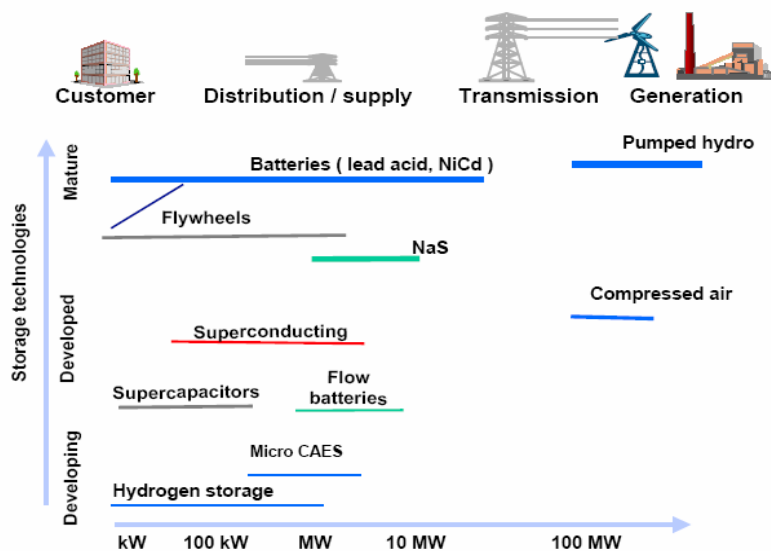
Οι εξελίξεις στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχει παρουσιάσει νέες ευκαιρίες για την εφαρμογή πολλών συστημάτων ηλεκτρικής αποθήκευσης για καλύτερη ενεργειακή διαχείριση, κυρίως στους τομείς των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της διεσπαρμένης παραγωγής. Ακολουθεί μία παρουσίαση των διαφόρων μεθόδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

Αρχικά πρέπει να επισημανθεί ότι τα μέσα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζουν τη λειτουργία τους στη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε χημική, μαγνητική ή δυναμική και στη συνέχεια στην εκ νέου μετατροπή αυτής της ενέργειας σε ηλεκτρική. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται διάφορες διατάξεις αποθήκευσης που αντιστοιχούν σε κάθε μορφή μετατροπής [7].

<i>Μορφή μετατροπής</i>	<i>Διάταξη</i>
Ηλεκτρική	Υπερ-πυκνωτές
Μαγνητική	Υπεραγωγικά υλικά (μαγνητική αποθήκευση)
Δυναμική-κινητική	Αντλησιοταμίευση Στρεφόμενες μάζες-σφόνδυλοι Συμπιεσμένος αέρας
Χημική	Μπαταρίες

Πίνακας 5.1. Διατάξεις αποθήκευσης

Κάθε διάταξη αποθήκευσης έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που την καθιστούν καταλληλότερη από κάποια άλλη για συγκεκριμένες εφαρμογές. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζονται το μέγεθος, οι εφαρμογές και η τεχνολογική ωριμότητα των διαφόρων πηγών αποθήκευσης [8].



Εικόνα 5.1. Τεχνολογίες αποθήκευσης

5.2 Μπαταρίες

Είναι ίσως η σημαντικότερη διάταξη αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Η βασική αρχή λειτουργίας των μπαταριών είναι ότι αποθηκεύουν χημική ενέργεια και την αποδεσμεύουν μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων με τη μορφή ηλεκτρισμού. Τα βασικά χαρακτηριστικά των μπαταριών τα οποία εξετάζονται για την επιλογή της καταλληλότερης διάταξης αποθήκευσης είναι η διάρκεια ζωής (σε κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης), ο χρόνος φόρτισης και εκφόρτισης, η ενεργειακή πυκνότητα, το βάθος εκφόρτισης και το κόστος.

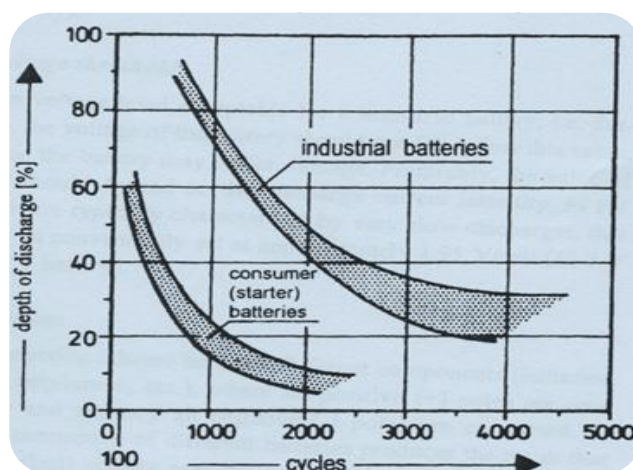
Παράλληλα υπάρχουν κάποιες πολύ σημαντικές παράμετροι σχετικά με τη λειτουργία των μπαταριών και οι οποίες έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην δημιουργία του μαθηματικού μοντέλου αφού εξασφαλίζουν το ισοζύγιο ενέργειας. Ο πίνακας που ακολουθεί παρουσιάζει ενδεικτικά αυτές τις παραμέτρους και τις τιμές τους για τις μπαταρίες οξέως μολύβδου και τις μπαταρίες ροής [1].

	Περιγραφή	Μπαταρίες οξέως μολύβδου	Μπαταρίες ροής
Απόδοση φόρτισης	αναλογία της ενέργειας εισόδου με αυτή που τελικά χρησιμοποιείται	0,9	0,84
Απόδοση εκφόρτισης	αναλογία της ενέργειας εξόδου με αυτή που τελικά χρησιμοποιείται	1	0,84
Συντελεστής απωλειών	μέρος της αποθηκευμένης ενέργειας που χάνεται ανά ώρα	0,001	0,01
Συντελεστής μέγιστης φόρτισης	μέγιστη ποσότητα που μπορεί να προστεθεί για αποθήκευση μέσα σε μία ώρα αναλογικά με την ονομαστική χωρητικότητα	0,1	-
Συντελεστής μέγιστης εκφόρτισης	μέγιστη ποσότητα που μπορεί να αποφορτιστεί μέσα σε μία ώρα αναλογικά με την ονομαστική χωρητικότητα	0,25	-
Ελάχιστη φόρτιση	ελάχιστη κατάσταση φόρτισης σε σχέση με την ονομαστική χωρητικότητα	0,3	0,25

Πίνακας 5.2. Παράμετροι μπαταριών που χρησιμοποιήθηκαν στον κώδικα

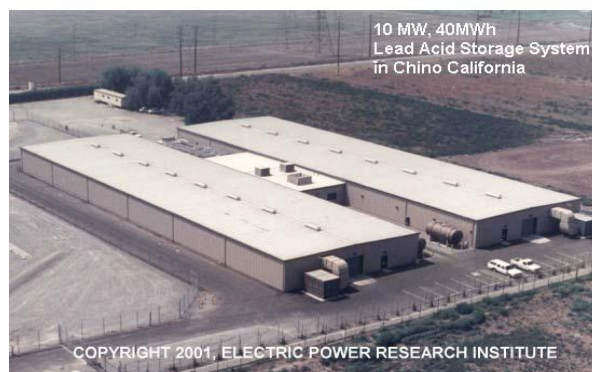
5.2.1 Μπαταρίες οξέως μολύβδου

Είναι η πιο κοινή μορφή επαναφορτιζόμενης μπαταρίας για ηλεκτρική αποθήκευση. Έχει το μικρότερο κόστος και παρόλο που έχουν χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα (30-40 Wh/Kg) είναι πολύ αξιόπιστες σε απότομες μεταβολές του ρεύματος, κάτι το οποίο είναι απαραίτητο για εφαρμογές σε κέντρα δεδομένων, σε οχήματα και σε τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές. Η απόδοση τους κυμαίνεται από 70% έως 85% και συνήθως η διάρκεια ζωής τους είναι περίπου 1000 κύκλοι φόρτισης/εκφόρτισης. Στο ακόλουθο διάγραμμα φαίνεται πως μειώνεται η διάρκεια ζωής τους σε συνάρτηση με το βάθος εκφόρτισης [7].



Εικόνα 5.2. Διάρκεια ζωής συναρτήσει του βάθους εκφόρτισης των μπαταριών οξέως-μολύβδου

Παρά τις πολλαπλές εφαρμογές τους και το χαμηλό κόστος, αναπτύσσονται εναλλακτικές εξαιτίας της χαμηλής τους χωρητικότητας σε αποθήκευση, των τοξικών υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους και τις επιπτώσεις στο περιβάλλον από την αποσύνθεσή τους. Ακόμη ο μικρός χρόνος ζωής τους είναι ένας περιοριστικός παράγοντας σε εφαρμογές διαχείρισης ενέργειας. Έχουν όμως χρησιμοποιηθεί σε μερικές μεγάλης κλίμακας εφαρμογές διαχείρισης ενέργειας. Η μεγαλύτερη εφαρμογή τους είναι μία των 40MWh που κατασκευάστηκε στην Καλιφόρνια το 1988 [8]. Η ποσότητα ενέργειας (kWh) που μπορεί να αποδώσει μία μπαταρία οξέως μολύβδου δεν είναι σταθερή και εξαρτάται από το λόγο εκφορτίσεως της.



Εικόνα 5.3. Εγκατάσταση μπαταριών οξέως – μολύβδου στην Καλιφόρνια

Μία απλή κυψέλη (η μικρότερη μονάδα μιας μπαταρίας) οξέως μολύβδου αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια κράματος μολύβδου εμβαπτισμένα σε έναν 20%-30% ηλεκτρολύτη θεικού οξέως. Μόλις φορτιστούν, μία κυψέλη οξέως μολύβδου παρέχει τάση περίπου 2V. Έτσι μία τυπική μπαταρία οξέως μολύβδου των 12V αποτελείται από έξι απλές κυψέλες οξέως μολύβδου συνδεδεμένες σε σειρά.

Βασικές κατηγορίες των μπαταριών οξέως μολύβδου.

Οι μπαταρίες οξέως μολύβδου κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με τις επικρατούσες συνθήκες λειτουργίας για τις οποίες έχουν σχεδιασθεί και πιο συγκεκριμένα σύμφωνα με τη διάρκεια του χρόνου εκφόρτισης ως εξής [7]:

- Για εκφορτίσεις μόνο λίγων δευτερολέπτων (τυπικές μπαταρίες εκκίνησης),
- 5-10 λεπτά εκφορτίσεις (π.χ. τροφοδοτικά μικρής διάρκειας [UPS]),
- 30 λεπτά- 1 ώρα (π.χ. εφεδρικά UPS),
- 10 ώρες και περισσότερο (π.χ. σε φωτοβολταϊκά συστήματα, σε τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές).

Οι μπαταρίες που είναι σχεδιασμένες για υπερβολικά μικρές και ισχυρές εκφορτίσεις έχουν μία υψηλά ηλεκτροδιακή επιφάνεια ώστε να μειώνουν την εσωτερική ηλεκτρική τους αντίσταση (έτσι διευκολύνεται η ανταλλαγή ιόντων μεταξύ ηλεκτροδίων και ηλεκτρολυτών). Τα ηλεκτρόδια είναι για αυτό το λόγο σχετικά λεπτά και έχουν μικρότερη ποσότητα μολύβδου. Οι μπαταρίες αυτές είναι σχεδιασμένες να δίνουν ρεύμα μεγάλης έντασης για μικρό χρονικό διάστημα (το μέγιστο λίγα λεπτά).

Αντίθετα, οι μπαταρίες για μεγάλης διάρκειας και ασθενείς εκφορτίσεις έχουν μικρότερη ηλεκτροδιακή επιφάνεια (εδώ δεν είναι απαραίτητη η γρήγορη ανταλλαγή ιόντων), αλλά τα ηλεκτρόδια έχουν μεγαλύτερο πάχος. Είναι σχεδιασμένες να παρέχουν ρεύματα μικρής έως μέτριας έντασης για μεγαλύτερο χρόνο, γι' αυτό το λόγο τα ηλεκτρόδια τους έχουν μεγαλύτερο πάχος και περισσότερο μολύβδο (έτσι εξασφαλίζεται η απαιτούμενη χωρητικότητα για την αποθήκευση).

Εμπορικά οι μπαταρίες οξέως μολύβδου κατατάσσονται σύμφωνα με τη σχεδίαση τους και συγκεκριμένα σύμφωνα με τον προβλεπόμενο χρόνο εκφόρτισης ως εξής:

- Μπαταρίες εκκίνησης οχημάτων
- Μπαταρίες έλξης
- Μπαταρίες για παροχή εφεδρικής ισχύος (UPS)
- Στατικές βιομηχανικές μπαταρίες
- Μπαταρίες με ημιστερεό ηλεκτρολύτη που δεν χρειάζονται συντήρηση
- Ειδικές ηλιακές μπαταρίες για φωτοβολταϊκά

5.2.2 Μπαταρίες νικελίου-καδμίου (Ni-Cd)

Οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου έχουν ως βασικό τους πλεονέκτημα το μεγάλο χρόνο ζωής τους και ότι δεν απαιτείται παρακολούθηση κατά τη λειτουργία τους. Ενσωματώνουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά σχεδιασμού μπαταριών για να αποτρέψουν τη συγκέντρωση πίεσης στην μπαταρία που προκαλείται με την έκλυση αερίων κατά τη διάρκεια της υπερφόρτισης. Κατά συνέπεια, οι μπαταρίες μπορούν να σφραγιστούν και δεν απαιτούν καμία άλλη επιδιόρθωση ή συντήρηση εκτός από την επαναφόρτιση. Γι' αυτό το λόγο μπορούν να τοποθετηθούν σε απομακρυσμένες περιοχές με δυσμενείς κλιματολογικές συνθήκες. Μειονεκτήματα τους είναι το υψηλό κόστος και τα τοξικά απόβλητα μετά τη χρήση τους.

Η πιο χαρακτηριστική εγκατάσταση αυτού του είδους μπαταριών είναι στην Αλάσκα για μια τοπική εταιρία και η οποία περιλαμβάνει 13760 μπαταρίες νικελίου – καδμίου και μπορεί να παρέχει 27 MW για 15 λεπτά και 46MW για 4 μόλις λεπτά. Ως εναλλακτική πρόταση για αυτές τις μπαταρίες είναι οι μπαταρίες Ni-MH (nickel-metal Hybride) οι οποίες έχουν λιγότερο τοξική συμπεριφορά, μεγάλη πυκνότητα ενέργειας και μεγάλο χρόνο ζωής.

5.2.3 Μπαταρίες και φωτοβολταϊκά

Οι βασικές συνθήκες λειτουργίας που συμβαίνουν σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή της μπαταρίας που θα χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση της ενέργειας των φωτοβολταϊκών είναι [7]:

- πολύ μικρά ρεύματα φόρτισης/εκφόρτισης,
- μεγάλης διάρκειας φορτίσεις και εκφορτίσεις (συνήθως πάνω από 20 ώρες),
- πολύ ισχυρές εκφορτίσεις (70% βάθος εκφόρτισης),
- τυχαίες και διαφορετικές σε μέγεθος φορτίσεις/εκφορτίσεις,
- μεγάλη διάρκεια ζωής (συνήθως πάνω από 1500 κύκλους).

Η μεγαλύτερη δυσκολία που πρέπει να αντιμετωπιστεί σχετικά με τα φωτοβολταϊκά και την αποθήκευση ενέργειας είναι ο εποχιακός χαρακτήρας των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Όπως είναι γνωστό η λειτουργία τους εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία η οποία φυσικά και διαφέρει κατά τη διάρκεια του έτους. Η μεγαλύτερη πρόκληση σε αυτόν τον τομέα είναι το να σχεδιασθεί μία μπαταρία για φωτοβολταϊκά η οποία θα μπορεί να λειτουργεί εποχιακά ανάλογα με τις μεταβολές στην ηλιακή ακτινοβολία. Κάτι τέτοιο δεν μπορεί να γίνει κυρίως για τους εξής λόγους:

- Στην περίπτωση μακροχρόνιας αποθήκευσης η αυτοεκφόρτιση των μπαταριών παίζει σημαντικό ρόλο και δημιουργεί μεγάλες απώλειες ενέργειας.
- Μία μπαταρία μεγάλης χωρητικότητας συνδυάζεται με ένα μικρό φωτοβολταϊκό (διαφορετικά δεν υπάρχει οικονομικό πλεονέκτημα στην αύξηση του μεγέθους της μπαταρίας) το οποίο θα παράγει μικρό ρεύμα φόρτισης. Όμως οι μπαταρίες μολύβδου οξέως και ακόμη περισσότερο οι μπαταρίες νικελίου καδμίου χρειάζονται ένα μεγαλύτερο ρεύμα φόρτισης. Αν ποτέ δεν φθάσει ένα ισχυρό

ρεύμα στην μπαταρία τότε ο ηλεκτρολύτης θα διαχωρισθεί κάτι το οποίο είναι καταστροφικό για τη λειτουργία της μπαταρίας.

Σε περιπτώσεις μέγιστης ηλιακής ακτινοβολίας το ρεύμα φόρτισης που δημιουργείται από το φωτοβολταϊκό (ισούται με το ρεύμα που εξέρχεται από τη γεννήτρια του φωτοβολταϊκού μείον το ρεύμα του φορτίου) πρέπει τουλάχιστον μερικές φορές να πλησιάζει το ονομαστικό ρεύμα φόρτισης της μπαταρίας (συνήθως είναι το ρεύμα με το οποίο η μπαταρία μπορεί να φορτιστεί πλήρως σε δέκα ώρες). Αν δεν συμβεί αυτό τότε πρέπει μία συμβατική γεννήτρια να παρέχει το επιπλέον ρεύμα που χρειάζεται η μπαταρία (τουλάχιστον κάθε 3 μήνες).

Οι μπαταρίες οξέως μολύβδου και οι μπαταρίες νικελίου καδμίου είναι οι πλέον χρησιμοποιούμενες για αποθήκευση ενέργειας σε φωτοβολταϊκά συστήματα. Οι βασικές διαφορές τους είναι:

- Οι μπαταρίες οξέως μολύβδου έχουν μεγαλύτερη αποδοτικότητα αποθήκευσης.
- Είναι η πιο συμφέρουσα λύση από άποψη κόστους-απόδοσης.
- Το επιπλέον κόστος των μπαταριών νικελίου καδμίου δικαιολογείται μόνο όταν η μπαταρία πρόκειται να τοποθετηθεί σε ιδιαίτερες συνθήκες λειτουργίας όπως είναι:
 - πολύ χαμηλές θερμοκρασίες ($< 0^{\circ}\text{C}$), όπου οι μπαταρίες οξέως μολύβδου έχουν πολύ χαμηλή απόδοση,
 - περιπτώσει όπου απαιτείται μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα, π.χ. όταν ο τροφοδοτούμενος εξοπλισμός χρειάζεται ρεύμα υψηλής έντασης και απαιτείται μεγάλη αντοχή σε συνεχόμενες φορτίσεις/εκφορτίσεις (οι μπαταρίες οξέως μολύβδου δεν μπορούν να αντέξουν πολλούς κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης), κάτι σπάνιο όμως για φωτοβολταϊκά συστήματα,
 - σε περιπτώσεις που προβλέπεται συχνή υπερφόρτιση ή βαθιά εκφόρτιση της μπαταρίας.

Παρά τη δυνατότητα των μπαταριών νικελίου καδμίου να λειτουργούν σε τέτοιες συνθήκες έχουν και κάποια βασικά μειονεκτήματα:

- Παρουσιάζουν το «φαινόμενο μνήμης», δηλαδή σε περίπτωση που η μπαταρία για μεγάλο χρονικό διάστημα λειτουργεί σε εκφορτίσεις μικρού βάθους, η διαθέσιμη χωρητικότητα της μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Έτσι σε περίπτωση που χρειαστεί επιπλέον χωρητικότητα η μπαταρία αρχικά δεν μπορεί να φθάσει την ονομαστική της χωρητικότητα. Αυτό μπορεί να γίνει μόνο αν η μπαταρία υποβληθεί σε μία σειρά ολοκληρωμένων κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης.
- Έχουν μικρότερη απόδοση από τις οξέως μολύβδου.
- Αν το ρεύμα φόρτισης είναι μικρό ($< 30\%$ του ονομαστικού ρεύματος της μπαταρίας) είναι δύσκολο να φορτιστεί πλήρως η μπαταρία. Γι' αυτό το λόγο σε

ένα φωτοβολταϊκό σύστημα δεδομένης ισχύος μία μπαταρία νικελίου καδμίου πρέπει να έχει μικρότερη χωρητικότητα από μία μπαταρία οξέως μολύβδου.

Η τυπική συντήρηση των μπαταριών (κυρίως των οξέως μολύβδου) σε φωτοβολταϊκά συστήματα περιλαμβάνει τα εξής:

- Περιοδική μέτρηση (τουλάχιστον κάθε 3 μήνες) της πυκνότητας των ηλεκτρολυτών.
- Έλεγχος του επιπέδου του ηλεκτρολύτη σε μηνιαία βάση. Αν χρειαστεί ο ηλεκτρολύτης θα πρέπει να συμπληρωθεί μόνο με απεσταγμένο νερό.
- Οι πόλοι της μπαταρίας πρέπει να προστατεύονται από τη διάβρωση με βαζελίνη ή κάποιο άλλο υλικό κατάλληλο για ηλεκτρικές εγκαταστάσεις.
- Η ηλεκτρική αγωγιμότητα των πόλων πρέπει να ελέγχεται τουλάχιστον κάθε έξι μήνες.

5.2.4 Μπαταρίες ροής

Παρόλο που πρόκειται για μία σχετικά καινούργια τεχνολογία, οι μπαταρίες ροής έχουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μπαταρίες. Όχι μόνο μπορούν να αποφορτίζονται πλήρως με ασφάλεια αλλά μπορούν να εκτελέσουν μέχρι και 10000 κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης με σχεδόν μηδενική μείωση στην απόδοση. Οι μπαταρίες ροής χρησιμοποιούν υγρούς ηλεκτρολύτες. Αποθηκεύονται σε δεξαμενές σε στρώσεις κυψελών για φόρτιση και εκφόρτιση. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι οι χωρητικότητες ενέργειας και ισχύος είναι εντελώς ανεξάρτητες μεταξύ τους. Η χωρητικότητα ενέργειας (kWh) εξαρτάται από το μέγεθος της δεξαμενής του ηλεκτρολύτη (electrolyte tank) ενώ η χωρητικότητα ισχύος (kW) εξαρτάται από το μέγεθος των αντλιών και των κυψελών [1].

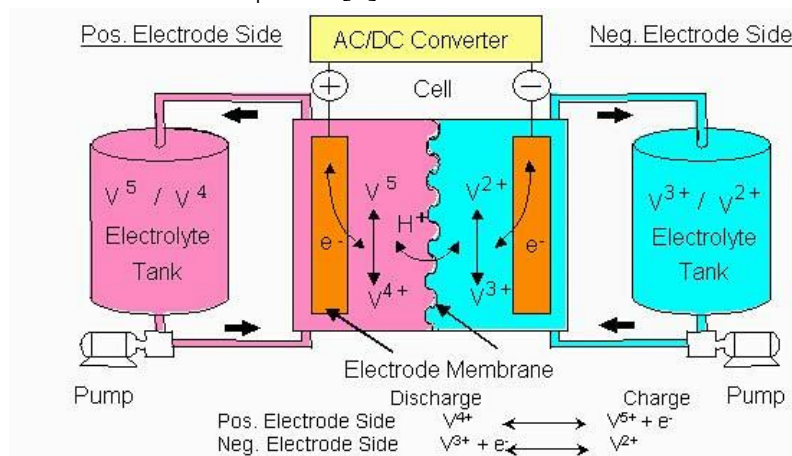


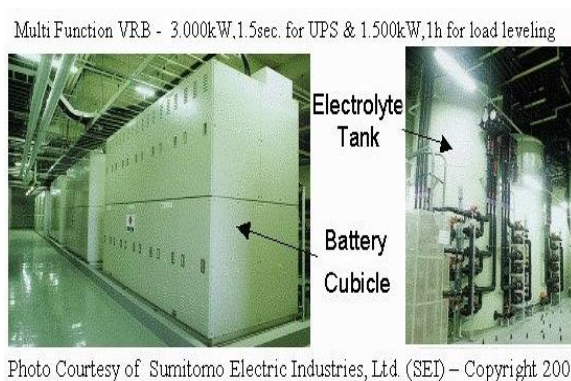
Photo Courtesy of Sumitomo Electric Industries, Ltd. (SEI) – Copyright 2001

Εικόνα 5.4. Διάταξη μπαταρίας ροής

Στο σημείο αυτό καλό θα ήταν να αναφερθούμε επιγραμματικά στις έννοιες της χωρητικότητας ενέργειας και χωρητικότητας ισχύος. Η χωρητικότητα ισχύος έχει να κάνει με το πόσα kW μπορεί να αποδώσει μία μπαταρία ενώ η χωρητικότητα ενέργειας

έχει να κάνει με το πόσες ώρες (h) μπορεί να αποδίδει αυτά τα kW (kWh). Σε όλες τις μπαταρίες οι δύο αυτές χωρητικότητες συνδέονται. Στις μπαταρίες ροής όμως είναι ανεξάρτητες.

Το υλικό του ηλεκτρολύτη εξαρτάται από τους κατασκευαστές και γενικά χρησιμοποιούνται μπαταρίες οξειδαναγωγής βαναδίου (VRB) και μπαταρίες βρωμιούχου ψευδάργυρου (ZBB). Τα συστήματα VRB είναι σχεδιασμένα για να αποθηκεύουν και να απελευθερώνουν ενέργεια για μεγάλα χρονικά διαστήματα αλλά μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για UPS (uninterrupted power supply). Οι συμβατικές συσκευές UPS δεν είναι σχεδιασμένες για αποθήκευση ενέργειας. Συστήματα VRB μέχρι 5MWh έχουν εγκατασταθεί στην Ιαπωνία από την SEI (Sumitomo Electric Industries).



Εικόνα 5.5. Συστήματα μπαταριών ροής στην Ιαπωνία

Οι κυψέλες κυκλοφορούν σε εύρος από μερικές εκατοντάδες kW έως MW σε μέγεθος και από 500\$ έως 800\$ ανά kWh σε κόστος. Όσο η συνολική χωρητικότητα του συστήματος αυξάνεται, το κόστος ανά kWh μειώνεται σημαντικά. Για μεγαλύτερα συστήματα το οριακό κόστος των κυψελών αναμένεται να είναι περίπου 220\$ ανά kWh. Τα αντίστοιχα κόστη ισχύος είναι της τάξης των 2000\$/kW, στα οποία δεν υπολογίζονται το κόστος για τη σύνδεση στο δίκτυο και του σχεδιασμού από τους μηχανικούς. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα φαίνεται να είναι το υψηλό κόστος. Αυτό οφείλεται στο ότι οι μπαταρίες ροής χρειάζονται σταθερές περιβαλλοντικές συνθήκες, απαιτώντας συχνά κτήρια γύρω από τις μπαταρίες, το οποίο αναμφίβολα δημιουργεί υψηλό κόστος.

5.2.5 Μπαταρίες λιθίου-ιόντος (Li-Ion)

Οι μπαταρίες λιθίου χρησιμοποιούνται κυρίως σε κινητά τηλέφωνα και φορητούς υπολογιστές εξαιτίας της υψηλής ενεργειακής τους πυκνότητας (150-200 Wh/kg) και λόγω του μικρού τους βάρους αφού το λίθιο είναι ένα πολύ ελαφρύ στοιχείο. Μεγαλύτερες μπαταρίες λιθίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διαχείριση ενέργειας και σαν UPS σε κτήρια. Ένα μεγάλο τους μειονέκτημα είναι το υψηλό κόστος επένδυσης (500\$/kWh-1500\$/kWh). Αντίθετα, ένα σημαντικό τους πλεονέκτημα είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής τους που κυμαίνεται από 1200 έως 3000 κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης. Οι μπαταρίες λιθίου δεσμεύουν λιγότερο χώρο και εκφορτίζονται

γρηγορότερα από τις μπαταρίες μολύβδου οξέως και τις μπαταρίες νικελίου. Η απόδοση φόρτισης/εκφόρτισης φθάνει και το 85%. Πολλές εταιρίες προσπαθούν να μειώσουν το κόστος κατασκευής των μπαταριών λιθίου ώστε να διεισδύσουν σε μεγάλες αγορές ενέργειας. Η βιομηχανία αυτοκινήτων είναι πρωτοπόρα σε αυτήν την προσπάθεια. Σε χαμηλότερα κόστη οι μπαταρίες λιθίου θα μπορούσαν να συμβάλουν σημαντικά στην ανάπτυξη των οχημάτων που λειτουργούν με ηλεκτρισμό.

5.2.6 Μπαταρίες θειούχου νατρίου (NaS)

Οι μπαταρίες θειούχου νατρίου έχουν μεγάλη χωρητικότητα ισχύος, φθάνουν μέχρι την κλίμακα των MW. Η ενεργειακή τους πυκνότητα είναι περίπου 120 Wh/kg και είναι τρεις φορές μεγαλύτερη από αυτήν των μπαταριών οξέως μολύβδου. Η απόδοση φόρτισης/εκφόρτισης φθάνει το 90%, η διάρκεια ζωής τους είναι περίπου 2500 κύκλοι και το κόστος τους περίπου 600\$/kWh. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εξομάλυνση των αιχμών που προκύπτει από την μεταβλητή έξοδο των φωτοβλαϊκών. Η πιο σημαντική εφαρμογή τους αφορά εγκαταστάσεις ενίσχυσης έργου ισχύος σε υποσταθμούς. Η μεγαλύτερη εγκατάσταση μπαταριών θειούχου νατρίου είναι μία μονάδα 34MW/245MWh για σταθεροποίηση της ενέργειας που παρέχουν οι ανεμογεννήτριες στην βόρεια Ιαπωνία.



Εικόνα 5.6. Εγκαταστάσεις μπαταριών θειούχου νατρίου

Η ζήτηση αυτών των μπαταριών σαν μέσο σταθεροποίησης της εξόδου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι συνεχώς αυξανόμενη. Ένα μεγάλο τους μειονέκτημα είναι ότι πρέπει πάντοτε να είναι σε λειτουργία και έτσι να καταναλώνουν ηλεκτρισμό ώστε να διατηρούν την υψηλή θερμοκρασία που χρειάζονται για να λειτουργήσουν (320-340 °C).

5.2.7 Μπαταρίες μετάλλου-αέρος (metal-air)

Είναι οι πιο συμπαγείς μπαταρίες και οι πιο οικονομικές μπαταρίες. Ακόμη είναι σχετικά φιλικές προς το περιβάλλον. Οι άνοδοι αυτών των μπαταριών είναι μέταλλα με μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα όπως αλουμίνιο και ψευδάργυρος τα οποία όταν οξειδωθούν απελευθερώνουν ηλεκτρόνια. Το μεγαλύτερο μειονέκτημά αυτών των μπαταριών είναι ότι δεν μπορούν να επαναφορτιστούν εύκολα. Η δημιουργία αποδοτικών επαναφορτιζόμενων μπαταριών μετάλλου-αέρος βρίσκεται σε εξέλιξη και η μέχρι τώρα δυνατότητες αυτών των μπαταριών είναι λίγες εκατοντάδες κύκλοι διάρκεια

ζωής και απόδοση περίπου 50%. Παρά την υψηλή ενεργειακή τους πυκνότητα και το χαμηλό κόστος τους, το βασικό τους μειονέκτημα δεν τις καθιστά συγκρίσιμες με τις άλλες μπαταρίες. Είναι κατάλληλες μόνο σε πολύ απλές χρήσεις μπαταριών.

Ακολουθεί ένα συγκεντρωτικός πίνακας με τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά και τα κόστη των βασικών μπαταριών που χρησιμοποιούνται για ηλεκτρική αποθήκευση.

	Οξέως μολύβδου	Ροής	Λιθίου- ιόντος	Θεικού νατρίου
Κόστος επένδυσης (\$/kWh)	100-200	500-800	500-1500	600
Κόστη σχετικά με την ισχύ (\$/kW)	125-175	2125	175-200	150
Κόστος συντήρησης (\$/kWh a)	5-15	20	10-25	20
Ενεργειακή πυκνότητα (Wh/kg)	30-40	25	150-200	100-120
Διάρκεια ζωής (σε κύκλους)	500-800	13000+	1200-3000	2500
Βάθος εκφόρτισης (%)	80	100	80	100
Απόδοση φόρτισης/εκφόρτισης (%)	70-90	85	85	90

Πίνακας 5.3. Βασικά χαρακτηριστικά και κόστη μπαταριών

5.3 Στρεφόμενες μάζες-σφόνδυλοι (flywheels)

Οι στρεφόμενες μάζες ή σφόνδυλοι (flywheels), αναμένεται να έχουν εφαρμογές παροχής ισχύος και ενέργειας για μικρά χρονικά διαστήματα και κυρίως για την παροχή εφεδρείας και όχι τόσο για την παροχή ενέργειας. Η ενέργεια που αποθηκεύεται με την περιστροφή μίας στρεφόμενης μάζας σε υψηλή ταχύτητα μπορεί να μετατραπεί ξανά σε ηλεκτρική ισχύ με τη σύνδεση της μάζας σε μια γεννήτρια. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης ο σφόνδυλος επιταχύνεται από έναν ηλεκτροκινητήρα ο οποίος κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης λειτουργεί ως γεννήτρια παράγοντας ηλεκτρισμό από την κινητική ενέργεια περιστροφής του σφονδύλου. Οι περισσότεροι σφόνδυλοι μπορούν να εκτελέσουν μερικές χιλιάδες κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης. Ο χρόνος εκφόρτισης αυτών των διατάξεων κυμαίνεται μεταξύ λίγων sec και μέχρι 15-30 min, βοηθώντας περισσότερο από τις μπαταρίες σε εφαρμογές ισχύος παρά ενέργειας. Η ενέργεια που μπορεί να αποδώσει ένα τέτοιο σύστημα αποθήκευσης εξαρτάται από το μέγεθος και την ταχύτητα περιστροφής του στροφέα και η ισχύς εξόδου εξαρτάται από τον κινητήρα-γεννήτρια. Τα μειονεκτήματα των σφονδύλων είναι η μικρή ενεργειακή πυκνότητα και οι μεγάλες απώλειες όταν είναι σε κατάσταση αναμονής. Όμως αντίθετα από τις μπαταρίες, τα συστήματα στρεφόμενων μαζών δεν είναι ευαίσθητα στη θερμοκρασία και η απόδοσή τους μπορεί να φτάσει ως και 80-90% χωρίς ιδιαίτερη

πτώση της απόδοσής τους με το χρόνο ζωής τους ο οποίος φτάνει τα 15-20 χρόνια με μικρή συντήρηση.

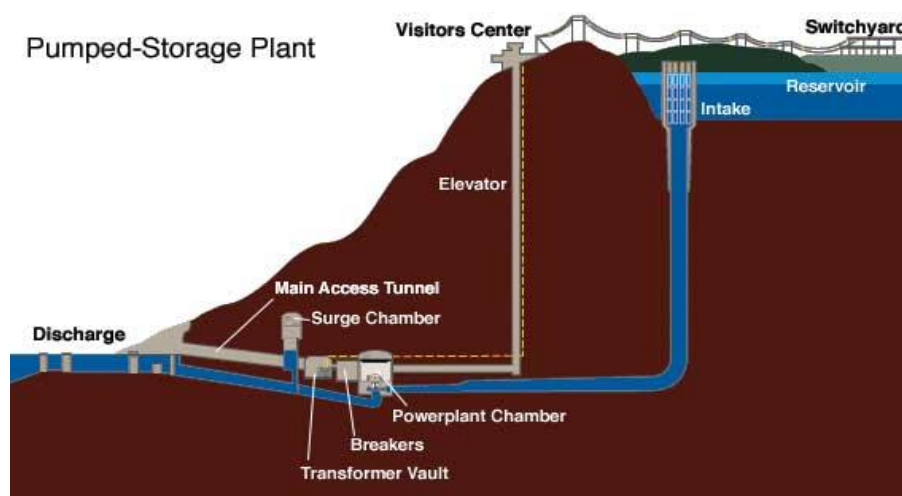
Υψηλής ισχύος σφόνδυλοι έχουν χρησιμοποιηθεί στην αεροδιαστημική και σε εφαρμογές UPS και τώρα γίνονται προσπάθειες να μειωθεί το κόστος των σφονδύλων που προορίζονται για λειτουργία μακράς διάρκειας (μέχρι μερικές ώρες). Συστήματα των 2kW/6kWh χρησιμοποιούνται σε τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές. Σαράντα σφόνδυλοι των 25kW μπορούν να αποθηκεύσουν αποτελεσματικά 1MW για μία ώρα καταλαμβάνοντας λίγο χώρο. Εγκαταστάσεις του 1MW έχουν κόστος επένδυσης από 550χιλ. \$ έως 750χιλ. \$.

5.4 Υπερπυκνωτές (super-capacitors)

Η χωρητικότητα και η ενεργειακή πυκνότητα αυτών των συσκευών είναι χιλιάδες φορές μεγαλύτερες από αυτές των ηλεκτρολυτικών πυκνωτών. Έχουν μικρότερη ενεργειακή πυκνότητα σε σχέση με τις μπαταρίες οξέως μολύβδου αλλά μπορούν να εκτελέσουν δεκάδες χιλιάδες κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης και επίσης έχουν την ικανότητα να φορτίζονται και να εκφορτίζονται σε μικρούς χρόνους. Οι κυριότερες εφαρμογές τους αφορούν υποστήριξη τάσης, βελτίωση του συντελεστή ισχύος και υποστήριξη ενεργού και άεργου ισχύος. Αποτελούν μια αποτελεσματική λύση σε παροχή ποιότητας ισχύος στα δίκτυα διανομής.

