



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

*Μοντελοποίηση και Διερεύνηση Αποκεντρωμένων
Αγορών στα πλαίσια Ενεργειακών Κοινοτήτων*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Νικόλαου Ι. Ατζαράκη

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάρτιος 2020



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

Μοντελοποίηση και Διερεύνηση Αποκεντρωμένων Αγορών
στα πλαίσια Ενεργειακών Κοινοτήτων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
του

Νικόλαου Ι. Ατζαράκη

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Φεβρουαρίου 2020.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Σταύρος Παπαθανασίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Παύλος Γεωργιλιάκης

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάρτιος 2020

(Υπογραφή)

.....

Νικόλαος Ι. Ατζαράκης

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

Copyright ©- All rights reserved. Νικόλαος Ι. Ατζαράκης, 2020
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

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.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του κυρίου Νικολάου Χατζηαργυρίου, καθηγητή Ε.Μ.Π.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή, κύριο Νικόλαο Χατζηαργυρίου, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Ιάσωνα Κουβελιώτη-Λυσικάτο και τον Φοίβο Παλαιογιάννη για την διαρκή καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές που μου παρείχαν.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αέναη στήριξη.

Νίκος Ατζαράκης

Περίληψη

Ο μετασχηματισμός του δικτύου μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια, δημιουργεί την αναγκαιότητα για την αναδιάρθρωση του μοντέλου αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μοντελοποίηση και η διερεύνηση ενός εναλλακτικού μοντέλου αποκεντρωμένης αγοράς στο πλαίσιο των Ενεργειακών Κοινοτήτων.

Κεντρική ιδέα της προτεινόμενης αποκεντρωμένης αγοράς σε παράλληλη λειτουργία με την κεντρική είναι η δυνατότητα αγοραπωλησίας της ενέργειας εντός της κοινότητας και η σύναψη οικονομικών σχέσεων μεταξύ των μελών. Η δομή αυτή αποσκοπεί στην βέλτιστη κατανομή των ενεργειακών πόρων, στην διαχείριση της ζήτησης, στην ενεργειακή αποδοτικότητα και ταυτόχρονα στην ελαχιστοποίηση του κόστους κάλυψης των ενεργειακών τους αναγκών.

Προκειμένου να αξιολογηθεί η λειτουργία της προτεινόμενης τοπικής αγοράς, συλλέχθηκαν δεδομένα που αφορούν στην πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας από τους καταναλωτές καθώς και την πρόβλεψη της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τους παραγωγούς. Στη συνέχεια διερευνήθηκε η λειτουργία των αγορών των ενεργειακών κοινοτήτων μέσα από την προσομοίωση διαφορετικών σεναρίων τα οποία αντιστοιχούν στις διαφορετικές τιμολογιακές πολιτικές που είτε είναι δυνατόν να εφαρμοστούν ήδη στις μέρες μας, είτε αναμένεται να εμφανιστούν στο εγγύς μέλλον και συζητούνται σε επίπεδο βιβλιογραφίας. Πραγματοποιείται σύγκριση με υφιστάμενες τιμολογιακές πολιτικές όπως είναι η Αυτοπαραγωγή, ο Ενεργειακός Συμφωνισμός και η Σταθερή Εγγυημένη Τιμή. Με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και των συγκρίσεων εξήχθησαν συμπεράσματα για την οικονομική βιωσιμότητα του εναλλακτικού μοντέλου της αποκεντρωμένης αγοράς εντός των Ενεργειακών Κοινοτήτων.

Με την χρήση της αλγοριθμικής εφαρμογής που αναπτύχθηκε επιτυγχάνεται η μαθηματική μοντελοποίηση της προτεινόμενης αγοράς και η πραγματοποίηση προσομοιώσεων. Για τις προσομοιώσεις αναπτύχθηκε μοντέλο χρησιμοποιώντας τη γλώσσα Julia και το πακέτο ανάπτυξης μοντέλων βελτιστοποίησης JuMP.

Λέξεις Κλειδιά: Ενεργειακή Κοινότητα, Διαχειριστής Κοινότητας, Πρόβλημα Βελτιστοποίησης, Διαχείριση Ζήτησης, Ενεργός Καταναλωτής, Έξυπνο Δίκτυο, Julia, JuMP.

Abstract

The transformation of the electricity transmission and distribution network observed in recent years creates the need to restructure the model of electricity market. This need is explored in the present thesis by testing an alternative decentralized market model within the Energy Communities.

The core idea of the proposed decentralized market, in conjunction with the central one, is the ability to market energy within the community and to establish financial relationships among its members. This structure aims to optimize the distribution of energy resources, management of demand and energy efficiency, and at the same time minimize the cost of meeting energy needs.

In order to evaluate the proposed local market, data has been collected forecasting the electricity demand of consumers as well as the forecasting of the volume of the production of electrical energy. Subsequently, the local market within energy communities was explored by simulating different scenarios that correspond to different pricing policies which may currently be implemented or are expected to appear in the near future and are discussed at the bibliographic level. Comparison is made between existing pricing policies such as Self-Consumption, Net Metering and Feed-In Tariff. Based on the results of the simulations and their comparisons, conclusions were drawn concerning the financial viability of the decentralized market within energy communities.

For the simulation of the above scenarios, the programming language “Julia” has been used in parallel with the domain-specific modeling language for mathematical optimization called “JuMP”.

Key Words:

Energy Community, Community Manager, Optimization Problem, Demand Management, Active Consumer, Smart Network, Julia, JuMP.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Abstract	5
Κατάλογος Σχημάτων.....	9
Κατάλογος Πινάκων	10
1. Εισαγωγή.....	13
1.1 Πλαίσιο της εργασίας	13
1.2 Στόχος Διπλωματικής και Προσέγγιση του Προβλήματος	15
1.3 Οργάνωση της Διπλωματικής Εργασίας	15
2. Ο Μετασχηματισμός του Δικτύου Ηλεκτρικής Ενέργειας	16
2.1 Το υφιστάμενο Μοντέλο Αγοράς.....	16
2.2 Εναλλακτικά Μοντέλα	20
2.3 Ομότιμες ενεργειακές αγορές (Peer-to-Peer Energy Markets)	23
2.4 Δομές των ομότιμων αγορών	24
2.4.1 Ελεύθερες Ομότιμες Αγορές (Full P2P Markets)	25
2.4.2 Ομότιμες Αγορές εντός των Ενεργειακών Κοινοτήτων	26
2.....	30
2.3 Υβριδικές Ομότιμες Αγορές (Hybrid P2P Markets).....	30
3. Ανάπτυξη του μοντέλου βελτιστοποίησης.....	32
3.1 Συμβολισμοί.....	33
3.3 Το Μαθηματικό Πρόβλημα της Βελτιστοποίησης.....	35
3.3.1 Ανάλυση των συντελεστών των συναρτήσεων g και h	42
3.4 Επίλυση του προβλήματος με χρήση της Γλώσσας Προγραμματισμού JULIA	47
4. Σενάρια και Προσομοιώσεις	54
4.1 Το Ενεργειακό Προφίλ των Καταναλωτών/Παραγωγών	55
4.2 Ενεργειακή Κοινότητα.....	62
4.2.1 Ενεργειακή Κοινότητα με 15 μέλη και ευέλικτο φορτίο.....	62
4.2.2 Ενεργειακή Κοινότητα με 15 μέλη χωρίς ευέλικτο φορτίο.....	71
4.2.3 Ενεργειακή Κοινότητα με 100 μέλη	74
4.2.3 Ενεργειακή Κοινότητα με 30 μέλη και Ευέλικτο φορτίο.....	77
4.3 Αυτοπαραγωγή.....	78

4.4 Σταθερή Εγγυημένη Τιμή	86
4.5 Ενεργειακός Συμψηφισμός	88
4.6 Αξιολόγηση των Αποτελεσμάτων των Προσομοιώσεων	91
5. Συμπεράσματα.....	94
5.2 Πλεονεκτήματα της Προτεινόμενης Αγοράς.....	95
5.3 Προτάσεις για Μελλοντική Εύρενα	96
Βιβλιογραφία.....	98
Ελληνική Νομοθεσία.....	99
Κώδικες	100

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1. Διαδικασία Υποβολής Προσφορών και Προβλέψεων. [3]	17
Σχήμα 2. Οριακή Τιμή Συστήματος. [4]	18
Σχήμα 3. Συναλλαγές Καταναλωτών και Προμηθευτών.	19
Σχήμα 4.Μετασχηματισμός Δικτύου. [7]	21
Σχήμα 5.Εναλλακτική Μορφή Αγοράς. [2]	22
Σχήμα 6.Ελεύθερη Ομότιμη Αγορά. [2]	26
Σχήμα 7. Ενεργειακές Κοινότητες και Κεντρική Αγορά. [2]	28
Σχήμα 8. Δομή Ενεργειακών Κοινοτήτων. [1]	29
Σχήμα 9. Υβριδική Μορφή Ομότιμης Αγορά. [2]	30
Σχήμα 10. Αλληλοεπίδραση μελών της κοινότητας	35
Σχήμα 11. Μέλος Ενεργειακής Κοινότητας. [1]	37
Σχήμα 12. Ανάλυση του συντελεστή $coef_{expg}$	42
Σχήμα 13. Ανάλυση Συντελεστή $coef_{expg}$	43
Σχήμα 14. Ανάλυση Συντελεστή $coef_{expb}$	44
Σχήμα 15. Ανάλυση Συντελεστή $coef_{comh}$	45
Σχήμα 16. Ανάλυση Συντελεστή $coef_{comh}$	46
Σχήμα 17. Πρόβλεψη Παραγωγής Φωτοβολταϊκού Μέλους 1	56
Σχήμα 18. Πρόβλεψη Παραγωγής Φωτοβολταϊκού Μέλους 1	57
Σχήμα 19. Πρόβλεψη Παραγωγής Φωτοβολταϊκού Μέλους 2	58
Σχήμα 20. Πρόβλεψη Ζήτηση Μέλους 1	59
Σχήμα 21. Πρόβλεψη Ζήτηση Μέλους 6	60
Σχήμα 22. Πρόβλεψη Ζήτησης χωρίς Ευέλικτο Φορτίο	61

Σχήμα 23. Συνολική Ωριαία Εισαγόμενη ισχύς στη Κοινότητα την αντιπροσωπευτική ημέρα του Απριλίου	65
Σχήμα 24. Συνολική Ωριαία Εξαγόμενη ισχύς από την Κοινότητα	66
Σχήμα 25. Καμπύλη Ζήτησης και Ευέλικτο Φορτίο ενός τυπικού καταναλωτή.....	67
Σχήμα 26. Ενέργεια που ανταλλάχθηκε εντός της κοινότητας	69
Σχήμα 27. Ενέργεια που ανταλλάχθηκε εντός της κοινότητας	70
Σχήμα 28. Πρόβλεψη Ζήτησης χωρίς Ευέλικτο Φορτίο	72
Σχήμα 29. Καμπύλη Ζήτησης με τυχαιότητα	75
Σχήμα 30. Μείωση Παραγωγής για Αποσυμφόρηση του Δικτύου	83
Σχήμα 31. Συνολική Σύγκριση Αποτελεσμάτων.....	92
Σχήμα 32. Σύγκριση μεγάλης και μικρής Κοινότητας.....	93

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Συνολική ενέργεια που συναλλάχθηκε από τα 15 μέλη της κοινότητας με ευέλικτο φορτίο	63
Πίνακας 2. Συνολική οικονομική επιβάρυνση/όφελος για την κοινότητα.	64
Πίνακας 3. Συνολική ενέργεια που συναλλάχθηκε από τα 15 μέλη της κοινότητας με ευέλικτο φορτίο	72
Πίνακας 4. Συνολική οικονομική επιβάρυνση/όφελος για την κοινότητα	73
Πίνακας 5. Σύγκριση 15μελούς κοινότητας με και χωρίς ευέλικτο φορτίο	73
Πίνακας 6. Συνολική ενέργεια που συναλλάχθηκε από τα 100 μέλη της κοινότητας με ευέλικτο φορτίο.....	76
Πίνακας 7. Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος.....	76
Πίνακας 8. Συνολική ενέργεια που συναλλάχθηκε από τα 30 μέλη της κοινότητας με ευέλικτο φορτίο	77
Πίνακας 9. Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος.....	77

Πίνακας 10. Σύγκριση 15μελούς και 30μελούς Κοινότητας.....	78
Πίνακας 11. Συνολική ενέργεια που συναλλάχθηκε από 15 αυτοπαραγωγούς.....	80
Πίνακας 12. Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος.....	81
Πίνακας 13. Σύγκριση Αυτοπαραγωγής και Τοπικής Αγοράς Ενεργειακής Κοινότητας.....	81
Πίνακας 14. Ετήσια Απόδοση Επένδυσης	82
Πίνακας 15. Αποσυμφόρηση Δικτύου με την Τοπική Αγορά.....	82
Πίνακας 16. Συνολική Ενέργεια που συναλλάχθηκε απο 100 Αυτοπαραγωγούς.....	84
Πίνακας 17. Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος.....	85
Πίνακας 18. Σύγκριση 100 τυχαίων καταναλωτών	85
Πίνακας 19. Συνολική Ενέργεια που συναλλάχθηκε στην Σταθερή Εγγυημένη Τιμή.....	86
Πίνακας 20. Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος.....	87
Πίνακας 21. Σύγκριση Σταθερής Εγγυημένης Τιμής και Τοπικής Αγοράς.....	87
Πίνακας 22. Ετήσια Απόδοση Επένδυσης	88
Πίνακας 23. Συνολική ενέργεια που συναλλάχθηκε στον Ενεργειακό Συμψηφισμό	89
Πίνακας 24. Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος.....	89
Πίνακας 25. Σύγκριση Ενεργειακού Συμψηφισμού και Τοπικής Αγοράς.....	90
Πίνακας 26. Ετήσια Απόδοση	90

1. Εισαγωγή

1.1 Πλαίσιο της εργασίας

Η διαρκής εκμετάλλευση ορυκτών πόρων και μη Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (γαιάνθρακες, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχει σαν αποτέλεσμα την απελευθέρωση επιβλαβών ουσιών και αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα. Για την μείωση των εκπομπών αερίων και την πρόληψη εκδήλωσης δυσμενέστερων συνεπειών της κλιματικής αλλαγής, το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο έθεσε οδηγίες σύμφωνα με τις οποίες καθορίζεται το ποσοστό συμμετοχής της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε) στην τελική κατανάλωση ενέργειας σε εθνικό επίπεδο. Σύμφωνα με Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ 2019), ορίζεται ως στόχος η συμμετοχή της ενέργειας που παράγεται από Α.Π.Ε στην ακαθάριστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε ποσοστό τουλάχιστον 60%. Σαν ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας ορίζονται τα ενεργειακά βασικά προϊόντα που παραδίδονται για ενεργειακούς σκοπούς στη βιομηχανία, στις μεταφορές, στα νοικοκυριά, στις υπηρεσίες, συμπεριλαμβανομένης της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας από τον ενεργειακό κλάδο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας κατά τη διανομή και τη μεταφορά. Επιπλέον ορίζεται σαν στόχος η συμμετοχή της ενέργειας που παράγεται από Α.Π.Ε στην τελική κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη σε ποσοστό τουλάχιστον 40% και στην τελική κατανάλωση ενέργειας στις μεταφορές σε ποσοστό τουλάχιστον 14% [ΕΣΕΚ 2019].

Οι παραπάνω στόχοι έχουν οδηγήσει στην ραγδαία αύξηση των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε τόσο σε μεγάλους σταθμούς όσο και σε μεμονωμένα Φωτοβολταϊκά στοιχεία σε στέγες κτιρίων. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνονται και οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας οι

οποίες βρίσκονται υπό την ιδιοκτησία φυσικών προσώπων. Για παράδειγμα καταναλωτές οι οποίοι εγκαθιστούν Φωτοβολταϊκές Μονάδες και εντάσσονται στο πρόγραμμα Ενεργειακού Συμφηφισμού. Συνεπώς εκτός από την αναδιάρθρωση του Συστήματος και Δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, παρατηρείται μεταβολή στον ρόλο του τελικού χρήστη. Υπό αυτήν την έννοια ο τελικός χρήστης λαμβάνει μέρος στη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, στην διαχείριση της ζήτησης και στην κάλυψη των ενεργειακών του αναγκών από ιδιόκτητη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ακολούθως, είναι αναγκαία η διερεύνηση καινοτόμων και εναλλακτικών μοντέλων αγοράς ώστε ο τελικός καταναλωτής να διαδραματίζει ενεργό ρόλο στην αγορά της ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι εναλλακτικές δομές αγοράς θα μπορούσαν να χαρακτηρισθούν ως «από κάτω προς τα πάνω», προσδίδοντας έτσι κύριο ρόλο στον καταναλωτή και τελικό χρήστη. Οι δομές αυτές δημιουργούν το κίνητρο εγκατάστασης φωτοβολταϊκών στοιχείων στις στέγες και συνεπώς εντείνουν τις προσπάθειες επίτευξης των στόχων συμμετοχής ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από Α.Π.Ε στην τελική κατανάλωση ενέργειας. Επιπλέον, στοχεύουν στην μείωση του κόστους που επιβαρύνονται οι καταναλωτές για την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών.

Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η ανάδειξη του μοντέλου της τοπικής αγοράς εντός των Ενεργειακών Κοινοτήτων. Σύμφωνα με την παράγραφο 1 του Άρθρου 1 του ν. 4513/2018 ως Ενεργειακή Κοινότητα ορίζεται ο αστικός συνεταιρισμός αποκλειστικού σκοπού με στόχο την προώθηση της κοινωνικής και αλληλέγγυας οικονομίας, της καινοτομίας στον ενεργειακό τομέα, την αντιμετώπιση της ενεργειακής ένδειας και την προαγωγή της ενεργειακής αειφορίας. Επιπλέον επιδιώκεται η βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας στην τελική χρήση μέσω δραστηριοποίησης των μελών της Ενεργειακής Κοινότητας στους τομείς των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, της ορθολογικής χρήσης ενέργειας και της διαχείρισης της ζήτησης.

Στα πλαίσια της Διπλωματικής Εργασίας, θεωρούμε ότι μία Ενεργειακή Κοινότητα αποτελείται από μέλη οι οποίοι διαθέτουν μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Φωτοβολταϊκά σε στέγες και συνεργάζονται κάτω από έναν κοινό κόμβο, τον διαχειριστή της κοινότητας (Community Manager). Στόχος των μελών της κοινότητας είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους που επιβαρύνονται από την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της δημιουργίας τοπικών συναλλαγών και αγοραπωλησιών [1], [2]. Υπό αυτήν την έννοια, τα μέλη της κοινότητας έχουν την δυνατότητα να αγοράζουν ηλεκτρική ενέργεια από άλλα μέλη, καθώς και να πωλούν την παραγόμενη ενέργεια εκτός της κοινότητας, δηλαδή στους προμηθευτές τους [1], [3].

1.2 Στόχος Διπλωματικής και Προσέγγιση του Προβλήματος

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η υλοποίηση ενός μοντέλου με σκοπό την επίλυση του προβλήματος της τοπικής αγοράς των Ενεργειακών Κοινοτήτων μέσα από προσομοιώσεις διαφόρων σεναρίων. Θεωρούμε ότι με τη χρήση έξυπνων μετρητών, έξυπνων ελεγκτών φορτίου και ευέλικτου φορτίου, έχουμε την δυνατότητα ανάκτησης δεδομένων τόσο για το φορτίο όσο και για την παραγωγή των μελών της κοινότητας καθώς επίσης και τη διαχείρισή. Σύμφωνα με αυτά τα δεδομένα επιλύεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης, με στόχο την οικονομικότερη κατανομή των πόρων αλλά και την εκπλήρωση των προτιμήσεων και αναγκών των μελών.

Για την αξιολόγηση της οικονομικής βιωσιμότητας του προτεινόμενου μοντέλου, πραγματοποιούμε σύγκριση με υφιστάμενες τιμολογιακές πολιτικές όπως είναι η Αυτοπαραγωγή, ο Ενεργειακός Συμφωνισμός και η Σταθερή Εγγυημένη Τιμή.

1.3 Οργάνωση της Διπλωματικής Εργασίας

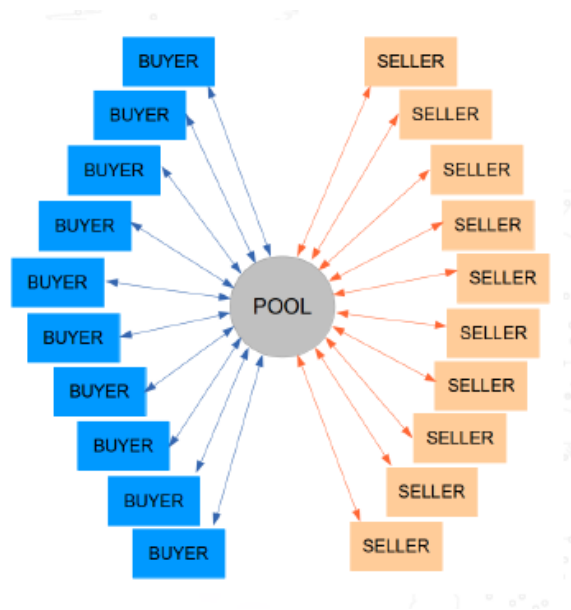
Η παρούσα διπλωματική εργασία διαρθρώνεται ως εξής:

- Στο 2^ο Κεφάλαιο παρατίθεται το θεωρητικό υπόβαθρο γύρω από τις διάφορες δομές της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και εισάγεται η έννοια των Ομότιμων αγορών.
- Στο 3^ο Κεφάλαιο ορίζεται το πρόβλημα της βελτιστοποίησης και παρουσιάζονται τα εργαλεία επίλυσής του.
- Στο 4^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα διάφορα σενάρια προσομοίωσης, τα αποτελέσματα και η σύγκριση μεταξύ των διαφόρων σεναρίων.
- Στο 5^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

2. Ο Μετασχηματισμός του Δικτύου Ηλεκτρικής Ενέργειας

2.1 Το υφιστάμενο Μοντέλο Αγοράς

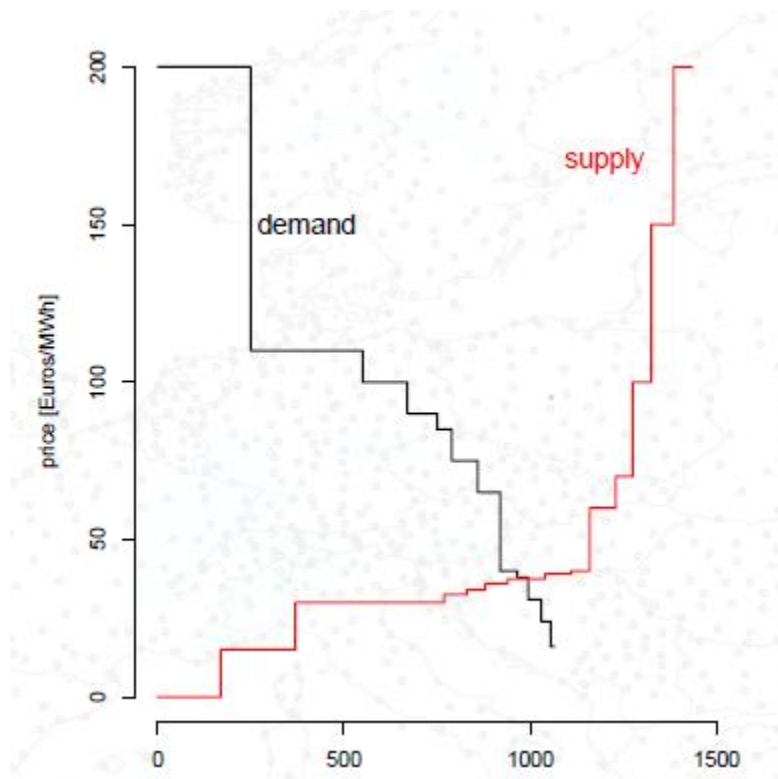
Το υφιστάμενο μοντέλο αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο μπορεί να χαρακτηριστεί ως «από πάνω προς τα κάτω», βασίζεται στην διαδικασία των δημοπρασιών προκειμένου να καθοριστεί η χονδρική τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας, σε €/MWh, δηλαδή η τιμή στην οποία η προμηθευτές αγοράζουν την ενέργεια από τους παραγωγούς και στην συνέχεια την πωλούν στους καταναλωτές σε λιανική τιμή, διαφορετική από την χονδρική [Πηγή ΔΑΠΕΕΠ]. Πιο αναλυτικά, με την διαδικασία της ανταγωνιστικής υποβολής προσφορών υπολογίζεται η οριακή τιμή του συστήματος για κάθε ώρα της επομένης ημέρας με βάση τον Ημερήσιο Ενεργειακό Προγραμματισμό (ΗΕΠ). Οι παραγωγοί και οι προμηθευτές αποστέλλουν τις προβλέψεις παραγωγής και ζήτησης και τις τιμές τους για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της επόμενης ημέρας διατηρώντας την πλήρη εχεμύθεια των προσφορών αυτών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1. Διαδικασία Υποβολής Προσφορών και Προβλέψεων. [3]

Έπειτα από την συλλογή των παραπάνω προσφορών, η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (Ρ.Α.Ε) συντάσσει τον Ημερήσιο Ενεργειακό Προγραμματισμό (Η.Ε.Π), ώστε να οργανώσει το μοντέλο της χονδρεμπορικής αγοράς σύμφωνα με το οποίο συναλλάσσεται το σύνολο της ηλεκτρικής ενέργειας που θα παραχθεί, θα καταναλωθεί και θα διακινηθεί την επόμενη ημέρα στην Ελλάδα [πηγή Ρ.Α.Ε].

Πιο συγκεκριμένα, ο προσδιορισμός της οριακής τιμής του συστήματος για κάθε ώρα της επόμενης ημέρας είναι αποτέλεσμα μιας αλγοριθμικής εφαρμογής στην οποία εισέρχονται οι προσφορές παραγωγής και ζήτησης. Το σημείο τομής των δύο καμπυλών για κάθε ώρα της επόμενης ημέρας θα αποτελέσει την οριακή τιμή του συστήματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.

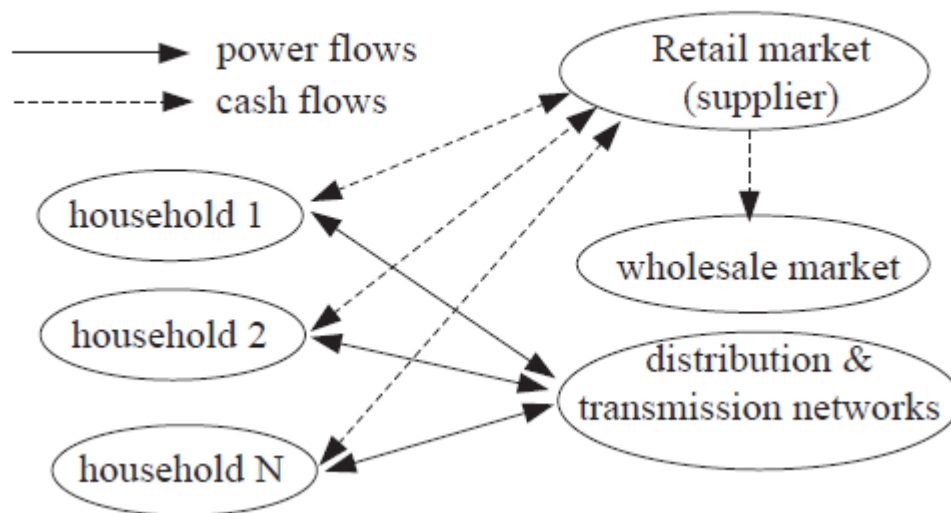


Σχήμα 2. Οριακή Τιμή Συστήματος. [4]

Από το Σχήμα 2 συμπεραίνουμε πως η χονδρική τιμή πώλησης για την συγκεκριμένη ώρα της επομένης ημέρας θα είναι το σημείο τομής των δύο καμπυλών (demand,supply), και θα είναι ελαφρώς χαμηλότερη από 50 €/MWh [4].

Από την διαδικασία της δημοπρασίας προσδιορίζεται ποιες θερμικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα εγγέουν ενέργεια στο Σύστημα. Οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε που συμμετέχουν στην παραπάνω διαδικασία (με μηδενική προσφορά τιμής ενέργειας) θα έχουν την δυνατότητα να εγγέουν ενέργεια στο Σύστημα ή Δίκτυο. Με αυτό το τρόπο εξασφαλίζεται η ενσωμάτωση των μονάδων παραγωγής από Α.Π.Ε και συνεπώς η ενίσχυση του ποσοστού της παραγόμενης ενέργειας από Α.Π.Ε του Ενεργειακού Μείγματος κάθε Προμηθευτή. Σαν Ενεργειακό Μείγμα Προμηθευτή ορίζουμε τον καταμερισμό των πελατών του εκάστοτε προμηθευτή στις ενεργειακές πηγές που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή της.

Η λιανική τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας καθορίζεται από τους προμηθευτές με βάση την χονδρική τιμή πώλησης που προσδιορίστηκε παραπάνω. Συνεπώς οι καταναλωτές καλούνται να πληρώσουν για την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών σε μία τιμή η οποία εμμέσως καθορίζεται από την διαδικασία των δημοπρασιών. Επιπλέον, το εμπόριο ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ καταναλωτών και προμηθευτών βασίζεται σε συμβόλαια στα οποία υπάρχει διακριτή ροή χρήματος και ενέργειας όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3. Συναλλαγές Καταναλωτών και Προμηθευτών.

Επομένως οι καταναλωτές δεν έχουν τη δυνατότητα σύναψης συμβολαίου με περισσότερους από έναν προμηθευτή. Όπως θα δείξουμε παρακάτω, η υιοθέτηση της τοπικής αγοράς εντός της Ενεργειακής Κοινότητας θα δώσει στους καταναλωτές την δυνατότητα να αγοράζουν ηλεκτρική ενέργεια από παραπάνω από μία οντότητες.