5.5 Αντλησιοταμίευση (pumped hydro storage)

Οι εγκαταστάσεις αυτές αποθηκεύουν την πλεονάζουσα ενέργεια αντλώντας νερό σε ταμιευτήρα που βρίσκεται σε κάποιο υψόμετρο και την αποδίδουν στη συνέχεια στο σύστημα μέσω υδροστροβίλων, όταν αυτό επιτρέπεται. Με τις σημερινές τεχνολογικές δυνατότητες είναι η μόνη ρεαλιστική και βιώσιμη μέθοδος ηλεκτρικής αποθήκευσης για νησιωτικά συστήματα. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται μία τυπική εγκατάσταση αντλησιοταμίευσης.

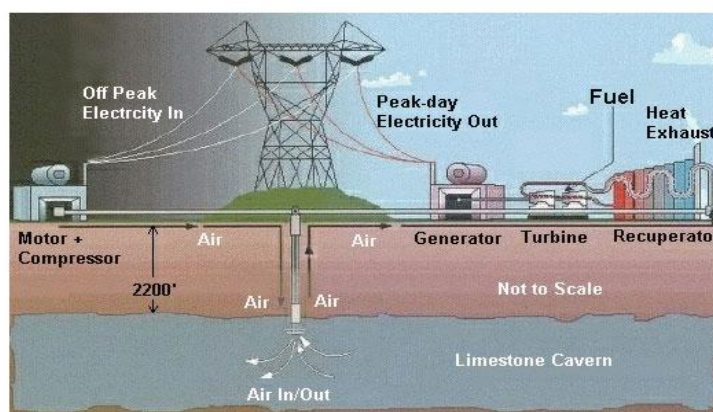


Εικόνα 5.7. Τυπική μορφή αντλησιοταμιευτικού συστήματος

Τα αντλησιοταμιευτικά συστήματα χρησιμοποιήθηκαν αρχικά στην Ιταλία και στην Ελβετία τη δεκαετία του '80. Σήμερα είναι διαθέσιμα σχεδόν σε κάθε κλίμακα με χρόνους εκφόρτισης που κυμαίνονται από μερικές ώρες μέχρι λίγες ημέρες. Η απόδοση τους φθάνει το 70% με 85%. Παγκοσμίως υπάρχουν σε λειτουργία πάνω από 90GW αντλησιοταμίευσης. Οι εγκαταστάσεις αντλησιοταμίευσης έχουν ως μειονεκτήματα το μεγάλο χρόνο κατασκευής τους, το υψηλό κόστος επένδυσης και την εύρεση κατάλληλου χώρου για τη δημιουργία τους. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές διαχείρισης ενέργειας και ελέγχου συχνότητας.

5.6 Συστήματα συμπιεσμένου αέρα (CAES)

Τα συστήματα συμπιεσμένου αέρα δεν είναι μία απλή διάταξη αποθήκευσης. Πρόκειται για έναν αεριοστρόβιλο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνει λιγότερο από 40% του καυσίμου που χρησιμοποιείται στους συμβατικούς αεριοστρόβιλους για να παραχθεί η ίδια ποσότητα ηλεκτρικής ισχύος. Αυτό συμβαίνει γιατί, αντίθετα από τους συμβατικούς αεριοστρόβιλους που καταναλώνουν περίπου τα 2/3 του καυσίμου για να συμπιέσουν τον αέρα κατά τη διάρκεια της παραγωγής, τα συστήματα συμπιεσμένου αέρα προσυμπιέζουν τον αέρα χρησιμοποιώντας ηλεκτρισμό από το δίκτυο όταν έχει χαμηλό κόστος και δεν υπάρχει ζήτηση και χρησιμοποιούν αυτή την ενέργεια αργότερα σε συνδυασμό με αέρια καύσιμα για να παραχθεί η ποσότητα ηλεκτρισμού που χρειάζεται. Ο συμπιεσμένος αέρας συχνά αποθηκεύεται σε υπόγεια ορυχεία που δημιουργούνται στο εσωτερικό πετρωμάτων άλατος. Διαρκεί περίπου 1,5 με 2 χρόνια να δημιουργηθεί μία τέτοια γεωλογική δομή. Γι' αυτό το λόγο υπάρχουν μόνο δύο τέτοιες εγκαταστάσεις μία στις ΗΠΑ των 110 MW και μία στην Γερμανία των 290 MW.



Εικόνα 5.8. Σύστημα συμπιεσμένου αέρα

5.7 Υπεραγωγικά – μαγνητική αποθήκευση (SMES)

Τα συστήματα SMES (superconducting magnetic energy storage) αποθηκεύουν ενέργεια στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τη ροή συνεχούς ρεύματος σε ένα

υπεραγώγιμο πηνίο το οποίο έχει υποστεί κρυογονική ψύξη σε μία θερμοκρασία κάτω από την κρίσιμη θερμοκρασία του, όπου τότε εμφανίζει τις υπεραγώγιμες ιδιότητές του.

Ένα τυπικό σύστημα μαγνητικής αποθήκευσης αποτελείται από τρία μέρη: το υπεραγώγιμο πηνίο, ένα κρυογονικό ψυγείο και ένα σύστημα βελτίωσης της ποιότητας ισχύος. Όταν το υπεραγώγιμο πηνίο φορτιστεί το ρεύμα δεν χάνεται και έτσι η μαγνητική ενέργεια μπορεί να αποθηκεύεται επ' αόριστον. Η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να αποδοθεί πίσω στο δίκτυο αποφορτίζοντας το πηνίο. Το σύστημα βελτίωσης της ποιότητας ισχύος χρησιμοποιεί έναν αντιστροφέα για να μετατρέψει το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές και αντίστροφα. Τα συστήματα SMES έχουν πολύ μικρές απώλειες σε σχέση με τις άλλες μεθόδους αποθήκευσης ενέργειας και έχουν υψηλή απόδοση (περίπου 95%). Παράλληλα έχουν μικρούς χρόνους φόρτισης/εκφόρτισης σε σχέση με τα αντλησιοταμιευτικά συστήματα και τα συστήματα συμπιεσμένου αέρα γιατί εδώ δεν απαιτείται η μετατροπή μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι ότι τα μέρη από τα οποία αποτελείται ένα τέτοιο σύστημα είναι ακίνητα και έτσι οι πιθανότητες φθοράς ή βλάβης είναι μικρές κάτι που συνεπάγεται υψηλή αξιοπιστία.

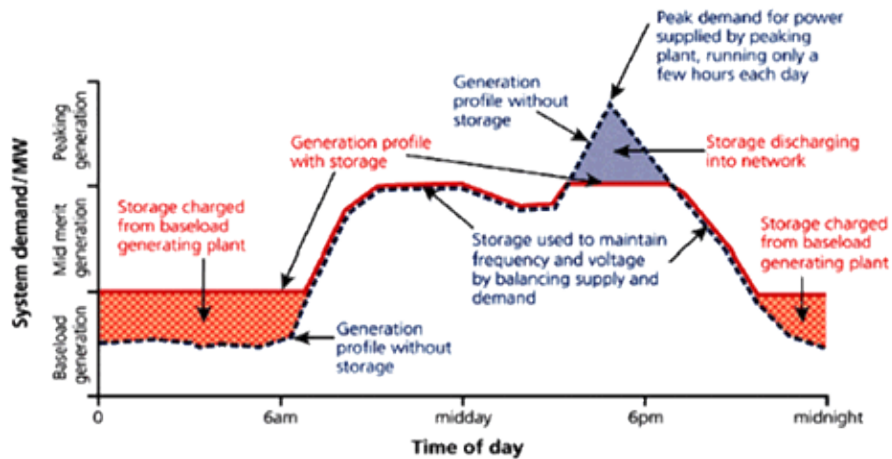
Λόγω των ενεργειακών απαιτήσεων του ψυγείου και του υψηλού κόστους του υπεραγώγιμου καλωδίου αλλά και των μικρών χρόνων φόρτισης/εκφόρτισης, τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται για μικρής διάρκειας αποθήκευση. Έτσι η βασική εφαρμογή τους είναι η βελτίωση της ποιότητας ισχύος. Υπάρχουν διάφορες μονάδες των 1MW ανά τον κόσμο για αυτό τον σκοπό και κυρίως σε εργοστάσια παραγωγής μικροτσιπ όπου οι απαιτήσεις για ποιότητα ισχύος είναι πολύ υψηλές.

5.8 Σύγκριση των διαφόρων μεθόδων αποθήκευσης

Κάθε τεχνολογία έχει κάποια πλεονεκτήματα και κάποιους περιορισμούς που την καθιστούν εφαρμόσιμη ή οικονομική συγκεκριμένο εύρος εφαρμογών.

Τα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες ανάλογα με την *λειτουργία* τους ως εξής:

- i. Ποιότητας ισχύος. Η αποθηκευμένη ενέργεια σε αυτές τις εφαρμογές χρησιμοποιείται μόνο για λίγα δευτερόλεπτα ή και λιγότερο, όταν χρειάζεται, για να εξασφαλιστεί η απαιτούμενη ποιότητας ισχύος.
- ii. Γεφύρωσης ισχύος. Εδώ η αποθηκευμένη ενέργεια χρησιμοποιείται από μερικά δευτερόλεπτα έως λεπτά ώστε να εξασφαλιστεί η αδιάκοπη παροχή υπηρεσιών όταν γίνεται η μετάβαση από μία πηγή παραγωγής ενέργειας σε άλλη.
- iii. Διαχείρισης ενέργειας. Τα αποθηκευτικά μέσα σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται για να αποφευχθεί ο συγχρονισμός παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας. Μία τυπική εφαρμογή τους είναι η εξομάλυνση της καμπύλης διάρκειας φορτίου, όπως φαίνεται και στο σχήμα, το οποίο γίνεται αποθηκεύοντας ενέργεια όταν το κόστος είναι χαμηλό και αποδίδοντας την όταν είναι αναγκαία στο σύστημα (κυρίως όταν υπάρχουν αιχμές ζήτησης).



Εικόνα 5.9. Εξομάλυνση αιχμών της καμπύλης διάρκειας φορτίου μέσω της ηλεκτρικής αποθήκευσης

Αυτή η λύση μπορεί να εξυπηρετήσει και τους καταναλωτές οι οποίοι μπορούν να είναι ανεξάρτητοι από το δίκτυο για πολλές ώρες καταναλώνοντας την αποθηκευμένη ενέργεια.

Το μέγεθος και το βάρος των συσκευών αποθήκευσης είναι σημαντικοί παράγοντες για συγκεκριμένες εφαρμογές.

Ένας άλλος παράγοντας καθοριστικός για την επιλογή του σωστού μέσου αποθήκευσης είναι το κόστος. Το αρχικό κόστος της επένδυσης είναι ένα καλό κριτήριο αλλά όχι τόσο ακριβές καθώς δεν συμπεριλαμβάνει το διάστημα ζωής της επένδυσης (δηλαδή της αποθηκευτικής διάταξης) καθώς και τα λειτουργικά κόστη και κόστη συντήρησης. Για παράδειγμα, οι μπαταρίες οξέως μολύβδου έχουν χαμηλό αρχικό κόστος όμως δεν είναι κατάλληλες για εφαρμογές επιπεδοποίησης φορτίου λόγω της σχετικά μικρής διάρκειας ζωής τους γι' αυτές τις εφαρμογές. Για τέτοιες εφαρμογές όπου γίνονται πολύ συχνές φορτίσεις/εκφορτίσεις είναι το κόστος ανά κύκλο που υπολογίζεται ως εξής:

$$\frac{\text{αρχικό κόστος} / \omega\phi\acute{\epsilon}\lambda\iota\mu\eta \text{ ενέργεια}}{\text{διάρκεια ζωής (κύκλοι)} \times \text{απόδοση}}$$

Η απόδοση και ο κύκλος ζωής είναι άλλες δύο σημαντικές παράμετροι για τη επιλογή της κατάλληλης αποθηκευτικής διάταξης. Και οι δύο επηρεάζουν το συνολικό κόστος της.

Ο πίνακας που ακολουθεί παρουσιάζει την καταλληλότητα κάθε αποθηκευτικής διάταξης για εφαρμογές ισχύος και εφαρμογές ενέργειας.

Τεχνολογία αποθήκευσης	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Εφαρμογές ισχύος	Εφαρμογές ενέργειας
<i>Μπαταρίες ροής</i>	Μεγάλη χωρητικότητα, ανεξάρτητη εκτίμηση ενέργειας- ισχύος	Μικρή ενεργειακή πυκνότητα	★★	★★★
<i>Μολύβδου οξέως</i>	Χαμηλό αρχικό κόστος	Μικρός χρόνος ζωής για βαθιές εκφορτίσεις	★★★	★
<i>Νικελίου καδμίου</i>	Υψηλή πυκνότητα ενέργειας και ισχύος, υψηλή απόδοση	«Φαινόμενο μνήμης», χρειάζονται μεγάλο ρεύμα για να φορτιστούν πλήρως	★★★	★★
<i>Θειικού νατρίου</i>	Υψηλή πυκνότητα ενέργειας και ισχύος, υψηλή απόδοση	Κόστος παραγωγής, θέματα ασφάλειας κατά την παραγωγή τους	★★★	★★★
<i>Λιθίου-ιόντος</i>	Υψηλή πυκνότητα ενέργειας και ισχύος, υψηλή απόδοση	Κόστος παραγωγής, απαιτούν ειδικό κύκλωμα φόρτισης	★★★	★
<i>Αντλησιοταμίευση</i>	Μεγάλη χωρητικότητα, χαμηλό κόστος	Εύρεση χώρου για την εγκατάσταση		★★★
<i>Συστήματα συμπιεσμένου αέρα</i>	Μεγάλη χωρητικότητα, χαμηλό κόστος	Εύρεση χώρου για την εγκατάσταση, χρειάζεται αέριο καύσιμο		★★★
<i>Υπερ-πυκνωτές</i>	Μεγάλη διάρκεια ζωής, υψηλή απόδοση	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας	★★★	★★
<i>Σφόνδυλοι</i>	Υψηλή ισχύς	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας	★★★	★
<i>Υπερ-αγώγιμα υλικά</i>	Υψηλή ισχύς	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας, Μεγάλο κόστος παραγωγής	★★★	

Πίνακας 5.4. Σύγκριση τεχνολογιών αποθήκευσης

- ★★★ Πλήρως κατάλληλη και συμφέρουσα
- ★★ Λογική επιλογή
- ★ Εφαρμόσιμη αλλά όχι πρακτική και οικονομική
- Δεν εφαρμόζεται

5.9 Άλλες μορφές αποθήκευσης

5.9.1 Θερμική αποθήκευση

Συνήθως χρησιμοποιούνται συλλέκτες ηλιακής ενέργειας οι οποίοι συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία και την μετατρέπουν σε θερμική ενέργεια. Η θερμότητα που συγκεντρώνεται από τους συλλέκτες μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί κατ' ευθείαν ή να αποθηκευθεί. Η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για εφαρμογές ψύξης είτε για εφαρμογές θέρμανσης. Πιο συγκεκριμένα η ανακτόμενη ενέργεια χρησιμοποιείται για θέρμανση χώρου και νερού ή σε ψυκτικά μηχανήματα και κλιματιστικά ή ακόμη και για παραγωγή ηλεκτρισμού. Θερμική αποθήκευση γίνεται κυρίως όπου υπάρχουν μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού θερμότητας και όπου υπάρχουν αυξημένα θερμικά φορτία.

Για την περίπτωση της θέρμανσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα μέσα όπως βραχισμός, άργιλος, μέταλλα, πυρότουβλα, άμμος και το νερό το οποίο παρουσιάζει και τη μεγαλύτερη κατ' όγκο θερμοχωρητικότητα. Οι περιέκτες του μέσου αποθήκευσης μπορεί να είναι κατασκευασμένοι από τσιμέντο ή βραχισμό και για περισσότερο μακροπρόθεσμη αποθήκευση να χρησιμοποιούνται κατάλληλες υπόγειες κοιλότητες. Ανάλογα με το επίπεδο μόνωσης που χρησιμοποιείται βελτιώνεται η απόδοση της αποθήκευσης αλλά και κατ' αντιστοιχία το κόστος κατασκευής.

Για την περίπτωση της ψύξης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσο αποθήκευσης, είτε ψυχρό νερό σε θερμοκρασία 3-6°C, για τη συνεργασία με διατάξεις ψυκτών απορρόφησης, είτε διατάξεις που χρησιμοποιούν πάγο και απαιτούν μικρότερο όγκο αλλά μεγαλύτερη πολυπλοκότητα είτε διατάξεις με εύτηκτα άλατα που χρησιμοποιούν διαλύματα ανόργανων αλάτων σε νερό. Το μέσο αυτό περιέχεται σε ανοξείδωτους, τσιμεντένιους ή πλαστικούς περιέκτες με διάφορα επίπεδα μόνωσης ανάλογα με την τοποθεσία εγκατάστασης.

Για την εξασφάλιση του ισοζυγίου ενέργειας η λειτουργία των μέσων θερμικής αποθήκευσης έχει μοντελοποιηθεί όπως έγινε και με τις μπαταρίες σύμφωνα με τις ακόλουθες παραμέτρους.

	Θερμική αποθήκευση
Απόδοση φόρτισης	0,9
Απόδοση εκφόρτισης	1
Συντελεστής απωλειών	0,01
Συντελεστής μέγιστης φόρτισης	0,25
Συντελεστής μέγιστης εκφόρτισης	0,25
Ελάχιστη φόρτιση	0

Πίνακας 5.5. Παράμετροι θερμικής αποθήκευσης

5.9.2 Αποθήκευση υδρογόνου σε κυψέλες καυσίμου

Το υδρογόνο είναι γνωστό για τη μεγάλη του θερμογόνο δύναμη. Μπορεί να παραχθεί είτε από υδρογονάνθρακες με διάφορες φυσικοχημικές μεθόδους είτε μέσω ηλεκτρόλυσης νερού όπου γίνεται χρήση ηλεκτρικής ενέργειας. Το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευθεί σε μεταλλικά δοχεία ή ράβδους διαφόρων σχημάτων με χρήση νερού ή αέρα για την ψύξη του. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κυψέλες καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή ως καύσιμο σε οχήματα [11].

5.10 Ηλεκτρική αποθήκευση στην Ελλάδα

Τρόπους για την αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές αναζητεί το υπουργείο Ανάπτυξης, προκειμένου να αξιοποιηθεί καλύτερα το πλούσιο δυναμικό της χώρας, στην λογική και της εξυπηρέτησης του στόχου για κάλυψη του 20% του ενεργειακού ισοζυγίου της χώρας μέχρι το 2020 από αυτές τις μορφές ενέργειας.

Λόγω της γεωφυσικής ιδιομορφίας του ελλαδικού χώρου (πάρα πολλά νησιά), των κλιματολογικών συνθηκών (δυνατοί άνεμοι κάποιους μήνες του έτους και ισχυρή ηλιοφάνεια) αλλά και του υπάρχοντος συστήματος παροχής ηλεκτρικής ενέργειας (μεγάλοι κεντρικοί σταθμοί παραγωγής που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα) η ηλεκτρική αποθήκευση στην χώρα μας εστιάζεται στην αποθήκευση ενέργειας που προέρχεται από ΑΠΕ κυρίως στα νησιά, όπου τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι αδύναμα. Είναι προφανές ότι ο κύκλος ενός συστήματος αποθήκευσης όταν γίνεται με χρήση νυχτερινής ενέργειας που προέρχεται από ορυκτά καύσιμα (λιγνίτης, άνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) προσαυξάνει τις εκπομπές CO₂ και άλλων αερίων ρύπων με πρόσθετα περιβαλλοντικά αλλά και σοβαρά οικονομικά προβλήματα ιδιαίτερα από το 2013 στα πλαίσια της εμπορίας των εκπομπών (ETS, Emission Trading Scheme). Επομένως, τα συστήματα αποθήκευσης στο μέλλον πρέπει να συνεργάζονται κυρίως με τις μονάδες παραγωγής ΑΠΕ ή και άλλες κεντρικές ή αποκεντρωμένες μονάδες παραγωγής με αποδοτικές και καθαρές τεχνολογίες. Τα συστήματα αποθήκευσης μπορούν να βελτιώσουν την ασφάλεια και αξιοπιστία των νησιωτικών συστημάτων καλύπτοντας τη ζήτηση με οικονομικό τρόπο και επιτυγχάνοντας μεγάλη διείσδυση των ΑΠΕ. Αυτά μπορούν να αναπτυχθούν σαν αποκεντρωμένες μονάδες στο δίκτυο μικρής σχετικά ισχύος ή σαν κεντρικές μονάδες μεγαλύτερης ισχύος χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες τεχνολογίες και λαμβάνοντας υπόψη ότι δεν υπάρχει μια μοναδική τεχνολογία που να μπορεί να καλύψει όλες τις ανάγκες των δικτύων [17]. Έτσι εγκαθιστώντας τεχνολογίες αποθήκευσης στα νησιά μειώνονται οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου (μεγαλύτερη διείσδυση ΑΠΕ), ενισχύονται τα ηλεκτρικά δίκτυα των νησιωτικών περιοχών και σταδιακά οδηγούμαστε σε ένα πιο αποκεντρωμένο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

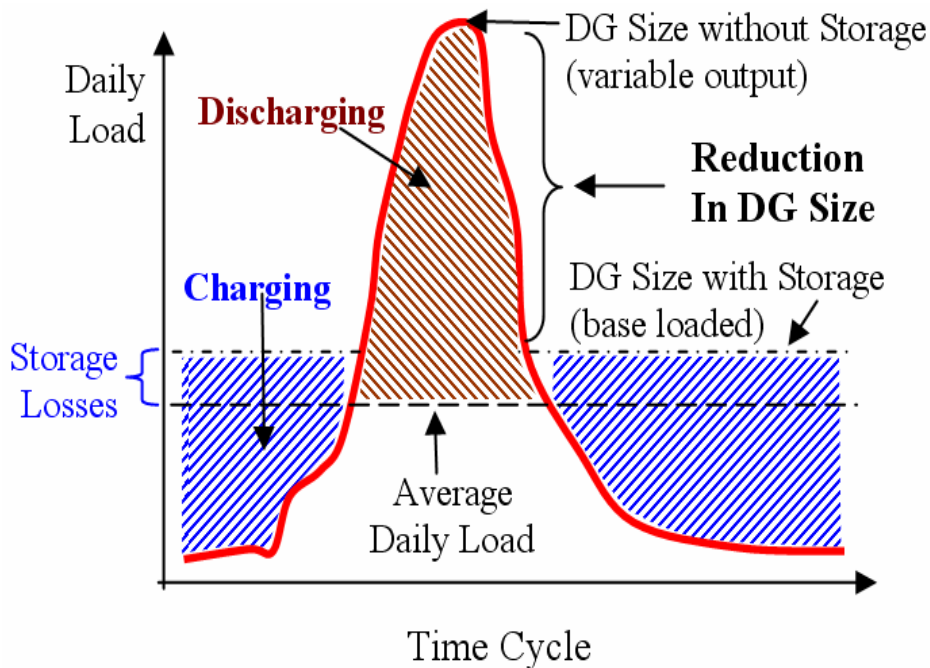
Οι συνήθεις εφαρμογές που χρησιμοποιούνται σήμερα στην Ελλάδα είναι οι μεγάλοι κεντρικοί αντλητικοί-υδροηλεκτρικοί σταθμοί. Σκοπός είναι η εξομάλυνση της καμπύλης ζήτησης χρησιμοποιώντας νυχτερινό φορτίο με χαμηλό κόστος για άντληση

ώστε να είναι εφικτή η λειτουργία των μεγάλων θερμικών ή και πυρηνικών μονάδων (πάνω από το τεχνικά ελάχιστο φορτίο) και αποδίδοντας ισχύ με υδροηλεκτρική εκμετάλλευση στις ώρες αιχμής με υψηλή τιμή, προσφέροντας και επικουρικές υπηρεσίες στο δίκτυο. Δύο τέτοιοι σταθμοί λειτουργούν έως τώρα (ΥΗΣ Σφηκιάς στον Αλιάκμονα και ΥΗΣ Θησαυρού στο Νέστο) με συνολική ισχύ 615 MW.

Σε διεθνές επίπεδο εξελίσσονται ερευνητικά προγράμματα για την χρησιμοποίηση του υδρογόνου στην προσπάθεια αποθήκευσης ενέργειας, η οποία μπορεί να προστατεύσει ένα σύστημα ηλεκτρισμού από την μεταβλητότητα που συνεπάγεται η εκτεταμένη χρησιμοποίηση των ανανεώσιμων πηγών.

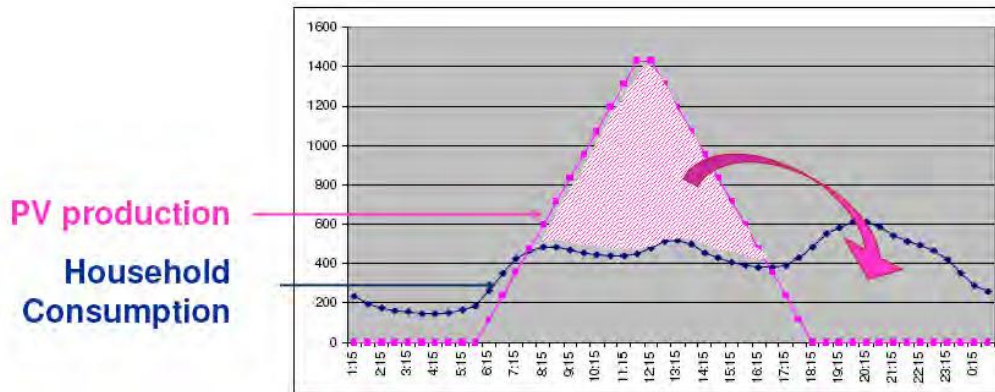
5.10.1 Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ

Η αιολική ενέργεια και η γεωθερμία προσφέρονται σήμερα πολύ ευνοϊκά για παραγωγή και αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας στα νησιά, τόσο από την άποψη του υψηλού δυναμικού όσο και του χαμηλού κόστους παραγωγής. Αργότερα, με την εξέλιξη της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών, αναμένεται να συνεισφέρει και η ηλιακή ενέργεια (περί το 2020). Η στοχαστική μορφή της ενέργειας των ΑΠΕ (πχ. της αιολικής ενέργειας με αιχμές παραγωγής και περιόδους νηνεμίας) και η ανάγκη αποθήκευσης μέρους της παραγόμενης ενέργειας σε σύγκριση με τη μέση ημερήσια ζήτηση (πρακτικά ένα φορτίο βάσεως) παρουσιάζεται στην εικόνα 10. Είναι ένα διάγραμμα που αναφέρεται στο εγγύς μέλλον όπου γενικά οι ΑΠΕ θα καλύπτουν και το φορτίο βάσεως ενώ η αποθήκευση θα προσφέρεται στις αιχμές και περιόδους μη διαθεσιμότητας των ΑΠΕ.



Εικόνα 5.10. Κάλυψη φορτίου από ΑΠΕ σε συνδυασμό με αποθήκευση

Η παραγωγή των φωτοβολταϊκών στη διάρκεια της ημέρας από μια Φ/Β μονάδα σε κατοικία έχει την αιχμή της στις μεσημβρινές ώρες και καθίσταται αναγκαία η αποθήκευση της πλεονάζουσας ενέργειας που παράγεται για να χρησιμοποιηθεί στο βραδινό φορτίο.



Εικόνα 5.11. Κάλυψη οικιακού φορτίου από Φ/Β σε συνδυασμό με αποθήκευση

Τα οφέλη της αποθήκευσης, εκτός από τη μεγάλη διείσδυση αιολικής και ηλιακής ενέργειας, είναι πολλά όπως η ενίσχυση του δικτύου με ισχύ και ενέργεια, η αποφόρτιση των δικτύων μεταφοράς, οι επικουρικές υπηρεσίες στο δίκτυο, η αξιοπιστία και ποιότητα, και άλλα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ

6.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια οι συζητήσεις γύρω από τα ενεργειακά – περιβαλλοντικά θέματα γίνονται όλο και πιο έντονες. Φράσεις όπως η κλιματική αλλαγή, το φαινόμενο του θερμοκηπίου, εκπομπές ρύπων και η εξοικονόμηση ενέργειας είναι πλέον άρρηκτα συνδεδεμένες. Η αλόγιστη κατανάλωση ενέργειας που λαμβάνει χώρα την τελευταία δεκαετία έχει οδηγήσει σε σοβαρές μεταβολές των κλιματολογικών συνθηκών του πλανήτη με ίσως καταστροφικές συνέπειες για το μέλλον. Πολλές είναι οι ρυπογόνες ουσίες που προέρχονται από διάφορους τομείς (μεταφορές, βιομηχανία κλπ.) και οφείλονται για αυτές τις αλλαγές. Στη συγκεκριμένη μελέτη εστιάζουμε στο διοξείδιο του άνθρακα που εκλύεται κατά την διαδικασία της ηλεκτροπαραγωγής.



Εικόνα 6.1. Εκπομπές ρύπων στην ηλεκτροπαραγωγή

Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, ένα από τα κυριότερα αέρια που συμβάλλουν στη δημιουργία του φαινομένου του θερμοκηπίου, αυξήθηκαν σε ανησυχητικά επίπεδα κατά το διάστημα 2000-2004, και με ρυθμό τρεις φορές μεγαλύτερο απ' ό,τι στη δεκαετία του '90. Οι εκπομπές του CO₂ αυξήθηκαν κατά 3,1% σε ετήσια βάση στις αρχές της τρέχουσας δεκαετίας, έναντι ρυθμού 1,1% στη δεκαετία του '90. Αυτή η ταχεία αύξηση των εκπομπών του CO₂ οφείλεται κατά μέγα μέρος στην κατανάλωση ενέργειας και στην αύξηση της χρήσης άνθρακα στην παραγωγή ενέργειας. Παρά την επιστημονική συναίνεση ως προς το γεγονός ότι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα βλάπτουν βαρύτερα το κλίμα, σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες δεν υπάρχουν δείγματα προόδου στη διαχείριση των εκπομπών αυτών, τόσο στις ανεπτυγμένες, όσο και στις αναπτυσσόμενες χώρες. Οι εκπομπές CO₂ έχουν αυξηθεί με ακόμη ταχύτερους ρυθμούς από το 2000 απ' ό,τι προέβλεπε το χειρότερο σενάριο της Διακυβερνητικής Ομάδος Ειδικών για τις Κλιματικές Εξελίξεις (GIEC). Οι εκπομπές CO₂ είναι ιδιαίτερα σημαντικές σε χώρες, των οποίων η οικονομική ανάπτυξη βρίσκεται σε επιτάχυνση, όπως η Κίνα, όπου η αύξηση των εκπομπών του ρύπου αυτού αντανακλά κατά κύριο λόγο την αύξηση του ΑΕΠ ανά κάτοικο. Στο διάστημα 2000- 2004, οι αναπτυσσόμενες χώρες ήταν οι κύριοι υπεύθυνοι για την αύξηση των εκπομπών του CO₂, μολονότι το ποσοστό τους δεν αντιπροσωπεύει παρά μόνον το 40% των εκπομπών CO₂ σε παγκόσμια κλίμακα. Κατά το 2004, το 73% της αύξησης των εκπομπών στον κόσμο

προήλθε από αναπτυσσόμενες και λιγότερο αναπτυγμένες χώρες, οι οποίες αντιπροσωπεύουν το 80% του παγκόσμιου πληθυσμού. Κατά τον ίδιο χρόνο, οι αναπτυγμένες χώρες (μεταξύ αυτών κι η πρώην Σοβιετική Ένωση) συνέβαλαν στο 60% των συνολικών εκπομπών, ενώ είναι υπεύθυνες για το 77% των συσσωρευμένων εκπομπών αερίων από την έναρξη της βιομηχανικής επανάστασης [22].

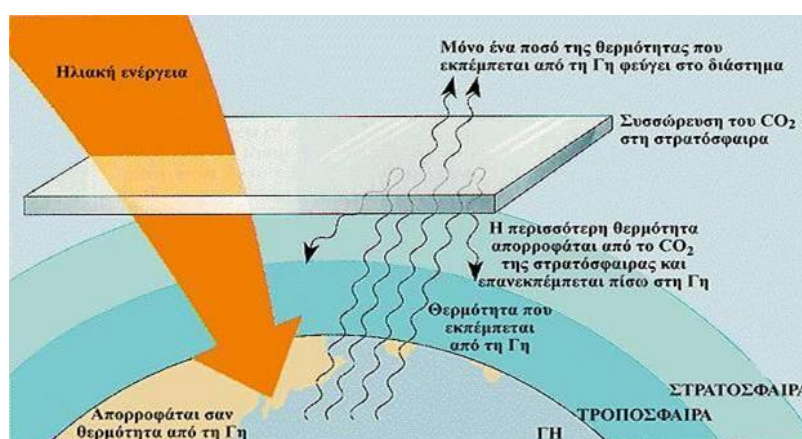
Παρόλα αυτά γίνονται σημαντικές προσπάθειες σε όλους τους τομείς για τη μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα. Στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής, υπάρχουν τρεις κύριοι άξονες για τη μείωση των ρύπων :

- Μείωση εκπεμπόμενων ρύπων στο σημείο παραγωγής τους.
- Δέσμευση και Αποθήκευση του CO₂ (Carbon dioxide Capture and Storage (CCS)).
- Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας χρησιμοποιώντας τεχνολογίες παραγωγής με χαμηλότερα επίπεδα εκπομπής ρύπων π.χ. αλλαγή καυσίμου στο ενεργειακό μείγμα από άνθρακα και πετρέλαιο σε φυσικό αέριο, πυρηνική ενέργεια αλλά κυρίως με τη βοήθεια τεχνολογιών όπως ΑΠΕ, συμπαραγωγή και μείωση της κατανάλωσης [11].

6.2 Το φαινόμενο του θερμοκηπίου

Η ενέργεια του ήλιου θερμαίνει την επιφάνεια της γης και καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, η θερμότητα αντανακλάται στην ατμόσφαιρα ως ενέργεια υπεριώδους ακτινοβολίας. Ένα μέρος της ενέργειας απορροφάται στην ατμόσφαιρα από τα λεγόμενα «αέρια του θερμοκηπίου».

Πιο συγκεκριμένα, η ατμόσφαιρα λειτουργεί όπως τα τοιχώματα ενός θερμοκηπίου, αφήνοντας το ορατό ηλιακό φως να εισέλθει και απορροφώντας την εξερχόμενη ενέργεια υπεριώδους ακτινοβολίας, διατηρώντας ζεστό το εσωτερικό του. Αυτή η φυσική διαδικασία ονομάζεται «φαινόμενο του θερμοκηπίου».

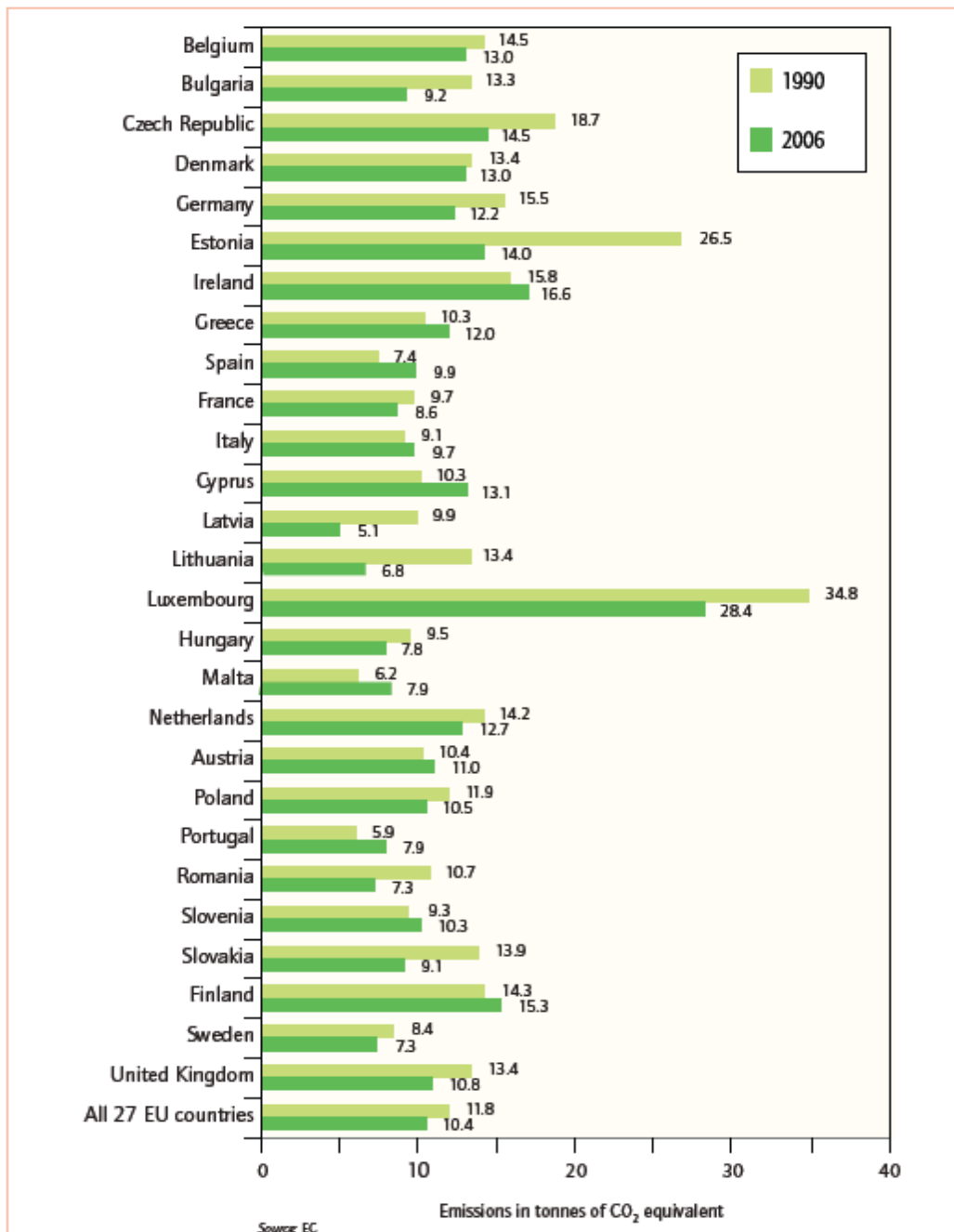


Εικόνα 6.2. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου

Αξίζει να σημειωθεί ότι το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι μια φυσική διαδικασία. Το χρειαζόμαστε για να διατηρούμε τη Γη ζεστή, ώστε να υπάρχει ζωή και ανάπτυξη. Δίχως αυτό, η Γη θα είχε θερμοκρασία περίπου -20 °C, και δεν θα μπορούσε να υπάρχει

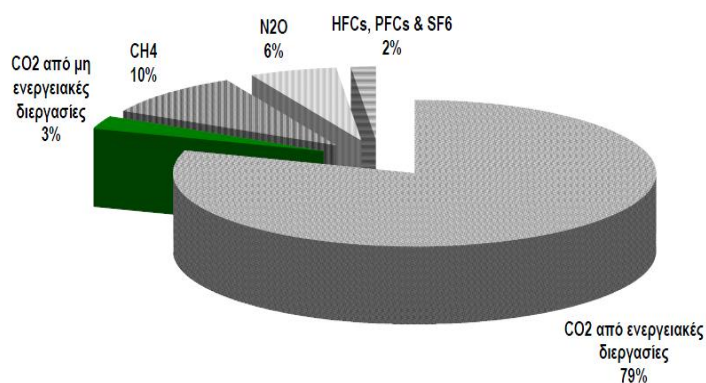
ζωή. Αντιθέτως, η μέση θερμοκρασία της Γης διατηρείται στο επίπεδο των 15 °C, χάρη σε αυτό το φαινόμενο. Τις τελευταίες δεκαετίες όμως όταν αναφερόμαστε στο φαινόμενο του θερμοκηπίου δεν εννοούμε αυτή τη φυσική διεργασία αλλά την έξαρση αυτού του φαινομένου λόγω της αυξημένης συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ολοένα αυξανόμενη θερμοκρασία του πλανήτη.