Σε ότι αφορά τους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκούς σταθμούς εγκατεστημένης ισχύος μικρότερη των 100 kWp, σύμφωνα με τον νόμο 4602/2019 για έργα που τίθενται σε λειτουργία έως 31/12/2019 η Τιμή Αναφοράς (Τ.Α) για το έτος n ανέρχεται σε $1,2 * \mu\text{OTS}_{n-1}$, όπου μOTS_{n-1} είναι η μέση τιμή της οριακής τιμής συστήματος για το $n-1$ έτος, δηλαδή για το προηγούμενο έτος. Η τιμή αυτή αφορά μονάδες παραγωγής που είναι στο διασυνδεδεμένο δίκτυο.

Για τα συγκεκριμένα έργα μπορεί να εφαρμόζεται ο υποστηρικτικός μηχανισμός των εγγυημένων σταθερών τιμών. Επομένως η τιμή αποζημίωσης για την εγχεόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τους παραγωγούς στο δίκτυο ανέρχεται, ενδεικτικά, σε 0.08 €/kWh.

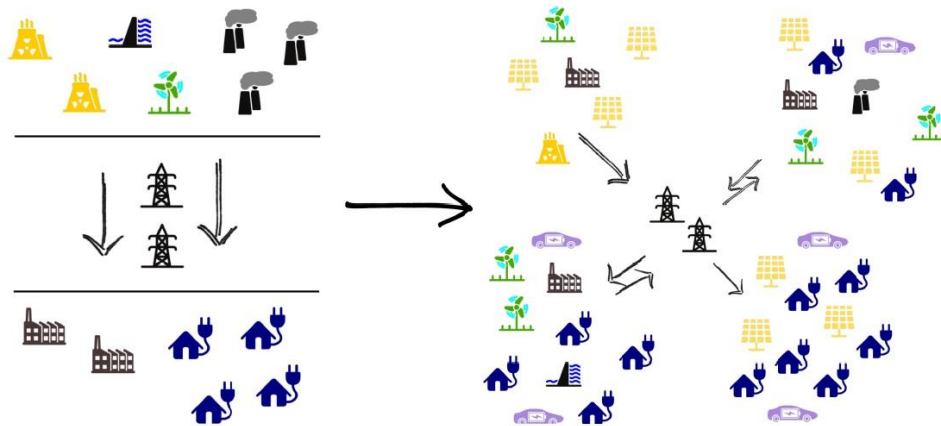
Για επενδυτές με έργα που τίθενται σε λειτουργία από 01/01/2020 η Τιμή Αναφοράς προκύπτει ως 1,05*μεσοσταθμική Τιμή Αναφοράς που προέκυψε κατά τις 3 προηγούμενες πριν την τελευταία ανταγωνιστικές διαδικασίες υποβολής προσφορών που αφορούν την ίδια τεχνολογία. Για παράδειγμα αν υποθέσουμε ότι το 2019 έγινε μία μόνο ανταγωνιστική διαδικασία για φωτοβολταϊκά τότε η Τιμή Αναφοράς προκύπτει 0.069 €/kWh ενώ αν υποθέσουμε ότι διενεργήθηκαν δύο διαγωνισμοί τότε η Τιμή Αναφοράς προκύπτει 0.07 €/kWh.

Εντούτοις, η διαφορά μεταξύ της λιανικής τιμής πώλησης από τους προμηθευτές και της τιμής πώλησης από τους παραγωγούς προς τους προμηθευτές, δεν αποφέρει σημαντικό κέρδος στους καταναλωτές που εγκαθιστούν μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και συνεπώς αποτελεί τροχοπέδη στην εγκατάσταση μονάδων παραγωγής μικρής κλίμακας [2].

2.2 Εναλλακτικά Μοντέλα

Η μετάβαση προς ένα φιλικότερο για το περιβάλλον και αποδοτικότερο μοντέλο διαχείρισης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας φαίνεται όλο και περισσότερο ενδιαφέρουσα καθώς ο ρυθμός διείσδυσης των Α.Π.Ε στο ήδη υπάρχον σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι ο μεγαλύτερος των τελευταίων ετών. Παράλληλα, η κλιματική αλλαγή και οι ανησυχητικές για το περιβάλλον επιπτώσεις από την χρήση των ορυκτών καυσίμων ωθούν τις περισσότερες χώρες ανά τον κόσμο να στραφούν σε ανανεώσιμες πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τον ρυθμό εγκατάστασης σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε να είναι συνεχώς αυξανόμενος. Ακολουθως αυξάνεται και η τάση απομάκρυνσης από το μοντέλο της κεντρικής παραγωγής με τη μεταφοράς της κοντά στον καταναλωτή [3], [4]. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η αποσυμφόρηση του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αφού η παραγωγή πλησιάζει όσο το δυνατόν περισσότερο το φορτίο, δηλαδή τους τελικούς χρήστες [5], [6]. Επιπλέον μειώνονται σημαντικά τα υψηλά κόστη μεταφοράς αφού

ελαχιστοποιούνται οι απώλειες ισχύος τις οποίες δημιουργούν τα μεγάλα σε μήκος δίκτυα μέσης και υψηλής τάσης. Η παραπάνω τάση παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.Μετασχηματισμός Δικτύου.



Σχήμα 4.Μετασχηματισμός Δικτύου. [7]

Παράλληλα με τον μετασχηματισμό του μοντέλου «από πάνω προς τα κάτω δικτύου», που παρουσιάστηκε προηγουμένως, αναθεωρείται και ο ρόλος που διαδραματίζουν οι καταναλωτές.

Οι τελικοί χρήστες θα πρέπει να συμμετέχουν ενεργά στην παραγωγή, διαχείριση και στο εμπόριο της ηλεκτρικής ενέργειας [6]. Αυτή η μετάβαση θα τους δώσει το απαιτούμενο κίνητρο για εξοικονόμηση, ενεργειακή αναβάθμιση και στροφή προς ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Οι εναλλακτικές μορφές αγορών έχουν σαν στόχο να δώσουν στους καταναλωτές την δυνατότητα δημιουργίας οικονομικών σχέσεων και συναλλαγών μεταξύ ανθρώπων που δεν αποτελούν κατ' ανάγκη επιχειρηματικές οντότητες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.Εναλλακτική Μορφή Αγοράς.



Σχήμα 5.Εναλλακτική Μορφή Αγοράς. [2]

Ακολούθως, δημιουργείται μια νέα κοινωνική σχέση μεταξύ ατόμων που διαθέτουν μονάδες παραγωγής (π.χ. φωτοβολταϊκά σε στέγες) και ατόμων που επιθυμούν να αγοράσουν ηλεκτρική ενέργεια χωρίς την ύπαρξη μεσάζοντα (προμηθευτή) ενώ ταυτόχρονα δημιουργείται ανταγωνισμός στο εμπόριο της ενέργειας. Αναδύεται έτσι η έννοια της ομοτιμίας (Peer-to-Peer) η οποία μπορεί να χαρακτηριστεί ως μια νέα κοινωνική, πολιτική και οικονομική δυναμική.

Τους παραπάνω στόχους καθιστούν εφικτούς η ανάπτυξη της τεχνολογίας πληροφοριών και επικοινωνίας (ICT), τα ευφυή δίκτυα (smart grids) και οι έξυπνοι μετρητές (smart meters) [8]. Επιπλέον οι νέες μορφές αγορών και συναλλαγών όπως το Blockchain, Bitcoin κ.α. δημιουργούν μία νέα εποχή στο τομέα της αγοράς και πώλησης προσδίδοντας πληθώρα επιλογών στον τελικό χρήστη [1].

Από τα παραπάνω γίνεται εμφανές πως ένας τρόπος μετασχηματισμού του δικτύου είναι η αναθεώρηση του ρόλου των καταναλωτών ώστε η αγορά να καθορίζεται από αυτούς (consumer-centric

market). Συγχρόνως εισάγεται η έννοια του παραγωγού-καταναλωτή (prosumer), δηλαδή μια οντότητα που διαθέτει μονάδα παραγωγής και είναι ταυτόχρονα καταναλωτής (π.χ νοικοκυριά που διαθέτουν φωτοβολταϊκά στις στέγες τους), έχουν τη δυνατότητα να διαχειρίζονται ενεργά την παραγωγή τους αλλά και το φορτίο τους. Υπό αυτήν την έννοια διαθέτουν ευέλικτο φορτίο (flexible load), το οποίο σημαίνει πώς μπορούν να ρυθμίζουν το φορτίο τους ανάλογα με την παραγόμενη στιγμιαία ισχύ τους. Το παραπάνω μοντέλο (prosumers with flexible load) συναντάται συνήθως σε νοικοκυριά, εταιρίες και οργανισμούς οι οποίοι διαθέτουν έξυπνους μετρητές/ελεγκτές και φωτοβολταϊκά στοιχεία ώστε να παράγουν την ενέργεια που χρειάζονται και ταυτόχρονα να ελέγχουν το φορτίο τους προκειμένου να ελαχιστοποιούν τα κόστη τους και τα μεγιστοποιούν τα κέρδη τους [7].

Οι παραπάνω χρήστες (prosumers) μπορούν να διαθέτουν μονάδες αποθήκευσης ενέργειας και την απαραίτητη τεχνολογική υποδομή ώστε να παρακολουθούν άμεσα την παραγόμενη και καταναλισκόμενη ισχύ τους [9].

2.3 Ομότιμες ενεργειακές αγορές (Peer-to-Peer Energy Markets)

Το υφιστάμενο μοντέλο αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται στα λεγόμενα διμερή συμβόλαια. Με τον όρο διμερές συμβόλαιο ορίζουμε μια συμφωνία μεταξύ δύο μερών, στη συγκεκριμένη περίπτωση ενός προμηθευτή και ενός καταναλωτή με στόχο την ανταλλαγή ενέργειας και χρήματος [5]. Άρα οι καταναλωτές αγοράζουν ηλεκτρική ενέργεια αποκλειστικά και μόνο από τον προμηθευτή με τον οποίο έχουν συμφωνήσει.

Στις αρχές της δεκαετίας του `90 προτάθηκε ένα νέο μοντέλο, αυτό των πολυμερών συμβολαίων, ως μια βιώσιμη εναλλακτική του μοντέλου αγοράς που παρουσιάστηκε προηγουμένως. Με τον όρο πολυμερή συμβόλαια ορίζουμε μία σύμβαση, ένα συμβόλαιο μεταξύ δύο ή περισσότερων μερών. Αρχικά προτάθηκε για την χονδρεμπορική αγορά δίνοντας έτσι την δυνατότητα στους προμηθευτές να δημιουργούν οικονομικές σχέσεις με περισσότερους από έναν παραγωγούς [5]. Εντούτοις, τα

πολυμερή συμβόλαια μπορούν να αποτελέσουν ένα σημαντικό εργαλείο για τις προτεινόμενες ομότιμες αγορές, αφού κατά βάση αυτό το μοντέλο εμπορίου βασίζεται σε συναλλαγές μεταξύ πολλών μερών.

Σε ότι αφορά το τεχνικό υπόβαθρο, η υιοθέτηση των μικροδικτύων (microgrids) δημιουργεί τις κατάλληλες προϋποθέσεις και υποδομές για την παρακολούθηση, επικοινωνία και έλεγχο ενός ευφυούς δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.

Η υιοθέτηση των ομότιμων αγορών αναμένεται να ενισχύσει την τοπική παραγωγή η οποία θα προέρχεται κυρίως από την ηλιακή ενέργεια, συνεπώς και την διείσδυση των αποκεντρωμένων Α.Π.Ε. Με τον τρόπο αυτό εντείνονται οι προσπάθειες για την επίτευξη των εθνικών στόχων για συμμετοχή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από Α.Π.Ε στην ακαθάριστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε ποσοστό τουλάχιστον 60% [ΕΣΕΚ 2019].

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως , η προτεινόμενη μορφή Ενεργειακών Κοινοτήτων έχει τόσο περιβαλλοντικές όσο και κοινωνικές προεκτάσεις. Αποτελεί γεγονός πως το 16% του παγκόσμιου πληθυσμού έχει ελάχιστη ή μηδενική πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια. Αυτό μεταφράζεται σε 1.6 δις ανθρώπων , κυρίως σε υποανάπτυκτες και αναπτυσσόμενες χώρες. Με την δημιουργία Ενεργειακών Κοινοτήτων επιτυγχάνεται ο σχηματισμός μικρών και αυτόνομων δομών διαχείρισης σε περιοχές όπου η διασύνδεση με το κυρίως δίκτυο μεταφοράς δεν είναι δυνατή και συνεπώς η ηλεκτροδότηση των ανωτέρω περιοχών.

2.4 Δομές των ομότιμων αγορών

Οι προτεινόμενες ομότιμες αγορές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τον βαθμό αποκέντρωσης αλλά και την τοπολογία τους ως εξής:

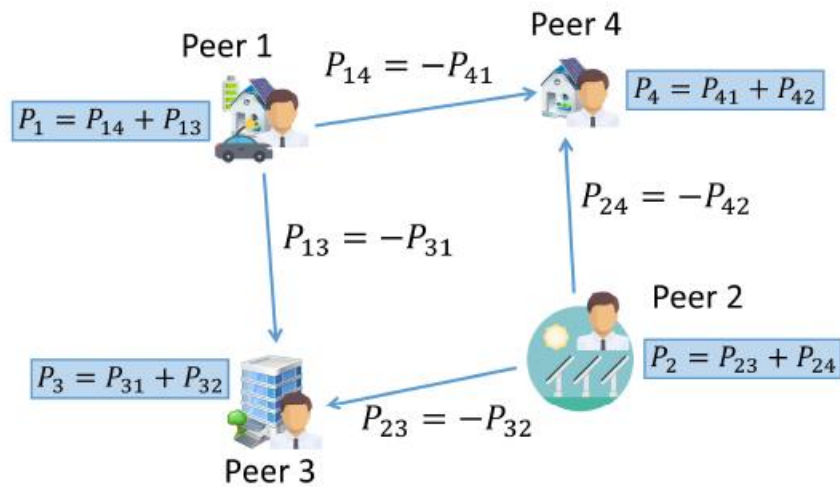
- i) Ελεύθερες Ομότιμες Αγορές
- ii) Ομότιμες Αγορές εντός Ενεργειακής Κοινότητας
- iii) Υβριδικές Ομότιμες Αγορές

2.4.1 Ελεύθερες Ομότιμες Αγορές (Full P2P Markets)

Αυτή η μορφή αγοράς έχει σχεδιαστεί με βάση τα μέλη της και την άμεση συνεργασία και διαπραγμάτευση μεταξύ αυτών για την δημιουργία συναλλαγών με στόχο την αγορά και πώληση ηλεκτρικής ενέργειας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6 του προηγούμενου κεφαλαίου. Συνεπώς δύο καταναλωτές/παραγωγοί έχουν τη δυνατότητα και το δικαίωμα να συμφωνήσουν για την τιμή της συναλλασσόμενης ενέργειας χωρίς την ύπαρξη ενός κεντρικού ρυθμιστή ή μεσάζοντα. Έχουν επίσης το δικαίωμα να επιλέξουν την πηγή προέλευσης της ενέργειας που καταναλώνουν (π.χ. τοπική παραγωγή, Α.Π.Ε κ.α.) καθώς και την δυνατότητα να συνάψουν συμβόλαια με παραπάνω από μία οντότητες. Υπό αυτήν την έννοια συμμετέχουν ενεργά στην διαχείριση και αγορά της ηλεκτρικής ενέργειας και συνεπώς είναι αυτοί που της δίνουν μορφή.