Τα τελευταία χρόνια γίνονται προσπάθειες ανά τον κόσμο για τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου. Ενδεικτικά παρατίθεται στο διάγραμμα 1 οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά κεφαλή στις χώρες τις ΕΕ το 1990 και το 2006.



Διάγραμμα 6.1. Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στην ΕΕ

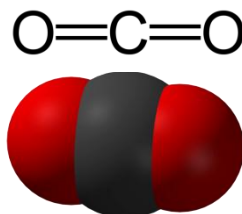
Τα αέρια που κατά κύριο λόγο προκαλούν αυτό το φαινόμενο είναι το διοξείδιο του άνθρακα CO_2 , το μεθάνιο CH_4 , το υποξείδιο του αζώτου N_2O , οι υδρογονοφθοράνθρακες HFCs , οι υπερφθοράνθρακες PFCs και το εξαφθοριούχο θείο SF_6 . Τη μεγαλύτερη συνεισφορά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου έχει το CO_2 , όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 2 [18].



Διάγραμμα 6.2. Συνεισφορά αερίων θερμοκηπίου

6.3 Χημική σύσταση και ιδιότητες CO_2

Το διοξείδιο του άνθρακα είναι ανόργανη χημική ένωση του στοιχείου άνθρακα. Αποτελείται από δύο άτομα οξυγόνου και ένα άτομο άνθρακα. Στην εικόνα 3 φαίνεται η χημική του σύσταση.



Εικόνα 6.3. Χημική σύσταση CO_2

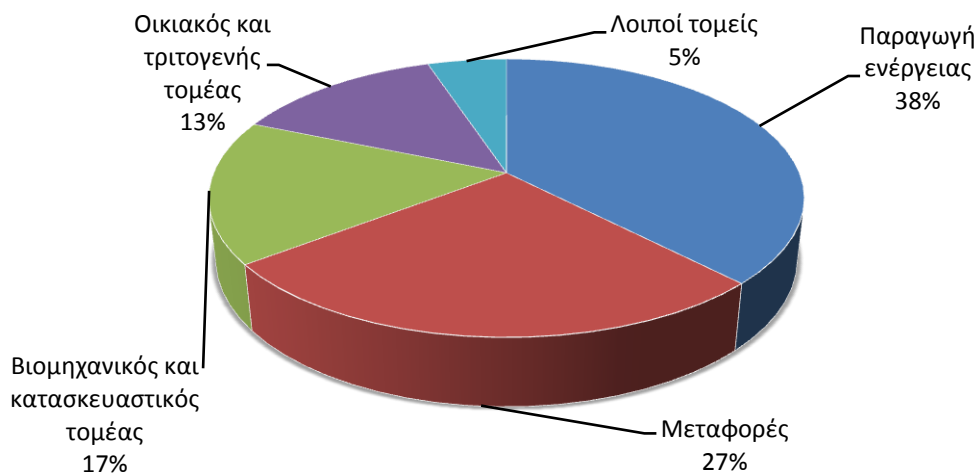
Το καθαρό διοξείδιο του άνθρακα είναι άχρωμο, άοσμο και άγευστο αέριο, βαρύτερο από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Το σημαντικότερο ίσως χαρακτηριστικό του είναι η χημική του αδράνεια και σταθερότητα ως ένωση, αντιδρά δηλαδή και διασπάται δύσκολα στα συστατικά του. Οι χρήσεις του από τον άνθρωπο είναι αρκετές και ποικίλες, το ίδιο και η παραγωγή του. Αποτελεί προϊόν όλων των καύσεων ορυκτών καυσίμων (κάρβουνου, πετρελαίου, βενζίνης, φυσικού αερίου), αλλά και του ξύλου, πλαστικών και άλλων οργανικών ενώσεων, καθώς και της αναπνοής των περισσότερων ζωντανών οργανισμών. Αυτό, σε συνδυασμό με τη χημική του σταθερότητα, καθιστά το διοξείδιο του άνθρακα, που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα της Γης, τον κυριότερο παράγοντα που προκαλεί το φαινόμενο του θερμοκηπίου [26]. Το CO_2 μπορεί να παραμείνει στην ατμόσφαιρα για 50-200 χρόνια, ανάλογα με τον τρόπο ανακύκλωσης και επιστροφής του στο έδαφος και τους ωκεανούς.

<i>Μοριακή μάζα</i>	44,010 gr/mol
<i>Μορφή σε κανονικές συνθήκες</i>	άχρωμο αέριο
<i>Πυκνότητα</i>	1,98 kg/m ³ (25 °C)
<i>Διαλυτότητα στο νερό</i>	1,45 kg/m ³
<i>Λανθάνουσα θερμότητα εξατίσεως</i>	25,13 kJ/mol
<i>Σημείο τήξεως</i>	-78 °C
<i>Σημείο βρασμού</i>	-57 °C

Πίνακας 6.1. Ιδιότητες CO₂

6.4 Συμβολή της ηλεκτροπαραγωγής στο φαινόμενο του θερμοκηπίου

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αντιστοιχεί στο 37% των εκπομπών CO₂ παγκοσμίως. Ένας μεσαίου μεγέθους σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιεί άνθρακα ως καύσιμο, καταναλώνει διπλάσια ποσότητα ενέργειας σε σχέση με την ποσότητα ενέργειας που μετατρέπει σε αξιοποιήσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Ένας μεγάλου μεγέθους σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των 1000 MW, εκπέμπει κατά μέσο όρο 5,6 εκατομμύρια τόνους CO₂ το χρόνο. Παρακάτω, στο διάγραμμα 3, παρουσιάζονται αναλυτικά τα ποσοστά συμμετοχής κάθε τομέα της οικονομίας στην παραγωγή αερίων του θερμοκηπίου που σχετίζονται με τη καύση ορυκτών καυσίμων [29].



Διάγραμμα 6.3. Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου των ανεπτυγμένων χωρών που σχετίζονται με την καύση ορυκτών καυσίμων ανά τομέα το 2004

6.5 Συμβολή διεσπαρμένης παραγωγής και συμπαραγωγής στη μείωση των εκπομπών CO₂

Η εγκατάσταση Διεσπαρμένης Παραγωγής πολύ κοντά στα φορτία μειώνει τη ροή ισχύος στο Σύστημα Μεταφοράς και το Δίκτυο Διανομής και επομένως τις ηλεκτρικές απώλειες που οδηγούν στην επιπλέον παραγωγή των κεντρικών μονάδων παραγωγής για να τις ικανοποιήσουν. Από μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί στο ΗΒ η μείωση των απωλειών στο σύστημα μεταφοράς κατά 1% μειώνει τις εκπομπές CO₂ έως και 2 εκατομμύρια τόνους ετησίως [11]. Παράλληλα η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως οι ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά, σαν μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής συμβάλουν ακόμα περισσότερο στη μείωση των εκπομπών CO₂.

Παράλληλα η χρήση τεχνολογιών συμπαραγωγής οδηγεί σημαντικά στη μείωση των παραγόμενων ρύπων αφού με την καύση της ίδιας ποσότητας καυσίμου καλύπτονται ταυτόχρονα και ηλεκτρικά και θερμικά φορτία. Οι απώλειες μειώνονται κατά πολύ και όλη σχεδόν η εκλυόμενη ενέργεια χρησιμοποιείται για την κάλυψη των θερμικών φορτίων. Ακόμη η αυξημένη αποδοτικότητα λόγω της οικιακής αξιοποίησης του φυσικού αερίου για συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στη μείωση εκπομπών CO₂. Η εγκατάσταση 60 εκατομμυρίων μονάδων οικιακής συμπαραγωγής σε πανευρωπαϊκό επίπεδο μπορεί να συμβάλλει ώστε να μειωθούν κατά 65 εκατομμύρια τόνους ετησίως οι εκπομπές CO₂ [11].

6.6 Προσέγγιση στη συγκεκριμένη μελέτη

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας σχετικά με τις εκπομπές CO₂ είναι να αναδείξει την επίδραση της φορολογίας του άνθρακα καθώς και των διαφόρων τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας στις συνολικές εκπομπές CO₂ που προκαλούνται από την κατανάλωση ενέργειας για την κάλυψη των φορτίων ενός μικροδικτύου. Οι εκπομπές CO₂ που αντιστοιχούν στο μικροδίκτυο προέρχονται από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εντός του μικροδικτύου και από τις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου από το μακροδίκτυο για την κάλυψη του φορτίου του. Στις συνολικές εκπομπές δεν υπολογίζονται αυτές που προέρχονται από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας των γεννητριών του μικροδικτύου που πωλείται στο μακροδίκτυο. Αυτό συμβαίνει γιατί παρόλο που οι εκπομπές CO₂ προέρχονται από το μικροδίκτυο δεν χρησιμοποιούνται για την κάλυψη του φορτίου του αλλά θα χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη του φορτίου κάποιου καταναλωτή. Το νόημα της φορολογίας του άνθρακα είναι στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, επομένως και επιβάλλεται στο ποσό ενέργειας που σπαταλάτε για την κάλυψη κάποιου φορτίου.

Στην παρούσα μελέτη υπήρχε ένα βασικό σενάριο στο οποίο όλη η ενέργεια που απαιτείτο για την κάλυψη του φορτίου του μικροδικτύου γίνονταν από αγορές ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου αφού δεν υπήρχε καμία εγκατεστημένη μονάδα παραγωγής. Στην περίπτωση αυτή για κάθε kWh ηλεκτρισμού που αγοράστηκε θεωρήθηκε ότι είχαμε εκπομπές 0,13 kg CO₂ και για κάθε kWh που προήλθε από καύση φυσικού αερίου είχαμε 0,05 kg CO₂. Στα υπόλοιπα σενάρια όπου υπήρχαν και

εγκατεστημένες μονάδες παραγωγής οι εκπομπές υπολογίζονται από το συντελεστή εκπομπών (kg/ kWh) της κάθε γεννήτριας συν τις εκπομπές από αγορές από το μακροδίκτυο που υπολογίστηκαν όπως και στο βασικό σενάριο.

Αν θέλαμε να υπολογίσουμε ένα συντελεστή εκπομπών συνολικά για τις αγορές από το δίκτυο, δηλαδή και για ηλεκτρική ενέργεια για την κάλυψη των ηλεκτρικών φορτίων και για φυσικό αέριο για την κάλυψη των θερμικών φορτίων τότε αυτό θα γίνονταν με τον ακόλουθο τύπο [34]:

$$C_{rate} = p_e \cdot r_e + p_h \cdot r_h \quad (1)$$

όπου p_e είναι το ποσοστό ενέργειας που καταναλώνεται για τα ηλεκτρικά φορτία, p_h το ποσοστό ενέργειας που καταναλώνεται για τα θερμικά φορτία, r_e ο μέσος συντελεστής εκπομπών άνθρακα για παραγωγή ηλεκτρισμού (0,13 kg/ kWh) και r_h ο μέσος συντελεστής εκπομπών άνθρακα για παραγωγή θερμικής ενέργειας από την καύση φυσικού αερίου (0,05 kg/ kWh).

Αυτός ο τύπος αναδεικνύει τον σημαντικό ρόλο των συστημάτων συμπαραγωγής στη μείωση των εκπομπών άνθρακα. Για παράδειγμα ας θεωρήσουμε ότι στο μικροδίκτυο έχει εγκατασταθεί μία γεννήτρια CHP, όπως η GA55 με συντελεστή εκπομπών 0,18 kg/ kWh. Έστω ότι το ποσοστό ενέργειας που καταναλώνεται για τα ηλεκτρικά φορτία είναι 40% και το ποσοστό για τα θερμικά φορτία είναι 60%. Αυτό το υποθέτουμε αφού από 1 kWh ηλεκτρικής ενέργειας από μία μονάδα συμπαραγωγής μπορεί να προκύψει 1,08 – 2,2 kWh (από τα στοιχεία των γεννητριών που είναι στο μοντέλο στις συγκεκριμένης εργασίας) για την κάλυψη θερμικού φορτίου. Θεωρώντας ότι όλο το φορτίο καλύπτεται από τη συγκεκριμένη γεννήτρια ο συντελεστής εκπομπών της βάσει του τύπου (1) θα είναι :

$$C_{rate} = 0,4 \cdot 0,18 + 0,6 \cdot 0 = 0,072 \text{ kg/ kWh}$$

αφού για την κάλυψη των θερμικών φορτίων λόγω συμπαραγωγής δεν καταναλώνεται επιπλέον καύσιμο και έτσι ο συντελεστής εκπομπών για την παραγωγή θερμικής ενέργειας είναι μηδέν. Αν τώρα όλο το φορτίο καλύπτονταν από το μακροδίκτυο τότε ο συντελεστής εκπομπών πάλι βάσει του τύπου (1) θα ήταν:

$$C_{rate} = 0,4 \cdot 0,13 + 0,6 \cdot 0,05 = 0,082 \text{ kg/ kWh}$$

Είναι εμφανές λοιπόν ότι με τη συμπαραγωγή μειώνονται αισθητά οι εκπομπές CO₂ ειδικά αν αναλογιστούμε ότι η ετήσια κατανάλωση σε ένα μικροδίκτυο είναι της τάξης της GWh.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

DER – CAM / GAMS

7.1 DER – CAM

Το DER-CAM (Distributed Energy Resources Customer Adoption Model) είναι ένα οικονομικό μοντέλο παραγωγής-κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας που υλοποιείται συνήθως με αλγεβρικά προγράμματα βελτιστοποίησης όπως είναι το GAMS (General Algebraic Modeling System). Το μοντέλο αυτό αναπτύσσεται στο εργαστήριο του Μπέρκλεϋ από το 2000. Ο στόχος του μοντέλου είναι να ελαχιστοποιήσει το κόστος λειτουργίας της τοπικής παραγωγής και των συστημάτων συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού (CHP), είτε για μεμονωμένες περιοχές καταναλωτών είτε για οποιοδήποτε μικροδίκτυο (μGrid). Για να επιτύχει αυτόν τον στόχο πρέπει να αντιμετωπιστούν τα ακόλουθα ζητήματα:

- Ποιος είναι ο αποδοτικότερος συνδυασμός διεσπαρμένης παραγωγής που ένας συγκεκριμένος καταναλωτής μπορεί να εγκαταστήσει;
- Ποιο είναι το κατάλληλο επίπεδο τεχνολογιών διανεμημένης παραγωγής που ελαχιστοποιεί το κόστος;
- Πώς πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι παραπάνω τεχνολογίες ώστε να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό κόστος για την κάλυψη του φορτίου των καταναλωτών;

Υποτίθεται ότι ο πελάτης-καταναλωτής επιθυμεί να εγκαταστήσει τη διανεμημένη παραγωγή για να ελαχιστοποιήσει το κόστος ενέργειας που καταναλώνεται στην περιοχή του. Συνεπώς, πρέπει να είναι δυνατό να καθοριστούν οι τεχνολογίες που ο πελάτης θα εγκαταστήσει και να προβλέπεται τότε ο πελάτης θα είναι αυτόνομος από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή/και να πραγματοποιήσει συναλλαγές με το δίκτυο ενέργειας και τότε να αγοράσει καύσιμα.

Το μοντέλο DER-CAM επιλέγει ποιες τεχνολογίες, διεσπαρμένης παραγωγής ή/και CHP, πρέπει ο καταναλωτής να επιλέξει και πώς αυτός ο συνδυασμός πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε συγκεκριμένο φορτίο ενός μικροδικτύου. Επιπλέον, παραθέτει πληροφορίες για το κόστος και τα στοιχεία απόδοσης και λειτουργίας του εξοπλισμού. Οι εισοδοί (δεδομένα), οι έξοδοι (αποτελέσματα) και οι υποθέσεις στο DER-CAM διευκρινίζονται παρακάτω.

Τα βασικά δεδομένα στο μοντέλο περιλαμβάνουν:

- Το προφίλ το φορτίου του καταναλωτή, δηλαδή οι ανάγκες σε θερμικά και ηλεκτρικά φορτία.

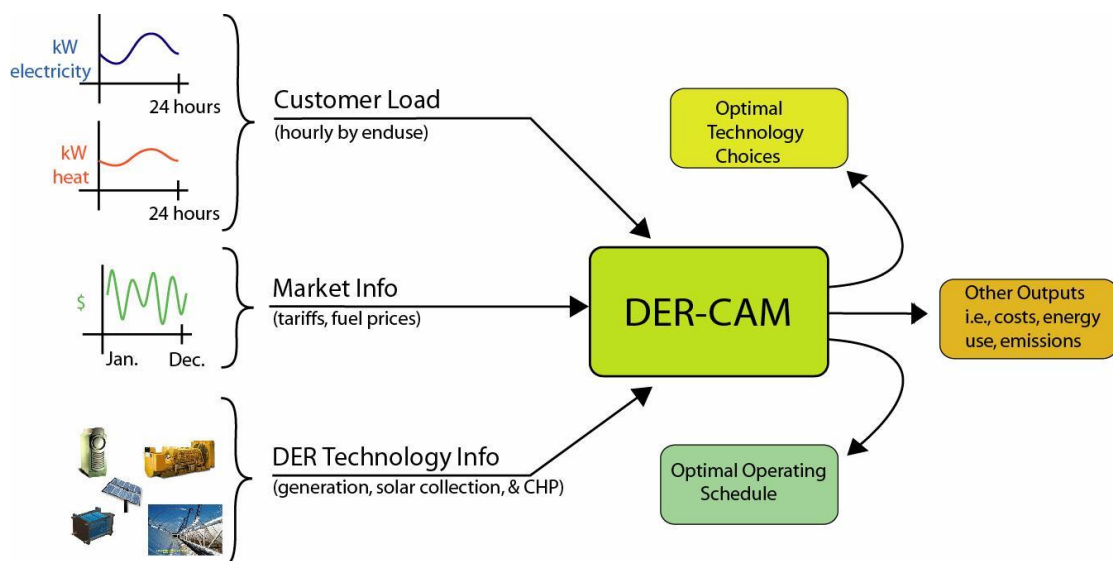
- Τα τιμολόγια της ηλεκτρικής ενέργειας ή/και του φυσικού αερίου που υπάρχει στην αγορά.
- Τα στοιχεία (κόστος κεφαλαίου, συντήρησης, ονοματική ισχύς κλπ.) των τεχνολογιών παραγωγής.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο βελτιστοποίησης DER-CAM είναι:

- Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και συμπαραγωγής.
- Σε ποιο ποσοστό και πότε η εγκατεστημένη παραγωγή θα παράγει την ενέργεια που απαιτεί η τοπική παραγωγή.
- Το συνολικό κόστος από την παραγωγή για την κάλυψη ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων.

Τα αποτελέσματα του DER-CAM δεν προτίθενται να είναι λεπτομερείς οικονομικές ή τεχνικές αποτιμήσεις του αν η αυτόνομη παραγωγή του μικροδικτύου έχει νόημα για συγκεκριμένες περιπτώσεις, ούτε να παρέχει αποτιμήσεις της αγοράς ή προβλέψεις διείσδυσης των DER. Ο στόχος του μοντέλου είναι απλώς να εξετάσει τα οικονομικά θεμέλια και να διαπιστώσει ποιες τεχνολογίες DER μπορεί να είναι ελκυστικές για τα μικροδίκτυα, σε τι συνδυασμούς μπορούν να εγκατασταθούν και πώς να λειτουργήσουν.

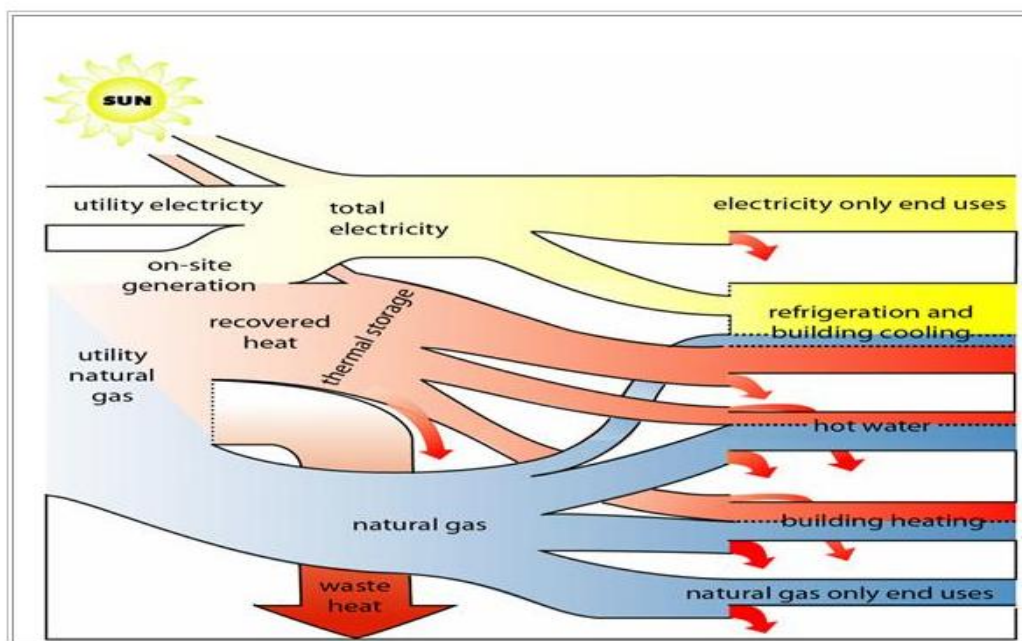
Η δομή του μοντέλου DER-CAM αποτυπώνεται χαρακτηριστικά στην εικόνα 1.



Εικόνα 7.1. Δομή μοντέλου DER-CAM

Το μοντέλο με την πάροδο των χρόνων συνεχώς εξελίσσεται και βελτιώνεται. Αρχικά προέβλεπε την εγκατάσταση μόνο τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής, στη συνέχεια προστέθηκαν και οι τεχνολογίες συμπαραγωγής ενώ τα τελευταία χρόνια το μοντέλο έχει εξελιχθεί ώστε να συμπεριλαμβάνει και θέματα εκπομπών και φορολογίας άνθρακα. Παράλληλα στις τελευταίες μελέτες στο μοντέλο ενσωματώθηκαν τεχνολογίες ηλεκτρικής και θερμικής αποθήκευσης.

Η εικόνα 2 δίνει μία σχηματική αναπαράσταση της ενεργειακής ροής όπως αυτή διαμορφώνεται στο DER-CAM. Έστω οι πιθανές μορφές ενέργειας σε μια περιοχή περιλαμβάνουν την ηλιακή ενέργεια, την ηλεκτρική και το φυσικό αέριο. Για μια δεδομένη επένδυση στη διασπαρμένη παραγωγή, το DER-CAM επιλέγει το βέλτιστο συνδυασμό τοπικής παραγωγής που απαιτείται για να ικανοποιήσει τα φορτία των καταναλωτών της περιοχής με το ελάχιστο δυνατό κόστος.



Εικόνα 7.2. Ενεργειακή ροή από την παραγωγή στην κατανάλωση με το DER-CAM

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα τα καθαρά ηλεκτρικά φορτία όπως φωτισμός, ηλεκτρικός εξοπλισμός γραφείων κτλ θα καλυφθούν μόνο από την ηλεκτρική ενέργεια. Τα ψυκτικά φορτία καλύπτονται από ηλεκτρική ενέργεια ή θερμότητα που χρησιμοποιεί ένα κύκλο απορρόφησης. Ζεστό νερό και θέρμανση χώρων ικανοποιούνται από την ανακτώμενη θερμότητα μέσω CHP ή το φυσικό αέριο. Επιπλέον το φυσικό αέριο χρησιμοποιείται αποκλειστικά στα κουζίνα φορτία.

Επιγραμματικά το μοντέλο που βελτιστοποιήθηκε βάσει του DER – CAM είναι [1]:

MINIMIZE

Annual energy cost:

- energy purchase cost
- + amortized DER technology capital cost
- + annual O&M cost

SUBJECT TO

Energy balance:

- Energy purchased + energy generated exceeds demand

Operational constraints:

- Generators, chillers, etc. must operate within installed limits
- Heat recovered is limited by generated waste heat

Regulatory constraints:

- Minimum efficiency requirements
- Maximum emission limits

Investment constraints:

- Payback period is constrained

Storage constraints:

- Electricity stored is limited by battery size
- Heat storage is limited by reservoir size

7.2 GAMS

7.2.1 Γενικά στοιχεία

Ουσιαστική πρόοδος έγινε τις δεκαετίες του '50 και του '60 με την ανάπτυξη αλγορίθμων και υπολογιστικού κώδικα για την επίλυση μεγάλων μαθηματικών προγραμματιστικών προβλημάτων. Την δεκαετία του '70 ο αριθμός των εφαρμογών αυτού του είδους ήταν μικρότερος από τον αναμενόμενο, διότι οι διαδικασίες επίλυσης αποτελούσαν μόνο ένα μικρό μέρος της προσπάθειας μοντελοποίησης. Ένα μεγάλο μέρος του χρόνου απαιτείτο για την ανάπτυξη ενός μοντέλου που περιελάμβανε προετοιμασία και μετασχηματισμό δεδομένων και αναφορά αποτελεσμάτων. Το κάθε μοντέλο απαιτούσε πολλές ώρες ανάλυσης και προγραμματισμού, ώστε να οργανωθούν τα δεδομένα και να γραφτεί το πρόγραμμα, που θα τα μετασχημάτιζε στην απαραίτητη από τους βελτιστοποιητές – optimizers μαθηματικού προγραμματισμού μορφή. Επιπροσθέτως, η ανίχνευση και εξάλειψη των λαθών ήταν μία πολύ δύσκολη διαδικασία, διότι τα προγράμματα που πραγματοποιούσαν ενέργειες, όπως πράξεις, μεταξύ των δεδομένων ήταν προσβάσιμα ουσιαστικά μόνο από τον ειδικό που τα έγραψε και όχι από τους υπεύθυνους αναλυτές του ερευνητικού έργου. Έτσι, τις τελευταίες δεκαετίες του 20ου αιώνα αναπτύχθηκαν λογισμικά μοντελοποίησης πιο φιλικά προς το χρήστη, με σκοπό να βελτιωθεί η παραπάνω κατάσταση. Ένα από αυτά είναι και το GAMS.

Το Γενικό Αλγεβρικό Σύστημα Μοντελοποίησης (General Algebraic Modeling System – GAMS) είναι ένα σύστημα μοντελοποίησης υψηλού επιπέδου για μαθηματικό προγραμματισμό και βελτιστοποίηση. Η ιδέα του προγράμματος παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1975 στο ISMP (International Symposium on Mathematical Programming) στη Βουδαπέστη. Το σύστημα αναπτύχθηκε κατόπιν στενής συνεργασίας μαθηματικών και οικονομολόγων, οι οποίοι είναι μία σημαντική ομάδα των χρηστών του GAMS. Η συνεργασία ανάμεσα σε οικονομικά, επιστήμη των υπολογιστών και επιχειρησιακή έρευνα ήταν ο σημαντικότερος παράγοντας για την επιτυχία στην ανάπτυξη του συστήματος. Ο μαθηματικός προγραμματισμός και η οικονομική θεωρία είναι στενά συνδεδεμένα.

Το GAMS είναι σχεδιασμένο για μοντελοποίηση γραμμικών, μη-γραμμικών και μεικτού ακεραίου προβλήματα βελτιστοποίησης. Το σύστημα αυτό είναι το πλέον κατάλληλο για περίπλοκες, μεγάλης κλίμακας εφαρμογές μοντελοποίησης και επιτρέπει στο χρήστη να κατασκευάσει μεγάλα, εύχρηστα μοντέλα τα οποία μπορούν να προσαρμοστούν σε νέες συνθήκες. Το GAMS επιτρέπει στο χρήστη να αφοσιωθεί στη μοντελοποίηση του προβλήματος κάνοντας την οργάνωση εύκολη. Το σύστημα μοντελοποιεί προβλήματα με ιδιαίτερα συμπαγή και φυσικό τρόπο [3]. Η γλώσσα που χρησιμοποιεί το GAMS είναι τυπικά παρόμοια με τις συνήθως χρησιμοποιημένες γλώσσες προγραμματισμού. Είναι επομένως οικία σε καθένα που έχει κάποια επαφή με τον προγραμματισμό.

Συνοπτικά το GAMS αναπτύχθηκε ώστε:

- να παρέχει μία υψηλού επιπέδου γλώσσα για την συμπαγή αναπαράσταση μεγάλων και πολύπλοκων μοντέλων,
- να επιτρέπονται αλλαγές στις ρυθμίσεις με απλό και ασφαλή τρόπο,
- να επιτρέπονται σαφείς δηλώσεις αλγεβρικών σχέσεων,
- να είναι δυνατή η περιγραφή ενός μοντέλου ανεξάρτητα από τον αλγόριθμο επίλυσης,

Το GAMS είναι κατάλληλο για χρήση σε διάφορες υπολογιστικές πλατφόρμες και τα μοντέλα είναι φορητά μεταξύ των πλατφορμών. Επίσης, είναι διαθέσιμο για χρήση από προσωπικούς υπολογιστές, workstations, υπολογιστές mainframe, και υπερυπολογιστές. Το σύστημα επιμελείται των χρονοβόρων λεπτομερειών για την υλοποίηση σε συγκεκριμένο μηχάνημα και σύστημα λογισμικού. Ο χρήστης μπορεί να αλλάξει τη δομή εύκολα και γρήγορα, επίσης μπορεί να μεταβεί από τον έναν στον άλλο επιλυτή – solver και να μεταβεί από γραμμικό σε μη γραμμικό προγραμματισμό χωρίς δυσκολία. Το σύστημα εμπεριέχει ένα περιβάλλον ολοκληρωμένης ανάπτυξης (integrated development environment – IDE) και μία ομάδα από ολοκληρωμένους επιλυτές (solvers).

Το GAMS επιτρέπει στους χρήστες του να αφοσιωθούν εντελώς στη μοντελοποίηση. Εξαλείφοντας την ανάγκη για βαθιά ενασχόληση με ειδικά τεχνικά προβλήματα για κάθε υπολογιστή που εφαρμόζεται το σύστημα, όπως υπολογισμοί διευθύνσεων, εντολές αποθήκευσης, σύνδεση υπορουτινών και έλεγχος ροής εισόδου – εξόδου, το GAMS αυξάνει το διαθέσιμο χρόνο για τη θεμελίωση και τρέξιμο του μοντέλου, καθώς και την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Το πρόγραμμα θεμελιώνει σωστές συνήθειες μοντελοποίησης από μόνο του, απαιτώντας σύντομους, περιεκτικούς και ακριβείς προσδιορισμούς των οντοτήτων και των σχέσεων.

Χρησιμοποιώντας το GAMS, τα δεδομένα εισάγονται μόνο μία φορά με τη γνωστή μέθοδο λιστών και πινάκων. Τα μοντέλα περιγράφονται με σαφείς αλγεβρικές δηλώσεις, οι οποίες είναι ευανάγνωστες ταυτόχρονα για ανθρώπους και υπολογιστές. Ολόκληρα σύνολα από στενά συνδεδεμένους περιορισμούς μπορούν να εισαχθούν σε μία δήλωση. Το GAMS αυτόματα αναπαράγει κάθε εξίσωση περιορισμών και επιτρέπει στο χρήστη να κάνει εξαιρέσεις σε περιπτώσεις όπου δεν απαιτείται γενικότητα. Οι δηλώσεις στα μοντέλα μπορούν να ξαναχρησιμοποιηθούν χωρίς να απαιτούνται αλλαγές στην άλγεβρα όταν προκύπτουν άλλες περιπτώσεις του ίδιου ή σχετικού προβλήματος. Η θέση και ο τύπος του σφάλματος επισημαίνονται πριν επιχειρηθεί η επίλυση. Το GAMS χειρίζεται τα δυναμικά μοντέλα περιλαμβάνοντας ακολουθίες χρόνου, καθυστερήσεις και προπορεύσεις, και επεξεργασία χρονικών σημείων τερματισμού.

Το GAMS είναι ευέλικτο και ισχυρό. Διευκολύνει την ανάλυση της ευαισθησίας. Ο χρήστης μπορεί εύκολα να επιλύσει ένα μοντέλο για διαφορετικές τιμές ενός στοιχείου και μετά να παράγει την αναφορά εξόδου καταγράφοντας τα χαρακτηριστικά επίλυσης

για κάθε περίπτωση. Τα μοντέλα μπορούν να αναπτυχθούν και να τεκμηριωθούν παράλληλα, διότι το GAMS επιτρέπει στο χρήστη να συμπεριλάβει επεξηγηματικό κείμενο ως μέρος του ορισμού οποιουδήποτε συμβόλου ή εξίσωσης. Το GAMS έχει τη δυνατότητα να εμπλουτίζεται και να επεκτείνεται συνεχώς. Η ύπαρξη ορισμένων μοντέλων ως βιβλιοθήκη παραδειγμάτων για διαφορετικά είδη προβλημάτων (οικονομικά, τεχνικά, περιβαλλοντικά κλπ.) είναι πολύ χρήσιμη, ιδιαίτερα για τους αρχάριους χρήστες του προγράμματος αφού τους δίνει τη δυνατότητα να πειραματιστούν και αργότερα να επεκτείνουν έναν σωστό κώδικα.

Η αναπαράσταση GAMS μοντέλων είναι σε ευανάγνωστη μορφή για τους χρήστες, αλλά και για τους υπολογιστές. Αυτό σημαίνει ότι το ίδιο το πρόγραμμα GAMS αποτελεί την επεξήγηση του μοντέλου και ότι η ξεχωριστή περιγραφή που απαιτείτο στο παρελθόν, δεν είναι πλέον αναγκαία. Η αναπαράσταση ενός μοντέλου GAMS είναι σαφής και περιεκτική και εκμεταλλεύεται πλήρως την κομψότητα της μαθηματικής αναπαράστασης. Παράλληλα όλοι οι μετασχηματισμοί των δεδομένων είναι καθορισμένοι λιτά και αλγεβρικά. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι τα δεδομένα μπορούν να εισαχθούν στην πιο στοιχειώδη τους μορφή και ότι όλες οι μετατροπές που έχουν λάβει χώρα κατά την οικοδόμηση του μοντέλου και στην αναφορά είναι διαθέσιμα για επισκόπηση. Πολύ σημαντικό είναι και το γεγονός ότι το επεξηγηματικό κείμενο μπορεί να αποτελέσει μέρος του ορισμού όλων των συμβόλων και να αναπαράγεται, όποτε οι αντίστοιχες τιμές εμφανίζονται στην οθόνη εξόδου. Ακόμη όλες οι απαραίτητες πληροφορίες για την κατανόηση του μοντέλου βρίσκονται σε ένα αρχείο. Βέβαια, απαιτείται οργάνωση ώστε να είναι δυνατή η πλήρης εκμετάλλευση αυτών των χαρακτηριστικών σχεδιασμού, αλλά σκοπός είναι να γίνουν τα μοντέλα πιο προσβάσιμα, πιο κατανοητά, πιο επαληθεύσιμα και, επομένως, πιο αξιόπιστα.

Το GAMS δίνει τη δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε διάφορα είδη προγραμματισμού γραμμικού και μη για την επίλυση ενός προβλήματος. Αυτά είναι:

- LP: Linear Programming, Γραμμικός Προγραμματισμός
- MIP: Mixed-Integer Programming, Προγραμματισμός Μεικτού Ακεραίου
- NLP: Non-Linear Programming, Μη Γραμμικός Προγραμματισμός
- MCP: Mixed Complementarity Problems, Προβλήματα Μεικτής Συμπληρωματικότητας
- MPEC: Mathematical Programs with Equilibrium Constraints, Μαθηματικά Προγράμματα με Περιορισμούς Ισοροπίας
- CNS: Constrained Nonlinear Systems, Περιορισμένα Μη-Γραμμικά Συστήματα
- DNLP: Non-Linear Programming with Discontinuous Derivatives, Μη Γραμμικός Προγραμματισμός με Ασυνεχείς Παραγώγους
- MINLP: Mixed-Integer Non-Linear Programming, Μη Γραμμικός Προγραμματισμός Μεικτού Ακεραίου
- QCP – Quadratically Constrained Programs, Προγράμματα με Περιορισμούς Δεύτερης Τάξης
- MIQCP: Mixed Integer Quadratically Constrained Programs, Μη Γραμμικά Προγράμματα με Περιορισμούς Δεύτερης Τάξης

Στην συγκεκριμένη μελέτη έγινε χρήση του MIP (προγραμματισμός μεικτού ακεραίου) που επιτρέπει τη χρήση δυαδικών και ακέραιων μεταβλητών.

7.2.2 Δομή ενός προγράμματος στο GAMS

Πριν γίνει μία συνοπτική παρουσίαση της δομής του GAMS καλό θα ήταν να αναφερθούν οι βασικότεροι κανόνες που διέπουν τη λειτουργία του προγράμματος. Αυτοί είναι:

- Ένα μοντέλο στο GAMS είναι μια συλλογή των δηλώσεων στη γλώσσα GAMS. Ο κανόνας που οδηγεί τις δηλώσεις είναι ότι κάθε οντότητα (εξαρτημένη ή ανεξάρτητη, μεταβλητή ή σταθερή) στο μοντέλο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί προτού να έχει δηλωθεί παραπάνω.
- Οι οντότητες στο GAMS μπορούν να δηλωθούν σχεδόν με οποιοδήποτε τρόπο επιθυμεί ο χρήστης. Έτσι επιτρέπονται οι δηλώσεις σε πολλαπλές γραμμές, οι κενές γραμμές μεταξύ των δηλώσεων όπως και οι πολλαπλές δηλώσεις ανά γραμμή.
- Για κάθε νέο χρήστη του GAMS πρέπει μετά την ολοκλήρωση κάθε δήλωσης να συνοδεύεται με το σύμβολο «;» (semicolon). Ο μεταγλωττιστής (compiler) GAMS δεν διακρίνει κεφαλαία και πεζά γράμματα έτσι τα χρησιμοποιούμε όπως μας βολεύει.
- Τα επεξηγηματικά σχόλια είναι χρήσιμα για την τεκμηρίωση των μαθηματικών μοντέλων. Είναι καλύτερα εάν ενσωματώνονται μέσα στο ίδιο το μοντέλο παρά να παρουσιάζονται ξεχωριστά. Υπάρχουν δύο τρόποι να παρεμβληθεί η επεξήγηση μέσα σε μια εφαρμογή του GAMS. Καταρχήν, οποιαδήποτε γραμμή που αρχίζει με έναν αστερίσκο (*) στη πρώτη στήλη λαμβάνεται ως γραμμή σχολίου από το μεταγλωττιστή GAMS. Δεύτερον, ίσως το σημαντικότερο, τα σχόλια μπορούν να παρεμβληθούν μετά από τις δηλώσεις των οντοτήτων του GAMS όπως θα δούμε παρακάτω σε παράδειγμα.
- Η δημιουργία οντοτήτων στο GAMS περιλαμβάνει δύο βήματα: μια δήλωση (declaration) και μια ανάθεση (assignment). Η δήλωση περιλαμβάνει την ύπαρξη της οντότητας στο πρόγραμμα δίνοντας ένα όνομα. Η ανάθεση δίνει μια συγκεκριμένη τιμή ή μια μορφή. Στην περίπτωση των εξισώσεων, πρέπει να γίνεται δήλωση και ανάθεση σε ξεχωριστές δηλώσεις στο GAMS. Για όλες τις άλλες οντότητες του GAMS, ωστόσο, υπάρχει η επιλογή των δηλώσεων και αναθέσεων στην ίδια δήλωση ή χωριστά.
- Τα ονόματα που δίνονται στις οντότητες του μοντέλου πρέπει να αρχίζουν με γράμμα και μπορούν να ακολουθηθούν μέχρι και τριάντα οποιοδήποτε χαρακτήρες ή ψηφία.

Η δομή του ενός κώδικα στο GAMS, δηλαδή τα βασικά στοιχεία εισόδου και εξόδου, είναι η εξής:

Είσοδοι:		Έξοδοι:
<ul style="list-style-type: none"> • Σύνολα 		<ul style="list-style-type: none"> • Εκτύπωση ηχούς (Echo Print)
	Δήλωση	<ul style="list-style-type: none"> • Χάρτες αναφοράς
	Ανάθεση μελών	<ul style="list-style-type: none"> • Λίστα εξισώσεων
<ul style="list-style-type: none"> • Δεδομένα (παράμετροι, πίνακες, βαθμωτά μεγέθη) 		<ul style="list-style-type: none"> • Αναφορές κατάστασης
	Δήλωση	<ul style="list-style-type: none"> • Αποτελέσματα
	Ανάθεση τιμών	
<ul style="list-style-type: none"> • Μεταβλητές 		
	Δήλωση	
	Ανάθεση είδους	
<ul style="list-style-type: none"> • Ορισμός ορίων και/ή αρχικών τιμών (προαιρετικό) 		
<ul style="list-style-type: none"> • Εξισώσεις 		
	Δήλωση	
	Ορισμός	
<ul style="list-style-type: none"> • Εντολές μοντέλου και επίλυσης 		
<ul style="list-style-type: none"> • Εντολές εμφάνισης (προαιρετικό) 		

Πίνακας 7.1. Δομή ενός μοντέλου GAMS

7.2.3 Διασύνδεση GAMS με άλλα προγράμματα

Οι γλώσσες μοντελοποίησης, όπως η GAMS, έχουν σαφώς καλύτερες δυνατότητες στην κατασκευή ενός μοντέλου βελτιστοποίησης από προγράμματα, όπως το Excel και η MATLAB. Παρόλα αυτά, μικρής κλίμακας μη γραμμικά μοντέλα (και ορισμένα μεγαλύτερα γραμμικά) μπορούν να επιλυθούν με τη μέθοδο της βελτιστοποίησης και σε αυτά τα προγράμματα. Ωστόσο, είναι σαφές, ότι σε προβλήματα μεγαλύτερης κλίμακας, όπου απαιτείται ο αυτόματος υπολογισμός παραγώγων και άλλες απαραίτητες διαδικασίες και πράξεις, τα προγράμματα αυτά είναι μη πρακτικά σε σχέση με το GAMS. Από την άλλη, παρότι το GAMS έχει τη δυνατότητα επεξεργασίας και απεικόνισης δεδομένων και αποτελεσμάτων, σε μεγάλο βαθμό η MATLAB, αλλά και το Excel, είναι σαφώς αποδοτικότερα στον τομέα αυτό.

Για το λόγο αυτό, έχει γίνει προσπάθεια από Αμερικανούς ερευνητές για σύνδεση και συνεργασία των προγραμμάτων GAMS και MATLAB με επιτυχία, ώστε η αρτιότερη βελτιστοποίηση να απεικονιστεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Έτσι προέκυψε το πρόγραμμα σύνδεσης GAMS/MATLAB από τον Michael C. Ferris, καθηγητή του πανεπιστημίου του Wisconsin, το οποίο βοηθά τους χρήστες του ενός προγράμματος να αξιοποιήσουν τις σημαντικότερες δυνατότητες, που προσφέρει το άλλο. Συνοψίζοντας, μπορούμε να πούμε ότι η MATLAB μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πακέτο απεικόνισης

για μοντέλα GAMS, και το GAMS μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σύνθετο εργαλείο βελτιστοποίησης για τη MATLAB [15].

Παράλληλα χρησιμοποιώντας τη λειτουργία GDX (Gams Data Exchange) γίνεται δυνατή η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ του GAMS και του EXCEL. Ένας φάκελος GDX είναι ένας φάκελος που μπορεί να αποθηκεύσει τις τιμές δεικτών, παραμέτρων, μεταβλητών και εξισώσεων που χρησιμοποιούνται σε ένα μοντέλο του GAMS. Αυτοί οι φάκελοι μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να προετοιμάσουν δεδομένα για ένα πρόγραμμα στο GAMS, να παρουσιάσουν αποτελέσματα από ένα πρόγραμμα του GAMS, να αποθηκεύσουν αποτελέσματα του ίδιου μοντέλου χρησιμοποιώντας διαφορετικές παραμέτρους κλπ. Για να περάσουν τα δεδομένα η τα αποτελέσματα από ένα αρχείο GAMS σε ένα αρχείο EXCEL και αντίστροφα πρέπει πρώτα να περάσουν από ένα αρχείο GDX. Μέσω του εργαλείου GDXXRW.exe γίνεται η μεταφορά από το GAMS στο EXCEL και μέσω των εντολών execute_unload και execute γίνεται τα ανάποδο [19]. Σε αυτή την εργασία όπου ο όγκος των δεδομένων αλλά και των αποτελεσμάτων η συνδεσιμότητα του GAMS με το EXCEL ήταν καθοριστικής σημασίας.

7.2.4 Επιλογή GAMS για τη δημιουργία του συγκεκριμένου μοντέλου

Ο σχεδιασμός για την επέκταση ηλεκτρικών εγκαταστάσεων και οι προσομοιώσεις λειτουργίας έχουν μία μακρά ιστορία και πολλές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για την επίλυση προβλημάτων αντίστοιχα με αυτά που ασχολείται η παρούσα εργασία. Μερικές από τις εφαρμοσμένες προσεγγίσεις βασίζονται σε εμπειρικούς κανόνες για την χρονολογική προσομοίωση του συστήματος λειτουργίας, ορισμένες βασίζονται σε μαθηματικές προσεγγίσεις του πραγματικού συστήματος λειτουργίας και άλλες εφαρμόζουν τεχνικές βελτιστοποίησης. Τα οικονομικά μεγέθη της υιοθέτησης μίας τεχνολογίας από τον καταναλωτή μπορούν να μοντελοποιηθούν με ευκολία από ένα μαθηματικό πρόβλημα βελτιστοποίησης εξαιτίας του γεγονότος ότι ο καταναλωτής πάντοτε προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει το εσωτερικό κόστος. Επιπροσθέτως, η χρήση τεχνικών βελτιστοποίησης έχει το επιπλέον πλεονέκτημα ότι μπορεί να προσφέρει εύρωστα και αποτελεσματικά εργαλεία, τα οποία μπορούν σχεδόν να εγγυηθούν την εύρεση μίας βέλτιστης λύσης στο πρόβλημα.

Η χρήση κλασικών τεχνικών βελτιστοποίησης έχει μερικούς σημαντικούς, αλλά και προφανείς, περιορισμούς. Από τους πιο γνωστούς είναι ότι μερικές αποφάσεις των καταναλωτών μπορεί να είναι πιο ποιοτικές παρά ποσοτικές. Για παράδειγμα, μερικά «οφέλη», όπως ευδιάκριτος έλεγχος πάνω στην ηλεκτρική κάλυψη ή καλύτερη ποιότητα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, δεν μπορούν εύκολα να μεταφραστούν σε οικονομικά μεγέθη. Ωστόσο, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, αυτοί οι περιορισμοί δεν αναμένεται να είναι σημαντικοί, αν και σίγουρα θα γίνουν προσπάθειες στο μέλλον ώστε να αντιμετωπιστούν. Υπάρχουν ακόμη καθαρά μαθηματικοί περιορισμοί που θα προκύψουν τελικά. Παραδείγματος χάριν, το κόστος γεννητριών μικρής κλίμακας δεν είναι προκαθορισμένο, όπως είναι απαραίτητο στην τρέχουσα δομή του DER-CAM με CHP, αλλά θα εμφανίσει τάση μείωσης, όσο η εμπειρία του καταναλωτή με μία

συγκεκριμένη τεχνολογία αυξηθεί. Με άλλα λόγια, ενώ η πρώτη μονάδα μίας συγκεκριμένης τεχνολογίας παραγωγής μπορεί να μην είναι η πιο ελκυστική για τον καταναλωτή, δεδομένου ότι έχει εμπειρία με την τεχνολογία, οι επακόλουθες μονάδες, ίσως είναι πιο ελκυστικές. Παράλληλα σχετικά με την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της γραμμικότητας του προβλήματος δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκθετικές σχέσεις, όπως γίνεται σε άλλες μοντελοποιήσεις ηλεκτρικής αποθήκευσης.

Το λογισμικό GAMS επιλέχτηκε επειδή αποτελεί μία υψηλού επιπέδου γλώσσα για μία συμπαγή έκφραση μεγάλων και πολύπλοκων μοντέλων, ενώ παράλληλα επιτρέπει να γίνονται αλλαγές στις ρυθμίσεις του μοντέλου με απλό και ασφαλή τρόπο. Επίσης, το GAMS επιτρέπει σαφείς δηλώσεις αλγεβρικών σχέσεων, και την περιγραφή μοντέλων που είναι ανεξάρτητα από αλγόριθμους επίλυσης. Ενώ υπάρχουν και άλλα πακέτα λογισμικών βελτιστοποίησης που έχουν τις ίδιες ιδιότητες, το GAMS έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν με επιτυχία από την ερευνητική ομάδα του Berkeley Lab για την υλοποίηση του DER-CAM.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

8.1 Εισαγωγή

Πριν από την υλοποίηση του κώδικα στο προγραμματιστικό περιβάλλον του GAMS απαραίτητη ήταν η δημιουργία του μαθηματικού μοντέλου του προβλήματος. Όπως είναι γνωστό, το GAMS επιλύει ένα πρόβλημα με μεθόδους γραμμικού προγραμματισμού και έτσι το μαθηματικό μας μοντέλο θα αποτελείται από την αντικειμενική συνάρτηση και τους περιορισμούς. Η αντικειμενική συνάρτηση περιλαμβάνει όλα τα κόστη που εμπλέκονται στο πρόβλημα και οι περιορισμοί εξασφαλίζουν τα ενεργειακά ισοζύγια εντός του μικροδικτύου. Η παρουσία τεχνολογιών συμπαραγωγής και αποθήκευσης περιπλέκουν αρκετά το μοντέλο.

Σχετικά με τη συμπαραγωγή έχουν εισαχθεί στο πρόγραμμα δεδομένα τεχνολογιών που μπορούν να παράγουν ηλεκτρισμό και θέρμανση ή ηλεκτρισμό και ψύξη για την κάλυψη θερμικών και ψυκτικών φορτίων αντίστοιχα. Οι γεννήτριες αυτές εφοδιάζονται με φυσικό αέριο και παράγουν ηλεκτρισμό για την κάλυψη των ηλεκτρικών φορτίων ενώ παράλληλα η θερμότητα που εκλύεται αξιοποιείται για την κάλυψη θερμικών ηλεκτρικών φορτίων. Στο μαθηματικό μοντέλο έχουν συμπεριληφθεί και μεταβλητές που σχετίζονται με τη θερμική αποθήκευση η οποία όμως δεν μοντελοποιείται στο κώδικα λόγω έλλειψης δεδομένων για τις τεχνολογίες που απαιτούνται αλλά και γιατί θα περιέπλεκε το πρόγραμμα, κάτι το οποίο είναι εμφανές από την προσθήκη της ηλεκτρικής αποθήκευσης εντός του προγράμματος.

Η ηλεκτρική αποθήκευση πραγματοποιείται από μπαταρίες στις οποίες εισέρχεται ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο τις ώρες χαμηλής ζήτησης και ανακτάται τις ώρες αιχμής εντός του μικροδικτύου για την κάλυψη μέρους του φορτίου.

8.2 Μοντελοποίηση ηλεκτρικής αποθήκευσης

Στο μαθηματικό μοντέλο που ακολουθεί δίνονται οι εξισώσεις και οι μεταβλητές για την υλοποίηση της ηλεκτρικής αποθήκευσης εντός του προγράμματος. Εδώ για λόγους πληρότητας παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο και για απλές μπαταρίες (οξέως-μολύβδου, νικελίου-καδμίου κλπ.), στις οποίες η χωρητικότητα ενέργειας σχετίζεται με την χωρητικότητα ισχύος, αλλά και για μπαταρίες ροής στις οποίες οι δύο χωρητικότητες είναι ανεξάρτητες. Στο πρόγραμμα χρησιμοποιούνται μόνο μπαταρίες οξέως-μολύβδου διότι είναι οι καταλληλότερες για εφαρμογές σε μικροδίκτυα αλλά και το κόστος των άλλων μπαταριών τις καθιστά απαγορευτικές για να συμπεριληφθούν στην λύση.

Με λίγα λόγια η διαδικασία της ηλεκτρικής αποθήκευσης έχει ως εξής. Ένα ποσό ενέργειας που αγοράζεται από το μικροδίκτυο προορίζεται για ηλεκτρική αποθήκευση. Η ενέργεια αυτή μειωμένη κατά ένα μικρό ποσοστό λόγω απωλειών μεταφοράς ενέργειας και εισέρχεται στις μπαταρίες. Το ποσό ενέργειας που θα εξαχθεί από τις μπαταρίες εξαρτάται από την διάρκεια που η ενέργεια έμεινε μέσα στην μπαταρία. Κάθε ώρα που περνάει η ενέργεια αυτή μειώνεται. Η συνολικά αποθηκευμένη ενέργεια μιας μπαταρίας μία συγκεκριμένη ώρα ισούται με τη συνολικά αποθηκευμένη ενέργεια της προηγούμενης ώρας ($h-1$) συν την ενέργεια που εισήχθη στις μπαταρίες αυτήν την ώρα (h) μείον την ενέργεια που πήραμε σαν έξοδο από τις μπαταρίες μείον τις απώλειες την συγκεκριμένη ώρα (h). Η τελική ενέργεια που χρησιμοποιείται για την κάλυψη του φορτίου από τις μπαταρίες είναι η ενέργεια εξόδου των μπαταριών μειωμένη και αυτή κατά ένα ποσοστό λόγω απωλειών.

Η συνύπαρξη στην ίδια εξίσωση μεταβλητών που αναφέρονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές (h και $h-1$) περιπλέκει αρκετά τον κώδικα και συνδυασμό με τη χρήση μεταβλητών για τη μοντελοποίηση των τεχνολογιών συμπαραγωγής ο χρόνος τρεξίματος του προγράμματος έφθανε ορισμένες φορές και τα 30 λεπτά.

8.3 Υποθέσεις και περιορισμοί του προγράμματος

Όπως και στην αρχική υλοποίηση του προγράμματος για εφαρμογή τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής που έγινε από το εργαστήριο του Berkeley χρησιμοποιώντας το DER-CAM υπήρχαν κάποιες υποθέσεις για τη καλύτερη λειτουργία του, έτσι και εδώ έχουν διατηρηθεί αυτές οι υποθέσεις και έχουν προσαρμοσθεί ώστε να εξυπηρετούν την μοντελοποίηση συστημάτων συμπαραγωγής και ηλεκτρικής αποθήκευσης. Αυτές είναι:

- Οι αποφάσεις για τον καταναλωτή λαμβάνονται αυτόματα και αυστηρά με οικονομικά κριτήρια,
- οι δηλώσεις των κατασκευαστών για τις τιμές και τις αποδόσεις του εξοπλισμού γίνονται αποδεκτές χωρίς αμφισβήτηση. Επίσης, δεν λαμβάνεται υπ' όψιν οποιαδήποτε σταδιακή φθορά ή πτώση της απόδοσης κατά τη διάρκεια του χρόνου ζωής του εξοπλισμού. Το κόστος εγκατάστασης, αδειοδότησης ή άλλο τυχόν προκύπτον κόστος δεν λαμβάνονται υπόψη στο αρχικό κόστος (capital cost), καθώς και άλλα λειτουργικά έξοδα και το κόστος εκκίνησης,
- από την άλλη, οφέλη από την μεγαλύτερη αξιοπιστία και ποιότητα ισχύος, όσον αφορά το λειτουργικό κόστος και το κόστος συντήρησης επίσης δεν λαμβάνονται υπόψη,
- το πρόγραμμα δεν γνωρίζει συνθήκες εκκίνησης ή μεταβατικής λειτουργίας το μηχανών. Οι γεννήτριες υποτίθεται ότι μπορούν να λειτουργούν οποιαδήποτε στιγμή αποδίδοντας την ονομαστική τους ισχύ ή μέρος αυτής,
- οι γεννήτριες θεωρούμε ότι λειτουργούν με σταθερή απόδοση,
- συνθήκες θερμοκρασίας, πίεσης και ροής για τη μεταφορά θερμότητας στη συστήματα CHP δεν συμπεριλήφθηκαν στο μοντέλο,

- ο επιπλέον ηλεκτρολογικός και μηχανολογικός εξοπλισμός που χρειάζεται για την εγκατάσταση των τεχνολογιών παραγωγής και αποθήκευσης δεν λαμβάνεται υπόψη,
- στην ηλεκτρική αποθήκευση δεν απασχολούν ζητήματα αποθήκευσης ενέργειας π.χ. τους χειμερινούς μήνες και ανάκτησης της μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα π.χ. τους καλοκαιρινούς μήνες. Η αποθήκευση λαμβάνει χώρα στα πλαίσια μιας ημέρας.

8.4 Μαθηματική διατύπωση

Παράμετροι

Όνομα	Περιγραφή
<i>h</i>	Ωρες ($H=\{1,2,\dots,24\}$)
<i>m</i>	Μήνες ($M=\{1,2,\dots,12\}$)
<i>t</i>	Τύπος ημέρας ($T=\{\text{weekday, peak, weekend}\}$)
<i>s</i>	Εποχές ($S=\{\text{summer, winter}\}$)
<i>p</i>	Περίοδος ($P=\{\text{on-peak, mid-peak, off-peak}\}$, αφορά τις χρεώσεις μόνο)
<i>i</i>	Τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας
<i>l</i>	Τεχνολογίες αποθήκευσης θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας ($L=\{\text{ηλεκτρική αποθήκευση 'es', θερμική αποθήκευση 'hs', θερμικοί συλλέκτες 'st', ενέργεια από μπαταρίες ροής 'fe', ισχύς από μπαταρίες ροής 'fp'}\}$)
<i>u</i>	Τελικές χρήσεις ($U=\{\text{αμιγώς ηλεκτρικά φορτία 'e', φορτία ψύξης και κλιματισμού 'c', θερμικά φορτία 'h', φορτία αποκλειστικά φυσικού αερίου 'g'}\}$)

Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιήθηκαν είναι γεννήτριες φυσικού αερίου (CHP+COOL), ντιζελογεννήτριες, κυψέλες καυσίμου (CHP+COOL), παλινδρομικές μηχανές φυσικού αερίου (CHP+COOL), μικροστρόβιλοι (CHP+COOL) και φωτοβολταϊκά. Οι τεχνολογίες που έχουν το χαρακτηριστικό COOL σημαίνει ότι μπορούν μέσω συμπαραγωγής να καλύπτουν φορτία κλιματισμού.

Τα θερμικά φορτία είναι φορτία θέρμανσης χώρου και νερού και τα φορτία αποκλειστικά φυσικού αερίου είναι τα μαγειρικά.

Δεδομένα Καταναλωτή

Όνομα	Περιγραφή
$Cload_{u,m,t,h}$	Το φορτίο του πελάτη σε kW κατά την ώρα h , τύπο ημέρας t , και μήνα m για τελική χρήση u

Δεδομένα Αγοράς

Όνομα	Περιγραφή
$RTPower_{s,p}$	Κανονικοποιημένη χρέωση ζήτησης υπό το προκαθορισμένο τιμολόγιο για την εποχή s (χειμώνα – καλοκαίρι) και την περίοδο p (on-peak, mid-peak, off-peak) (\$/kW)
$RTEnergy_{m,t,h}$	Κανονικοποιημένο τιμολόγιο για αγορά ενέργειας κατά την ώρα h , τύπο ημέρας t , και μήνα m (\$/kWh)
$RTCCharge$	Κανονικοποιημένο τιμολόγιο χρέωσης πελατών (\$)
$RTFCharge$	Κανονικοποιημένο τιμολόγιο χρέωσης εγκαταστάσεων (\$/kW)
$IEM_{m,t,h}$	Τιμή Ανισομερούς αγοράς ενέργειας (Imbalance Energy Market) κατά την ώρα h , τύπο ημέρας t , και μήνα m (\$/kWh)
$RTGPower_{s,p}$	Κανονικοποιημένη χρέωση ζήτησης φυσικού αερίου υπό το προκαθορισμένο τιμολόγιο για την εποχή s και την περίοδο p (\$/kW)
$RTGEnergy_{m,t,h}$	Κανονικοποιημένο τιμολόγιο για αγορές φυσικού αερίου κατά την ώρα h , τύπο ημέρας t και μήνα m (\$/kWh)
$RTGCCCharge$	Κανονικοποιημένο τιμολόγιο χρέωσης πελατών για το φυσικό αέριο (\$)
$CTax$	Φόρος για εκπομπές CO ₂ (\$/kg-carbon)
$MktCRate$	Ρυθμός εκπομπής CO ₂ για την ενέργεια που αγοράζεται από το δίκτυο (kg-carbon/kWh)
$NGCRate$	Ρυθμός εκπομπής CO ₂ από την καύση φυσικού αερίου που αγοράζεται από το δίκτυο (kg-carbon/kWh)

$CRate_i$	Ρυθμός εκπομπής CO ₂ από την τεχνολογία i (kg-carbon/kWh)
$StandbyC$	Χρέωση standby (για εφεδρεία) σε \$/kW/μήνα που χρεώνει η εταιρεία ενέργειας (πχ. ΔΕΗ) στους πελάτες με αυτόνομη παραγωγή

Δεδομένα Τεχνολογιών DER-CHP και αποθήκευσης

Όνομα	Περιγραφή
$DERmaxp_i$	Ονομαστική ισχύς τεχνολογίας i (kW)
$DERlifetime_i$	Αναμενόμενος χρόνος ζωής της τεχνολογίας i (έτη)
$DERcapcost_i$	Σταθερό κόστος τεχνολογίας i (\$/kW)
$DEROMfix_i$	Σταθερό ετήσιο λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης της τεχνολογίας i (\$/kW)
$DEROMvar_i$	Μεταβλητό λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης της τεχνολογίας i (\$/kWh)
$Capcost_l$	Σταθερό κόστος τεχνολογίας l (\$)
$VariableCost_l$	Μεταβλητό λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης της τεχνολογίας l (\$/kWh)
$ElectricityStorageEfficiencyCharge$	Ποσοστό ηλεκτρισμού που φόρτισε μπαταρία το οποίο δεν χάνεται κατά τη μεταφορά ενέργειας
$ElectricityStorageEfficiencyDischarge$	Ποσοστό ηλεκτρισμού που προήλθε από αποφόρτιση μπαταρίας το οποίο δεν χάνεται κατά τη μεταφορά ενέργειας
$ElectricityStorageEfficiencyDecay$	Ποσοστό ηλεκτρισμού στην μπαταρία που χάνεται σε μία περίοδο
$ElectricityStorageMaxChargeRate$	Μέγιστο ποσοστό από την παραμένουσα χωρητικότητα της μπαταρίας που μπορεί να φορτιστεί σε μία περίοδο
$ElectricityStorageMaxDischargeRate$	Μέγιστο ποσοστό της αποθηκευμένης ενέργειας της μπαταρίας που μπορεί να

	αποφορτιστεί σε μία περίοδο
<i>ElectricityStorageMinStateofCharge</i>	Ελάχιστο ποσοστό χωρητικότητας της μπαταρίας που πρέπει να παραμένει
<i>FlowBatteryEfficiencyCharge</i>	Ποσοστό ηλεκτρισμού που φόρτισε μπαταρία ροής το οποίο δεν χάνεται κατά τη μεταφορά ενέργειας
<i>FlowBatteryEfficiencyDischarge</i>	Ποσοστό ηλεκτρισμού που προήλθε από αποφόρτιση μπαταρίας ροής το οποίο δεν χάνεται κατά τη μεταφορά ενέργειας
<i>FlowBatteryEfficiencyDecay</i>	Ποσοστό ηλεκτρισμού σε μπαταρία ροής που χάνεται σε μία περίοδο
<i>FlowBatteryMinStateofCharge</i>	Ελάχιστο ποσοστό χωρητικότητας της μπαταρίας ροής που πρέπει να παραμένει
<i>HeatStorageEfficiencyCharge</i>	Ποσοστό θερμότητας προς αποθήκευση που δεν χάνεται κατά τη μεταφορά ενέργειας
<i>HeatStorageEfficiencyDischarge</i>	Ποσοστό ανακτώμενης θερμότητας από αποθήκευση που δεν χάνεται κατά τη μεταφορά ενέργειας
<i>HeatStorageEfficiencyDecay</i>	Ποσοστό αποθηκευμένης θερμότητας που χάνεται σε μία περίοδο
<i>HeatStorageMaxChargeRate</i>	Μέγιστο ποσοστό παραμένουσας χωρητικότητας αποθηκευμένης θερμότητας που μπορεί να φορτιστεί σε μία περίοδο
<i>HeatStorageMaxDischargeRate</i>	Μέγιστο ποσοστό αποθηκευμένης θερμότητας που μπορεί να ανακτηθεί σε μία περίοδο
<i>TE ratio_i</i>	Θερμική έξοδος (kW_{th}) ανά παραγόμενο ηλεκτρικό kW από την τεχνολογία CHP <i>i</i> . Ο συντελεστής αυτός πολλαπλασιασμένος με τον όρο $GenL_i$ καθορίζει πόση παραμένουσα θερμότητα είναι διαθέσιμη.
<i>ResHtoL_i</i>	Ποσοστό αξιοποιούμενης ενέργειας από την αποβαλλόμενη ενέργεια των τεχνολογιών CHP που χρησιμοποιείται για την κάλυψη θερμικών φορτίων.

$DERCostkWh_i$	Κόστος παραγωγής για την τεχνολογία i (\$/kWh)
$DERhours_i$	Μέγιστος αριθμός ωρών ανά έτος που η τεχνολογία i επιτρέπεται να παράξει (ώρες)

Άλλες παράμετροι

Όνομα	Περιγραφή
$IntRate$	Επιτόκιο αναγωγής για τις επενδύσεις DER (%)
$DiscoER$	Ποσό που προστίθεται στην χονδρική τιμή αγοράς ενέργειας (€/kWh)
$FixRate$	Σταθερή τιμή αγοράς ενέργειας από το δίκτυο. Αν χρησιμοποιηθεί στο μοντέλο αυτή η παράμετρος τότε ο πελάτης θα αγοράζει πάντα την ενέργεια σε σταθερή τιμή (\$/kWh)
$Solar_{m,h}$	Ηλιακή μόνωση ως ποσοστό του μέγιστου δυνατού κατά την ώρα h και μήνα m (%)

Μεταβλητές

Όνομα	Περιγραφή
$InvGen_i$	Αριθμός των μονάδων της τεχνολογίας i που έχει εγκαταστήσει ο πελάτης
$GenL_{u,i,m,t,h}$	Παραγόμενη ισχύς από την τεχνολογία i την ώρα h , τύπο ημέρας t και μήνα m για να καλύψει το φορτίο u του πελάτη (kW)
$Heat_{u,i,m,t,h}$	Παραμένουσα θερμότητα που παράγεται από την τεχνολογία i κατά την ώρα h , τύπο ημέρας t και μήνα m για την κάλυψη του θερμικού φορτίου u του πελάτη όταν αυτό είναι ζεστό νερό ή θέρμανση χώρου (kW)
$Cool_{u,i,m,t,h}$	Παραμένουσα θερμότητα που παράγεται από την τεχνολογία i κατά την ώρα h , τύπο ημέρας t και μήνα m για την κάλυψη του θερμικού φορτίου u του πελάτη όταν αυτό είναι ψύξη ή κλιματισμός HVAC

	(kW)
$Dumpl_{i,m,t,h}$	Τεχνητή μεταβλητή για να επιτρέπεται από το πρόγραμμα η παραγωγή παραπάνω θερμότητας από αυτήν που χρειάζεται στις εγκαταστάσεις
$GenX_{i,m,t,h}$	Παραγόμενη ισχύς από την τεχνολογία i κατά την ώρα h , τύπο ημέρας t και μήνα m προς πώληση στην αγορά ενέργειας (kW)
$DRLoad_{u,m,t,h}$	Περισσευόμενο φορτίο u του πελάτη κατά την ώρα h , τύπο ημέρας t και μήνα m (ενέργεια που αγοράζεται από την εταιρεία διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών του πελάτη) (kW)
$DRGLoad_{u,m,t,h}$	Περισσευόμενο φορτίο u του πελάτη κατά την ώρα h , τύπο ημέρας t και μήνα m (φυσικό αέριο που αγοράζεται από την εταιρεία διανομής φυσικού αερίου για την κάλυψη των αναγκών του πελάτη) (kW)
$Purchase_l$	Δυαδική μεταβλητή απόφασης για αγορά τεχνολογίας αποθήκευσης l
$Capacity_l$	Χωρητικότητα αγορασμένης τεχνολογίας l (kW)
$TotalEnergyCost$	Συνολικό κόστος τεχνολογιών DER, φυσικού αερίου, αγοράς ηλεκτρισμού, και αποθήκευσης θερμότητας (\$))
$ElectricityProvided_{m,t,h}$	Συνολική προμήθεια ηλεκτρισμού κατά την ώρα h , τύπο ημέρας t και μήνα m (kW)
$ElectricityfromBattery_{m,t,h}$	Καθαρή προμήθεια ηλεκτρισμού από μπαταρίες κατά την ώρα h , τύπο ημέρας t και μήνα m (kW)
$ElectricityfromFlowBattery_{m,t,h}$	Καθαρή προμήθεια ηλεκτρισμού από μπαταρίες ροής κατά την ώρα h , τύπο ημέρας t και μήνα m (kW)
$ElectricityStored_{m,t,h}$	Συνολική ποσότητα ηλεκτρισμού που αποθηκεύεται σε μπαταρίες κατά την ώρα h , τύπο ημέρας t και μήνα m (kW)
$ElectricityStorageInput_{m,t,h}$	Καθαρή ποσότητα ηλεκτρισμού που αποστέλλεται στις μπαταρίες για αποθήκευση κατά την ώρα h ,

	τύπο ημέρας t και μήνα m (kW)
$ElectricityStorageOutput_{m,t,h}$	Συνολική ποσότητα ηλεκτρισμού που ανακτάται από τις μπαταρίες κατά την ώρα h , τύπο ημέρας t και μήνα m (kW)
$ElectricityStorageLosses_{m,t,h}$	Ποσότητα ηλεκτρισμού που χάνεται από τις μπαταρίες κατά την ώρα h , τύπο ημέρας t και μήνα m (kW)
$FlowBatteryStored_{m,t,h}$	Συνολική ποσότητα ηλεκτρισμού που αποθηκεύεται σε μπαταρίες ροής κατά την ώρα h , τύπο ημέρας t και μήνα m (kW)
$FlowBatteryInput_{m,t,h}$	Καθαρή ποσότητα ηλεκτρισμού που αποστέλλεται στις μπαταρίες ροής για αποθήκευση κατά την ώρα h , τύπο ημέρας t και μήνα m (kW)
$FlowBatteryOutput_{m,t,h}$	Συνολική ποσότητα ηλεκτρισμού που ανακτάται από τις μπαταρίες ροής κατά την ώρα h , τύπο ημέρας t και μήνα m (kW)
$FlowBatteryLosses_{m,t,h}$	Ποσότητα ηλεκτρισμού που χάνεται από τις μπαταρίες ροής κατά την ώρα h , τύπο ημέρας t και μήνα m (kW)
$ElectricityforCooling_{m,t,h}$	Φορτίο ψύξης που καλύπτεται από ηλεκτρισμό κατά την ώρα h , τύπο ημέρας t και μήνα m (kW)
$ElectricityforStorage_{m,t,h}$	Συνολική ποσότητα ηλεκτρισμού προς αποθήκευση σε μπαταρίες κατά την ώρα h , τύπο ημέρας t και μήνα m (kW)
$ElectricityforFlowBattery_{m,t,h}$	Συνολική ποσότητα ηλεκτρισμού προς αποθήκευση σε μπαταρίες ροής κατά την ώρα h , τύπο ημέρας t και μήνα m (kW)
$HeatProvided_{m,t,h}$	Διαθέσιμη θερμότητα κατά την ώρα h , τύπο ημέρας t και μήνα m (kW)
$HeatfromNG_{m,t,h}$	Καθαρή θερμότητα από φυσικό αέριο κατά την ώρα h , τύπο ημέρας t και μήνα m (kW)
$HeatfromSolar_{m,t,h}$	Καθαρή θερμότητα από συλλέκτες ηλιακής θερμότητας κατά την ώρα h , τύπο ημέρας t και μήνα m (kW)

$HeatfromStorage_{m,t,h}$	Καθαρή θερμότητα που ανακτάται από αποθήκευση κατά την ώρα h , τύπο ημέρας t και μήνα m (kW)
$HeatStorageOutput_{m,t,h}$	Συνολική αποθηκευμένη ενέργεια που ανακτάται κατά την ώρα h , τύπο ημέρας t και μήνα m
$HeatStored_{m,t,h}$	Συνολική αποθηκευμένη θερμότητα κατά την ώρα h , τύπο ημέρας t και μήνα m (kW)
$HeatStorageInput_{m,t,h}$	Καθαρή θερμότητα προς αποθήκευση κατά την ώρα h , τύπο ημέρας t και μήνα m (kW)
$HeatStorageLosses_{m,t,h}$	Απώλειες θερμότητας από την αποθήκευση κατά την ώρα h , τύπο ημέρας t και μήνα m (kW)
$HeatforStorage_{m,t,h}$	Συνολική θερμότητα προς αποθήκευση κατά την ώρα h , τύπο ημέρας t και μήνα m (kW)

Αντικειμενική συνάρτηση:

$$\begin{aligned}
 \min_{TotalEnergyCost} = & \sum_m RTFCh \arg e \cdot \max(DRLoad_{m,t,h}) + \sum_m RTCCh \arg e \\
 & + \sum_m \sum_i (InvGen_i \cdot DER \max p_i) \cdot S \tan dbyC \\
 & + \sum_s \sum_{m \in s} \sum_p RTPower_{s,p} \cdot \max(DRLoad_{m,(t,h) \in p}) \\
 & + \sum_m \sum_t \sum_h DRLoad_{u,m,t,h} \cdot MktCRate \cdot CTax \\
 & + \sum_u \sum_i \sum_m \sum_t \sum_h (GenL_{u,i,m,t,h} + GenX_{i,m,t,h}) \cdot DERCostkWh_i \\
 & + \sum_u \sum_i \sum_m \sum_t \sum_h (GenL_{u,i,m,t,h} + GenX_{i,m,t,h}) \cdot DEROM \text{ var}_i \\
 & + \sum_i InvGen_i \cdot (DERcap \cos t_i + DEROMfix_i) \cdot DER \max p_i \cdot AnnuityF \\
 & + \sum_m RTFGCh \arg e \cdot \max(DRGLoad_{m,t,h}) + \sum_m RTGCCCh \arg e \\
 & + \sum_s \sum_{m \in s} \sum_p RTGPower_{s,p} \cdot \max(DRGLoad_{l,m,(t,h) \in p}) \\
 & + \sum_m \sum_t \sum_h DRGLoad_{u,m,t,h} \cdot NGCRate \cdot CTax \\
 & + \sum_l (Purchase_l \cdot Capital \cos t_l + Capacity_l \cdot VariableCo st_l) \cdot Annuity_l \\
 & + \sum_m \sum_l Capacity_l \cdot FixedMCo st_l \\
 & + \sum_u \sum_i \sum_m \sum_t \sum_h GenL_{u,i,m,t,h} \cdot CRate_i \cdot CTax \\
 & - \sum_i \sum_m \sum_t \sum_h (GenX_{i,m,t,h} \cdot IEM_{m,t,h})
 \end{aligned}$$

-Χρέωση εγκαταστάσεων, πελάτη και εφεδρείας

-Χρέωση ζήτησης

-Χρέωση για εκπομπές άνθρακα

-Κόστος παραγωγής ενέργειας (καυσίμου)

-Λειτουργικό κόστος, κόστος συντήρησης

-Συνολικό κόστος επένδυσης

-Χρέωση εγκαταστάσεων και πελάτη

(ΓΙΑ ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ)-

Χρέωση ζήτησης-

Χρέωση για εκπομπές άνθρακα

-Κόστη για τεχνολογίες αποθήκευσης

-Χρέωση για εκπομπές άνθρακα

-Έσοδα από πωλήσεις ενέργειας στο δίκτυο

Περιορισμοί:

- Ηλεκτρικά φορτία

Τα ηλεκτρικά φορτία απαρτίζονται από τα αμιγώς ηλεκτρικά φορτία καθώς και από φορτία ψύξης και κλιματισμού.