Οι συγκεκριμένοι καταναλωτές/παραγωγοί δεν είναι απαραίτητο να ανήκουν σε κάποιο συνεταιρισμό, όπως είναι οι Ενεργειακές Κοινότητες.

Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται η σχηματική αναπαράσταση μιας Ελεύθερης Ομότιμης Αγοράς αποτελούμενη από 4 μέλη.



Σχήμα 6. Ελεύθερη Ομότιμη Αγορά. [2]

Όπως φαίνεται, στο συγκεκριμένο παράδειγμα τα δύο μέλη ,Peer 1 και Peer 2 , είναι κατά αποκλειστικότητα παραγωγοί ενώ οι Peer 3 και Peer 4 είναι καταναλωτές για την συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Με P_{nm} συμβολίζουμε την ισχύ που μεταφέρεται από το n μέλος προς το m μέλος.

Φυσικά η παραπάνω αγορά είναι ευέλικτη στην ποικιλομορφία των μελών της και συνεπώς θα μπορούσαν όλα τα μέλη της να είναι ταυτόχρονα παραγωγοί και καταναλωτές (prosumers).

Παρ' όλα αυτά η οργάνωση της αγοράς αποτελεί πρόκληση καθώς δεν υφίσταται κεντρικός κόμβος που να ορίζει και να ρυθμίζει την ομαλή λειτουργία της.

2.4.2 Ομότιμες Αγορές εντός των Ενεργειακών Κοινοτήτων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί με τον όρο Ενεργειακή Κοινότητα (Ε.Κοιν.) ορίζουμε έναν αστικό συνεταιρισμό με στόχο στην δραστηριοποίηση στους τομείς των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, την

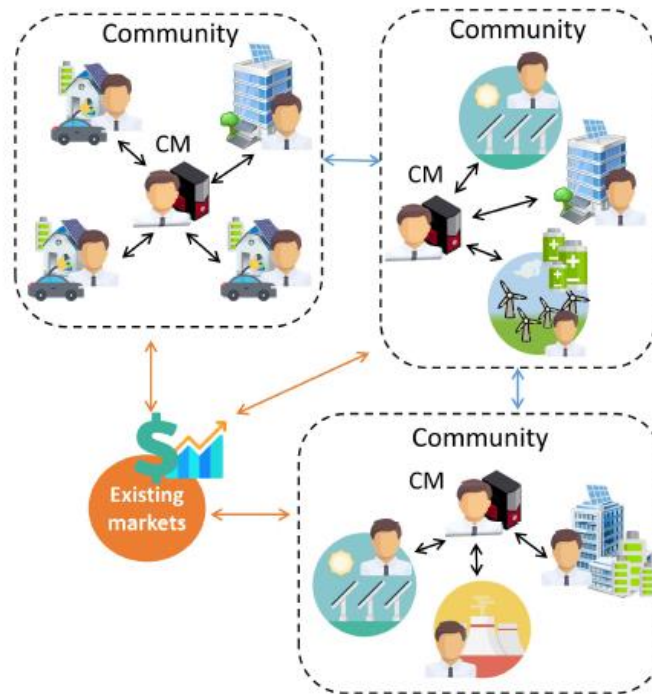
ενεργειακή αποδοτικότητα, την διαχείριση της ζήτησης και της παραγωγής, διανομή και προμήθεια ηλεκτρικής ενέργειας [ν. 4513/2018].

Τα μέλη της κοινότητας θέτουν ως στόχο την οικονομικότερη κατανομή των πόρων που διαθέτουν, την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών τόσο των ίδιων (μέσω ιδιοκατανάλωσης), όσο και των υπολοίπων μελών της κοινότητας [9], [2].

Πρόκειται λοιπόν για μία οργανωμένη δομή με τα μέλη της να θέτουν στόχους και να λειτουργούν συνεργατικά για την επίτευξη αυτών. Υπό αυτήν την έννοια η ύπαρξη ενός κεντρικού κόμβου εντός της κοινότητας διευκολύνει την επικοινωνία και συνεργασία μεταξύ των μελών της.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θεωρούμε πως ο διαχειριστής της κοινότητας (Community Manager) θα αποτελέσει τον κεντρικό κόμβο .

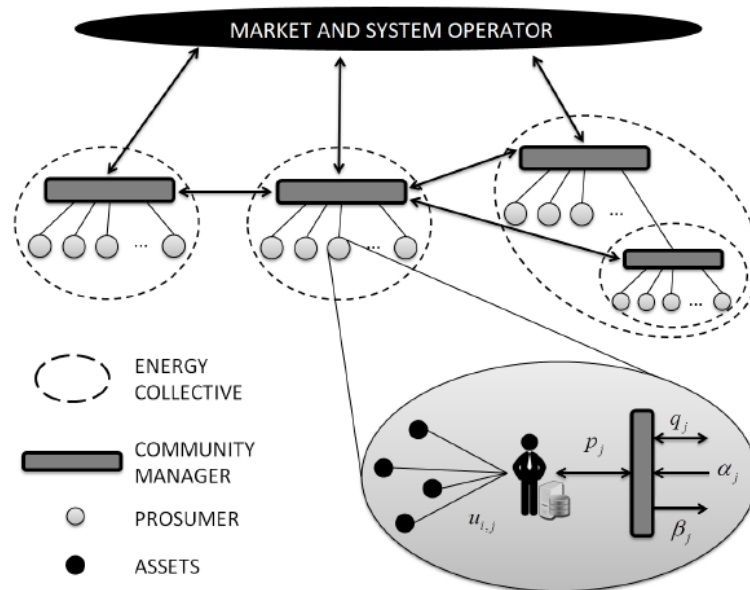
Ο διαχειριστής της κοινότητας είναι υπεύθυνος για την ομαλή λειτουργία αυτής και τη συνεργασία μεταξύ των μελών ενώ συγχρόνως αποτελεί μέσο σύνδεσης της κοινότητας με την κεντρική αγορά (προμηθευτές, διαχειριστές δικτύου κ.α.), [12], όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.



Σχήμα 7. Ενεργειακές Κοινότητες και Κεντρική Αγορά. [2]

Η ύπαρξη του διαχειριστή διευκολύνει τόσο την επικοινωνία μεταξύ των μελών όσο και την επικοινωνία αυτών με την κεντρική αγορά. Επιπλέον τα μέλη εκφράζουν τις προτιμήσεις και τις ανάγκες τους, με τον διαχειριστή της κοινότητας να είναι υπεύθυνος για την τήρηση του πλαισίου που συμφωνήθηκε κατά την δημιουργία της κοινότητας [13].

Κάθε μέλος μπορεί να αγοράσει ή/και να πουλήσει ενέργεια εντός της κοινότητας ενώ έχει επίσης την δυνατότητα να αγοράσει ή/και να πουλήσει ενέργεια εκτός αυτής από και προς τον πάροχό του, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7. Αυτό συνεπάγεται πώς τα μέλη της κοινότητας δεν προχωρούν σε λήξη της σύμβασης με τον προμηθευτή τους με την ενσωμάτωση αυτών στην Ενεργειακή Κοινότητα. Ταυτόχρονα υπάρχει η δυνατότητα συνεργασίας μεταξύ διαφόρων κοινοτήτων ενώ μικρότερες σε μέλη κοινότητες μπορούν να συγχωνευτούν στις μεγαλύτερες όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.



Σχήμα 8. Δομή Ενεργειακών Κοινοτήτων. [1]

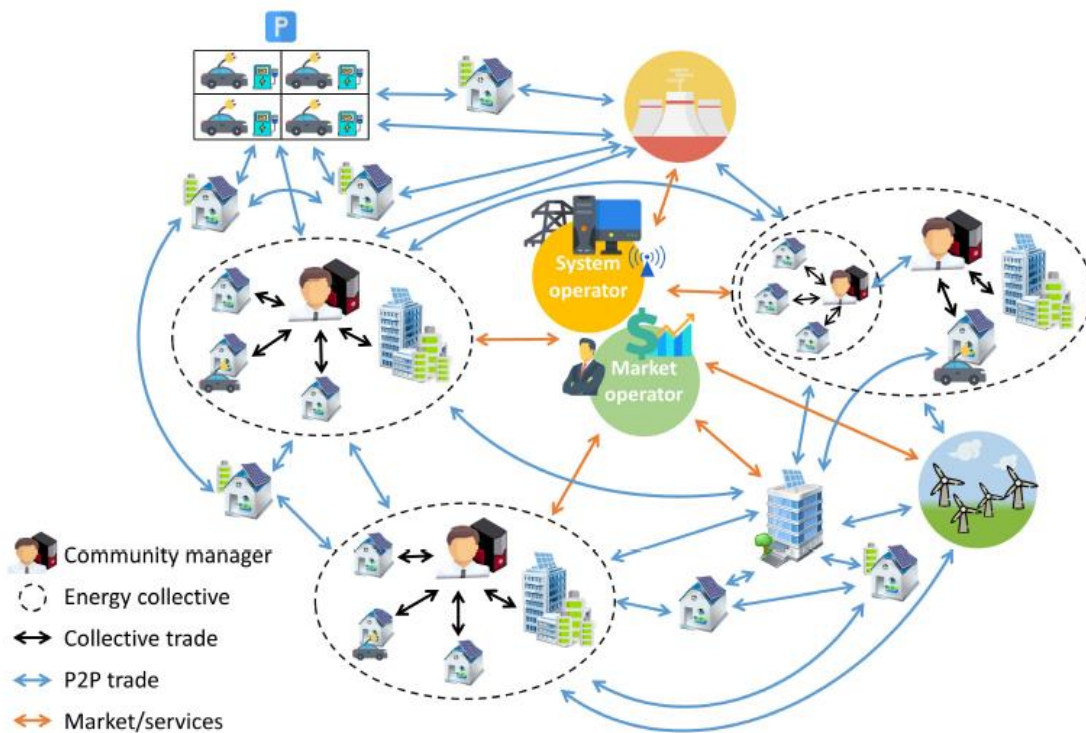
Το μοντέλο των ενεργειακών κοινοτήτων μπορεί να εφαρμοσθεί σε μικρο-δίκτυα (microgrids) αλλά και σε παραγωγούς/καταναλωτές που βρίσκονται γεωγραφικά κοντά , χωρίς όμως αυτό να αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση [10]. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με την παράγραφο 3 του Άρθρου 2 του Νόμου 4513/2018, τουλάχιστον το 50% συν ένα των μελών πρέπει να σχετίζονται με τον τόπο στον οποίο βρίσκεται η έδρα της Ενεργειακής Κοινότητας. Τα μέλη έχουν ως κοινό στόχο την αξιοποίηση των επενδύσεων τους (π.χ. φωτοβολταϊκά σε στέγες) καθώς και την οικονομικότερη σε κόστος ικανοποίηση του φορτίου τους.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του προτεινόμενου μοντέλου της τοπικής αγοράς εντός της Ενεργειακής Κοινότητας είναι πως η δομή της αγοράς εντός αυτών ορίζεται ανεξάρτητα από την μορφή και τα χαρακτηριστικά των μελών της. Συνεπώς υπάρχει ευελιξία στην ενσωμάτωση νέων μελών και στην ποικιλομορφία αυτών [10], [11].

Στόχος της κοινότητας είναι η ενεργός συμμετοχή των μελών της μέσα από μια διαδικασία διαπραγμάτευσης και η αποτελεσματικότερη διαχείριση των επενδύσεων τους αλλά και η ικανοποίηση των προσωπικών τους αναγκών.

2.4.3 Υβριδικές Ομότιμες Αγορές (Hybrid P2P Markets)

Η υβριδική μορφή αγοράς αποτελεί τον συνδυασμό των δύο προηγούμενων μορφών όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 9.



Σχήμα 9. Υβριδική Μορφή Ομότιμης Αγορά. [2]

Σε αυτή τη περίπτωση όλα τα μέλη αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και είτε ανήκουν σε ενεργειακές κοινότητες είτε όχι. Η μορφή αυτή συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των ανωτέρω δύο, όμως η μαθηματική μοντελοποίηση της αποτελεί δύσκολο πρόβλημα και συνεπώς ενδείκνυται για μετέπειτα χρήση [2].

3. Ανάπτυξη του μοντέλου βελτιστοποίησης

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, στόχος της προτεινόμενης τοπικής αγοράς εντός της Ενεργειακής Κοινότητας είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους με το οποίο επιβαρύνονται τα μέλη της για την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών. Τα μέλη της κοινότητας επιδιώκουν την βέλτιστη κατανομή των πόρων τους ώστε να ικανοποιούν τόσο τις δικές τους ενεργειακές ανάγκες όσο και των υπολοίπων μελών. Η αλγοριθμική εφαρμογή που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της Διπλωματικής Εργασίας, λαμβάνει ως δεδομένα την πρόβλεψη κάθε μέλους για την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια της επόμενης ημέρας, καθώς και την πρόβλεψη για τις ενεργειακές ανάγκες κάθε μέλους. Επιπλέον οι προτιμήσεις και οι επιθυμίες των μελών μοντελοποιούνται, όπως παρουσιάζεται παρακάτω, και λαμβάνονται ως δεδομένα εισόδου στην εφαρμογή. Στόχος της εφαρμογής είναι η βελτιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία αφορά το κόστος που επωμίζονται τα μέλη της Κοινότητας καθώς και η μεγιστοποίηση των εσόδων που αυτοί λαμβάνουν. Η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης γίνεται υπό τους περιορισμούς που τίθενται, οι οποίοι αφορούν τόσο τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μελών της κοινότητας όσους και τους στόχους της κοινότητας.

Επιπλέον, ο αλγόριθμος έχει οργανωθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μην επιτρέπει στα μέλη της κοινότητας να ακολουθούν στρατηγική συμπεριφορά με στόχο την μεγιστοποίηση των εσόδων τους σε βάρος το υπολοίπων μελών. Υπο αυτήν την έννοια, αρχικός στόχος κάθε καταναλωτή/παραγωγού είναι η κάλυψη των δικών του ενεργειακών αναγκών από την ιδιόκτητη Φωτοβολταϊκή μονάδα (ιδιοκατανάλωση), και στη συνέχεια η προσφορά της περίσσειας ενέργειας σε άλλα μέλη της κοινότητας. Αν υπάρχει επιπλέον ποσότητα ενέργειας, δηλαδή ενέργεια που δεν καταναλώθηκε εξ ολοκλήρου από τον ίδιο ή άλλα μέλη της κοινότητας, τότε αυτή πωλείται στον εκάστοτε προμηθευτή του παραγωγού.

Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε, λαμβάνοντας ως δεδομένα εισόδου τις προβλέψεις παραγωγής και ζήτησης και τις προσδοκίες των μελών, βελτιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση και παρέχει πληροφορίες ως προς την βέλτιστη κατανομή των πόρων της κοινότητας, τις ώρες κατά τις οποίες η ενσωμάτωση του ευέλικτου φορτίου θα έχει το μικρότερο δυνατό αντίκτυπο στα έξοδα των μελών, καθώς και τις συναλλαγές των μελών της κοινότητας με την κεντρική αγορά (δηλαδή συναλλαγές εκτός κοινότητας).