Για τα αμιγώς ηλεκτρικά φορτία έχω:

$$\mathbf{Cload}_{e',m,t,h} = \mathbf{ElectricityProvided}_{m,t,h} - \mathbf{ElectricityforCooling}_{m,t,h} - \mathbf{ElectricityforStorage}_{m,t,h} - \mathbf{ElectricityforFlowBattery}_{m,t,h} \quad \forall m, t, h$$

$$\mathbf{ElectricityProvided}_{m,t,h} = \mathbf{DRLoad}_{u,m,t,h} + \sum_i \mathbf{GenL}_{u,i,m,t,h} + \mathbf{ElectricityfromBattery}_{m,t,h} + \mathbf{ElectricityfromFlowBattery}_{m,t,h} \quad \forall u, m, t, h \text{ αν } u \in \{\text{ηλεκτρισμό (e) και ψύξη (c)}\}$$

Οι περιορισμοί που ακολουθούν αφορούν την ηλεκτρική αποθήκευση. Συγκεκριμένα εξασφαλίζουν το ισοζύγιο ενέργειας για τις μπαταρίες λαμβάνοντας υπόψη τους συντελεστές που σχετίζονται με αυτές.

$$\mathbf{ElectricityStored}_{m,t,h} = \mathbf{ElectricityStored}_{m,t,h-1} + \mathbf{ElectricityStorageInput}_{m,t,h} - \mathbf{ElectricityStorageOutput}_{m,t,h} - \mathbf{ElectricityStorageLosses}_{m,t,h} \quad \forall m, t, h$$

$$\mathbf{ElectricityfromBattery}_{m,t,h} = \mathbf{ElectricityStorageOutput}_{m,t,h} \cdot \mathbf{ElectricityStorageEfficiencyDischarge} \quad \forall m, t, h$$

$$\mathbf{ElectricityStorageInput}_{m,t,h} = \mathbf{ElectricityforStorage}_{m,t,h} \cdot \mathbf{ElectricityStorageEfficiencyCharge} \quad \forall m, t, h$$

$$\mathbf{ElectricityStorageLosses}_{m,t,h} = \mathbf{ElectricityStored}_{m,t,h-1} \cdot \mathbf{ElectricityStorageEfficiencyDecay} \quad \forall m, t, h$$

$$\mathbf{ElectricityStorageInput}_{m,t,h} \leq (\mathbf{Capacity}_{es'} - \mathbf{ElectricityStored}_{m,t,h-1}) \cdot \mathbf{ElectricityStorageMaxChargeRate} \quad \forall m, t, h$$

$$\mathbf{ElectricityStorageOutput}_{m,t,h} \leq \mathbf{ElectricityStored}_{m,t,h-1} \cdot \mathbf{ElectricityStorageMaxDischargeRate} \quad \forall m, t, h$$

$$\mathbf{ElectricityStored}_{m,t,h} \leq \mathbf{Capacity}_{es'} \quad \forall m, t, h$$

$$\mathbf{ElectricityStored}_{m,t,h} \geq \mathbf{Capacity}_{es'} \cdot \mathbf{ElectricityStorageMinStateofCharge} \quad \forall m, t, h$$

$$\mathbf{FlowBatteryStored}_{m,t,h} = \mathbf{FlowBatteryStored}_{m,t,h-1} + \mathbf{FlowBatteryInput}_{m,t,h} - \mathbf{FlowBatteryOutput}_{m,t,h} - \mathbf{FlowBatteryLosses}_{m,t,h} \quad \forall m, t, h$$

$$\mathbf{ElectricityfromFlowBattery}_{m,t,h} = \mathbf{FlowBatteryOutput}_{m,t,h} \cdot \mathbf{FlowBatteryEfficiencyDischarge} \quad \forall m, t, h$$

$$FlowBatteryInput_{m,t,h} = ElectricityforFlowBattery_{m,t,h} \cdot FlowBatteryEfficiencyCharge \forall m, t, h$$

$$FlowBatteryLosses_{m,t,h} = FlowBatteryStored_{m,t,h-1} \cdot FlowBatteryEfficiencyDecay \forall m, t, h$$

$$FlowBatteryInput_{m,t,h} \leq Capacity_{fp'} \forall m, t, h$$

$$FlowBatteryOutput_{m,t,h} \leq Capacity_{fp'} \forall m, t, h$$

$$FlowBatteryStored_{m,t,h} \leq Capacity_{fe'} \forall m, t, h$$

$$FlowBatteryStored_{m,t,h} \geq Capacity_{fe'} \cdot FlowBatteryMinStateofCharge \forall m, t, h$$

- Φορτία ψύξης και κλιματισμού

$$Load_{c',m,t,h} = \sum_i Cool_{c',i,m,t,h} + ElectricityforCooling_{m,t,h} \forall m, t, h$$

$$ElectricityforCooling_{m,t,h} = \sum_i GenL_{c',i,m,t,h} + DRLoad_{c',m,t,h} \forall m, t, h$$

$$Cool_{c',i,m,t,h} = \sum_i (GenL_{c',i,m,t,h} + GenX_{m,t,h}) TEratio_i \cdot ResHtoL_i \forall m, t, h$$

*Ο συντελεστής $TEratio_i$ για τεχνολογίες που δεν είναι CHP είναι μηδέν.

- Θερμικά φορτία (όχι μαγειρικά)

$$Load_{h',m,t,h} = HeatProvided_{m,t,h} - \sum_i Cool_{c',i,m,t,h} - HeatforStorage_{m,t,h} \forall m, t, h$$

$$HeatProvided_{m,t,h} = HeatfromNG_{m,t,h} + HeatfromDG_{m,t,h} + HeatfromSolar_{m,t,h} + HeatfromStorage_{m,t,h} \forall m, t, h$$

$$HeatfromNG_{m,t,h} = DRG Load_{h',m,t,h} \cdot ConversionEfficiencyNG \forall m, t, h$$

$$HeatfromDG_{m,t,h} \leq \sum_i Heat_{h',i,m,t,h} + \sum_i Cool_{c',i,m,t,h} \forall m, t, h$$

$$Heat_{h',i,m,t,h} = \sum_i (GenL_{h',i,m,t,h} + GenX_{m,t,h}) TEratio_i \cdot ResHtoL \forall m, t, h$$

$$HeatfromStorage_{m,t,h} = HeatStorageOutput_{m,t,h} \cdot HeatStorageEfficiencyDischarge \forall m, t, h$$

$$HeatStorageOutput_{m,t,h} \leq Capacity_{hs'} \cdot HeatStorageMaxDischargeRate \forall m, t, h$$

$$HeatStorageInput_{m,t,h} \leq Capacity_{hs'} \cdot HeatStorageMaxChargeRate \forall m, t, h$$

$$HeatStorageInput_{m,t,h} = \mathbf{HeatforStorage}_{m,t,h} \cdot HeatStorageEfficiencyCharge \forall m, t, h$$

$$HeatStored_{m,t,h} = HeatStored_{m,t,h-1} \cdot HeatStorageInput_{m,t,h} - HeatStorageOutput_{m,t,h} - HeatStorageLosses_{m,t,h} \forall m, t, h$$

$$HeatStorageLosses_{m,t,h} = HeatStored_{m,t,h-1} \cdot HeatStorageEfficiencyDecay \forall m, t, h$$

$$HeatStored_{m,t,h} \leq Capacity_{hs'} \forall m, t, h$$

$$HeatfromSolar_{m,t,h} \leq Capacity_{st'} \cdot Solar_{m,h} \forall m, t, h$$

- Μαγειρικά φορτία

$$Cload_{g',m,t,h} = DRGLoad_{g',m,t,h} \forall m, t, h$$

- Φωτοβολταϊκά

$$\sum_u GenL_{u,pv',m,t,h} + GenX_{pv',m,t,h} \leq InvGen_{pv'} \cdot DERmaxp_{pv'} \cdot Solar_{m,h} \forall m, t, h$$

- Λοιποί περιορισμοί

$$GenX_{i,m,t,h} = 0 \text{ αν } \sum_i GenL_{u,i,m,t,h} < Cload_{u,m,t,h}$$

$$\forall u, i, m, t, h \text{ αν } u \in \{\text{ηλεκτρισμό (e) και ψύξη (c)}\}$$

Ο παραπάνω περιορισμός δεν επιτρέπει στον πελάτη να αγοράζει και να πουλάει ενέργεια ταυτόχρονα.

Μέγιστη δυνατή παραγωγή ενέργειας εντός του μικροδικτύου:

$$\sum_u GenL_{u,i,m,t,h} + GenX_{i,m,t,h} \leq InvGen_i \cdot DERmaxp_i \forall m, t, h$$

Περιορισμός για ώρες λειτουργίας:

$$\sum_u \sum_m \sum_t \sum_h (GenL_{u,i,m,t,h} + GenX_{i,m,t,h}) \leq InvGen_i \cdot DERmaxp_i \cdot DERhours_i \forall i$$

Μετατροπή του σταθερού κόστους επένδυσης σε ετήσιο σύμφωνα με το επιτόκιο αναγωγής:

$$AnnuityF = \frac{IntRate}{\left(1 - \frac{1}{(1 + IntRate)^{DERlifetime_i}}\right)}$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

9.1 Φορτία

9.1.1 Εισαγωγή

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η εφαρμογή του μοντέλου DER-CAM με τεχνολογίες συμπαραγωγής, αποθήκευσης ηλεκτρισμού και εκπομπές άνθρακα σε πραγματικά ελληνικά δεδομένα. Η εύρεση αυτών των δεδομένων είχε αυξημένη δυσκολία δεδομένου ότι δεν είναι εγκατεστημένοι μετρητές ικανοί να μας δώσουν τις ωριαίες καταναλώσεις σε ηλεκτρικά και θερμικά φορτία που ήταν απαραίτητες για τη λειτουργία του προγράμματος.

9.1.2 Επιλογή του πελάτη

Λόγω της δυσκολίας εύρεσης πραγματικών δεδομένων η επιλογή του πελάτη έγινε ουσιαστικά με κριτήριο την διαθεσιμότητα των δεδομένων για τα φορτία. Έτσι η εφαρμογή έγινε στο ξενοδοχείο Ledra Marriott για το οποίο υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα. Πρόκειται για ένα ξενοδοχείο κοντά στο κέντρο της Αθήνας, μεγάλης έκτασης και πολλών ορόφων που λειτουργεί όλο το χρόνο. Έτσι η επιλογή του καθίσταται κατάλληλη αφού έχει υψηλές καταναλώσεις καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και είναι αντιπροσωπευτικό της ελληνικής πραγματικότητας. Δηλαδή, μεγάλα φορτία ψύξης και κλιματισμού τους καλοκαιρινούς μήνες, κυρίως της μεσημεριανές ώρες και μεγάλα θερμικά φορτία τους χειμερινούς μήνες.

Το αρχικό σχέδιο ήταν να εφαρμοστεί ο κώδικας του GAMS σε ένα μικροδίκτυο. Ουσιαστικά όμως τα δεδομένα για τα φορτία που εισάγονται στον κώδικα είναι αθροιστικά για όλο το μικροδίκτυο και έτσι δεν μας απασχολεί το γεγονός ότι έχουμε τα δεδομένα για τα φορτία μόνο ενός ξενοδοχείου. Στόχος είναι να καλυφθεί αυτό το φορτίο με τον πιο οικονομικό τρόπο. Δεν ελήφθησαν υπόψη στη συγκεκριμένη εργασία θέματα μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας εντός του μικροδικτύου καθώς και θέματα εγκατάστασης του εξοπλισμού και έτσι το γεγονός ότι έχουμε τα δεδομένα μόνο ενός ξενοδοχείου δεν δημιουργεί πρόβλημα. Εξάλλου, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα φορτία εισάγονται αθροιστικά στο πρόγραμμα και έτσι τα δεδομένα που έχουμε θα μπορούσαν να είναι τα φορτία για παράδειγμα από δύο μικρότερα ξενοδοχεία και ένα σχολείο που βρίσκονται κοντά και αποτελούν ένα μικροδίκτυο. Φυσικά δεν μπορούμε να παραλείψουμε το γεγονός ότι στην περίπτωση που θα είχαμε διαφορετικούς καταναλωτές συνδεδεμένους σε μικροδίκτυο τα αποτελέσματα πιθανόν να ήταν αρκετά διαφορετικά λόγω της ανομοιομορφίας των

καταναλώσεων. Ένα σχολείο για παράδειγμα είναι κλειστό τους καλοκαιρινούς μήνες και έτσι το συνολικό φορτίο του μικροδικτύου θα ήταν μικρότερο. Παρόλα αυτά η συγκριμένη προσέγγιση του θέματος είναι μία πολύ καλή προσπάθεια εφαρμογής των τεχνολογιών συμπαραγωγής και αποθήκευσης καθώς και θεμάτων εκπομπών άνθρακα στην ελληνική πραγματικότητα. Με τη διαθεσιμότητα επιπλέον πραγματικών δεδομένων για ωριαίες καταναλώσεις ο κώδικας με μία απλή αντικατάσταση των δεδομένων μπορεί να εφαρμοσθεί σε ένα πραγματικό μικροδίκτυο.

9.1.3 Προσαρμογή των δεδομένων και του κώδικα

Τα διαθέσιμα δεδομένα ήταν χωρισμένα σε φορτία ηλεκτρικά, θερμικά και ψυκτικά (ψύξης και κλιματισμού) για κάθε ώρα ενός μήνα για μία τυπική ημέρα. Στον κώδικα όμως, για να πετύχουμε πιο ακριβή ανάλυση, τα δεδομένα έπρεπε να εισαχθούν ανά τελική χρήση, μήνα, είδος ημέρας και ώρα. Είχαμε τρία ήδη ημέρας, τυπική ημέρα της εβδομάδας (*week*), ημέρες αιχμής (*peak*) και σαββατοκύριακα (*weekend*). Οι ημέρες αιχμής έχουν σαν φορτίο το μέσο όρο των τριών ημερών του μήνα με τη μεγαλύτερη κατανάλωση για κάθε τελική χρήση. Στο πίνακα 1 φαίνεται πόσες μέρες από κάθε είδος αντιστοιχούν σε κάθε μήνα.

Μήνες	Τύπος ημέρας		
	<i>week</i>	<i>peak</i>	<i>weekend</i>
Ιανουάριος	20	3	8
Φεβρουάριος	17	3	8
Μάρτιος	20	3	8
Απρίλιος	19	3	8
Μάιος	20	3	8
Ιούνιος	19	3	8
Ιούλιος	20	3	8
Αύγουστος	20	3	8
Σεπτέμβριος	19	3	8
Οκτώβριος	20	3	8
Νοέμβριος	19	3	8
Δεκέμβριος	20	3	8

Πίνακας 9.1. Τύποι ημερών ανά μήνα

Τα φορτία λοιπόν προσαρμόστηκαν ώστε να είναι στην μορφή *load (enduse, months, ltypes, hours)*, δηλαδή για κάθε τελική χρήση, μήνα, τύπο φορτίου ή τύπο ημέρας και ώρα. Αυτό έγινε ως εξής:

- έστω ότι έχουμε τα ηλεκτρικά φορτία για τον μήνα Ιανουάριο,

h1	h2	h3	h4	h5	h6	h7	h8	h9	h10	h11	h12	h13	h14	h15	h16	h17	h18	h19	h20	h21	h22	h23	h24
513	493	442	418	429	444	490	506	570	594	607	615	597	593	590	590	587	580	594	596	584	588	578	544

- θεωρούμε ότι τα φορτία αυτά είναι τα φορτία για μία τυπική μέρα της εβδομάδας (*week*), δηλαδή για την πρώτη ώρα θα είναι 513 kW,

- αυξάνουμε αυτές τις τιμές σε λογικά και ρεαλιστικά πλαίσια ανάλογα με τον μήνα και την ώρα ώστε να έχουμε τις ημέρες αιχμής (peak), δηλαδή θεωρούμε ότι για την πρώτη ώρα θα είναι 600 kW,
- υπολογίζουμε τον σταθμικό μέσο όρο των τριών τύπων ημερών για κάθε ώρα έχοντας ως μόνο άγνωστο το φορτίο των σαββατοκύριακων (weekend). Ο μέσος όρος πρέπει να έχει σαν αποτέλεσμα το φορτίο που είχαμε σαν δεδομένα και το οποίο θεωρήθηκε ότι είναι το φορτίο μιας τυπικής μέρας της εβδομάδας. Δηλαδή, η εξίσωση που μας δίνει το φορτίο για τα σαββατοκύριακα της πρώτης ώρας του μήνα Ιανουάριου είναι:

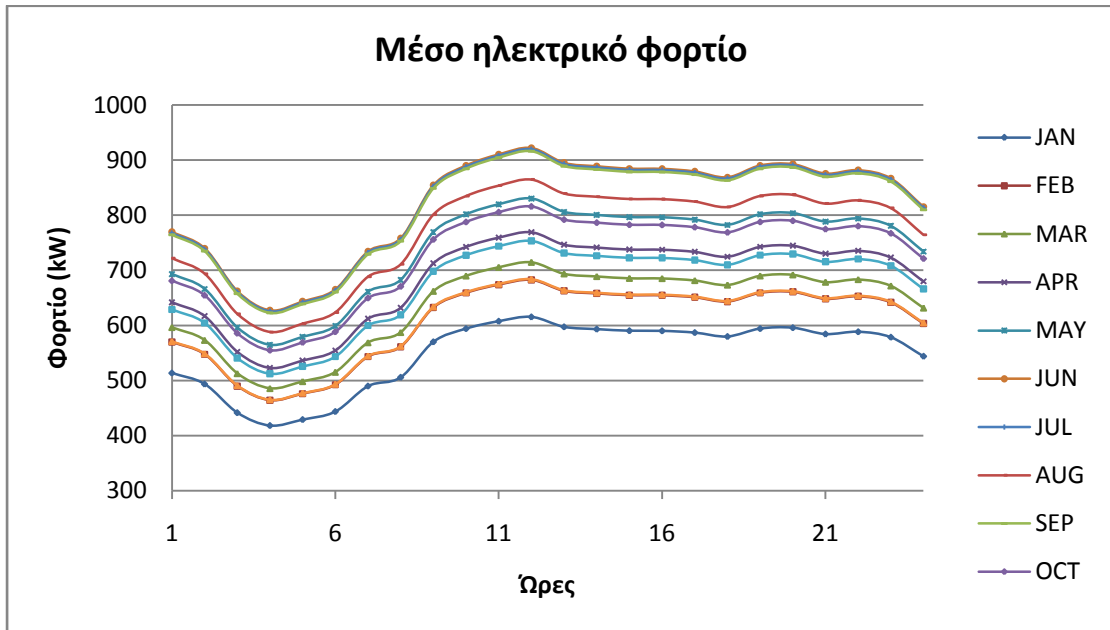
$$20 \cdot 513 + 3 \cdot 600 + 8 \cdot X = 31 \cdot 513$$

και έτσι προκύπτει $X = 481,01$.

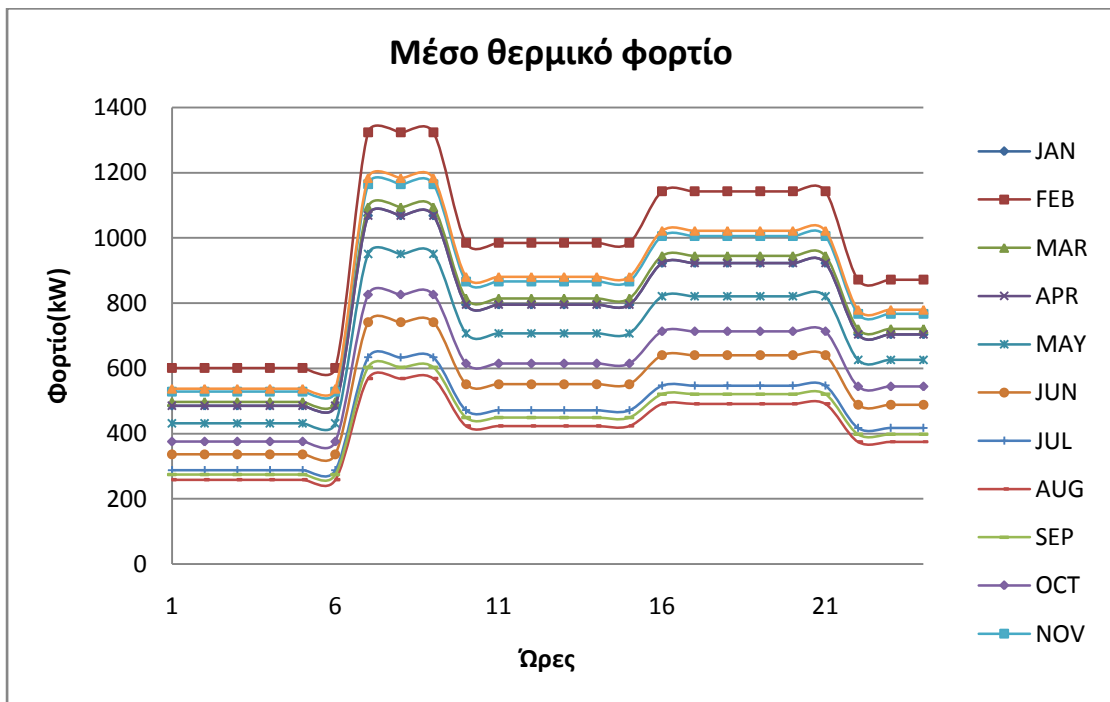
Με αυτό τον τρόπο τα δεδομένα προσαρμόζονται στον κώδικα και παράλληλα δεν αλλοιώνονται αφού ο μέσος όρος του φορτίου για κάθε μήνα και ώρα είναι ίσος με τα δεδομένα που είχαμε διαθέσιμα.

Ένα άλλο θέμα που χρειάστηκε προσοχή αφορά στις τελικές χρήσεις των φορτίων. Αρχικά τα θεωρητικά δεδομένα (πηγή Berkley Lab) πάνω στα οποία δημιουργήθηκε ο κώδικας είχαν σαν τελικές χρήσεις φορτία αποκλειστικά ηλεκτρισμού, φορτία κλιματισμού και ψύξης που καλύπτονταν είτε από ηλεκτρισμό είτε από συμπαραγωγή, φορτία θέρμανσης χώρου και νερού που καλύπτονταν είτε από φυσικό αέριο είτε από τις τεχνολογίες συμπαραγωγής και μαγειρικά φορτία που ήταν φορτία αποκλειστικά φυσικού αερίου. Στα δεδομένα του ξενοδοχείου δεν υπήρχαν τα μαγειρικά φορτία και έτσι αφαιρέθηκαν από τον κώδικα υπό μορφή σχολίου οι εξισώσεις και οι μεταβλητές που σχετίζονταν με αυτά. Ακόμη τα θερμικά φορτία δεν χωρίζονταν σε φορτία θέρμανσης χώρου και νερού αλλά είναι αθροισμένα και τα δύο σε ένα δείκτη ('heating' loads). Τέλος από τα ψυκτικά φορτία, τα φορτία ψύξης ήταν ενσωματωμένα στα αμιγώς ηλεκτρικά φορτία ενώ τα φορτία κλιματισμού ήταν εκείνα που μπορούσαν να καλυφθούν είτε από ηλεκτρισμό είτε από τεχνολογίες συμπαραγωγής με ψυχαντήρα απορρόφησης. Έτσι έγιναν οι απαραίτητες αλλαγές στον κώδικα και τα πρώτα αναφέρονται ως 'electrical' μαζί με τα υπόλοιπα αμιγώς ηλεκτρικά φορτία και τα δεύτερα ως 'cooling'.

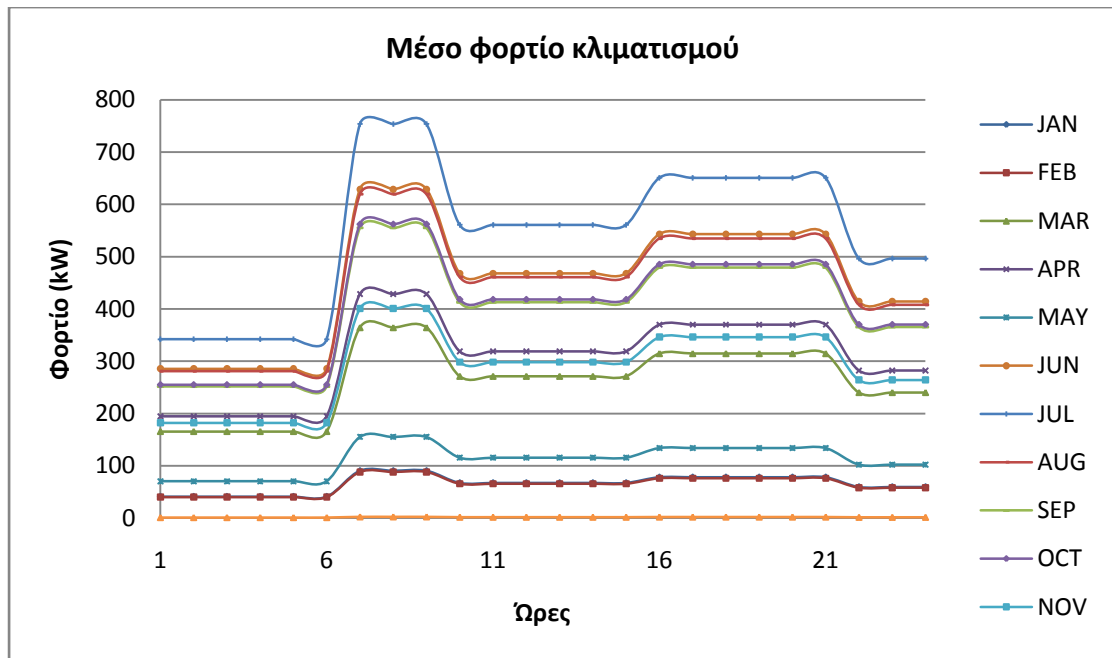
Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνονται τα ηλεκτρικά και θερμικά φορτία και τα φορτία κλιματισμού για μία τυπική μέρα κάθε μήνα που είναι στην ουσία και το μέσο φορτίο του μήνα για κάθε ώρα.



Διάγραμμα 9.1. Μέσο ηλεκτρικό φορτίο

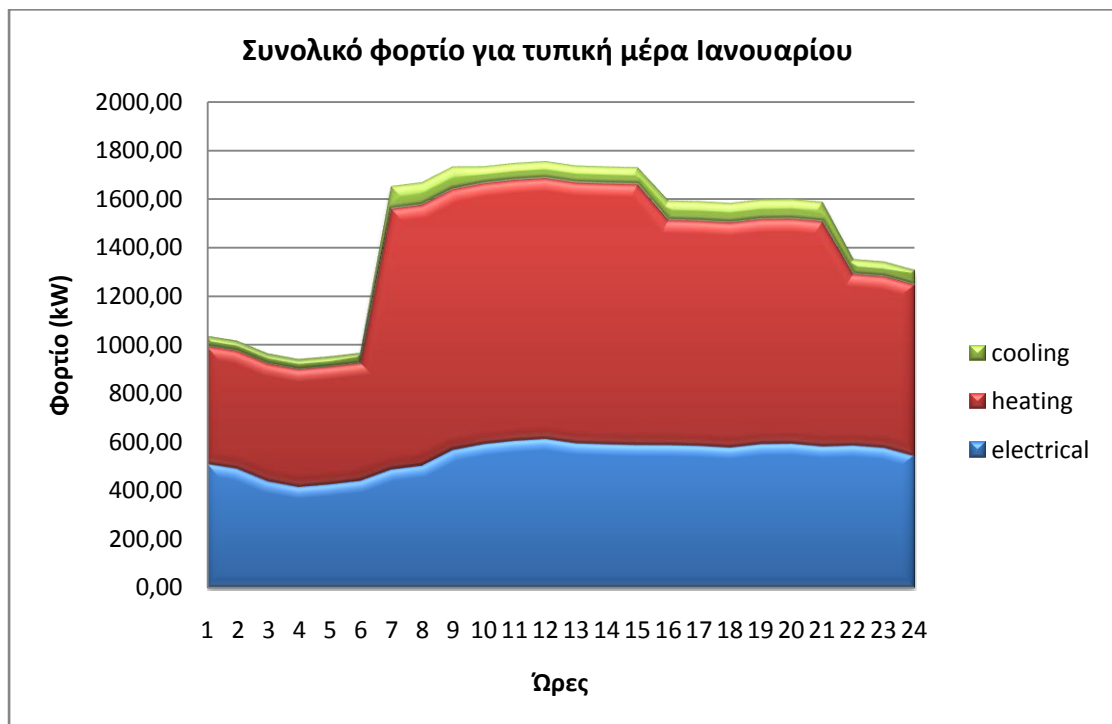


Διάγραμμα 9.2. Μέσο θερμικό φορτίο

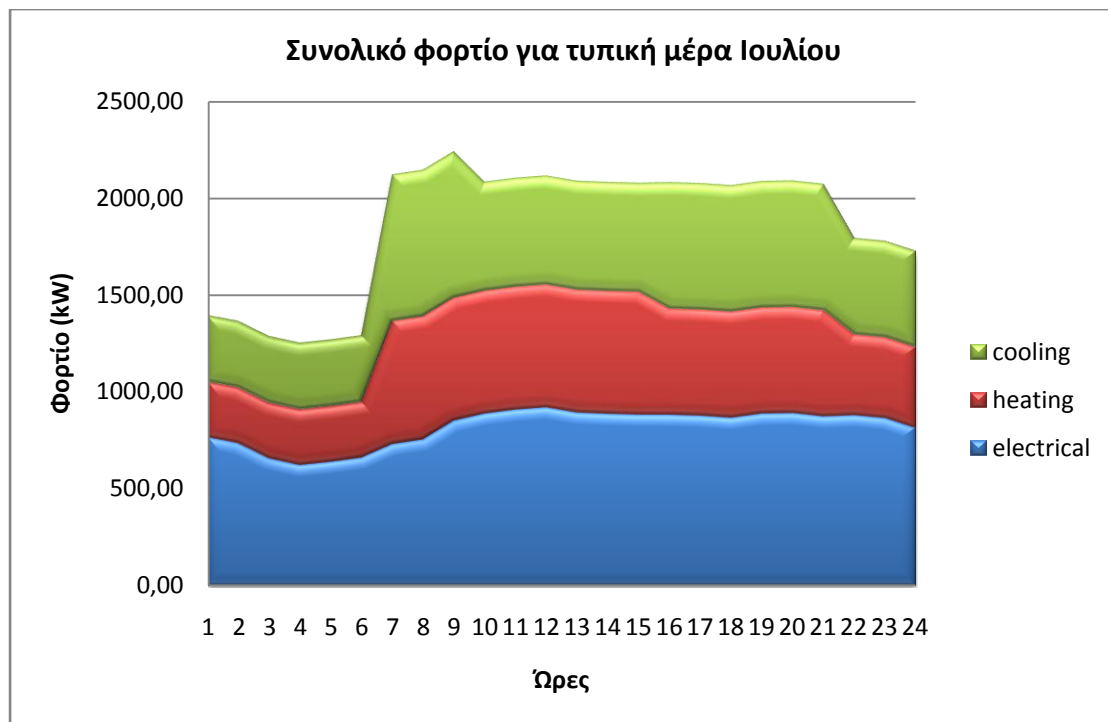


Διάγραμμα 9.3. Μέσο φορτίο κλιματισμού

Στα διαγράμματα 4 και 5 που ακολουθούν βλέπουμε το συνολικό φορτίο για μία τυπική μέρα Ιανουαρίου και μία τυπική μέρα Ιουλίου. Μπορούμε να παρατηρήσουμε τη συμβολή του κάθε είδους φορτίου στο συνολικό φορτίο.



Διάγραμμα 9.4. Συνολικό φορτίο για τυπική μέρα Ιανουαρίου



Διάγραμμα 9.5. Συνολικό φορτίο για τυπική μέρα Ιουλίου

Από το διάγραμμα 4 παρατηρούμε όπως ήταν αναμενόμενο ότι το συνολικό φορτίο αποτελείται κατά κύριο λόγο από θερμικά φορτία. Τα φορτία αυτά, όπως έχει αναφερθεί, είναι φορτία θέρμανσης χώρου και νερού και ειδικά σε ένα ξενοδοχείο είναι απόλυτα φυσιολογικό να έχουν το μεγαλύτερο ποσοστό επί του συνολικού φορτίου και ιδίως τις πρώτες πρωινές ώρες όπου η ανάγκη για θέρμανση είναι μεγαλύτερη.

Αντίθετα στο διάγραμμα 5 παρατηρούμε ότι τα θερμικά φορτία έχουν μειωθεί αισθητά ενώ έχουν αυξηθεί σημαντικά τα φορτία κλιματισμού λόγω των υψηλών θερμοκρασιών τον μήνα Ιούλιο στην Ελλάδα που προηγουμένως ήταν σχεδόν ανύπαρκτα. Παρατηρείται επίσης αύξηση και του ηλεκτρικού φορτίου καθώς σε αυτό συμπεριλαμβάνονται και τα φορτία ψύξης.

Και από τα δύο διαγράμματα είναι φανερό ότι δεν έχουμε πολλές αιχμές στην καμπύλη του φορτίου και ότι τις ώρες 1-7, δηλαδή καθ' όλη τη διάρκεια της νύχτας το φορτίο είναι σαφώς μειωμένο και τους δύο μήνες. Αυτό δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες για την εγκατάσταση τεχνολογιών αποθήκευσης, αφού ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αγοράζεται από το μακροδίκτυο τις βραδινές ώρες, που είναι ώρες χαμηλής ζήτησης και η τιμή της kWh είναι φθηνότερη, και να χρησιμοποιείται τις ώρες αιχμής. Αυτό έχει διπλό όφελος αφού και εξοικονόμηση χρημάτων έχουμε αλλά και εξομάλυνση της καμπύλης διάρκειας φορτίου. Παράλληλα η ύπαρξη μεγάλων φορτίων θέρμανσης και κλιματισμού δημιουργούν επίσης ευνοϊκές συνθήκες για την εγκατάσταση τεχνολογιών συμπαραγωγής. Παρόλα αυτά η ύπαρξη τεχνολογιών τριπαραγωγής (ηλεκτρισμού – θέρμανσης – ψύξης) θα ήταν πολύ καταλληλότερη λόγω της ύπαρξης μεγάλων φορτίων θέρμανσης και κλιματισμού σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Η μοντελοποίηση όμως αυτών των συστημάτων θα ήταν αρκετά πολύπλοκη και δεν υπήρχαν επαρκή

στοιχεία για αυτές τις τεχνολογίες. Επομένως δεν έχουν αξιοποιηθεί στην συγκεκριμένη εργασία.