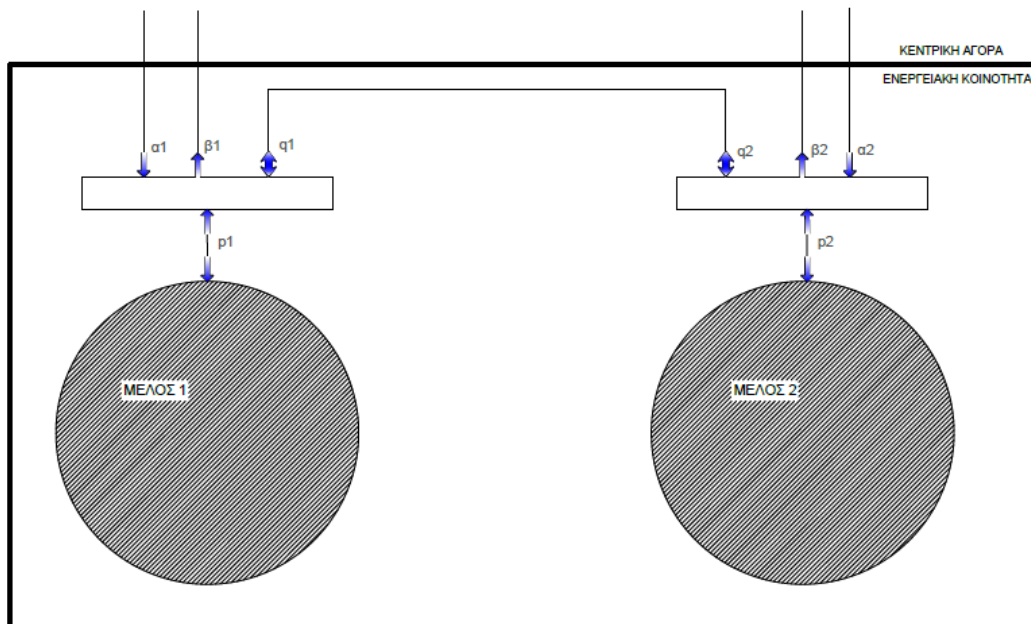
Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος αποτελείται από μεταβλητές που αντιστοιχούν σε φυσικά μεγέθη, όπως η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς, σε kW, η ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος, σε kW, καθώς και τα κόστη που επωμίζονται οι καταναλωτές για την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών, σε €. Στόχος της βελτιστοποίησης είναι ο επιμερισμός της παραγόμενης ισχύος στα μέλη της κοινότητας, δηλαδή ο προσδιορισμός της ποσότητας ενέργειας που κάθε μέλος θα αγοράσει ή θα πουλήσει εντός της τοπικής αγοράς, καθώς και ο προσδιορισμός των κατάλληλων συναλλαγών μεταξύ καταναλωτών και προμηθευτών ώστε να επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση του κόστους με το οποίο επιβαρύνονται οι καταναλωτές. Παράλληλα, στόχος της βελτιστοποίησης είναι η μεγιστοποίηση του κέρδους των παραγωγών μέσω της πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας.

3.1 Συμβολισμοί

α_j Εισαγόμενη (αγορασθείσα από τον προμηθευτή) ενέργεια από το μέλος j
β_j Εξαγόμενη (πωληθείσα προς τον προμηθευτή) ενέργεια από το μέλος j
ψ_{ij} Συνάρτηση κόστους του περιουσιακού στοιχείου i του μέλους j
g Συνάρτηση μοντελοποίησης του διαχειριστή κοινότητας (Community Manager)

f_j Συνάρτηση κόστους του μέλους j
r Συνάρτηση εσόδων των μελών
I_j Σύνολο επενδυτικών στοιχείων του μέλους j
n Σύνολο μελών που συμμετέχουν στην κοινότητα
c_{ij} Συντελεστής στην συνάρτηση κόστους ψ_{ij}
d_{ij} Συντελεστής στην συνάρτηση κόστους ψ_{ij}
P_j Εφικτός χώρος του p_j του μέλους j
h_j Συμπεριφορά του μέλους j
u_{ij} Σημείο λειτουργίας της παραγωγής ή του φορτίου i του μέλους j
\overline{U}_{ij} Πάνω όριο σημείου λειτουργίας του επενδυτικού στοιχείου i του μέλους j
\underline{U}_{ij} Κάτω όριο σημείου λειτουργίας του επενδυτικού στοιχείου i του μέλους j
p_j Καθαρή εξερχόμενη ενέργεια (net energy production) του μέλους j
q_j Ενέργεια που αγόρασε ή πούλησε το μέλος j εντός της κοινότητας
q_{exp} Συνολική εξαγόμενη (πωληθείσα προς τους προμηθευτές) ενέργεια από την κοινότητα
q_{imp} Συνολική εισαγόμενη (αγορασθείσα από τους προμηθευτές) ενέργεια από την κοινότητα

Στο Σχήμα 10 παρουσιάζεται η αλληλοεπίδραση μεταξύ δύο μελών της Ενεργειακής Κοινότητας. Με q_1 συμβολίζεται η ενέργεια που πούλησε ή αγόρασε το μέλος 1 προς ή από το μέλος 2. Με α_1 συμβολίζεται η ενέργεια που αγόρασε το μέλος 1 από την κεντρική αγορά, δηλαδή τον προμηθευτή του και με β_1 συμβολίζεται η ενέργεια που το μέλος 1 πούλησε στην κεντρική αγορά.



Σχήμα 10. Αλληλοεπίδραση μελών της κοινότητας

3.3 Το Μαθηματικό Πρόβλημα της Βελτιστοποίησης

Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης αφορά την ελαχιστοποίηση την αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία παρουσιάζεται παρακάτω, δηλαδή την ελαχιστοποίηση του κόστους και την ικανοποίηση των επιθυμιών των μελών της κοινότητας.

Προκειμένου να επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους της κοινότητας, δηλαδή η βέλτιστη λειτουργία αυτής, είναι απαραίτητο το κάθε μέλος j να λειτουργεί βέλτιστα. Συνεπώς η επίλυση του προβλήματος θα δώσει το ύψος του βέλτιστου σημείου λειτουργίας $u_{i,j}$ για κάθε επενδυτικό στοιχείο i

του prosumer j . Πρέπει να τονιστεί πως δεν απαραίτητο να ελαχιστοποιούνται τα ωριαία κόστη όλων των μελών κατά την διάρκεια της ημέρας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι βασικός στόχος της κοινότητας είναι η συμμόρφωση όλων με τους κοινούς στόχους και συμφωνίες, και τελικά την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους της κοινότητας.

Κάθε prosumer έχει καθαρή εξερχόμενη ενέργεια (net energy production) η οποία μοντελοποιείται μέσω της μεταβλητής p_j και συνολικά κόστη που προκύπτουν από τη συνάρτηση f_j .

Η βέλτιστη λειτουργία της κοινότητας προκύπτει από την επίλυση του παρακάτω προβλήματος βελτιστοποίησης [1] :

$$\min_{\Gamma} \sum_{j=1}^n f_j(p_j, q_j, \alpha_j, \beta_j) + g(q_{imp}, q_{exp}) \quad (1)$$

Υπό τους περιορισμούς [1]:

$$p_j + q_j + \alpha_j - \beta_j = 0, \quad j = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n q_j = 0 \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n \alpha_j = q_{imp} \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n \beta_j = q_{exp} \quad (5)$$

$$p_j \in P_j, \quad j = 1, \dots, n \quad (6)$$

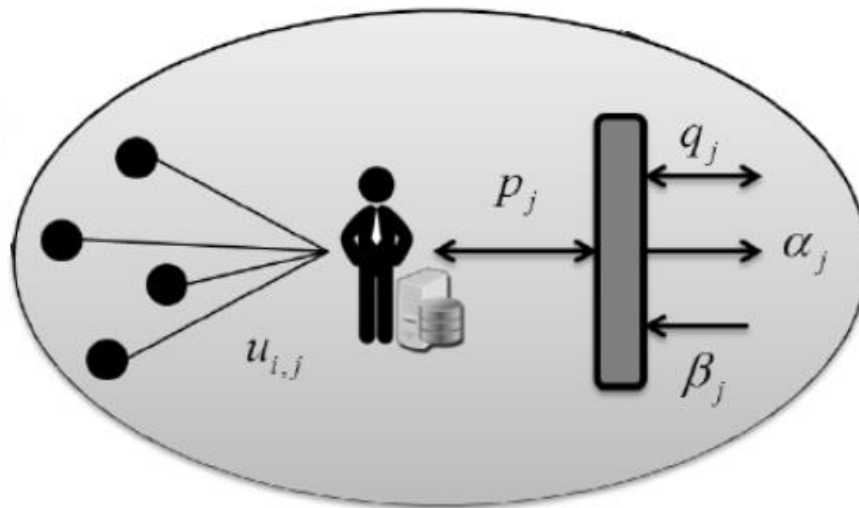
$$\alpha_j \geq 0, \beta_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, n \quad (7)$$

όπου $\Gamma = \{ p_j, q_j, \alpha_j, \beta_j \}$ είναι το σύνολο των μεταβλητών απόφασης και q_{imp}, q_{exp} είναι συνεχόμενες μεταβλητές που εκφράζουν την συνολική αγορασθείσα από τους προμηθευτές (εισαγόμενη) ενέργεια και την συνολική πωληθείσα προς τους προμηθευτές (εξαγόμενη) ενέργεια προς και από την κοινότητα αντίστοιχα . Πιο αναλυτικά :

Η μεταβλητή a_j εκφράζει την ενέργεια που αγόρασε ο prosumer j από τον προμηθευτή του ενώ η μεταβλητή b_j εκφράζει την ενέργεια που πούλησε προς αυτόν.

Η μεταβλητή q_j εκφράζει την ενέργεια που ο prosumer j αντάλλαξε εντός της κοινότητας, δηλαδή πούλησε ή αγόρασε από άλλα μέλη. Στην συνέχεια θεωρούμε πως αν $q_j > 0$, ο prosumer j πούλησε ενέργεια εντός της κοινότητας ενώ αν $q_j < 0$ ο prosumer j αγόρασε από την κοινότητα.

Οι παραπάνω μεταβλητές φαίνονται γραφικά στο Σχήμα 11.



Σχήμα 11. Μέλος Ενεργειακής Κοινότητας. [1]

Σε κάθε prosumer θέτουμε τεχνικούς περιορισμούς (6) καθώς και ισοζύγιο ισχύος μεταξύ ενέργειας που παράχθηκε και ενέργειας που ανταλλάχθηκε (2).

Επιπλέον, προκειμένου να εξασφαλίσουμε την κάλυψη του ευέλικτου φορτίου θέτουμε τον περιορισμό

$$\sum_{t=1}^{24} \sum_{i \in I_j} u_{ij}(t) = c_j \quad (8)$$

όπου το c_j συμβολίζει την ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας του μέλους j αυξημένη κατά το ευέλικτο φορτίο

του. Στην παρούσα διπλωματική εργασία έχουμε θεωρήσει πως το ευέλικτο φορτίο ανέρχεται σε ποσοστό 10% της συνολικής ζήτησης.

Σε κάθε περίπτωση οι συναρτήσεις ορίζονται έτσι ώστε να διατηρείται η κυρτότητα του προβλήματος. Η διατήρηση της κυρτότητας καθ' όλη τη διαδικασία επίλυσης του προβλήματος εξασφαλίζει ότι η λύση συμπίπτει με το ολικό βέλτιστο του προβλήματος.

Προκειμένου να μοντελοποιήσουμε τον ρόλο του διαχειριστή της κοινότητας χρησιμοποιούμε την συνάρτηση g . Διαφορετικοί ορισμοί στην συνάρτηση g θα έχουν και διαφορετικό αντίκτυπο τόσο στην συμπεριφορά των μελών όσο και στα κόστη και κέρδη που αυτοί καταβάλλουν και λαμβάνουν.

Αν για παράδειγμα η κοινότητα επιδιώκει να είναι όσο το δυνατόν ενεργειακά αυτόνομη τότε ορίζουμε την g ως :

$$g = \gamma_{imp} * q_{imp} + coef_{exp} * \gamma_{exp} * g_{exp} \quad (9)$$

όπου $coef_{exp} \geq 0$.

Διαφορετικοί συντελεστές $coef_{exp}$, θα έχουν διαφορετικά αποτελέσματα στη συμπεριφορά των παικτών. Ανάλυση της επίδρασης του συντελεστή $coef_{exp}$ στο πρόβλημα της βελτιστοποίησης ακολουθεί παρακάτω.

Κάθε prosumer είναι υπεύθυνος για την ρύθμιση του σημείου λειτουργίας του φορτίου και της παραγωγής του u_{ij} , όπου $i \in I_j$, η οποία προκύπτει από την επίλυση του παραπάνω προβλήματος. Στη συνέχεια θεωρούμε πως αν $u_{ij} > 0$ τότε πρόκειται για σημείο λειτουργίας της παραγωγής ενώ αν $u_{ij} < 0$ πρόκειται για σημείο λειτουργίας φορτίου.

Υποθέτουμε κυρτή και δευτέρου βαθμού συνάρτηση κόστους όπως φαίνεται παρακάτω :

$$\psi_{i,j}(u_{i,j}) = c_{i,j} * u_{i,j}^2 + d_{i,j} * u_{i,j} \quad (10)$$

Όπου $c_{i,j} \geq 0$.

Οι συντελεστές c_{ij} και d_{ij} ορίζονται ως εξής :

$$c_{i,j} = 2 \frac{b}{\overline{U_{ij}} - \underline{U_{ij}}} \text{ και } d_{i,j} = a + b \frac{\overline{U_{ij}} + \underline{U_{ij}}}{\overline{U_{ij}} - \underline{U_{ij}}} \quad (11)$$

όπου η τιμή a συμβολίζει την τιμή την οποία κάθε μέλος είναι διατεθειμένο να πληρώσει (ή να πληρωθεί) για τη μέση ζήτηση (ή παραγωγή) του ενώ η τιμή b συμβολίζει την αύξηση ή την μείωση της τιμής a , που αντιστοιχεί στο ελάχιστο σημείο λειτουργίας ($\underline{U_{ij}}$) ή στο μέγιστο ($\overline{U_{ij}}$), αντίστοιχα, του περιουσιακού στοιχείου i του μέλους j .

Για παράδειγμα, αν η τιμή αγοράς (λιανική) από τον πάροχο είναι 0.11936 €/kWh , οι παίκτες επιθυμούν να αγοράσουν ενέργεια σε τιμή 0.09 €/kWh και να πουλήσουν ενέργεια στον πάροχο σε τιμή 0.11 €/kWh . Συνεπώς οι συντελεστές c_{ij} και d_{ij} δείχνουν τις επιθυμίες των μελών να μεγιστοποιήσουν τα κέρδη τους και να ελαχιστοποιήσουν την επιβάρυνση τους. Αυτές οι επιθυμίες λαμβάνονται υπ' όψιν από τον διαχειριστή της τοπικής αγοράς ο οποίος τελικά ορίζει την τιμή συναλλαγής εντός της κοινότητας. Καθώς δεν δύναται να μεταβληθεί η τιμή πώλησης και αγοράς προς και από τον πάροχο, οι προσδοκίες των παικτών ικανοποιούνται από συναλλαγές που πραγματοποιούνται εντός της κοινότητας.

Εφόσον η δομή της κοινότητας είναι ανεξάρτητη από χαρακτηριστικά του καθενός, κάθε prosumer χαρακτηρίζεται μέσα στην κοινότητα από την καθαρή εξερχόμενη ενέργεια του (net energy production):

$$p_j = \sum_{i \in I_j} u_{ij}, j = 1, \dots, n, i \in I_j \quad (12)$$

Η μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των μελών της κοινότητας επιτυγχάνεται μέσω της συνάρτησης h , η οποία ορίζεται ως εξής:

$$h_j(q_j, \alpha_j, \beta_j) = \text{coef}_{\text{comh}} * \gamma_{\text{com}} * |q_i| + \gamma_{\text{imp}} * \alpha_j + \text{coef}_{\text{exph}} * \gamma_{\text{exp}} * \beta_j, \quad j = 1, \dots, n \quad (13)$$

Όπου:

α_j είναι η ενέργεια που το μέλος j αγοράζει από τον προμηθευτή του

β_j είναι η ενέργεια που το μέλος j πουλάει προς τον προμηθευτή του και

$\text{coef}_{\text{comh}} \geq 0$ και $\text{coef}_{\text{exph}} \geq 0$.

Παρατηρούμε πώς η συνάρτηση h περιλαμβάνει την απόλυτη τιμή της μεταβλητής q_i . Προκειμένου να διατηρείται η κυρτότητα του προβλήματος χρησιμοποιούμε την βοηθητική μεταβλητή q_{bi} στην θέση της μεταβλητής q_i υπό τους περιορισμούς:

$$q_i \leq qb_i \text{ και } q_i \geq -qb_i.$$

Επομένως η συνάρτηση h λαμβάνει την παρακάτω μορφή:

$$h_j(q_j, \alpha_j, \beta_j) = \text{coef}_{\text{comh}} * \gamma_{\text{com}} * qb_i + \gamma_{\text{imp}} * \alpha_j + \text{coef}_{\text{exph}} * \gamma_{\text{exp}} * \beta_j, \quad j = 1, \dots, n \quad (13')$$

Με αυτό το τρόπο επιτυγχάνεται η μετατροπή της απόλυτης τιμής σε γραμμική έκφραση και συνεπώς διατηρείται η κυρτότητα στο πρόβλημα η οποία θα εξασφαλίσει την εύρεση του ολικού βέλτιστου.

Ευνοϊκή τιμή του συντελεστή $\text{coef}_{\text{comh}}$ θα ενθαρρύνει το μέλος j να αγοράσει και να πουλήσει ενέργεια εντός της τοπικής αγοράς της κοινότητας ενώ παράλληλα δυσμενής τιμή του συντελεστή $\text{coef}_{\text{exph}}$ θα αποθαρρύνει το μέλος j να πουλάει ενέργεια εκτός κοινότητας (στον προμηθευτή του) και συνεπώς να την καταναλώνει ο ίδιος ή να την πουλάει σε άλλα μέλη. Οι τιμές των συντελεστών καθορίζονται από τα μέλη της κοινότητας και συνεπώς η συνάρτηση (12') αποτελεί την μοντελοποίηση των επιθυμιών τους και αναγκών τους. Ανάλυση ευαισθησίας για τους συντελεστές $\text{coef}_{\text{comh}}$ και $\text{coef}_{\text{exph}}$ ακολουθεί παρακάτω.

Επομένως η συνάρτηση f ορίζεται ως:

$$f_{j(p_j, q_j, \alpha_j, \beta_j)} = \sum_{i \in I_j} \psi_{ij}(u_{ij}) + h_j(q_j, \alpha_j, \beta_j) \quad (14)$$

Προκειμένου να εξασφαλίσουμε τα μέγιστα δυνατά κέρδη εισάγουμε την συνάρτηση r η οποία ορίζεται ως εξής :

$$r(q_{\text{exp}}) = \gamma_{\text{exp}} * q_{\text{exp}} \quad (15)$$

Η συνάρτηση (15) χρησιμοποιείται στην αντικειμενική συνάρτηση (με αρνητικό πρόσημο). Με αυτό το τρόπο φροντίζουμε να μεγιστοποιούμε τα κέρδη των μελών από την πώληση ενέργειας εκτός κοινότητας, δηλαδή στον πάροχο τους.

Στην περίπτωση όπου δεν υπήρχε η συνάρτηση r , (15), η επίλυση του προβλήματος της βελτιστοποίησης θα όριζε μείωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα μέλη της κοινότητας ώστε να ικανοποιούνται αποκλειστικά και μόνο οι ενεργειακές ανάγκες αυτών. Συνεπώς δεν θα πωλούσαν την περίσσεια ενέργειας στους προμηθευτές και θα ικανοποιούνταν μόνο ο αρχικός στόχος

που αφορά την ελαχιστοποίηση του κόστους με το οποίο επιβαρύνονται για την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών.

Συνεπώς το πρόβλημα βελτιστοποίησης αποκτά την παρακάτω μορφή :

$$\min_{\Gamma} \sum_{j=1}^n f_j(p_j, q_j, a_j, \beta_j) + g(q_{imp}, q_{exp}) - r(q_{exp}) \quad (1')$$

Υπό τους περιορισμούς:

$$p_j + q_j + a_j - \beta_j = 0, \quad j = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n q_j = 0 \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n a_j = q_{imp} \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n \beta_j = q_{exp} \quad (5)$$

$$p_j \in P_j, \quad j = 1, \dots, n \quad (6)$$

$$a_j \geq 0, \beta_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, n \quad (7)$$

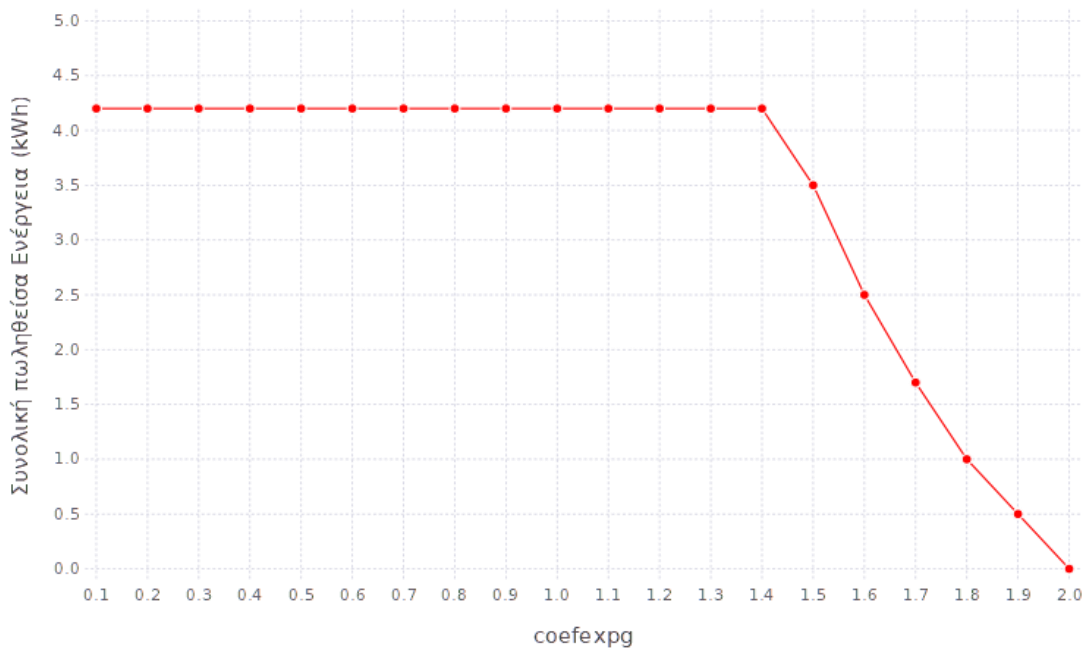
$$\sum_{t=1}^{24} \sum_{i \in I_j} u_{ij}(t) = c_j \quad (8)$$

Η επίλυση του προβλήματος θα δώσει οδηγίες σε όλα τα μέλη ως προς την προέλευση της ενέργειας που καταναλώσουν (είτε θα προέρχεται από άλλα μέλη είτε από τους προμηθευτές τους), καθώς και το ποσό της ενέργειας που θα πουλήσουν στην κεντρική αγορά (προμηθευτές) ή σε άλλα μέλη της κοινότητας. Συνεπώς προσδιορίζεται και η συνολική εξαγόμενη ενέργεια από την κοινότητα (πωληθείσα προς τους προμηθευτές) καθώς και η συνολική εισαγόμενη ενέργεια προς την κοινότητα (αγορασθείσα από τους προμηθευτές).

3.3.1 Ανάλυση των συντελεστών των συναρτήσεων g και h

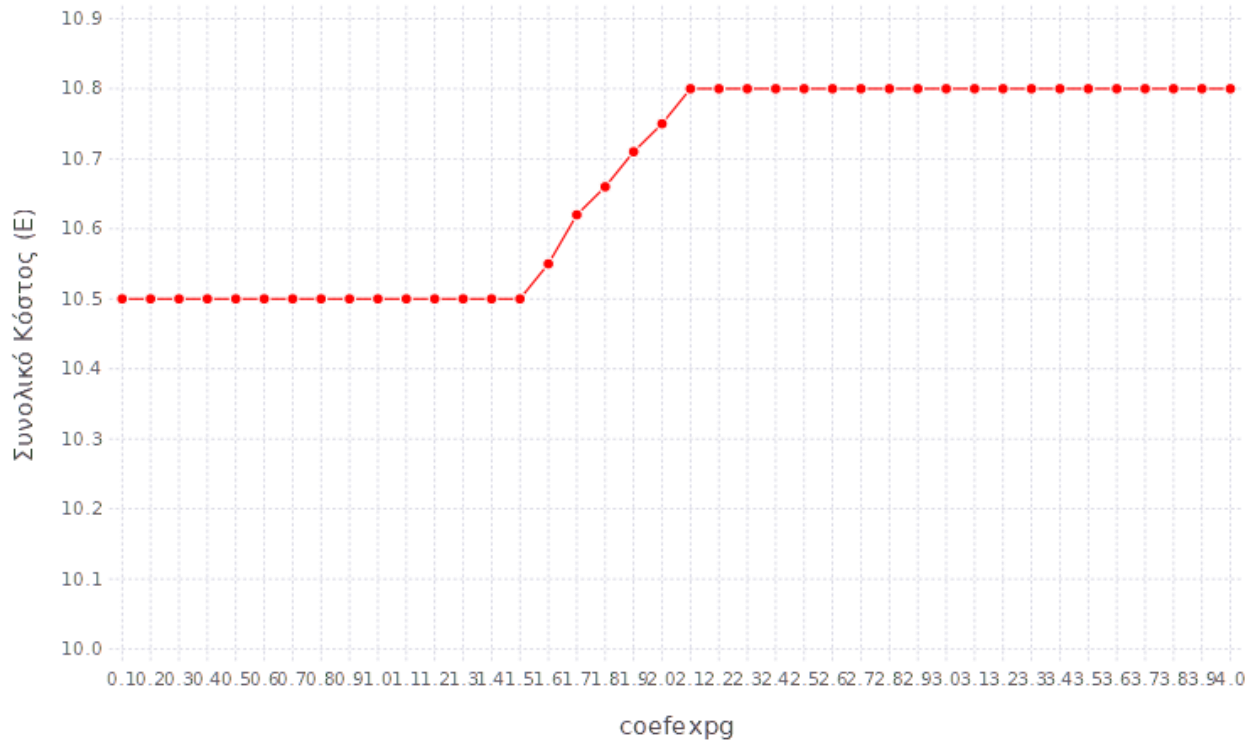
Για την συνάρτηση g (9) που μοντελοποιεί τον ρόλο του διαχειριστή της κοινότητας :

ο σκοπός του συντελεστή $coef_{expg}$ είναι να μπορεί ο διαχειριστής της κοινότητας να ρυθμίζει την ισχύ που διοχετεύεται στο δίκτυο, δηλαδή πωλείται στους παρόχους των μελών. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 12 η πωληθείσα ενέργεια από τα μελή της κοινότητας προς τους προμηθευτές τους μειώνεται όταν $coef_{expg} > 1.4$ ενώ μηδενίζεται όταν $coef_{expg} \geq 2$.



Σχήμα 12. Ανάλυση του συντελεστή $coef_{expg}$

Αντίστοιχα μειώνονται και τα κέρδη των μελών , αυξάνονται δηλαδή τα συνολικά κόστη της κοινότητας όπως φαίνεται στο Σχήμα 13.



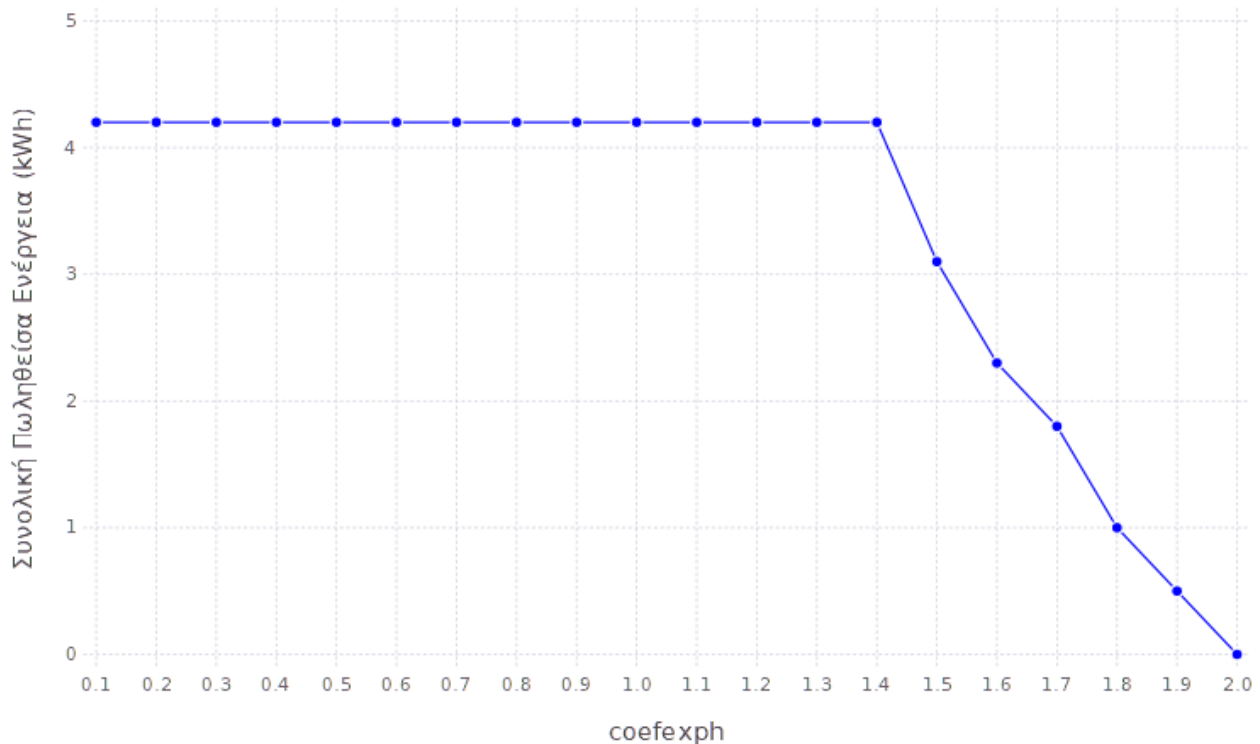
Σχήμα 13. Ανάλυση Συντελεστή $coef_{exp}$

Φυσικά ο διαχειριστής της κοινότητας δεν έχει λόγο να περιορίσει την παραγόμενη ισχύ των μελών και συνεπώς να μειώσει τα κέρδη τους, εκτός και αν πρόκειται για αίτημα του διαχειριστή δικτύου λόγω συμφόρησης.