9.2 Τεχνολογίες

Ακολουθεί μία συνοπτική παρουσίαση των τεχνολογιών που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα. Αυτές είναι οι τεχνολογίες αποθήκευσης, οι τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (γεννήτριες και φωτοβολταϊκά) και οι τεχνολογίες συμπαραγωγής (γεννήτριες CHP και γεννήτριες με ψυχαντήρα απορρόφησης).

9.2.1 Τεχνολογίες παραγωγής

Στον πίνακα 2 φαίνονται οι τεχνολογίες παραγωγής που χρησιμοποιήθηκαν στον κώδικα. Τα δεδομένα προέρχονται από την ιστοσελίδα του εργαστηρίου του Berkeley [14]. Σε αυτές υπάρχουν μηχανές εσωτερικής καύσης (με φυσικό αέριο), ντιζελογενήτριες, φωτοβολταϊκά, κυψέλες καυσίμου και μικροτουρμπίνες. Οι δύο τελευταίες χρησιμοποιήθηκαν μόνο σε ένα σενάριο ενώ σε όλα τα υπόλοιπα επιτρέπονταν τα τρία πρώτα είδη για να είναι το πρόγραμμα πιο κοντά στην πραγματικότητα. Αυτό γιατί οι τεχνολογίες των κυψελών καυσίμου και των μικροτουρμπίνων δεν χρησιμοποιούνται ακόμη ευρέως στην ελληνική αγορά και έτσι δεν θα ήταν ρεαλιστικό να τις εγκαταστήσουμε στο ξενοδοχείο. Στο σενάριο που χρησιμοποιήθηκαν έγινε για να φανούν τα οφέλη που προκύπτουν από τη χρήση τέτοιων τεχνολογιών.

Χαρακτηριστικά *												
Τεχνολογίες παραγωγής	MAXP (kW)	LIFETIME (έτη)	CAPCOST (\$/kW)	OMFix (\$/kW)	OMVar (\$/kWh)	HeatR (kJ/kWh)	Fuel	Type	TEratio (kW _{th} /kW _e)	RecHtoL (kW _{th} /kW _{th})	GType	CRate (kg/kWh)
GA55	55	15	866	26,5	0,0033	12997	NG	2	1,35	0,8	1	0,18
GA100	100	15	830	26,5	0,0033	15200	NG	2	1,54	0,8	1	0,21
GA215	215	15	1196	26,5	0,0033	13157	NG	2	1,52	0,8	1	0,18
GA500	500	15	678	26,5	0,0033	12003	NG	2	1,15	0,8	1	0,16
100FGG4	100	12,5	539	26,5	0,000033	15291	NG	1	0	0	4	0,15
400FGZ4	400	12,5	471,18	26,5	0,000033	12997	NG	1	0	0	4	0,12
100ROZJ	100	10	231,89	26,5	0,000033	37843,96	D	1	0	0	4	0,35
200ROZD	200	10	175	26,5	0,000033	39127,95	D	1	0	0	4	0,35
500ROZD	500	10	159,956	26,5	0,000033	38546,77	D	1	0	0	4	0,35
DFED	500	12,5	136	26,5	0,000033	9327	D	1	0	0	4	0,2
DGDB	100	12,5	385	26,5	0,000033	10287	D	1	0	0	4	0,21
DGFC	200	12,5	259	26,5	0,000033	9944	D	1	0	0	4	0,2
PV-5	5	20	4370	14,3	0	0	-	1	0	0	5	0
PV-20	20	20	4070	14,3	0	0	-	1	0	0	5	0
PV-50	50	20	3970	12	0	0	-	1	0	0	5	0
PV-100	100	20	3920	11	0	0	-	1	0	0	5	0
GT-1000	1000	20	2137	10,4	0,0096	16438	NG	3	2,45	0,13	1	0,17
NG-100	100	20	1774	16,5	0,018	12000	NG	3	2,05	0,13	1	0,16
NG-300	300	20	1465	12,1	0,013	11613	NG	3	1,85	0,13	1	0,15
NG-1000	1000	20	1117	7	0,009	10588	NG	3	1,36	0,13	1	0,13
MCFC1500	1550	32,5	1358	70	0,003	7451	NG	2	0,59	0,8	2	0,05
MTL-C-30	30	10	1333,3	119	0,015	12186	NG	2	2,67	0,8	3	0,17
MTH-C-30	30	10	1333,3	119	0,015	12186	NG	2	2,51	0,8	3	0,17
CAP60	60	15	1600	0	0,01	11300	NG	2	2	0,8	3	0,14

BOWMAN50	50	15	1500	0	0,015	10500	NG	2	2,1	0,8	3	0,15
BOWMAN80	80	15	1700	0	0,015	11300	NG	2	1,8	0,8	3	0,14
SOFC1200	1233	30	1225	37,5	0,0025	6067	NG	2	1,1	0,8	2	0,13

Πίνακας 9.2. Τεχνολογίες παραγωγής

- * MAXP: Μέγιστη ισχύς
LIFETIME: Χρόνος ζωής
CAPCOST: Κόστος κεφαλαίου
OMFix: Σταθερά έξοδα λειτουργίας και συντήρησης ετησίως
OMVar: Μεταβλητά έξοδα λειτουργίας και συντήρησης
HeatR: Αντιστοιχία 1kJ καυσίμου σε 1kWh από μία τεχνολογία παραγωγής
Fuel: Είδος καυσίμου (NG: φυσικό αέριο, D: ντίζελ)
Type: Είδος παραγωγής (1: ηλεκτρισμός, 2: ηλεκτρισμός + θέρμανση, 3: ηλεκτρισμός + ψύξη)
TERatio: Αναλογία θερμότητας (σε kW) που μπορεί να ανακτηθεί από την παραγωγή 1 kW ηλεκτρισμού από τεχνολογίες συμπαραγωγής (είτε για ψύξη είτε για θέρμανση)
RecHtoL: Το ποσό της τελικά ανακτώμενης ωφέλιμης θερμότητας από αυτήν που εκλύεται από την συμπαραγωγή
GType: Είδος γεννήτριας (1: παλινδρομικές μηχανές, 2: κυψέλες καυσίμου, 3: μικροτουρμπίνες, 4: ντιζελογεννήτριες, 5: φωτονολταϊκά)
CRate: Ρυθμός εκπομπών άνθρακα

Σχετικά με τα φωτοβολταϊκά τα δεδομένα για την ηλιοφάνεια προήλθαν από τη μελέτη «Distributed Energy Resources with Combined Heat and Power Applications» [4] και είναι αρκετά κοντά με την ελληνική πραγματικότητα.

9.2.2 Τεχνολογίες αποθήκευσης

Παρά την μεγάλη ποικιλία των τεχνολογιών αποθήκευσης μόνο ένα είδος χρησιμοποιήθηκε για την μοντελοποίηση της ηλεκτρικής αποθήκευσης στο πρόγραμμα. Αυτό ήταν οι μπαταρίες οξέως – μολύβδου (lead – acid batteries) επειδή είναι οι καταλληλότερες για εφαρμογές σε μικροδίκτυα. Το κόστος των τεχνολογιών αποθήκευσης είναι ακόμη σε υψηλά επίπεδα και ακόμη και οι μπαταρίες οξέως – μολύβδου που ενδείκνυται για τέτοιες εφαρμογές έχουν μεγάλο κόστος κάτι το οποίο δεν επέτρεπε στο πρόγραμμα να τις συμπεριλάβει στη λύση του. Για να γίνει αυτό και να φανούν τα πλεονεκτήματα που μπορεί να προσφέρει η ηλεκτρική αποθήκευση μειώθηκε το κόστος τους. Έτσι από 190 \$/kWh μειώθηκε στα 60 \$/kWh. Ο πίνακας 3 δίνει τα χαρακτηριστικά των μπαταριών οξέως – μολύβδου που χρησιμοποιήθηκαν σαν δεδομένα στο πρόγραμμα.

capital cost (\$/kW)	charging efficiency	discharging efficiency	decay	maximum charge rate	minimum discharge rate	minimum state of charge	lifetime (έτη)	maintenance costs (\$/kW)
60	0,9	1	0,001	0,1	0,25	0,3	5	5

Πίνακας 9.3. Χαρακτηριστικά μπαταριών οξέως - μολύβδου

Αναλυτικά η επεξήγηση κάθε χαρακτηριστικού βρίσκεται στο κεφάλαιο της ηλεκτρικής αποθήκευσης.

9.3 Τιμολογιακά δεδομένα

Απαραίτητα ήταν τα τιμολογιακά δεδομένα τόσο για το κόστος των καυσίμων όσο και για τις αγορές ενέργειας και ισχύος από το μακροδίκτυο για να τρέξει το πρόγραμμα. Δεδομένου ότι όλες οι τεχνολογίες που χρησιμοποιήθηκαν έχουν εισαχθεί στο πρόγραμμα με οικονομικά δεδομένα από το εργαστήριο του Berkeley. Έτσι θεωρήθηκε σωστότερο να εισαχθούν τιμολογιακά δεδομένα που χρησιμοποιούνται στην Καλιφόρνια. Θα ήταν πιο ρεαλιστικό αν υπήρχαν τεχνοοικονομικά δεδομένα για τις τεχνολογίες από την ελληνική αγορά, κάτι το οποίο θα επέτρεπε και την εισαγωγή των ελληνικών τιμολογίων (της ΔΕΗ). Όμως η εύρεση των δεδομένων για τις τεχνολογίες ήταν πολύ δύσκολη αφού δεν υπήρχαν τόσα πολλά διαθέσιμα δεδομένα.

Τα τιμολόγια λοιπόν που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

- TOU2B (time of use 2B), το τιμολόγιο αυτό προέρχεται από την Southern California Edison (SCE). Περιλαμβάνει χρεώσεις ενέργειας και ισχύος, ανάλογα με την εποχή και την περίοδο, καθώς επίσης και πάγιες χρεώσεις.

		TOU2B			
Εποχή	Περίοδος φορτίου	<i>power charge</i> (\$/kW)	<i>energy charge</i> (\$/kWh)	<i>customer charge</i> (\$/month)	<i>facility charge</i> (\$/kW)
<i>summer</i>	<i>on</i>	16,40	0,14896	79,95	5,40
<i>summer</i>	<i>mid</i>	2,45	0,06613		
<i>summer</i>	<i>off</i>	0	0,04271		
<i>winter</i>	<i>on</i>	0	0		
<i>winter</i>	<i>mid</i>	0	0,07811		
<i>winter</i>	<i>off</i>	0	0,04271		

Πίνακας 9.4. Τιμολόγιο TOU2B

- Gn10, το τιμολόγιο αυτό αφορά τις χρεώσεις για το φυσικό αέριο και προέρχεται από την Pacific Gas & Electric (PG&E).

		Gn10	
Εποχή		<i>energy charge</i> (\$/kWh)	<i>customer charge</i> (\$/month)
<i>summer</i>		0,035	15
<i>winter</i>		0,037	

Πίνακας 9.5. Χρεώσεις φυσικού αερίου

- CalPX (California Power Exchange), το τιμολόγιο αυτό έχει διαφορετική τιμή για κάθε ώρα του χρόνου, μήνα και τύπο φορτίου για χρέωση ενέργειας. Όταν το μικροδίκτυο πουλάει ενέργεια στο μακροδίκτυο, την πουλάει σε αυτήν την τιμή. Οι τιμές για αυτό το τιμολόγιο δίνονται στο παράρτημα Α μέσα στα δεδομένα του κώδικα.

Τέλος στον πίνακα 6 δίνονται οι τιμές για την κατανάλωση καυσίμου (ντίζελ ή φυσικού αερίου) από τις τεχνολογίες παραγωγής.

Καύσιμο	Τιμή (\$/kJ)
Φυσικό αέριο	$4,2 \cdot 10^{-6}$
Ντίζελ	$7,36 \cdot 10^{-6}$

Πίνακας 9.6. Τιμή καυσίμων

Η τιμή της kWh που προέρχεται από κάθε τεχνολογία παραγωγής i προκύπτει ως εξής:

$$\text{Κόστος } kWh_i = HeatR_i \cdot \text{Τιμή καυσίμου}$$

$$\left(\frac{\$}{kWh} = \frac{kJ}{kWh} \cdot \frac{\$}{kJ} \right)$$

και για τις τεχνολογίες που έχουν χρησιμοποιηθεί στο πρόγραμμα κυμαίνεται από 0,031 έως 0,29 \$/kWh.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

10.1 Σενάρια

Έχοντας σκοπό να φανεί η επίδραση των τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής (DER), συμπαραγωγής (CHP) και αποθήκευσης καθώς και της φορολογίας του άνθρακα πραγματοποιηθήκαν διάφορα σενάρια με όλους τους πιθανούς συνδυασμούς. Επιγραμματικά τα σενάρια (Σ) είναι:

1. Βασικό σενάριο (*'do nothing'*), όπου δεν χρησιμοποιείται καμία τεχνολογία και ουσιαστικά το μικροδίκτυο συμπεριφέρεται ως ένας απλός καταναλωτής όπου αγοράζει όλη την ενέργεια για την κάλυψη των φορτίων του από το δίκτυο.
2. *'DER + CHP + STORE'*, όπου εδώ υπάρχουν στο μικροδίκτυο εγκατεστημένες τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής, συμπαραγωγής και αποθήκευσης.
3. *'DER + STORE'*, όπως στο σενάριο 2 αλλά χωρίς τεχνολογίες συμπαραγωγής.
4. *'DER'*, εδώ χρησιμοποιούνται μόνο τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής.
5. *'DER + CHP'*, όπως στο σενάριο 2 αλλά χωρίς τεχνολογίες αποθήκευσης.
6. *'STORE'*, εδώ χρησιμοποιούνται μόνο τεχνολογίες αποθήκευσης και το μικροδίκτυο προμηθεύεται όλη του την ενέργεια από το δίκτυο.

Κάθε ένα από αυτά τα σενάρια πραγματοποιήθηκε δύο φορές για δύο διαφορετικές τιμολογιακές πολιτικές. Αυτές είναι:

- A. Με προκαθορισμένο τιμολόγιο (*TARIFF*) όπου το μικροδίκτυο (πελάτης) αγοράζει την ενέργεια που του χρειάζεται από την εταιρία παροχής (π.χ. ΔΕΗ) και χρεώνεται βάσει του συγκεκριμένου τιμολογίου. Το τιμολόγιο που επιλέχθηκε για την συγκεκριμένη εφαρμογή είναι το *TOU2B* (time of use) το οποίο χωρίζει τις χρεώσεις σε έξι ζώνες ανάλογα με την ώρα της ημέρας και την εποχή (summer – on / mid / off και winter – on / mid / off). Αυτό το τιμολόγιο χρησιμοποιείται στην Καλιφόρνια και επιλέχθηκε γιατί είναι πολύ κοντά στα τιμολόγια της ΔΕΗ και ο τρόπος με τον οποίο γίνονται οι χρεώσεις ήταν ο καταλληλότερος για να προσαρμοστούν στον κώδικα.
- B. Με το τιμολόγιο *CalPX* (California Power Exchange) όπου ο πελάτης αγοράζει την ενέργεια που του χρειάζεται στην τιμή *PX* την συγκεκριμένη ώρα και μέρα του κάθε μήνα. Οι τιμές του *CalPX* είναι πολύ κοντά στις τιμές του *EEX* (European Energy Exchange).

Σε κάθε ένα από τα παραπάνω σενάρια και σε συνδυασμό με τις δύο τιμολογιακές πολιτικές υπήρχε η φορολογία του άνθρακα στην τιμή 0,09 \$/kg CO₂. Στο βασικό σενάριο όπου δεν είχαμε παραγωγή ενέργειας από το μικροδίκτυο, επομένως και εκπομπές CO₂ υπολογίσθηκαν οι εκπομπές που πραγματοποιήθηκαν από το μακροδίκτυο για την ενέργεια που παράχθηκε για την κάλυψη του φορτίου του μικροδικτύου. Για κάθε kWh ηλεκτρισμού που αγοράστηκε θεωρήθηκε ότι είχαμε εκπομπές 0,13 kg CO₂ και για κάθε kWh που προήλθε από καύση φυσικού αερίου είχαμε 0,05 kg CO₂.

Στη συνέχεια για να εξετασθεί η ευαισθησία της αντικειμενικής συνάρτησης ως προς τη φορολογία του άνθρακα εξετάσθηκαν τα σενάρια 1-6 μόνο για την τιμολογιακή πολιτική A για τιμές φόρου άνθρακα 0,27 \$/kg CO₂ (A1C1 – A6C1) και 0,9 \$/kg CO₂ (A1C2 – A6C2).

Τέλος εξετάσθηκαν ακόμη τρία σενάρια (με την τιμολογιακή πολιτική A) όπου σκοπός ήταν να διαπιστωθεί η επίδραση διαφόρων τεχνολογιών και πολιτικών στην λειτουργία του μοντέλου. Συγκεκριμένα τα σενάρια αυτά είναι:

Ai. ‘*DER + CHP + STORE - FREE FOR SELL*’, όπου το μικροδίκτυο μπορεί και πουλάει ενέργεια στο μακροδίκτυο χωρίς να υπάρχει κανένας περιορισμός. Στα προηγούμενα σενάρια έπρεπε το μικροδίκτυο να καλύπτει πρώτα το φορτίο του και μετά μπορούσε να πουλάει στο μάκροδίκτυο.

Aii. ‘*DER + CHP + STORE – ME FC KAI MT*’, όπου τώρα στις τεχνολογίες εγκαθίστανται και κυψέλες καυσίμου (fuel cells) και μικροτουρμπίνες (microturbines).

Aiii. ‘*DER + CHP + STORE – NO CARBON TAX*’, όπου εδώ δεν υπήρχε καθόλου χρέωση για εκπομπές άνθρακα.

10.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Παρακάτω, στους πίνακες 1-5, παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα σχετικά με τα κόστη, τις τεχνολογίες που χρησιμοποιήθηκαν και τις εκπομπές άνθρακα για όλα τα πιθανά σενάρια.

	Σ1	Σ2	Σ3	Σ4	Σ5	Σ6
	<i>do nothing</i>	<i>DER + CHP + STORE</i>	<i>DER + STORE</i>	<i>DER</i>	<i>DER + CHP</i>	<i>STORE</i>
Εξοπλισμός						
τεχνολογίες παραγωγής	-	GA55 GA500(×2)	100FGG4(×2) 400FGZ4(×2)	100FGG4(×2) 400FGZ4(×2)	GA55 GA500(×2)	-
εγκατεστημένη ισχύς (kW)		1055	1000	1000	1055	
παραγωγή (MWh)		6917,31	6436,15	6436,15	6859,5	
συμπαραγωγή θ (MWh)		5501,12	-	-	5496,5	
συμπαραγωγή ψ (MWh)		0	-	-	0	
αποθήκευση (MWh)						
IN	-	26,32	0	-	-	85,32
OUT		13,54	0			46,71
χωρητικότητα μπαταρίας (kW)		87,92	0			264
Αγορές από το δίκτυο (MWh)						
ηλεκτρισμού	8627,6	1723,05	2191,45	2191,45	1768,1	8666,21
φυσικού αερίου	6428,5	927,4	6428,5	6428,5	932	6428,5
Εκπομπές ρύπων (tn)						
CO ₂	1443,01	1383	1395,3	1395,3	1379,87	1448
Κόστη (k\$)						
ηλεκτρισμού	783,48	158,68	195,4	195,4	163,77	774,66
φυσικού αερίου	234	34,43	234	234	34,6	234
τεχνολογιών παραγωγής	-	539,17	498,13	498,13	536,07	-
αποθήκευσης	-	1,74	0	0	-	5,23
φορολογίας CO ₂	129,87	124,47	125,58	125,58	124,19	130,32
ΣΥΝΟΛΟ	1147,35	858,49	1053,11	1053,11	858,63	1144,21
Εξοικονόμηση σε σχέση με το Σ1 ('do nothing')						
% εξοικονόμηση στο συνολικό κόστος	-	25,18	8,95	8,95	25,16	0,27
% εξοικονόμηση στην εκπομπή CO ₂	-	4,16	3,31	3,31	4,38	-0,35

Πίνακας 10.1. Αποτελέσματα για χρεώσεις με προκαθορισμένο τιμολόγιο

Παρατηρούμε, όπως ήταν αναμενόμενο άλλωστε, ότι με την εγκατάσταση τεχνολογιών συμπαραγωγής και αποθήκευσης το φορτίο καλύπτεται με τον οικονομικότερο τρόπο. Αυτό γιατί με τις τεχνολογίες συμπαραγωγής η εκλυόμενη θερμότητα από τις γεννήτριες δεν αποβάλλεται στο περιβάλλον αλλά χρησιμοποιείται για την κάλυψη των θερμικών φορτίων (ή φορτίων κλιματισμού ανάλογα με την τεχνολογία). Παράλληλα χρησιμοποιώντας μπαταρίες οξέως-μολύβδου για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας αγοράζεται ενέργεια από το δίκτυο τις βραδινές ώρες και χρησιμοποιείται τις ώρες αιχμής όπου το κόστος της kWh είναι μεγαλύτερο. Έτσι το συνολικό κόστος μειώνεται. Παρατηρούμε επίσης ότι στις τεχνολογίες συμπαραγωγής σε κανένα από τα παραπάνω σενάρια δεν υιοθετούνται στη λύση γεννήτριες με ψυχαντήρα απορρόφησης λόγω του υψηλού τους κόστους.

Σχετικά με τις εκπομπές άνθρακα βλέπουμε ότι γενικά με την εγκατάσταση τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής μειώνονται. Ειδικά όταν έχουμε και τεχνολογίες συμπαραγωγής η μείωση είναι μεγαλύτερη. Στα συγκεκριμένα σενάρια η φορολογία άνθρακα είναι σχετικά χαμηλή (0,09 \$/kg). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα όταν κάνουμε ηλεκτρική αποθήκευση οι εκπομπές να παρουσιάζουν μία μικρή αύξηση. Η εξήγηση είναι ότι το ποσό που εξοικονομείται κάνοντας χρήση της αποθήκευσης, αγοράζοντας ουσιαστικά παραπάνω ενέργεια από το μακροδίκτυο από αυτή που χρειαζόμαστε για την κάλυψη του φορτίου άρα και περισσότερες εκπομπές CO₂, είναι μεγαλύτερο από το ποσό που πρέπει να πληρωθεί για την φορολογία του άνθρακα. Αν αυξηθεί ο φόρος άνθρακα τα αποτελέσματα είναι διαφορετικά, όπως θα φανεί στα ακόλουθα σενάρια. Παρατηρούμε ότι και στο σενάριο A6, όπου έχουμε χρήση μόνο τεχνολογιών αποθήκευσης και όλη η απαραίτητη ενέργεια για την κάλυψη του φορτίου προέρχεται από αγορές από το μακροδίκτυο, οι εκπομπές άνθρακα είναι λίγο αυξημένες (αρνητική μείωση) σε σχέση με το σενάριο A1 ('do nothing').

Στην εικόνα 1 φαίνεται το ισοζύγιο ενέργειας για το μικροδίκτυο υπό μορφή διαγράμματος Sankey για το σενάριο A2. Η συνολική ενέργεια που καταναλώνει το μικροδίκτυο για την κάλυψη των φορτίων του προέρχεται από την αγορά ενέργειας από το μακροδίκτυο, από την αυτοπαραγωγή του μικροδικτύου και από την αποθηκευμένη ενέργεια. Η αποθηκευμένη ενέργεια εισέρχεται στο μικροδίκτυο από την αγορά ηλεκτρισμού τις ώρες που δεν έχουμε μεγάλα φορτία και καταναλώνεται τις ώρες αιχμής όπου η ζήτηση ενέργειας είναι υψηλή και η τιμή της kWh ακριβότερη. Συγκεκριμένα η εξίσωση που δίνει το ενεργειακό ισοζύγιο είναι:

Συνολικό φορτίο = Αυτοπαραγωγή + Αγορές ηλεκτρισμού + Αγορές φυσικού αερίου
 όπου: Αυτοπαραγωγή = Ηλεκτροπαραγωγή + Παραγωγή από CHP

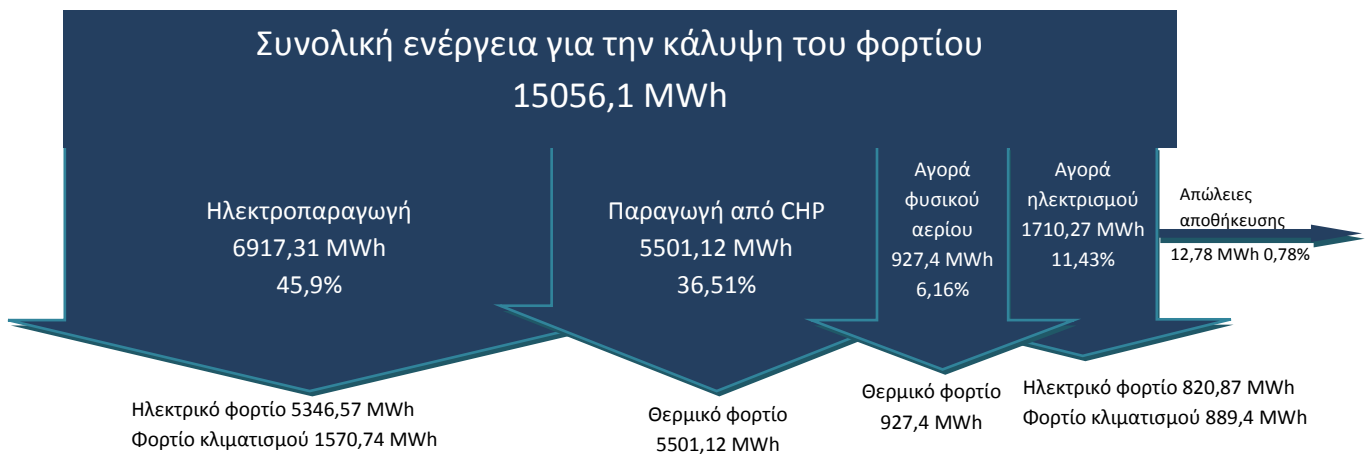
$$\text{II}$$

$$(\text{Ηλεκτροπαραγωγή} \cdot \text{TERatio} \cdot \text{ResidualHeat})$$

$$\text{Αγορές ηλεκτρισμού} = \text{Κάλυψη φορτίου} - (\text{Είσοδος μπαταριών} - \text{Εξοδος μπαταριών})$$

$$\text{II}$$

$$\text{Απώλειες αποθήκευσης}$$



Εικόνα 10.1. Ενεργειακό ισοζύγιο υπό μορφή διαγράμματος Sankey

Στις αγορές ηλεκτρισμού στην εικόνα 1 που καταλήγουν στα φορτία συμπεριλαμβάνεται και η ενέργεια που ανακτάται από τις μπαταρίες.

Στα διαγράμματα 1 έως 9 στη συνέχεια παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο καλύπτονται τα φορτία για το σενάριο 2 (όλες οι τεχνολογίες) με την τιμολογιακή πολιτική A (tariff) για μία τυπική μέρα Ιανουαρίου και μία Ιουλίου.

[Επεξήγηση υπομνημάτων

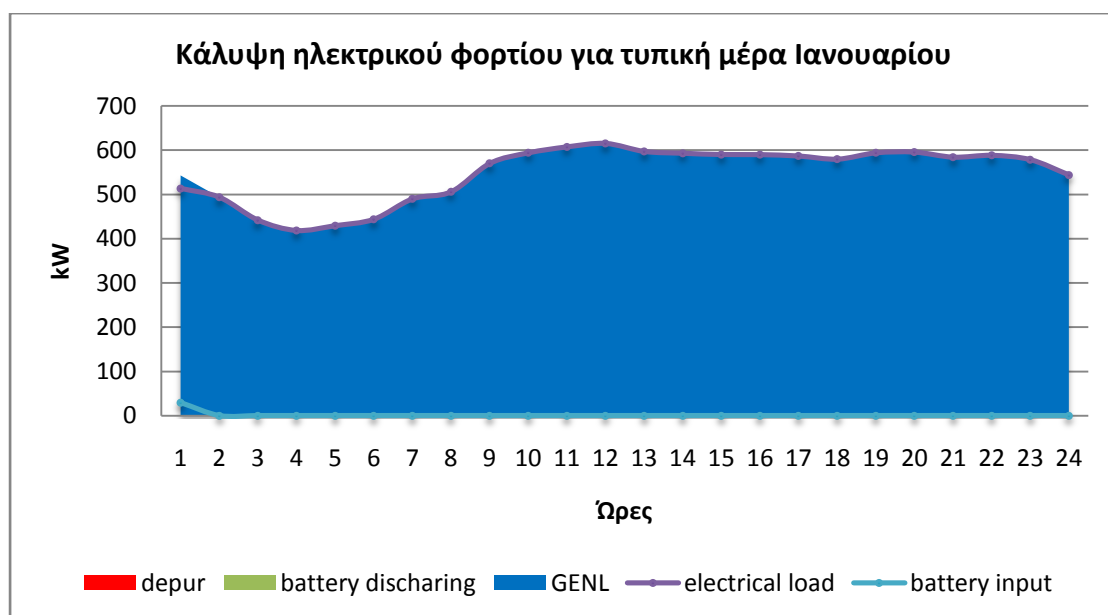
Depur : distributed energy purchases (αγορά ηλεκτρισμού από το μακροδίκτυο)

Genl: energy from self-generation (ηλεκτρική ενέργεια από γεννήτριες του μικροδικτύου)

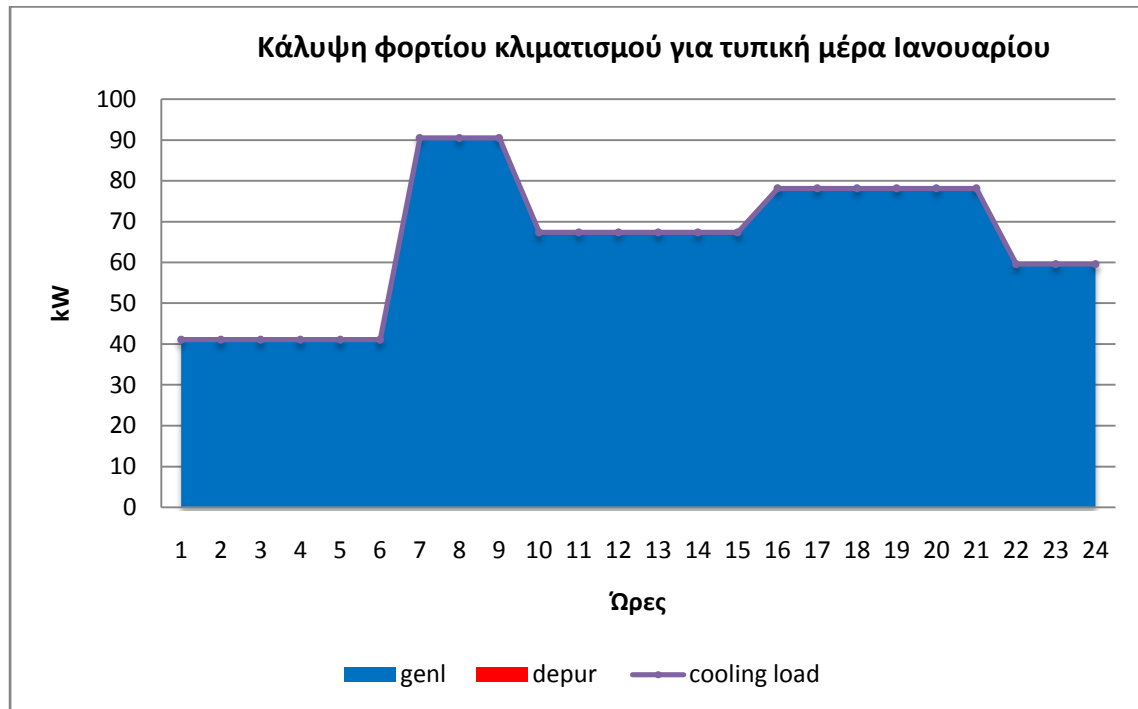
Genh: energy from CHP for heating loads (ενέργεια που προέρχεται από συμπαραγωγή για την κάλυψη των θερμικών φορτίων)

Dgpur: distributed gas purchases (αγορά φυσικού αερίου από το μακροδίκτυο)

Purtotal: total purchases (συνολικές αγορές ηλεκτρισμού και φυσικού αερίου)]

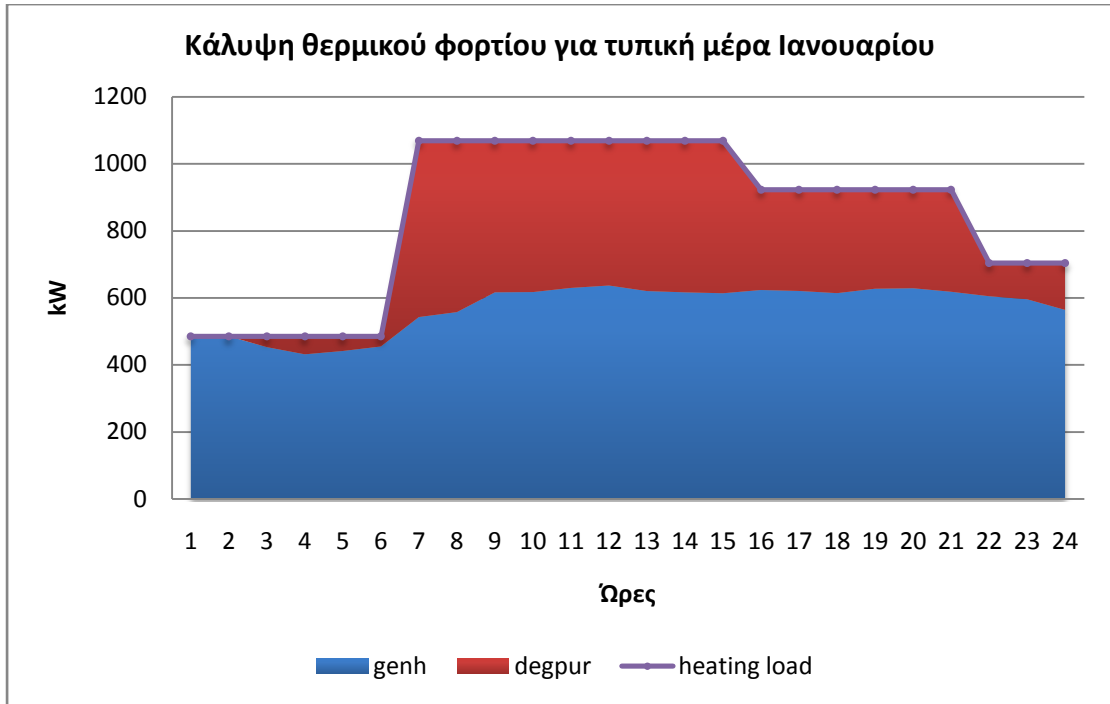


Διάγραμμα 10.1. Κάλυψη ηλεκτρικού φορτίου για τυπική μέρα Ιανουαρίου

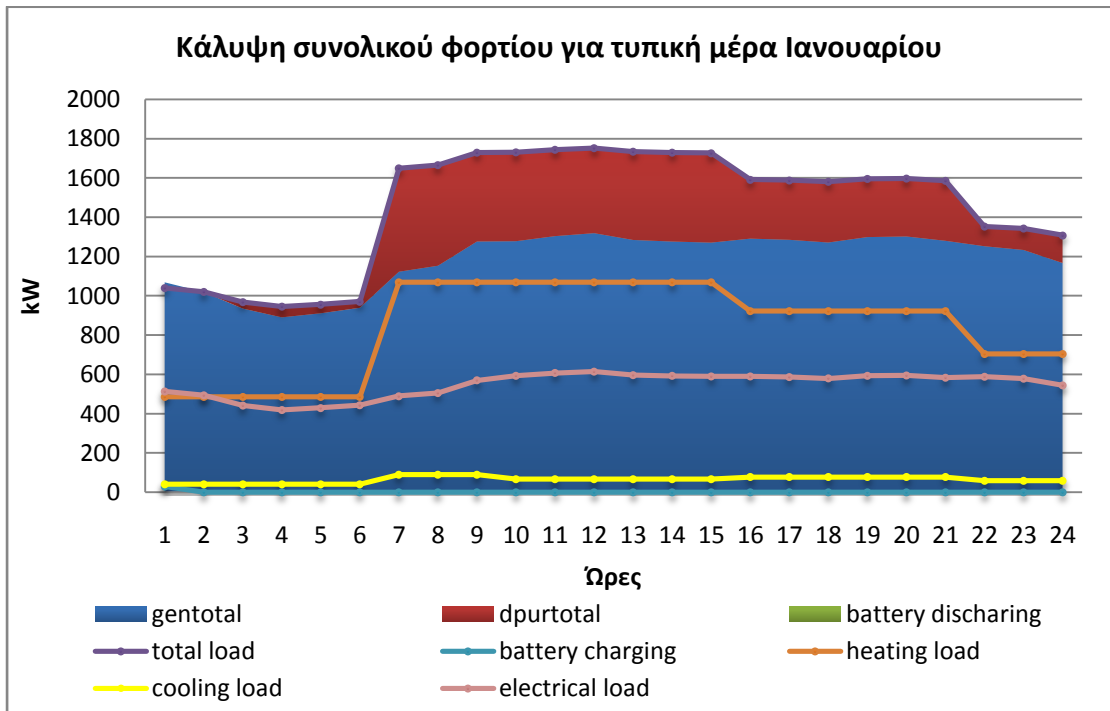


Διάγραμμα 10.2. Κάλυψη φορτίου κλιματισμού για τυπική μέρα Ιανουαρίου

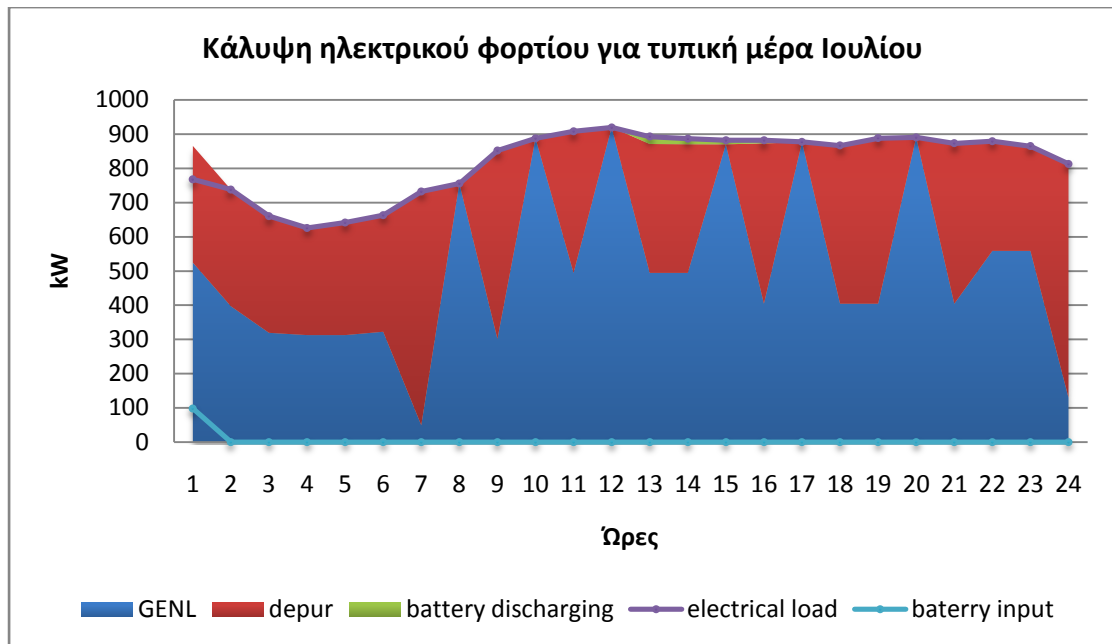
Από τα διαγράμματα 1 και 2 παρατηρούμε ότι τα φορτία ηλεκτρισμού και κλιματισμού καλύπτονται αποκλειστικά από την ηλεκτροπαραγωγή από τις γεννήτριες του μικροδικτύου. Αυτό συμβαίνει γιατί το σύνολο αυτών των δύο φορτίων δεν είναι τόσο μεγάλο και μπορεί να καλυφθεί ακόμη και τις ώρες αιχμής από τις εγκατεστημένες μονάδες στο μικροδίκτυο. Παράλληλα αυτό εξυπηρετεί και την κάλυψη των αυξημένων θερμικών φορτίων, λόγω εποχής, κάνοντας χρήση της συμπαραγωγής. Η επιπλέον ενέργεια που απαιτείται για την κάλυψη των θερμικών φορτίων προέρχεται από την αγορά φυσικού αερίου από το μακροδίκτυο, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 3. Το συγκεκριμένο μήνα δεν γίνεται ηλεκτρική αποθήκευση όπως φαίνεται στα διαγράμματα 1 και 4. Μία πολύ μικρή ποσότητα ενέργειας που εισέρχεται στις μπαταρίες την πρώτη ώρα του Ιανουαρίου ουσιαστικά δεν ανακτάται ποτέ αφού λόγω απωλειών έχει σχεδόν μηδενιστεί μέχρι τις ώρες αιχμής, όπου χρησιμοποιείται συνήθως η αποθηκευμένη ενέργεια. Ο λόγος που αυτή η πολλή μικρή ποσότητα εισέρχεται στις μπαταρίες και μάλιστα από την παραγωγή των γεννητριών του μικροδικτύου (κανονικά η είσοδος στις μπαταρίες γίνεται από αγορά επιπλέον ηλεκτρισμού από το μακροδίκτυο, όμως εδώ δεν έχουμε καθόλου αγορές ηλεκτρισμού) είναι για την σωστή λειτουργία του μοντέλου. Αν δηλαδή είχαμε μηδενική ενέργεια εισόδου στις μπαταρίες την πρώτη ώρα του πρώτου μήνα του έτους η αποθηκευμένη ενέργεια για όλες τις υπόλοιπες ώρες του έτους θα ήταν μηδενική αφού όπως γίνεται αντιληπτό και από το μαθηματικό μοντέλο του προβλήματος η ενέργεια από αποθήκευση σχετίζεται με την ενέργεια που αποθηκεύτηκε στις μπαταρίες την προηγούμενη ώρα (h-1).