Τέλος, δεν έχει νόημα ύπαρξης αντίστοιχου συντελεστή στην έκφραση $\gamma_{imp} * q_{imp}$ της συνάρτησης g (9) αφού η καταναλισκόμενη ισχύς των παικτών δεν δύναται να πέσει κάτω από το ελάχιστο όριο (μπλέ γραμμή) καθώς και ούτε να υπερβεί το ανώτατο όριο (κόκκινη γραμμή).

Για την συνάρτηση h (13') που μοντελοποιεί την συμπεριφορά των μελών:

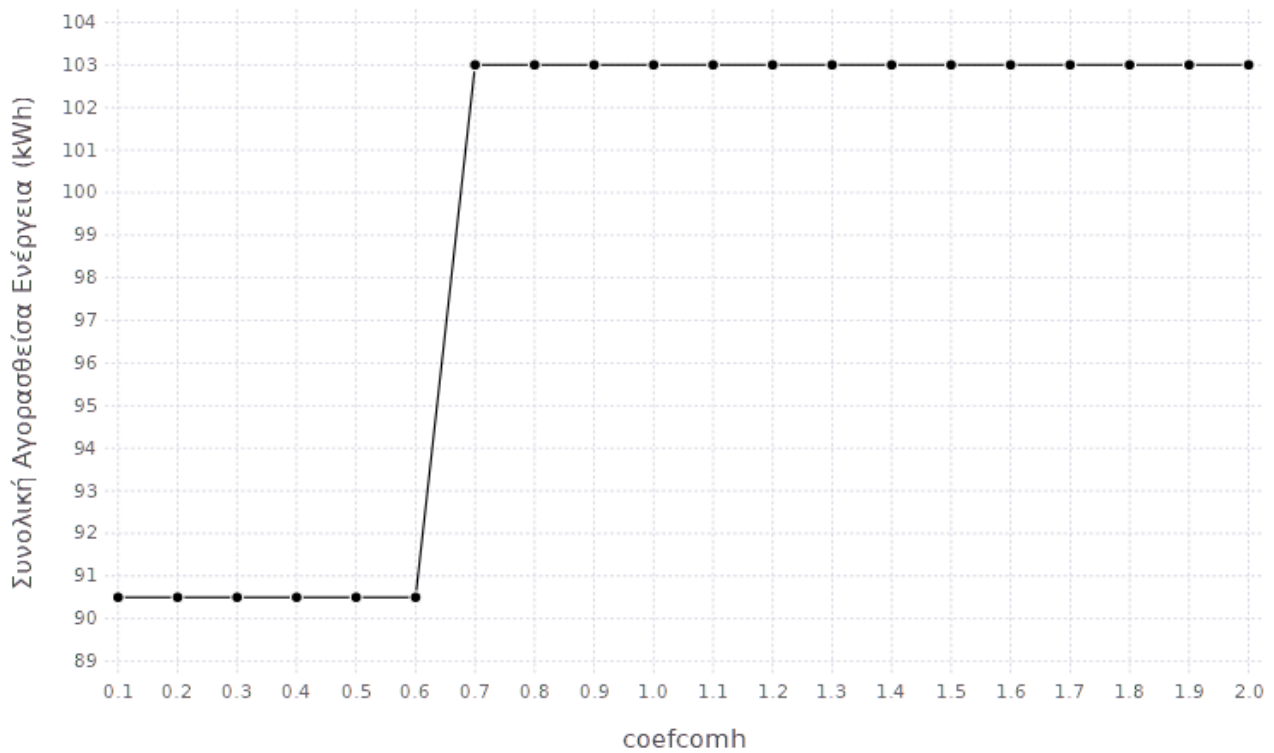
Οι συντελεστές $coef_{comh}$, $coef_{exph}$ δίνουν τη δυνατότητα στους παίκτες να εκφράσουν τις επιθυμίες τους. Για παράδειγμα αν κάποιος δεν επιθυμεί να πουλάει ενέργεια στον πάροχο του, η αύξηση του συντελεστή $coef_{exph}$ θα προκαλέσει την μείωση αυτής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 14.



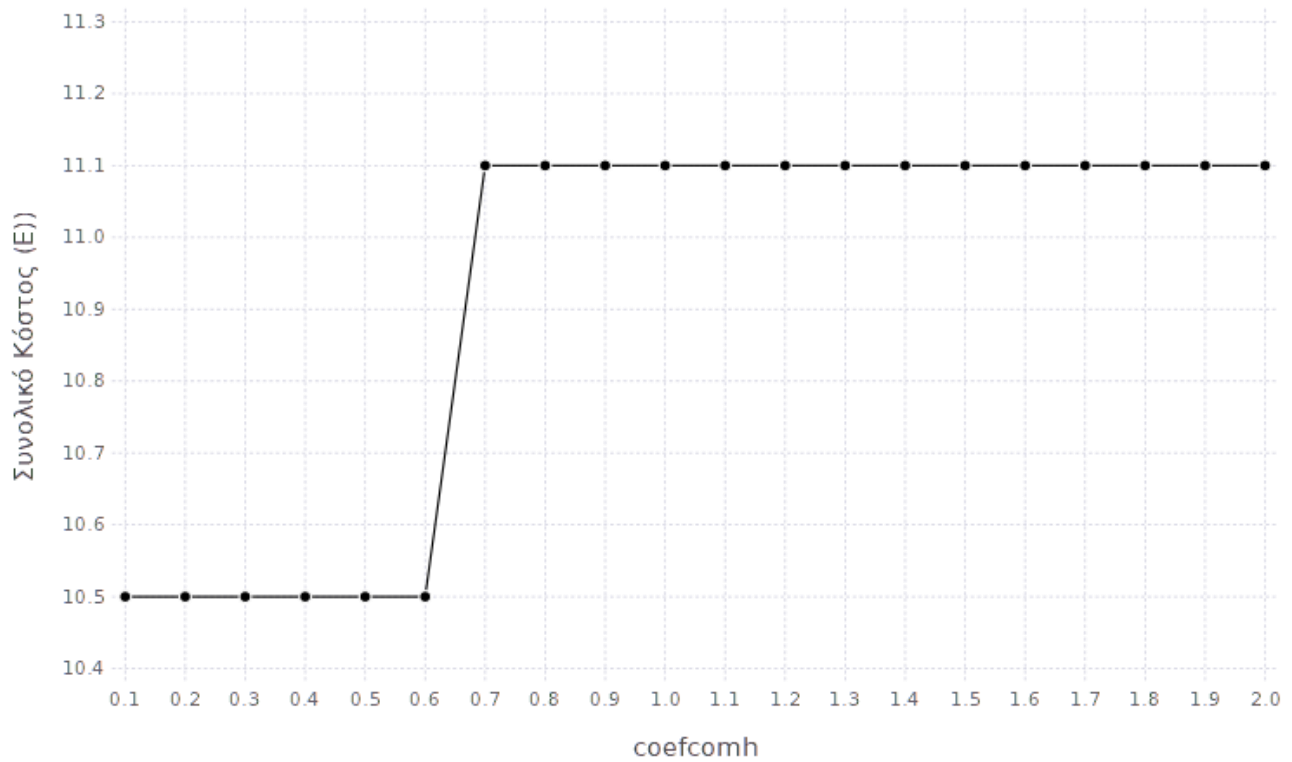
Σχήμα 14. Ανάλυση Συντελεστή $coef_{exph}$

Εντούτοις, κάθε μέλος έχει ως στόχο την μεγιστοποίηση του κέρδους του, επομένως η επιθυμία για ελαχιστοποίηση της εξαγόμενης ενέργειας έχει νόημα σε περίπτωση βλάβης ή συντήρησης της μονάδας παραγωγής του, σενάριο το οποίο δε θα μελετηθεί περαιτέρω στην παρούσα εργασία.

Αντίστοιχα η αύξηση του συντελεστή $\text{coef}_{\text{comh}}$ από κάποιο μέλος δείχνει την επιθυμία του να μην αγοράσει και ούτε να πουλήσει ενέργεια σε άλλα μέλη της κοινότητας. Η άρνηση για αγοραπωλησία εντός της κοινότητας συνεπάγεται αύξηση της εισαγόμενης ενέργειας, δηλαδή της ενέργειας που αγοράζεται από τους παρόχους. Συνεπώς και αύξηση του συνολικού κόστους, όπως φαίνεται στα Σχήμα 15, Σχήμα 16.



Σχήμα 15. Ανάλυση Συντελεστή $\text{coef}_{\text{comh}}$



Σχήμα 16. Ανάλυση Συντελεστή $coef_{comh}$

Η αύξηση του συντελεστή $coef_{comh}$ έχει και πάλι νόημα μόνο σε περίπτωση τεχνικής δυσκολίας να αλληλοεπιδράσει ένας μέλος με τα υπόλοιπα της κοινότητας.

Φυσικά σε περιπτώσεις βλάβης και συντήρησης, ενημερώνεται ο διαχειριστής της κοινότητας ώστε να αποφεύγεται η άσκηση στρατηγικής και κερδοσκοπικών συμπεριφορών από τα μέλη της.

3.4 Επίλυση του προβλήματος με χρήση της Γλώσσας Προγραμματισμού JULIA

Για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού Julia. Πρόκειται για μία υψηλού επιπέδου δυναμική γλώσσα προγραμματισμού κατάλληλη για την μοντελοποίηση μαθηματικών προβλημάτων [<https://docs.julialang.org/en/v1/>]. Παρουσιάστηκε πρώτη φορά το 2012 και έως σήμερα διατίθεται από το Τεχνολογικό Ινστιτούτο της Μασαχουσέτης (MIT). Χαρακτηρίζεται από την υψηλή επίδοση και την δυνατότητα εκτέλεσης παράλληλων λειτουργιών και δυναμικού ελέγχου. Η αφθονία της σε βιβλιοθήκες την καθιστά κατάλληλη για την υλοποίηση και επίλυση υψηλού επιπέδου μαθηματικών προβλημάτων και θεωρείται αντίστοιχη των R, Matlab και Python.

Για την μοντελοποίηση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε το ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (IDE) Juno και το πακέτο JuMP (Julia Mathematical Programming).

Το πακέτο JuMP της γλώσσας Julia χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση μαθηματικών προβλημάτων βελτιστοποίησης και υποστηρίζει την επίλυση γραμμικών και μη γραμμικών προβλημάτων.

Τα πακέτα που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος είναι συνολικά 8 και παρουσιάζονται παρακάτω:

```

1  using JuMP
2  using Ipopt
3  using Gadfly
4  using DataFrames
5  using LinearAlgebra
6  using CSV
7  using Cairo
8  using Distributions
^

```

Αρχικά ορίζεται το μοντέλο `m` το οποίο χρησιμοποιεί το πακέτο `Ipopt` για την ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης.

```
m= Model(with_optimizer(Ipopt.Optimizer))
```

Το πακέτο `Ipopt` αποτελείται από έναν επιλυτή (Solver) που χρησιμοποιείται για την επίλυση τόσο γραμμικών όσο και μη γραμμικών προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Τα δεδομένα των προβλέψεων της παραγωγής και της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας είναι αποθηκευμένα σε μορφή `.CSV` και εισέρχονται στο πρόβλημα ως εξής:

```

prosumers=DataFrame(CSV.read(joinpath(pwd(),datapath,"15prosumersapril.csv");datarow=3))
prices=DataFrame(CSV.read(joinpath(pwd(),datapath,"Prices.csv")))
number_of_prosumers=size(prosumers,1) #αριθμος μελών
time_lapses=(size(prosumers,2)-1)/4 #χρονικες στιγμες
time_lapses=floor(Int,time_lapses) #το κανω floor για να γινει int απο float
ycom=prices[1,1] #τιμη συναλλαγης μεσα στην κοινοτητα
yexr=prices[1,2] #τιμη πωλησης στην κεντρικη αγορα

```

Με τη χρήση του πακέτου `DataFrames`, τα δεδομένα εισόδου αποθηκεύονται σε πλαίσια δεδομένων και ανακτώνται από το πρόγραμμα για την δημιουργία του προβλήματος. Το πλεονέκτημα των `DataFrames` είναι πώς καταλαμβάνουν λιγότερη μνήμη και τα δεδομένα ανακτώνται πιο γρήγορα σε σχέση με την δομή των πινάκων (`Arrays`).

Στη συνέχεια ορίζονται οι μεταβλητές του μοντέλου m , δηλαδή οι μεταβλητές του προβλήματος (1') :

```

@variables m begin
    u[1:(time_lapses)*2,1:number_of_prosumers]    #σημείο λειτουργίας παραγωγής και φορτίου
    a[1:time_lapses,1:number_of_prosumers]        #ενέργεια που εισήχθη στην κοινότητα και αγοράστηκε από τους προμηθευτές
    b[1:time_lapses,1:number_of_prosumers]        #ενέργεια που εξήχθη από την κοινότητα και πωλήθηκε στους προμηθευτές
    q[1:time_lapses,1:number_of_prosumers]        #ενέργεια που συναλλάχθηκε μεταξύ των μελών της κοινότητας
    qb[1:time_lapses,1:number_of_prosumers]       #βοηθητική μεταβλητή για την απόλυτη τιμή |q| στην εκφραση h
end

```

Οι εκφράσεις g (9) και h (13) :

```

@expression(m, g , coefimp*g*imp*sum(qimp[1:end]) + coefexp*g*exp*sum(qexp[1:end]))    #ο ρόλος του διαχειριστή κοινότητας

h=@expression(m,[1:time_lapses,1:number_of_prosumers],0)    #συμπεριφορά των μελών
for i in 1:number_of_prosumers
    for j in 1:time_lapses
        h[j,i]=coefcomh*γcom*qb[j,i]+ γimp*a[j,i]+ coefexp*h*γexp*b[j,i]
    end
end
end

```

Η συνάρτηση κόστους ψ (10), η οποία παρουσιάστηκε προηγουμένως ορίζεται ως :

```

ψ = Matrix{JuMP.QuadExpr}(undef, 2*time_lapses, number_of_prosumers)    #συνάρτηση κόστους ψ
for i in 1:(2*time_lapses)
    for j in 1:number_of_prosumers
        ψ[i, j] = zero(JuMP.QuadExpr)
    end
end

for i in 1:number_of_prosumers
    for j in 1:(time_lapses*2)
        JuMP.add_to_expression!(ψ[j,i], c[j,i]u[j,i]+d[j,i], u[j,i])
    end
end
end

```


Με τους συντελεστές c_{ij} και d_{ij} όπως ορίζονται από την σχέση (11) :

```

c = Array{Float64}(undef, (time_lapses*2) , number_of_prosumers) #σταθερα c για την συναρτηση κοστους ψ
for i in 1:number_of_prosumers
  for j in 1:(time_lapses*2)
    if j % 2 != 0 # AN j%2 != 0 ΤΟΤΕ ΠΡΟΚΕΙΤΑΙ ΓΙΑ ΦΟΡΤΙΟ
      if Lower_bounds[j,i] == Upper_bounds[j,i]
        c[j,i]= (2*bψ)/(-Lower_bounds[j,i])
      else #το C πρέπει να είναι πάντα θετικό
        c[j,i]=(2*bψ)/(Upper_bounds[j,i]-Lower_bounds[j,i])
      end
    else #AN j%2==0 ΤΟΤΕ ΠΡΟΚΕΙΤΑΙ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ
      if Lower_bounds[j,i] == Upper_bounds[j,i]
        c[j,i]=0
      else
        c[j,i]=(2*bψ)/(Upper_bounds[j,i]-Lower_bounds[j,i])
      end
    end
  end
end
end
end