Διάγραμμα 10.3. Κάλυψη θερμικού φορτίου για τυπική μέρα Ιανουαρίου

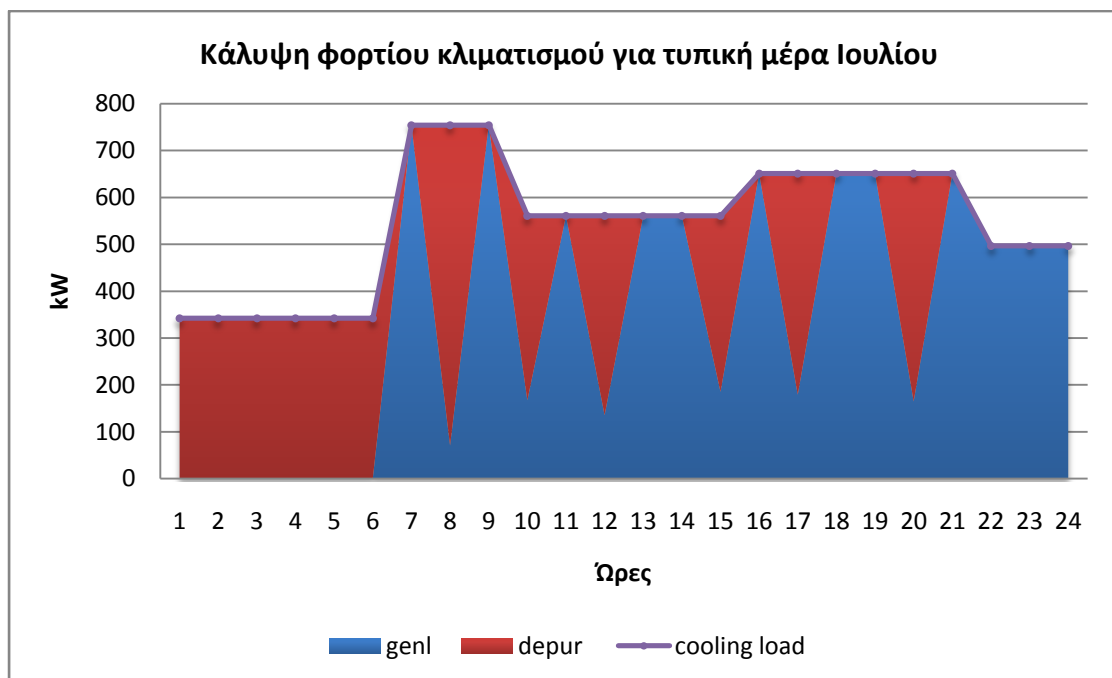


Διάγραμμα 10.4. Κάλυψη συνολικού φορτίου για τυπική μέρα Ιανουαρίου



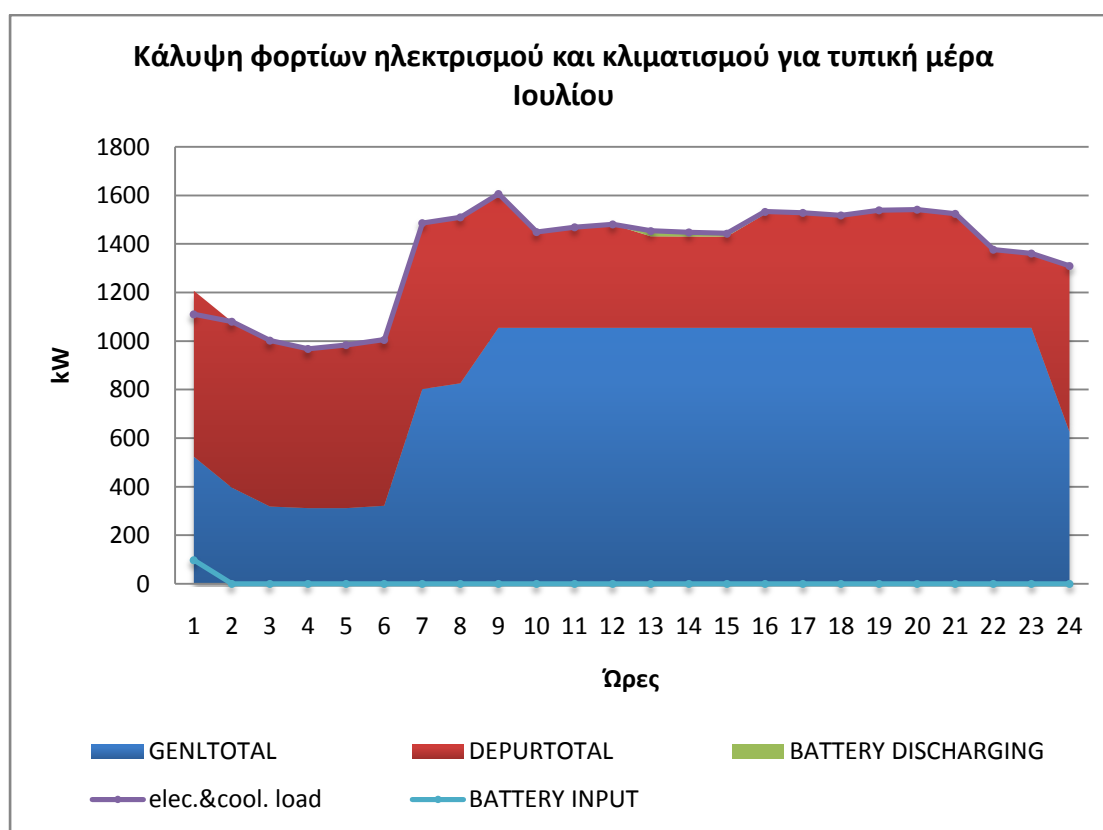
Διάγραμμα 10.5. Κάλυψη ηλεκτρικού φορτίου για τυπική μέρα Ιουλίου

Για τον μήνα Ιούλιο, όπου το ενεργειακό προφίλ του μικροδικτύου είναι διαφορετικό από την Ιανουάριου λόγω κλιματολογικών συνθηκών, παρατηρούμε στα διαγράμματα 6 και 7 ότι τώρα δεν επαρκεί μόνο η ηλεκτροπαραγωγή εντός του μικροδικτύου αλλά είναι απαραίτητες και οι αγορές ηλεκτρισμού από το μακροδίκτυο. Βλέποντας αυτά τα δύο διαγράμματα φαίνεται ότι η παραγωγή ηλεκτρισμού από τις γεννήτριες έχει πολύ συχνές και μεγάλες μεταβολές κάτι το οποίο δεν είναι ρεαλιστικό γιατί μία γεννήτρια εσωτερικής καύσης, όπως αυτές που χρησιμοποιούνται εδώ, δεν είναι εφικτό να λειτουργούν με τέτοιο τρόπο.



Διάγραμμα 10.6. Κάλυψη φορτίου κλιματισμού για τυπική μέρα Ιουλίου

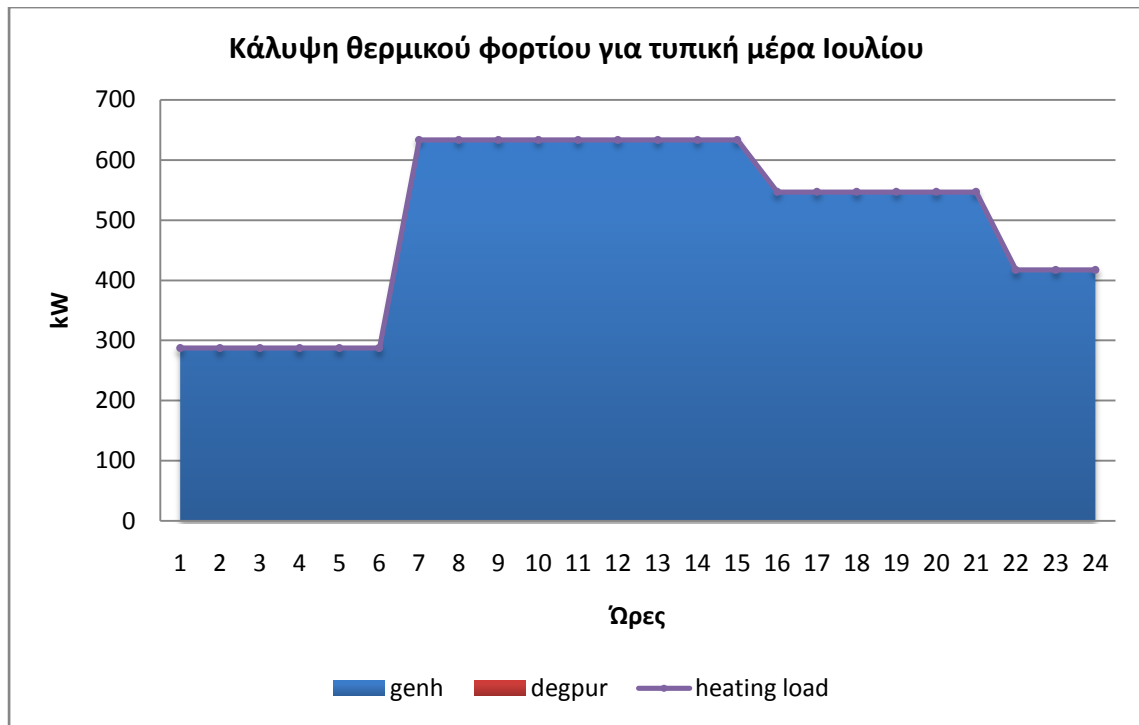
Αν όμως συνδυάσουμε και τα δύο φορτία ηλεκτρισμού, μιας και δεν γίνεται χρήση γεννητριών με ψυχαντήρα απορρόφησης στο συγκεκριμένο σενάριο και έτσι τα φορτία κλιματισμού μετατρέπονται σε αποκλειστικά φορτία ηλεκτρισμού, παρατηρούμε ότι η παραγωγή ηλεκτρισμού από τις γεννήτριες είναι πιο ομαλή. Βέβαια αυτό δεν γίνεται λόγω περιορισμών στη λειτουργία των γεννητριών αφού το πρόγραμμα δεν μπορεί να γνωρίσει κάτι τέτοιο αλλά γίνεται διότι προκύπτει ως πιο οικονομική λύση από την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου. Φαίνεται επίσης ότι αγορές ηλεκτρισμού γίνονται κυρίως τις πρώτες ώρες της ημέρας (1-6) όπου η τιμή της kWh είναι αρκετά χαμηλή. Παρατηρούμε ότι αγοράζεται και επιπλέον ενέργεια τις δύο πρώτες ώρες (εκεί όπου το κόκκινο χωρίο βρίσκεται πάνω από την καμπύλη του φορτίου) η οποία πηγαίνει για την φόρτιση των μπαταριών και ανακτάται από τις μπαταρίες για την κάλυψη ενός μέρους του φορτίου τις ώρες 12 – 15 όπου η ζήτηση είναι αυξημένη η τιμή της kWh υψηλή (on hours).



Διάγραμμα 10.7. Κάλυψη φορτίου ηλεκτρισμού και κλιματισμού για τυπική μέρα Ιουλίου

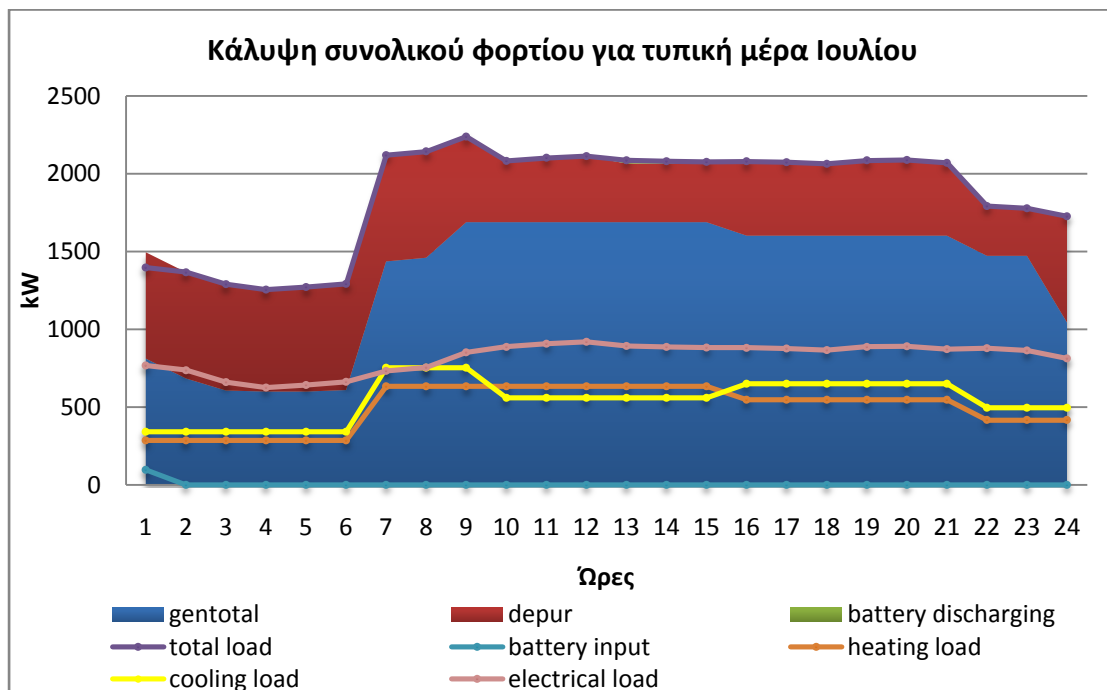
Από το διάγραμμα 8 είναι εμφανές ότι όλο το θερμικό φορτίο, που είναι σαφώς μικρότερο σε σχέση με τον Ιανουάριο, καλύπτεται από την ενέργεια που προέρχεται από συμπαραγωγή. Αγορές φυσικού αερίου δεν γίνονται.

Τέλος στο διάγραμμα 9 βλέπουμε ότι το συνολικό φορτίο είναι αρκετά μεγαλύτερο από αυτό του Ιανουαρίου και ότι οι αγορές ηλεκτρισμού είναι περισσότερες αφού η εγκατεστημένη ισχύς δεν επαρκεί για την κάλυψη του φορτίου.



Διάγραμμα 10.8. Κάλυψη θερμικού φορτίου για τυπική μέρα Ιουλίου

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ενέργεια από αποθήκευση κατέχει ένα πολύ μικρό ποσοστό της συνολικά καταναλισκόμενης ενέργειας. Αυτό έχει να κάνει με τα οικονομικά δεδομένα των τεχνολογιών αποθήκευσης και παραγωγής που χρησιμοποιούνται στο πρόγραμμα. Αν οι τεχνολογίες παραγωγής είχαν υψηλότερο κόστος και οι τεχνολογίες αποθήκευσης μικρότερο τα οφέλη από την ηλεκτρική αποθήκευση θα φαινόταν πιο έντονα.



Διάγραμμα 10.9. Κάλυψη συνολικού φορτίου για τυπική μέρα Ιουλίου

	Σ1	Σ2	Σ3	Σ4	Σ5	Σ6
	<i>do nothing</i>	<i>DER + CHP + STORE</i>	<i>DER + STORE</i>	<i>DER</i>	<i>DER + CHP</i>	<i>STORE</i>
Εξοπλισμός						
τεχνολογίες παραγωγής	-	GA500(×2)	400FGZ4(×2)	400FGZ4(×2)	GA500(×2)	-
εγκατεστημένη ισχύς (kW)		1000	800	800	1000	
παραγωγή (MWh)		7603	6577,5	6577,5	7603	
συμπαραγωγή θ (MWh)		5435,3	-	-	5435,3	
συμπαραγωγή ψ (MWh)		0	-	-	0	
αποθήκευση (MWh)		0	0	-	-	0
	<i>IN</i>	0	0	-	-	0
	<i>OUT</i>	0	0	-	-	0
χωρητικότητα μπαταρίας (kW)		0	0			0
Αγορές από το δίκτυο (MWh)						
ηλεκτρισμού	8627,6	1024,6	2050,1	2050,1	1024,6	8627,6
φυσικού αερίου	6428,5	993,2	6428,5	6428,5	993,2	6428,5
Εκπομπές ρύπων (tn)						
CO ₂	1443,01	1399,34	1377,24	1377,24	1399,34	1443,01
Κόστη (k\$)						
ηλεκτρισμού	766	101,56	195,15	195,15	101,56	766
φυσικού αερίου	234	36,86	234	234	36,86	234
τεχνολογιών παραγωγής	-	564,98	470,89	470,89	564,98	-
αποθήκευσης	-	0	0	-	-	0
φορολογίας CO ₂	129,87	125,94	123,94	123,94	125,94	129,87
ΣΥΝΟΛΟ	1129,87	829,34	1023,98	1023,98	829,34	1129,87
Εξοικονόμηση σε σχέση με το Σ1 ('do nothing')						
% εξοικονόμηση στο συνολικό κόστος	-	26,6	9,37	9,37	26,6	0
% εξοικονόμηση στην εκπομπή CO ₂	-	3,03	4,56	4,56	3,03	0

Πίνακας 10.2. Αποτελέσματα για το τιμολόγιο CalPX

Παρατηρούμε και εδώ ότι η χρήση τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής και ιδιαίτερα τεχνολογιών συμπαραγωγής επιφέρει μείωση τόσο στο συνολικό κόστος όσο και στις εκπομπές άνθρακα σε σχέση με το βασικό σενάριο αυτής της τιμολογιακής πολιτικής. Σε σύγκριση με την περίπτωση Α (προκαθορισμένο τιμολόγιο) η εξοικονόμηση σε κόστος και εκπομπές είναι λίγο μεγαλύτερη. Εδώ όμως δε υιοθετούνται στη λύση τεχνολογίες αποθήκευσης λόγω της ιδιομορφίας του τιμολογίου, όπου η τιμή της αγοράς

ενέργειας αλλάζει ανά ώρα και έτσι το μικροδίκτυο μπορεί να διαχειριστεί με οικονομικότερο τρόπο τις αγορές ηλεκτρισμού χωρίς να χρειάζεται η αποθήκευση. Παρατηρούμε ότι η συνολικά εγκατεστημένη ισχύ σε κάθε σενάριο στην περίπτωση Α είναι μεγαλύτερη από ότι στην Β αφού στην δεύτερη η αγορά ηλεκτρισμού είναι πιο συμφέρουσα από την πρώτη.

	Σ1	Σ2	Σ3	Σ4	Σ5	Σ6
	<i>do nothing</i>	<i>DER + CHP + STORE</i>	<i>DER + STORE</i>	<i>DER</i>	<i>DER + CHP</i>	<i>STORE</i>
AC1						
Εξοπλισμός						
τεχνολογίες παραγωγής	-	GA55 GA500(×2)	100FGG4(×2) 400FGZ4(×2)	100FGG4(×2) 400FGZ4(×2)	GA55 GA500(×2)	-
εγκατεστημένη ισχύς (kW)		1055	1000	1000	1055	
παραγωγή (MWh)		6734,8	6278,4	6278,4	6734,8	
συμπαραγωγή θ (MWh)		5470,11	-	-	5470,11	
συμπαραγωγή ψ (MWh)		0	-	-	0	
αποθήκευση (MWh)						
IN	-	0	0	-	-	75,59
OUT		0	0			41,53
χωρητικότητα μπαταρίας (kW)		0	0			231,66
Αγορές από το δίκτυο (MWh)						
ηλεκτρισμού	8627,6	1892,8	2349,18	2349,18	1892,8	8661,64
φυσικού αερίου	6428,52	958,39	6428,52	6428,52	958,39	6428,52
Εκπομπές ρύπων (tn)						
CO ₂	1443,01	1373,28	1392,12	1392,12	1373,28	1447,44
Κόστη (k\$)						
ηλεκτρισμού	783,48	171,34	205,84	205,84	171,34	775,4
φυσικού αερίου	234	35,57	234	234	35,57	234
τεχνολογιών παραγωγής	-	528,5	487,98	487,98	528,5	-
αποθήκευσης	-	0	0	-	-	4,59
φορολογίας CO ₂	389,62	370,79	375,87	375,87	370,79	390,81
ΣΥΝΟΛΟ	1407,1	1106,2	1303,69	1303,69	1106,2	1404,8
Εξοικονόμηση σε σχέση με το Σ1 ('do nothing')						
% εξοικονόμηση στο συνολικό κόστος	-	21,38	7,35	7,35	21,38	0,16
% εξοικονόμηση στην εκπομπή CO ₂	-	4,83	3,53	3,53	4,83	-0,31

Πίνακας 10.3. Αποτελέσματα για προκαθορισμένο τιμολόγιο με φόρο άνθρακα 0,27 \$/kg

Σε σύγκριση με τον πίνακα 1 παρατηρούμε ότι η αύξηση στην φορολογία του άνθρακα στην τριπλάσια τιμή δεν επιφέρει σημαντικές αλλαγές, αφού οι ίδιες τεχνολογίες έχουν εγκατασταθεί και οι εκπομπές άνθρακα είναι σχεδόν ίσες. Μόνο το συνολικό κόστος έχει αλλάξει αρκετά λόγω της επιβολής του μεγαλύτερου φόρου άνθρακα.

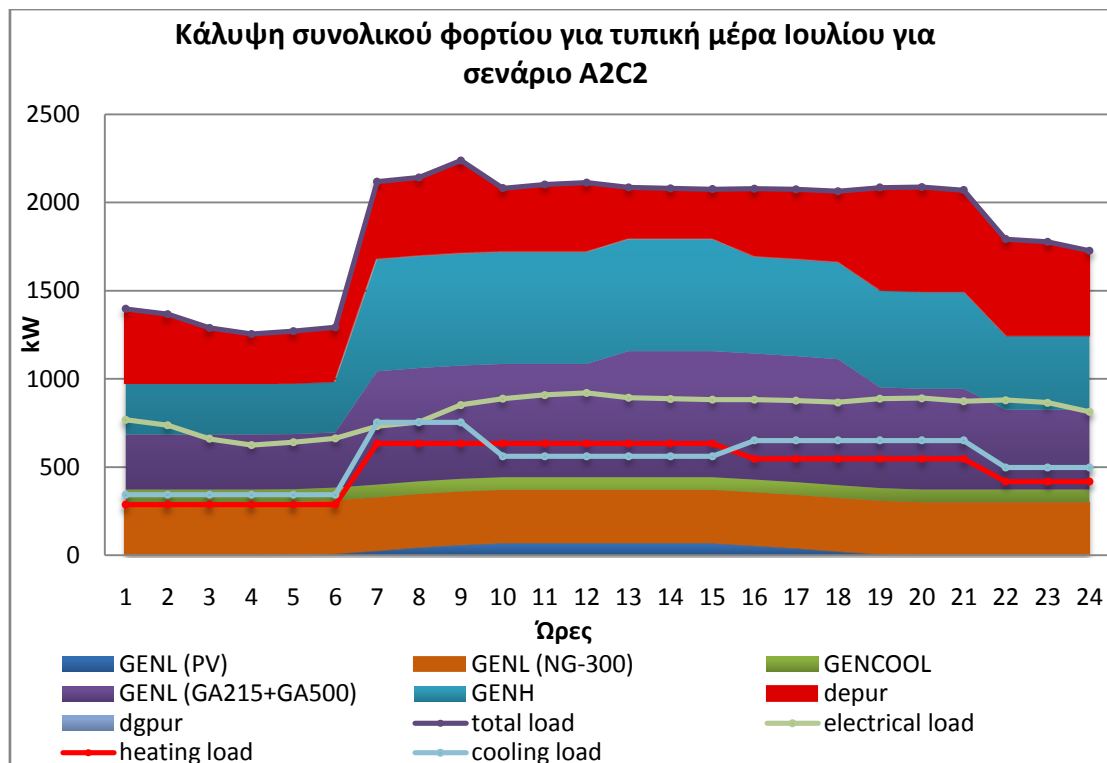
Στον πίνακα 4 όπου έχουμε τα αποτελέσματα για τον υψηλότερο φόρο άνθρακα (0,9 \$/kg), δεκαπλάσιο σε σχέση με την περίπτωση A, παρατηρούμε σημαντικές αλλαγές. Πλέον στις τεχνολογίες παραγωγής εγκαθίστανται και φωτοβολταϊκά όπου έχουν μηδενικές εκπομπές ρύπων. Παρατηρούμε επίσης ότι έχουν εγκατασταθεί και γεννήτριες με ψυχαντήρα απορρόφησης για την κάλυψη μέρους των φορτίων κλιματισμού και ότι η συνολικά εγκατεστημένη ισχύς είναι μεγαλύτερη. Αυτό γίνεται για να μειωθούν οι αγορές ηλεκτρισμού από το δίκτυο στις οποίες οφείλεται ένα μεγάλο ποσοστό εκπομπών λόγω του ότι ο συντελεστής εκπομπών είναι μεγαλύτερος από ότι για παραγωγή εντός του μικροδικτύου. Έτσι το κόστος για τον ψυχαντήρα απορρόφησης στο συγκεκριμένο σενάριο είναι μικρότερο από το κόστος που προκύπτει από την αγορά ηλεκτρισμού λόγω φορολογίας άνθρακα. Παρατηρούμε επίσης ότι αυξάνονται οι αγορές φυσικού αερίου από το μακροδίκτυο για την κάλυψη των θερμικών φορτίων διότι ο συντελεστής εκπομπών άνθρακα είναι μικρότερος από αυτόν που προκύπτει σε μία γεννήτρια συμπαραγωγής. Αξιοσημείωτο είναι και το γεγονός ότι σε σύγκριση με το βασικό σενάριο αυτής της περίπτωσης (A1C2) τα υπόλοιπα σενάρια έχουν σημαντικά ποσοστά εξοικονόμησης εκπομπών ενώ το ποσοστό εξοικονόμησης σε κόστος δεν είναι τόσο μεγάλο όσο στις άλλες περιπτώσεις. Αυτό φυσικά οφείλεται στο ότι το πρόγραμμα αναγκάζεται να υιοθετήσει στη λύση του τεχνολογίες με μικρότερες ή μηδενικές εκπομπές (φωτοβολταϊκά) που έχουν όμως υψηλότερο κόστος.

Στο διάγραμμα 10 φαίνεται και πάλι η κάλυψη του συνολικού φορτίου για τυπική μέρα Ιουλίου αλλά για το σενάριο A2C2. Φαίνεται τώρα ότι πέρα από τις τεχνολογίες συμπαραγωγής θερμότητας που είχαμε και στο σενάριο A2, έχουν εγκατασταθεί και φωτοβολταϊκά και γεννήτριες με ψυχαντήρα απορρόφησης για συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και ψύξης. Και εδώ οι αγορές ηλεκτρισμού γίνονται με την ίδια λογική. Είναι δηλαδή περισσότερες όταν η τιμή της kWh είναι χαμηλότερη. Οι αγορές φυσικού αερίου παρόλο που σε αυτό το σενάριο είναι αρκετές, για τον μήνα Ιούλιο είναι κ εδώ μηδενικές αφού τα θερμικά φορτία δεν είναι πολύ υψηλά και καλύπτονται από συμπαραγωγή. Παρατηρούμε ακόμη ότι τα φωτοβολταϊκά προσφέρουν ενέργεια στο μικροδίκτυο τις ώρες όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι πιο ισχυρή, μεταξύ 8π.μ και 4μ.μ..

AC2

	Σ1	Σ2	Σ3	Σ4	Σ5	Σ6
	<i>do nothing</i>	<i>DER + CHP + STORE</i>	<i>DER + STORE</i>	<i>DER</i>	<i>DER + CHP</i>	<i>STORE</i>
Εξοπλισμός						
τεχνολογίες παραγωγής	-	GA215 GA500 PV-20 PV-50 NG-300	400FGZ4(×2) PV-5(×3) PV-20 PV-50 PV-100(×2)	400FGZ4(×2) PV-5(×3) PV-20 PV-50 PV-100(×2)	GA215 GA500 PV-20 PV-50 NG-300	-
εγκατεστημένη ισχύς (kW)		1085	1085	1085	1085	
παραγωγή (MWh)		7166,9	5687,43	5687,43	7166,9	
συμπαραγωγή θ (MWh)		5181,7	-	-	5181,7	
συμπαραγωγή ψ (MWh)		400,1	-	-	400,1	
αποθήκευση (MWh)	<i>IN</i>	0	0	-	-	23,77
	<i>OUT</i>	0	0			13,19
χωρητικότητα μπαταρίας (kW)		0	0			70,99
Αγορές από το δίκτυο (MWh)						
ηλεκτρισμού	8627,6	1060,6	2940,16	2940,16	1060,6	8638,16
φυσικού αερίου	6428,52	1246,8	6428,52	6428,52	1246,8	6428,52
Εκπομπές ρύπων (tn)						
CO ₂	1443,01	1324,84	1287,4	1287,4	1324,84	1444,19
Κόστη (k\$)						
ηλεκτρισμού	783,48	119,13	248,75	248,75	119,13	780,69
φυσικού αερίου	234	46,14	234	234	46,14	234
τεχνολογιών παραγωγής	-	617,8	510,31	510,31	617,8	-
αποθήκευσης	-	0	0	-	-	1,41
φορολογίας CO ₂	1298,72	1191,5	1158,6	1158,6	1191,5	1300
ΣΥΝΟΛΟ	2316,2	1974,53	2151,67	2151,67	1974,53	2316,1
Εξοικονόμηση σε σχέση με το Σ1 ('do nothing')						
% εξοικονόμηση στο συνολικό κόστος	-	14,75	7,1	7,1	14,75	0,043
% εξοικονόμηση στην εκπομπή CO ₂	-	8,19	10,78	10,78	8,19	-0,08

Πίνακας 10.4. Αποτελέσματα για προκαθορισμένο τιμολόγιο με φόρο άνθρακα 0,9 \$/kg



Διάγραμμα 10.10. Κάλυψη συνολικού φορτίου για τυπική μέρα Ιουλίου με φόρο άνθρακα 0,9 €/kg

Οι πωλήσεις προς το δίκτυο σε όλα τα παραπάνω σενάρια ήταν μηδενικές γι' αυτό και δεν συμπεριλαμβάνονται στους πίνακες.

Στον πίνακα 5 φαίνονται τα αποτελέσματα για τα ειδικά σενάρια Ai-Aiii.

Από το Ai παρατηρούμε ότι οι πωλήσεις προς το δίκτυο είναι πολύ μικρές ακόμη και στην περίπτωση όπου ο καταναλωτής είναι ελεύθερος να πουλήσει όποτε θέλει και ουσιαστικά δεν αλλάζουν κάτι στο αποτέλεσμα. Το γεγονός ότι οι πωλήσεις είναι πολύ μικρές οφείλεται στο εξής: η ενέργεια που πωλείται προέρχεται από την περίσσεια παραγωγής των γεννητριών του μικροδικτύου. Το κόστος για την παραγωγή αυτής της ενέργειας είναι ίδιο οποιαδήποτε ώρα της ημέρας αφού ουσιαστικά έχει να κάνει με την τιμή του καυσίμου και την απόδοση της κάθε γεννήτριας που τα θεωρήσαμε σταθερά όλο το χρόνο. Η λογική είναι ότι αυτή η ενέργεια πωλείται προς το δίκτυο τις ώρες αιχμής όπου η τιμή της kWh είναι υψηλή και μάλιστα μεγαλύτερη από το ποσό που κόστισε στο μικροδίκτυο να παράξει τις επιπλέον kWh. Όμως αυτό το κέρδος αντισταθμίζεται από το κόστος της φορολογίας άνθρακα και έτσι οι πωλήσεις περιορίζονται. Παράλληλα στο μικροδίκτυο εγκαθίστανται συγκεκριμένες μονάδες που στόχο έχουν την κάλυψη του φορτίου. Είναι λίγες οι περιπτώσεις όπου μπορούν οι μονάδες αυτές να καλύψουν το φορτίο και να παράξουν επιπλέον ισχύ για πώληση στο δίκτυο. Εξάλλου, όπως αναφέρθηκε, η πώληση είναι συμφέρουσα τις ώρες αιχμής, που όμως τότε και το φορτίο του μικροδικτύου είναι μέγιστο και έτσι οι γεννήτριες δεν έχουν την ικανότητα να παράξουν επιπλέον ισχύ. Θα έπρεπε για αυτό το σκοπό να εγκαθιστούσαμε επιπλέον μονάδες κάτι το οποίο δεν προκύπτει να είναι οικονομικά συμφέρον. Παράλληλα η λογική της παραγωγής επιπλέον ενέργειας της ώρες χαμηλής

ζήτησης και της αποθήκευσης αυτής τις ενέργειας για πώληση στο δίκτυο τις ώρες αιχμής θεωρητικά μπορούσε να ήταν συμφέρουσα. Όμως στο συγκεκριμένο μικροδίκτυο, με τα συγκεκριμένα φορτία, τις εγκατεστημένες μονάδες και τις χρεώσεις που χρησιμοποιούνται δεν επαληθεύεται κάτι τέτοιο.

Από το Aii είναι εμφανές ότι οι εγκατάσταση σύγχρονων τεχνολογιών, όπως είναι μικροτουρμπίνες, έχει σαν αποτέλεσμα την συνολικά μικρότερη εγκατεστημένη ισχύ για την κάλυψη του ίδιου φορτίου αφού οι τεχνολογίες αυτές είναι αποδοτικότερες. Ειδικά η ενέργεια που προέρχεται από την συμπαραγωγή για την κάλυψη των θερμικών φορτίων είναι αρκετά μεγαλύτερη αναλογικά της ηλεκτροπαραγωγής σε σχέση με το σενάριο A2 και γι' αυτό οι αγορές φυσικού αερίου είναι λιγότερες. Όμως οι αγορές ηλεκτρισμού από το δίκτυο είναι αρκετά υψηλές και γι' αυτό παρατηρείται και πιο έντονη χρήση της ηλεκτρικής αποθήκευσης. Οι εκπομπές άνθρακα είναι μικρότερες αλλά το συνολικό κόστος είναι λίγο υψηλότερο λόγω του μεγάλου κόστους του εξοπλισμού (καινούργιες τεχνολογίες που δεν χρησιμοποιούνται ευρέως), πάντα σε σχέση με το σενάριο A2.

Στο σενάριο Aiii παρατηρούμε ότι η μηδενική επιβολή φόρου άνθρακα δεν επιφέρει κάποιες ουσιαστικές αλλαγές στα αποτελέσματα σε σύγκριση με το A2. Η μόνη ουσιαστική αλλαγή είναι στο συνολικό κόστος που ήταν και αναμενόμενη αφού τώρα το μικροδίκτυο δεν χρεώνεται τίποτα για τις εκπομπές άνθρακα.

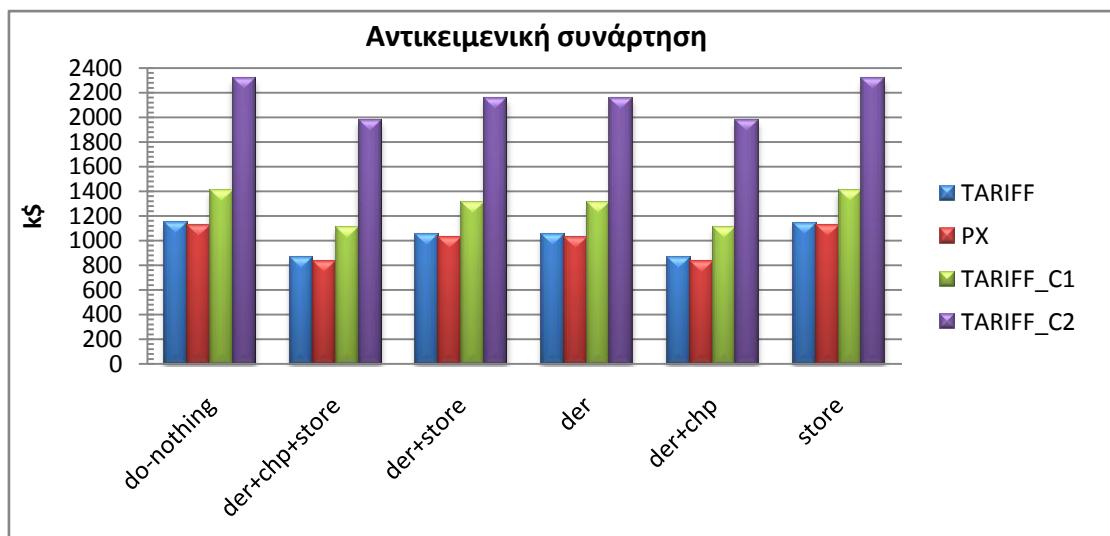
AI		Σi	Σii	Σiii
		DER + CHP + STORE - FREE FOR SELL	DER + CHP + STORE - ME FC KAI MT	DER + CHP + STORE - NO CARBON TAX
Εξοπλισμός				
τεχνολογίες παραγωγής		GA55 GA500(×2)	GA500 MTL-C-30(×2) CAP60 BOWMAN50(×2)	GA55 GA500(×2)
εγκατεστημένη ισχύς (kW)		1055	720	1055
παραγωγή (MWh)		6906,39	5018,9	7029,6
συμπαραγωγή θ (MWh)		5501,62	5695,6	5505,4
συμπαραγωγή ψ (MWh)		0	0	0
αποθήκευση (MWh)	IN	26,31	67,6	52,48
	OUT	13,54	36,4	26,53
χωρητικότητα μπαταρίας (kW)		87,92	213,27	178,89
Αγορές από το δίκτυο (MWh)				
ηλεκτρισμού		1723,1	3639,9	1623,96
φυσικού αερίου		926,9	732,9	923,09

Πωλήσεις στο δίκτυο (MWh)			
ηλεκτρισμού	10,86	0	0
Εκπομπές ρύπων (tn)			
CO ₂	1386,5	1298,2	1387,8
Κόστη (k\$)			
ηλεκτρισμού	158,7	328,74	150,81
φυσικού αερίου	34,43	27,24	34,28
τεχνολογιών παραγωγής	540,31	416,17	545,2
αποθήκευσης	1,74	4,23	3,54
φορολογίας CO ₂	124,78	116,84	-
έσοδα (-)	1,82	0	0
ΣΥΝΟΛΟ	858,14	893,2	733,83
Εξοικονόμηση σε σχέση με το ΑΣ1 ('do nothing')			
% εξοικονόμηση στο συνολικό κόστος	25,2	22,15	36,04
% εξοικονόμηση στην εκπομπή CO ₂	3,92	10,03	3,83

Πίνακας 10.5. Αποτελέσματα ειδικών σεναρίων

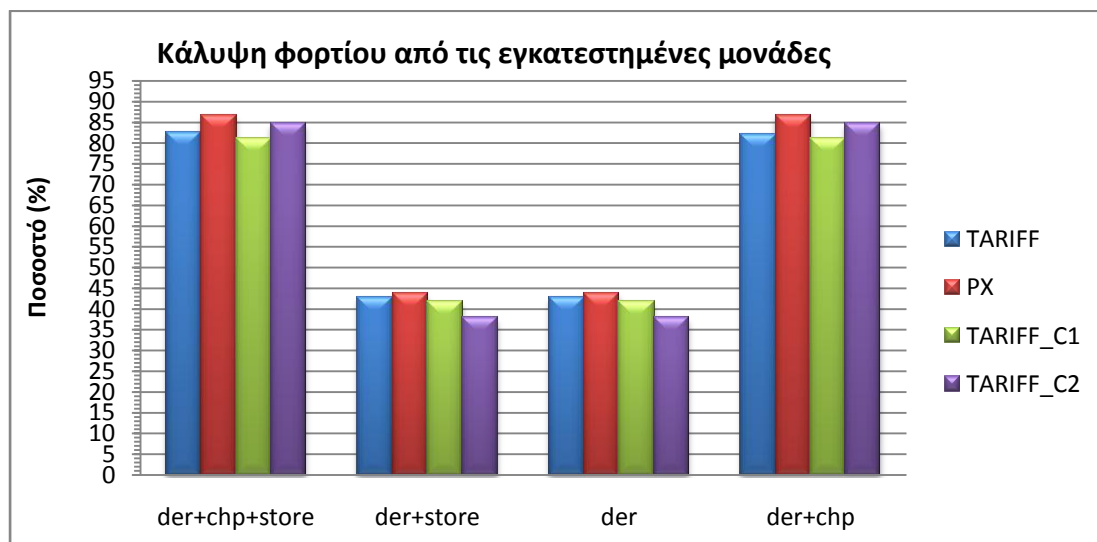
10.3 Συγκρίσεις αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα

Στα διαγράμματα 11 έως 17 παρουσιάζονται τα βασικότερα αποτελέσματα για όλα τα πιθανά σενάρια (εκτός από τα Ai – Aiii), δηλαδή κάθε τιμολογιακή πολιτική (TARIFF: χρέωση με προκαθορισμένο τιμολόγιο, PX: χρέωση με το τιμολόγιο CalPX, - ο φόρος άνθρακα είναι και στις δύο 0,09 \$/kg - TARIFF_C1: χρέωση με προκαθορισμένο τιμολόγιο και φόρο άνθρακα 0,27 \$/kg, TARIFF_C2: χρέωση με προκαθορισμένο τιμολόγιο και φόρο άνθρακα 0,9 \$/kg) και κάθε συνδυασμό τεχνολογιών.



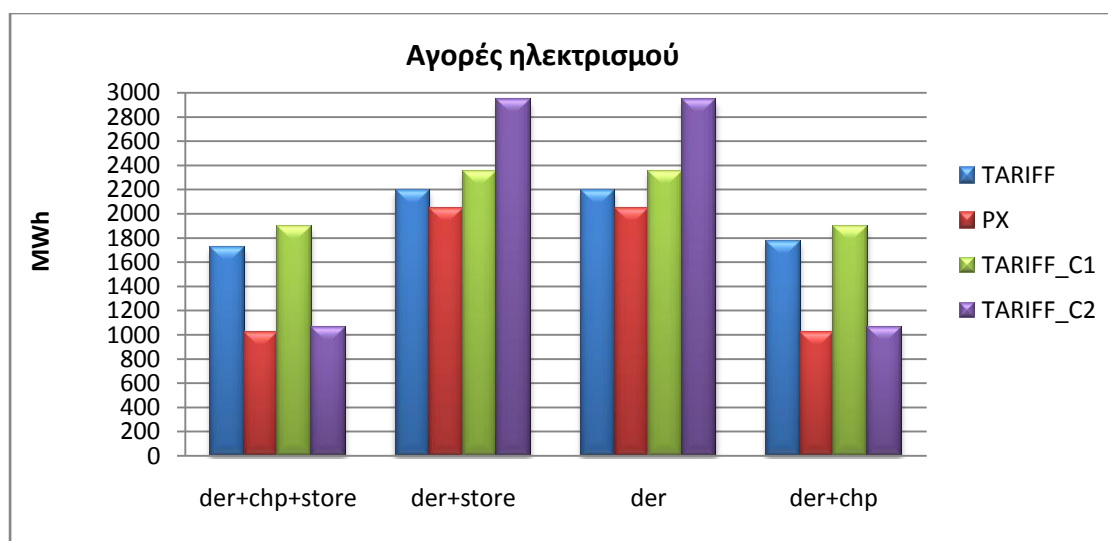
Διάγραμμα 10.11. Αντικειμενική συνάρτηση (συνολικό κόστος)

Από το διάγραμμα 11 είναι εμφανές ότι η επιβολή μεγάλου φόρου άνθρακα έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του συνολικού κόστους για όλες τις περιπτώσεις. Παρατηρούμε επίσης ότι το λιγότερο κόστος το πετυχαίνουμε σε κάθε περίπτωση με την τιμολογιακή πολιτική B (PX) και ότι για κάθε τιμολογιακή πολιτική η εγκατάσταση τεχνολογιών συμπαραγωγής και αποθήκευσης έχει σαν αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη μείωση του κόστους.



Διάγραμμα 10.12. Ποσοστό κάλυψης του φορτίου από τις εγκατεστημένες μονάδες

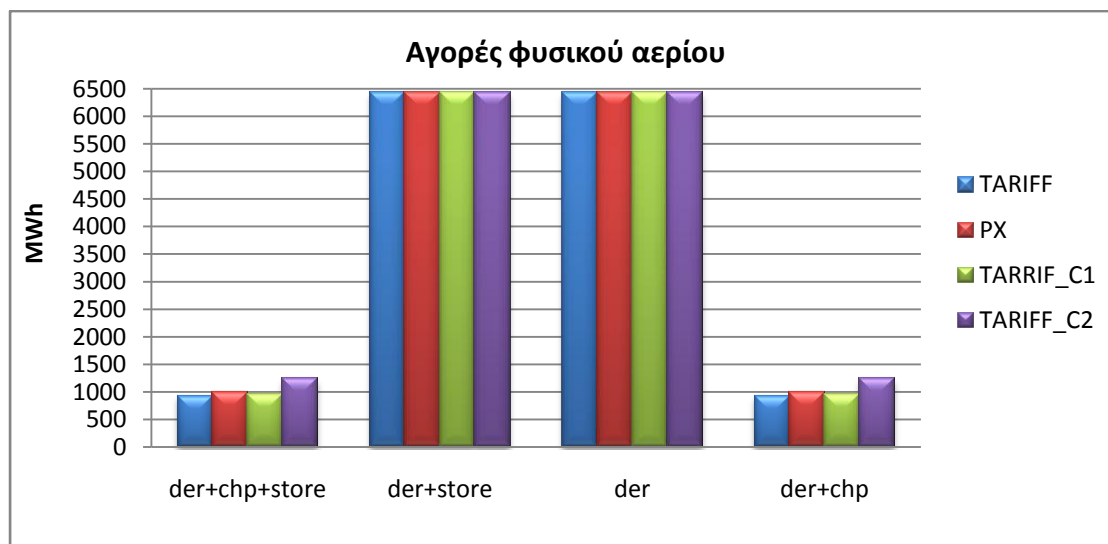
Στο διάγραμμα 12 μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η κάλυψη του φορτίου από τις εγκατεστημένες μονάδες γίνεται κατά πολύ περισσότερο όταν χρησιμοποιούμε τεχνολογίες συμπαραγωγής κάτι το οποίο εξηγεί και το γεγονός ότι σε αυτές τις περιπτώσεις οι αγορές ηλεκτρισμού και φυσικού αερίου είναι μειωμένες σε σχέση με εκείνες όπου είναι εγκατεστημένες τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής χωρίς τη δυνατότητα συμπαραγωγής, όπως φαίνεται στα διαγράμματα 13 και 14.



Διάγραμμα 10.13. Αγορές ηλεκτρισμού από το μακροδίκτυο

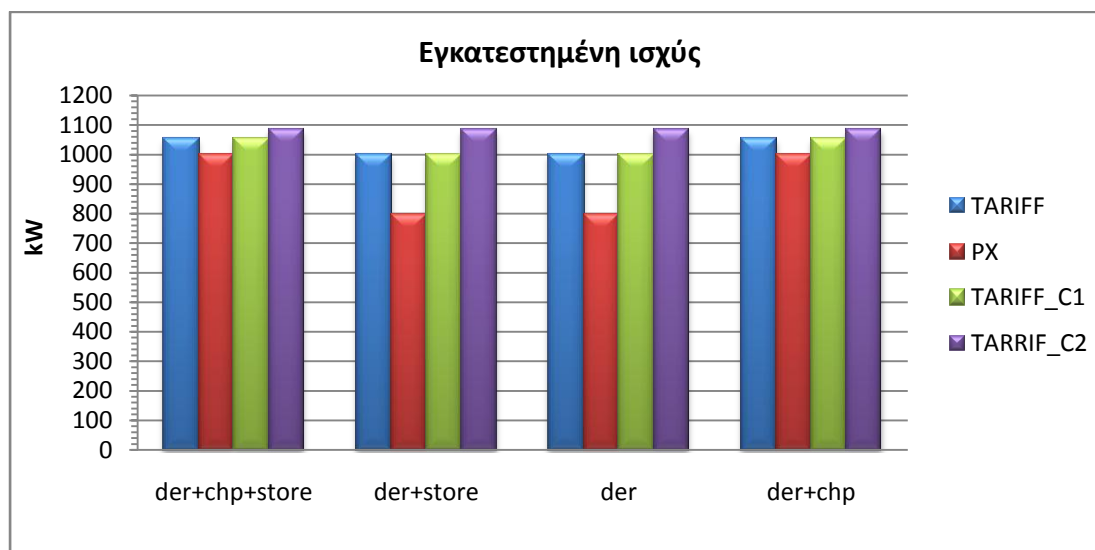
Οι αγορές ηλεκτρισμού είναι υψηλότερες στην περίπτωση όπου η φορολογία άνθρακα είναι μεγάλη (C2) και αυτό γιατί έχουν εγκατασταθεί φωτοβολταϊκά που έχουν

μηδενικές εκπομπές ρύπων αλλά δεν μπορούν παρέχουν την ίδια ισχύ με μία γεννήτρια εσωτερικής καύσης. Πάντως η εγκατάσταση οποιωνδήποτε τεχνολογιών παραγωγής μειώνει σημαντικά την αγορά ηλεκτρισμού σε σχέση με το σενάριο do-nothing (8627,6 kWh).



Διάγραμμα 10.14. Αγορές φυσικού αερίου από το μακροδίκτυο

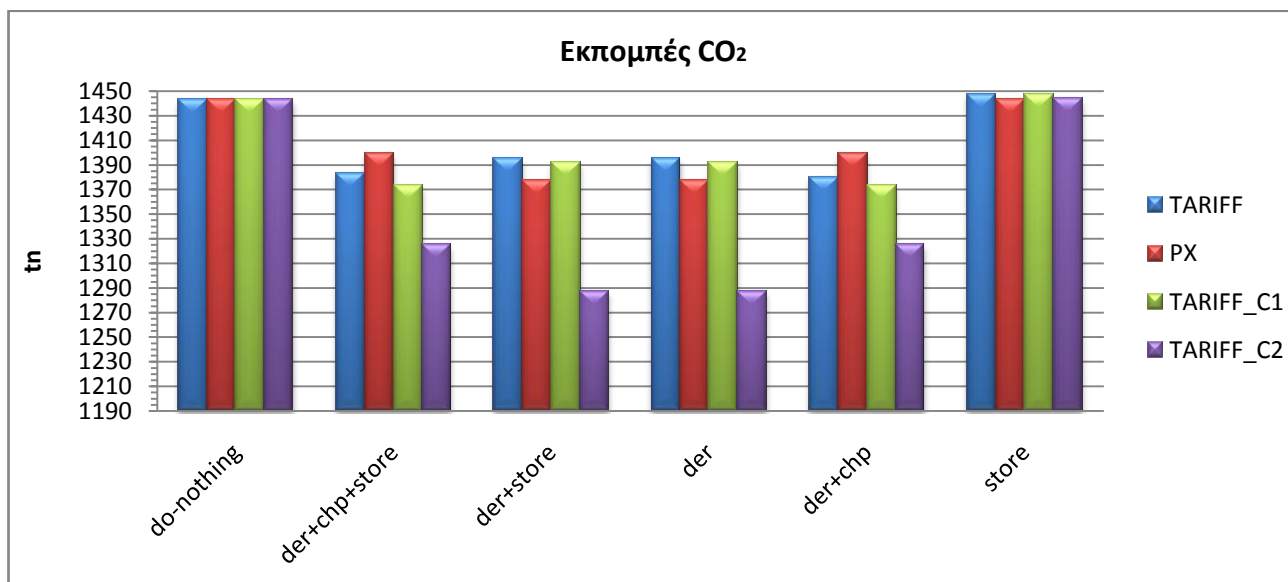
Τα θερμικά φορτία καλύπτονται από την θερμική ενέργεια που εκλύεται από τις τεχνολογίες συμπαραγωγής και από τις αγορές φυσικού αερίου. Επομένως, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 14, στην περίπτωση που δεν έχουμε τεχνολογίες συμπαραγωγής τα θερμικά φορτία καλύπτονται αποκλειστικά από αγορές φυσικού αερίου.



Διάγραμμα 10.15. Συνολικά εγκατεστημένη ισχύς εντός του μικροδικτύου

Από το διάγραμμα 15 συμπεραίνουμε ότι σε κάθε περίπτωση την λιγότερη εγκατεστημένη ισχύ την έχω στην περίπτωση PX ενώ παράλληλα έχω και τις λιγότερες αγορές ηλεκτρισμού (διάγραμμα 13). Για να συμβαίνει κάτι τέτοιο πρέπει οι εγκατεστημένες τεχνολογίες να λειτουργούν περισσότερες ώρες και να καλύπτουν μεγαλύτερο μέρος του φορτίου σε σχέση με τις άλλες περιπτώσεις (διάγραμμα 12).

Παρατηρούμε επίσης ότι στην τιμολογιακή πολιτική TARIFF_C2 η εγκατεστημένη ισχύ είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τις άλλες πολιτικές. Ειδικά στην περίπτωση όπου δεν έχω τεχνολογίες συμπαραγωγής παρόλο που η συνολικά εγκατεστημένη ισχύ είναι μεγαλύτερη, το ποσοστό κάλυψης του φορτίου (διάγραμμα 12) δεν είναι. Αυτό οφείλεται στην εγκατάσταση φωτοβολταϊκών που παράγουν ηλεκτρική ισχύ μόνο όταν υπάρχει επαρκής συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας.



Διάγραμμα 10.16. Συνολικές εκπομπές CO₂

Σχετικά με τις εκπομπές άνθρακα παρατηρούμε ότι η χρήση τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής για την κάλυψη του φορτίου συμβάλλει σημαντικά στη μείωση τους. Παράλληλα η αυξημένη φορολογία άνθρακα, όπως ήταν αναμενόμενο, συμβάλλει στην περαιτέρω μείωση των εκπομπών. Αξιοπρόσεκτο είναι και το γεγονός ότι η ηλεκτρική αποθήκευση έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση των εκπομπών κατά ένα πολύ μικρό ποσοστό.

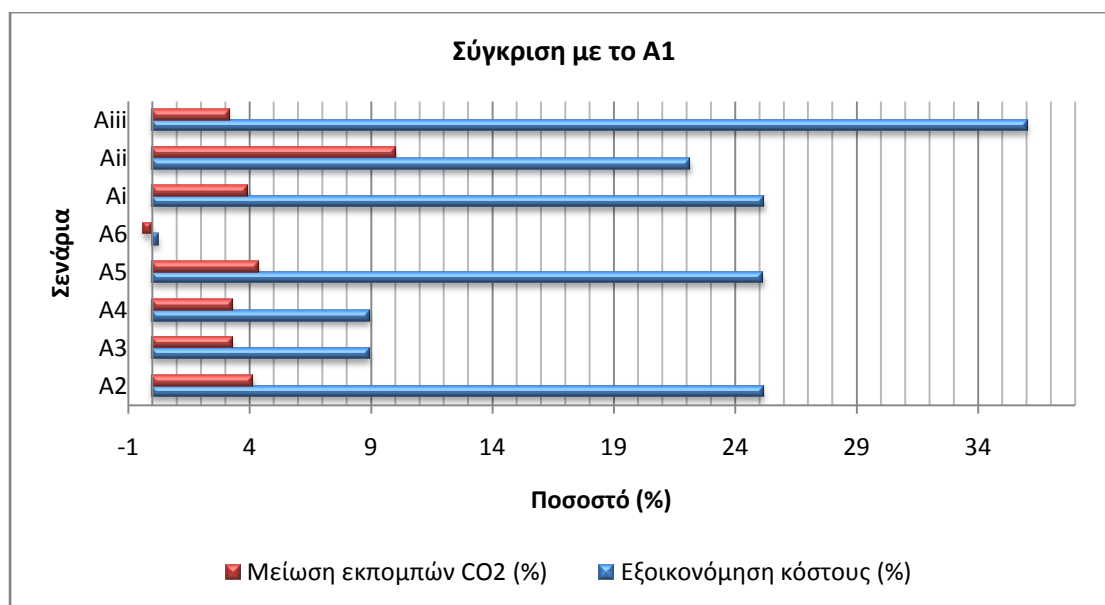


Διάγραμμα 10.17. Χωρητικότητα εγκατεστημένων μπαταριών οξέως-μολύβδου

Από το διάγραμμα 17 συμπεραίνουμε ότι η ηλεκτρική αποθήκευση δεν είναι τόσο ελκυστική στην συγκεκριμένη εφαρμογή. Με άλλα τιμολογιακά δεδομένα και άλλες

τεχνολογίες παραγωγής η ηλεκτρική αποθήκευση θα ήταν πιο έντονη. Γενικά παρατηρούμε ότι είναι πιο συμφέρουσα στην περίπτωση όπου στο μικροδίκτυο δεν υπάρχουν τεχνολογίες παραγωγής και έτσι είναι πιο οικονομικό να αγοράζεται επιπλέον ενέργεια από αυτή που απαιτείται για την κάλυψη του φορτίου τις ώρες μειωμένης ζήτησης και να χρησιμοποιείται τις ώρες αιχμής.

Στο διάγραμμα 18 γίνεται σύγκριση όλων των σεναρίων στα οποία εφαρμόστηκε η τιμολογιακή πολιτική A με φόρο άνθρακα 0,09 \$/kg, εκτός από το Aiii όπου ο φόρος άνθρακα είναι μηδενικός.



Διάγραμμα 10.18. Σύγκριση με το σενάριο 'do nothing' για την τιμολογιακή πολιτική A

Γενικά παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη εξοικονόμηση κόστους γίνεται στις περιπτώσεις όπου έχουν εγκατασταθεί τεχνολογίες συμπαραγωγής, αφού με την ίδια ποσότητα καυσίμου καλύπτονται περισσότερα φορτία. Γεγονός είναι ότι η μεγαλύτερη εξοικονόμηση επιτυγχάνεται όταν δεν υπάρχει η φορολογία άνθρακα, κάτι τέτοιο όμως έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση των εκπομπών CO₂. Η σημαντικότερη μείωση των εκπομπών CO₂ προκύπτει στην περίπτωση Aii όπου είναι εγκατεστημένες νέες τεχνολογίες (μικροτουρμπίνες) εντός του μικροδικτύου. Η εξοικονόμηση στο κόστος είναι λίγο μικρότερη συγκριτικά με τις περιπτώσεις όπου είναι εγκατεστημένες μηχανές εσωτερικής καύσης με CHP και αυτό λόγω του υψηλού κόστους κεφαλαίου των νέων τεχνολογιών. Η σημαντική μείωση όμως των εκπομπών CO₂ πιθανότητα να αξίζει την επένδυση επιπλέον κεφαλαίου σε νέες τεχνολογίες δεδομένου των κλιματικών συνθηκών και αλλαγών των τελευταίων χρόνων.

10.4 Οικονομική αξιολόγηση επένδυσης για το σενάριο A2

(εγκατάσταση τεχνολογιών συμπαραγωγής και αποθήκευσης και αγορά ενέργειας από το δίκτυο με προκαθορισμένο τιμολόγιο).

Για την πραγματοποίηση αυτής της οικονομικής ανάλυσης θεωρούμε ότι το συνολικό φορτίο του μικροδικτύου είναι σταθερό κάθε χρόνο. Το μικροδίκτυο σε αυτή την μελέτη ουσιαστικά είναι μία ξενοδοχειακή μονάδα οπότε η υπόθεση ότι το συνολικό ετήσιο φορτίο θα είναι ίδιο κάθε χρόνο δεν έχει μεγάλη αβεβαιότητα. Τα δεδομένα για τα κόστη είναι αυτά που έχουν εισαχθεί στο πρόγραμμα (βλ. κεφ. 9). Από τον πίνακα 1 έχουν προκύψει τα υπόλοιπα δεδομένα που χρειάζονται για τον υπολογισμό της περιόδου αποπληρωμής. Σε αυτό τον πίνακα στα κόστη τεχνολογιών συμπεριλαμβάνεται και το κόστος κεφαλαίου σύμφωνα με την ισοδύναμη ετήσια αξία τους. Εδώ τα κόστη τεχνολογιών χωρίζονται σε κόστη κεφαλαίου, έξοδα συντήρησης, πάγια και λειτουργικά έξοδα. Το επιτόκιο αναγωγής θεωρήθηκε ίσο με 7,5%.

Σε αυτό το σενάριο έχει επιλεγεί από το πρόγραμμα σαν βέλτιστη λύση η εγκατάσταση των γεννητριών GA55 και GA500 καθώς και η εγκατάσταση μπαταριών οξέως μολύβδου συνολικής χωρητικότητας ισχύος 87,92 kW. Το κόστος κεφαλαίου (κόστος επένδυσης – C) και τα ετήσια λειτουργικά έξοδα είναι:

GA55: $866 \text{ \$/kW} \cdot 55 \text{ kW} = 47630 \text{ \$}$

GA500: $(678 \text{ \$/kW} \cdot 500 \text{ kW}) \cdot 2 = 678000 \text{ \$}$ (εγκαταστάθηκαν 2 μονάδες GA500)

Lead-acid batteries: $60 \text{ \$/kW} \cdot 87,92 \text{ kW} = 5275,2 \text{ \$}$

Συνολικό κόστος κεφαλαίου (C): 730905,2 \\$

Ετήσια έξοδα συντήρησης και πάγια έξοδα για τεχνολογίες παραγωγής:

$(0,0033 \text{ \$/kWh} \cdot 6917,3 \text{ MWh}) + (26,5 \text{ \$/kW} \cdot 1055 \text{ kW}) = 50784,59 \text{ \$}$

Ετήσια έξοδα συντήρησης μπαταριών: $5 \text{ \$/kW} \cdot 87,92 \text{ kW} = 439,6 \text{ \$}$

Ετήσια συνολικά έξοδα συντήρησης και πάγια έξοδα εξοπλισμού: 51224,19 \\$

Αν δεν πραγματοποιούνταν αυτή η επένδυση τότε το κόστος για την κάλυψη του φορτίου ενός έτους θα ήταν (βλ. πίνακα 1) **1147350 \\$**. Με την εγκατάσταση των παραπάνω τεχνολογιών όμως το ετήσιο κόστος για την κάλυψη του φορτίου (πέρα από τα πάγια έξοδα και τα έξοδα συντήρησης) είναι:

$(0,0506 \text{ \$/kWh} \cdot 6917,3 \text{ MWh}) + 124470 \text{ \$} + 158680 \text{ \$} + 34430 \text{ \$} = 667595 \text{ \$}$

όπου σε αυτά αποτελούνται από το κόστος παραγωγής 1kWh (είναι ουσιαστικά το κόστος των καυσίμων), το κόστος από την επιβολή του φόρου άνθρακα και το κόστος για την αγορά ηλεκτρισμού και φυσικού αερίου για την κάλυψη του φορτίου που δεν καλύπτεται από τις εγκατεστημένες μονάδες παραγωγής.

Έτσι το ετήσιο όφελος (**F**) είναι: $1147350 \$ - (51224,19 \$ + 667595 \$) = 428530,81 \$$

Άρα η καθαρή περίοδος αποπληρωμής της επένδυσης είναι:

$$N_{καθ} = \frac{C}{F} = \frac{730905,2}{428530,81} = 1,71 \text{ έτη}$$

Και η έντοκη περίοδο αποπληρωμής θεωρώντας ως επιθυμητή απόδοση κεφαλαίου (επιτόκιο αναγωγής) $d=7,5\%$ είναι:

$$N_{εντ} = -\ln\left(1 - d \cdot \frac{C}{F}\right) / \ln(1 + d) = 1,9 \text{ έτη}$$

Δεδομένου ότι ο χρόνος ζωής των μπαταριών είναι 5 χρόνια και των τεχνολογιών παραγωγής είναι 15 χρόνια και βάσει της έντοκης περιόδου αποπληρωμής προκύπτει ότι η επένδυση είναι πολύ συμφέρουσα.

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μελέτη έγινε στα πλαίσια της διπλωματικής μου εργασίας και στόχο είχε να αναδείξει τα οφέλη των τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής και αποθήκευσης σε ένα μικροδίκτυο καθώς και την επίδραση της φορολογίας του άνθρακα χρησιμοποιώντας το μοντέλο DER - CAM. Έγινε προσπάθεια η μελέτη αυτή να είναι όσο πιο ρεαλιστική γίνεται και κοντά στην ελληνική πραγματικότητα. Είναι μία προσπάθεια συνέχειας, βελτίωσης και εξέλιξης προηγούμενων διπλωματικών εργασιών της σχολής μας. Ο κώδικας που δημιουργήθηκε στο πρόγραμμα GAMS είναι αρκετά αξιόπιστος και ρεαλιστικός. Παρόλα αυτά υπάρχουν και πάντα θα υπάρχουν, λόγω των τεχνολογικών εξελίξεων, περιθώρια εξέλιξης. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να είναι η εύρεση νέων δεδομένων φορτίων και τιμολογίων, η ένταξη τεχνολογιών θερμικής αποθήκευσης καθώς και θεμάτων αξιοπιστίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Michael Stadler, Chris Marnay, Afzal Siddiqui, Judy Lai, Brian Coffey, Hirohisa Aki “Effect of heat and electricity storage and reliability on microgrid viability: A study of commercial buildings in California and New York states”, Berkley National Laboratory, December 2008.
- [2] Suleiman Abu-Sharkh, Rachel Li, Tom Markvart, Neil Ross, Peter Wilson, Runming Yao, Koen Steemers, Jonathan Kohler and Ray Arnold, Microgrids: distributed on-site generation, March 2005
- [3] Lasseter, R., A. Akhil, C. Marnay, J. Stephens, J. Dagle, R. Guttromson, A.S. Meliopoulos, R. Yinger, and J. Eto “Integration of Distributed Energy Resources: The CERTS MicroGrid Concept”, 2002
- [4] Afzal S. Siddiqui, Ryan Firestone, Srijay Ghosh, Michael Stadler, Jennifer L. Edwards, and Chris Marnay “Distributed Energy Resources with Combined Heat and Power Applications” Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory University of California Berkeley, 2003
- [5] Ibrahim Dincer, Marc A Rosen, Adrian Bejan “Thermal Energy Storage, Systems and Applications”, John Wiley and sons, West Sussex, 2002
- [6] David Linden, Thomas B. Reddy “Handbook of Batteries”, 3rd Edition: McGraw-Hill, Inc., New York, 2002
- [7] Georg Hille, Dr Helen Rose Wilson, Werner Roth, Dr Heribert Schmidt, Course book for seminar “Photovoltaic Systems”, prepared as a part of the Comett project “Sunrise”
- [8] Energy Storage Association: www.electricitystorage.org
- [9] European SmartGrids Technology Platform, Vision and Strategy for Europe’s Electricity Networks of the Future, 2006
- [10] Νίκος Χατζηαργυρίου, Ευφυή δίκτυα διανομής για αυξημένη διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής, Εκδήλωση ΕΒΕΑ – Εφημερίδας Απογευματινή «ΕΝΕΡΓΕΙΑ – ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΠΑΡΚΑ», Αθήνα 18.04.2007
- [11] Αντώνιος Γ.Τσικαλάκης, «Συμβολή στον προγραμματισμό λειτουργίας δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με μεγάλη διείσδυση διεσπαρμένης και ανανεώσιμης παραγωγής και συσκευών αποθήκευσης», Διδακτορική διατριβή Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Ιούλιος 2008

- [12] Χρίστος Φραγκόπουλος, Ηλίας Καρυδογιάννης, Γιάννης Καραλής «Συμπααραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας», Ελληνικό Κέντρο Παραγωγικότητας, Νοέμβριος 2004
- [13] S. Hamilton, “Microturbine Generators,” Distributed Generation Project Report, California Energy Commission, Sept 1999
- [14] DER – CAM: <http://der.lbl.gov>
- [15] Michael C. Ferris, MATLAB and GAMS: Interfacing Optimization and Visualization Software, 2005
- [16] EURELECTRIC (Smart Grids and Networks of the future): <http://www2.eurelectric.org>
- [17] Γιάννης Χατζηβασιλειάδης, Τεχνολογίες και εφαρμογές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε νησιωτικές περιοχές, TEE, Μάιος 2009
- [18] Ι. Ψαρράς, «Διαχείριση Ενέργειας και Περιβαλλοντική Πολιτική», Αθήνα, 2005
- [19] <http://www.gams.com/docs/excel/>
- [20] The institution of engineering and technology: www.theiet.org
- [21] www.sciencedirect.com
- [22] Proceedings of the national academy of science: <http://www.pnas.org/>
- [23] <http://www.microgrids.eu/>
- [24] <http://smartgridcity.xcelenergy.com>
- [25] <http://www.distributed-generation.com/technologies.htm>
- [26] <http://en.wikipedia.org>
- [27] <http://ec.europa.eu/environment/>
- [28] http://www.cres.gr/energy_saving/
- [29] Green Peace Ελλάς: <http://www.greenpeace.org/greece>
- [30] <http://www.enet.gr/>
- [31] www.intelen.gr
- [32] D.Pavlov, G.Papazov and M.Gerganska, Battery Energy Storage Systems, UNESCO, Technical Report No. 7

- [33] Owen Bailey, Boubekour Ouaglal, Emily Bartholomew, Chris Marnay, and Norman Bourassa, An Engineering-Economic Analysis of Combined Heat and Power Technologies in a μ Grid Application, 2002
- [34] Afzal S. Siddiqui, Chris Marnay, Jennifer L. Edwards, Ryan M. Firestone, Srijay Ghosh and Michael Stadler “Effects of a Carbon Tax on Microgrid Combined Heat and Power Adoption” Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2004
- [35] Afzal S. Siddiqui, Anibal T. de Almeida, Chris Marnay, and F. Javier Rubio "The Implications of Carbon Taxation on μ Grid Adoption of Small-Scale On-Site Power Generation Using a Multi-Criteria Approach." Lawrence Berkeley National Laboratory Report, 2002
- [36] Price, L., Marnay, C., Sathaye, J., Murtishaw, S., Fisher, D., Phadke, A., and Franco, G. “The California Climate Action Registry: Development of Methodologies for Calculating Greenhouse Gas Emissions from Electricity Generation,” in Proceedings of the ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, Pacific Grove, CA, 2002
- [37] F. Javier Rubio, Afzal S. Siddiqui, Chris Marnay and Kristina S. Hamachi Consortium for Electric Reliability Technology Solutions CERTS Customer Adoption Model, 2001