```

```

d = Array{Float64}(undef, (time_lapses*2) , number_of_prosumers) #σταθερα d για την συναρτηση κοστους ψ
for i in 1:number_of_prosumers
  for j in 1:(time_lapses*2)
    if j % 2 != 0 #ΠΡΟΚΕΙΤΑΙ ΓΙΑ ΦΟΡΤΙΟ
      if Lower_bounds[j,i] == Upper_bounds[j,i]
        d[j,i]=aψ
      else
        d[j,i]=(aψ + (bψ)*(-(Upper_bounds[j,i]+Lower_bounds[j,i])/(Upper_bounds[j,i]-Lower_bounds[j,i])))
      end
    else
      if Lower_bounds[j,i] == Upper_bounds[j,i]
        d[j,i]=0
      else
        d[j,i]=- (aψ + (bψ)*((Upper_bounds[j,i]+Lower_bounds[j,i])/(Upper_bounds[j,i]-Lower_bounds[j,i])))
      end
    end
  end
end
end
end
end

```

Και η συνάρτηση εσόδων r (revenues) (15):

```
revenues=@expression(m,[1:(time_lapses),1:number_of_prosumers],0)
for i in 1:number_of_prosumers
    for j in 1:(time_lapses)
        revenues[j,i]=γexp*b[j,i]
    end
end
end
```

Οι περιορισμοί του προβλήματος :

```
@constraint(m,[i=1:number_of_prosumers,j=1:(time_lapses*2)], Lower_bounds[j,i] <= u[j,i]) #άνω και κάτω όρια φορτίου και παραγωγής
@constraint(m,[i=1:number_of_prosumers,j=1:(time_lapses*2)], Upper_bounds[j,i] >= u[j,i]) #άνω και κάτω όρια φορτίου και παραγωγής
```

```
@constraint(m,a[1:end,1:end] .>= 0) #('g')
@constraint(m,b[1:end,1:end] .>= 0) #('g')
@constraint(m,sum(q,dims=2) .== 0) #('c')
@constraint(m,[j=1:time_lapses,i=1:number_of_prosumers], Pnet[j,i] == b[j,i]- q[j,i]-a[j,i]) #('b')
```

```
@constraint(m,[j=1:time_lapses,i=1:number_of_prosumers],q[j,i] <= qb[j,i]) #περιορισμος για την μεταβλητη q ωστε να παρω την απολυτη τιμη της στην εκφραση h
@constraint(m,[j=1:time_lapses,i=1:number_of_prosumers],q[j,i] >= -qb[j,i]) #περιορισμος για την μεταβλητη q ωστε να παρω την απολυτη τιμη της στην εκφραση h
@constraint(m,[i=1:counter],sum(u[1:2:end,i]) == 1.05sum(Upper_bounds[1:2:end,i])) #αύξηση της κατανάλωσης κάθε παίκτη κατά 5% (ευέλικτο φορτίο)
```

Ο τελευταίος περιορισμός του προβλήματος εξασφαλίζει την ενσωμάτωση του ευέλικτου φορτίου κάθε μέλους με τον οικονομικότερο δυνατό τρόπο.

Η αντικειμενική συνάρτηση που επιδιώκουμε να ελαχιστοποιήσουμε ορίζεται ως εξής :

```
@objective(m,Min, sum(ψ[1:end,1:end]) +sum(h[1:end,1:end]) - sum(revenues[1:end,1:end]) + g )
```

Στην περίπτωση που η κοινότητα αποτελείται από δεκαπέντε (15) μέλη τα δεδομένα εισόδου του προβλήματος παρουσιάζονται στο Σχήμα

Number of nonzeros in equality constraint Jacobian...:	2472
Number of nonzeros in inequality constraint Jacobian.:	3600
Number of nonzeros in Lagrangian Hessian.....:	508
Total number of variables.....:	2160
variables with only lower bounds:	0
variables with lower and upper bounds:	0
variables with only upper bounds:	0
Total number of equality constraints.....:	397
Total number of inequality constraints.....:	2880
inequality constraints with only lower bounds:	1800
inequality constraints with lower and upper bounds:	0
inequality constraints with only upper bounds:	1080

Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης του προβλήματος πραγματοποιήθηκαν συνολικά 47 επαναλήψεις ο χρόνος χρήσης της Κεντρικής Μονάδας Επεξεργασίας (CPU) από τον Solver Ipopt ήταν 1.258 δευτερόλεπτα, όπως φαίνεται παρακάτω.

Number of objective function evaluations	=	47
Number of objective gradient evaluations	=	44
Number of equality constraint evaluations	=	47
Number of inequality constraint evaluations	=	47
Number of equality constraint Jacobian evaluations	=	1
Number of inequality constraint Jacobian evaluations	=	1
Number of Lagrangian Hessian evaluations	=	1
Total CPU secs in IPOPT (w/o function evaluations)	=	1.258
Total CPU secs in NLP function evaluations	=	0.012

EXIT: Optimal Solution Found.

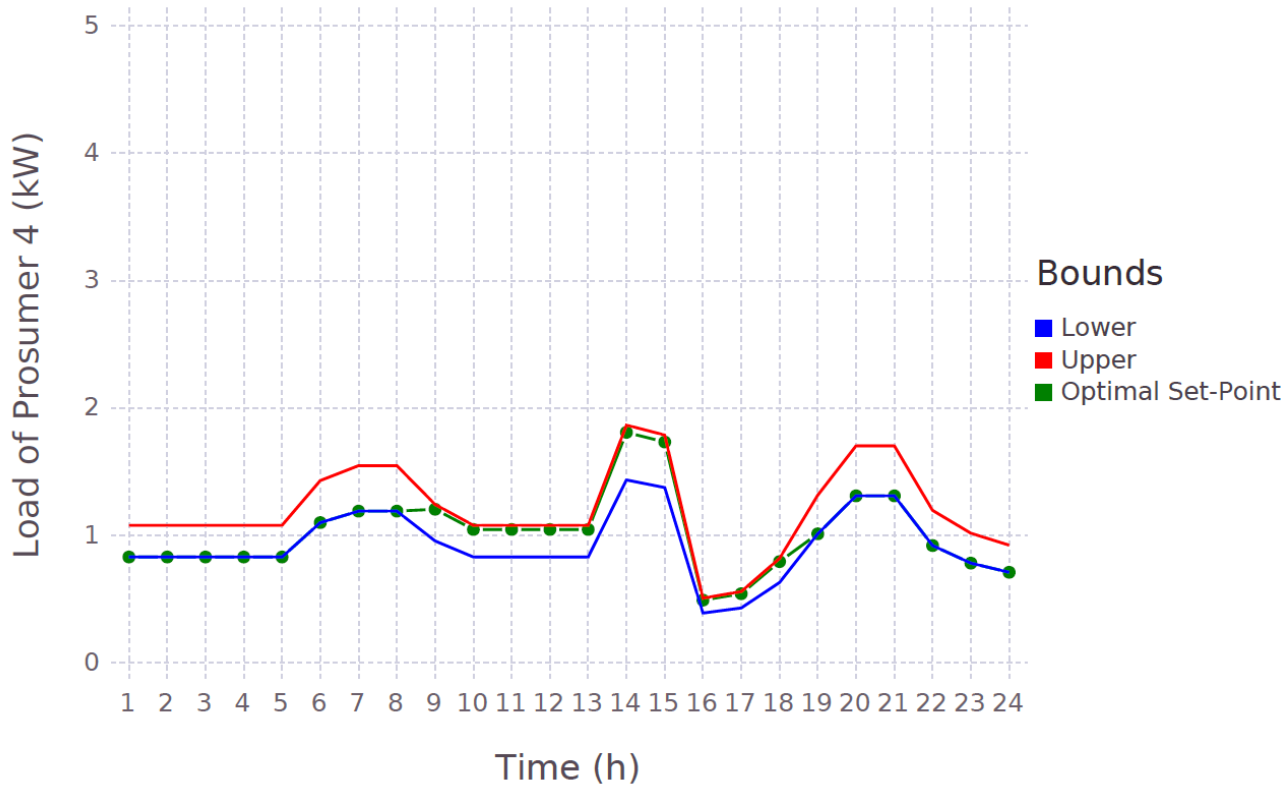
julia>

Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης εξάγονται σε μορφή .xls καθώς και σε Διαγράμματα με τη χρήση του πακέτου Gadfly.jl.

Ενδεικτικά, τα διαγράμματα των προβλέψεων των μελών σε ότι αφορά την ζήτηση της επομένης ημέρας κατασκευάζονται με τον παρακάτω κώδικα:

```
pload=Gadfly.plot(set_default_plot_size(10inch,8inch),Theme(major_label_font_size=30pt),layer(x=1:time_lapses,y=load_upper_diag,Geom.point,Geom.line,
Theme(default_color=color("blue"))), layer(x=1:time_lapses,y=load_lower_diag,Geom.point,Geom.line,
Theme(default_color=color("red"))),Guide.XLabel("Ώρες (h)"),Guide.YLabel("Πρόβλεψη Ζήτησης του μέλους " * jb * " (kW)"),
Theme(line_width=5pt,point_size=5pt), Guide.xticks(ticks=[1:1:24;]),Guide.yticks(ticks=[0:0.2:5;]) , Guide.manual_color_key("Όρια", ["Άνω", "Κάτω"], ["red", "blue"]))
```

Με τη χρήση του πακέτου Gadfly.jl έχουμε την δυνατότητα να ενώνουμε διαγράμματα σε ένα, όπως φαίνεται ενδεικτικά παρακάτω:



4. Σενάρια και Προσομοιώσεις

Για τη διερεύνηση του μοντέλου αγοράς που παρουσιάστηκε, ορίζεται μια σειρά σεναρίων που έχουν στόχο την ανάδειξη των πλεονεκτημάτων της τοπικής αγοράς σε οικονομικό επίπεδο, στην ενεργειακή αποδοτικότητα και στην διαχείριση της ζήτησης. Σαν σενάρια αναφοράς θα χρησιμοποιήσουμε μοντέλα τα οποία ήδη χρησιμοποιούνται από καταναλωτές/παραγωγούς σύμφωνα με την κείμενη εθνική νομοθεσία. Στα πλαίσια της Διπλωματικής Εργασίας αναπτύχθηκαν αλγοριθμικά μοντέλα που προσομοιώνουν την λειτουργία της Αυτοπαραγωγής, της Σταθερής Εγγυημένης Τιμής (Feed-In Tariff) και του Ενεργειακού Συμφηφισμού, τα οποία θα συγκριθούν στη συνέχεια με το προτεινόμενο μοντέλο.

Για την υλοποίηση των προσομοιώσεων θεωρούμε δεκαπέντε (15) καταναλωτές, οι δώδεκα (12) εκ των οποίων διαθέτουν φωτοβολταϊκά στις στέγες τους, εγκατεστημένης ισχύος μικρότερης ή ίσης των 10 kWp. Επιπλέον, οι δεκατρείς (13) από αυτούς διαθέτουν την απαραίτητη υποδομή ώστε να μπορούν να μετακινούν το ευέλικτο φορτίο τους κατά την διάρκεια της ημέρας.

Προκειμένου να βγάλουμε συμπεράσματα για όλο το έτος χρησιμοποιούμε τέσσερις ενδεικτικές ημέρες του χρόνου κατά τους μήνες Ιανουάριο, Απρίλιο, Ιούλιο και Οκτώβριο. Στη συνέχεια σταθμίζουμε τα αποτελέσματα των ενδεικτικών ημερών ώστε να προσεγγίσουμε την ετήσια λειτουργία.

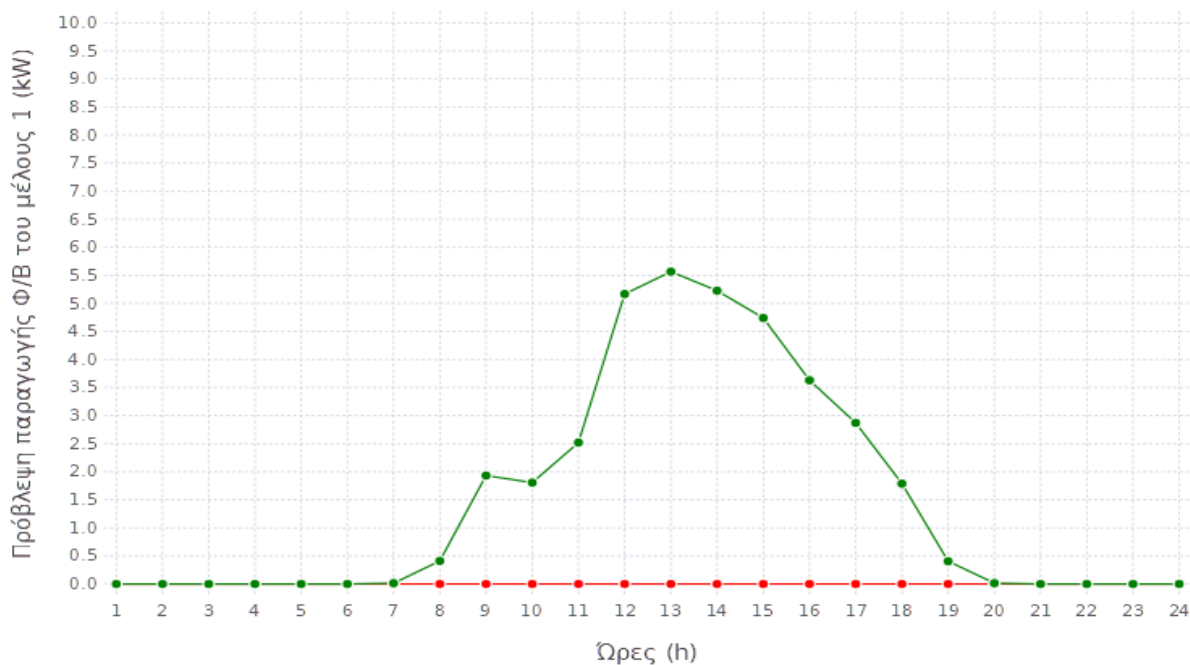
Τα δεδομένα παραγωγής και ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας ακολουθούν πραγματικές μετρήσεις και θεωρώντας σαν μήνα αναφοράς τον Απρίλιο, η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται τον Ιανουάριο κατά 30%, τον Ιούλιο κατά 40% και τον Οκτώβριο κατά 10%, σύμφωνα με δεδομένα τους Ανεξάρτητου Διαχειριστή Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ). Με αυτό το τρόπο καλύπτονται όλα τα σενάρια για τις

καμπύλες φορτίου και παραγωγής αφού είναι λογικό η παραγωγή των φωτοβολταϊκών να μειώνεται κατά τις χειμερινούς μήνες ενώ αυξάνεται κατά τους θερινούς.

4.1 Το Ενεργειακό Προφίλ των Καταναλωτών/Παραγωγών

Για την υλοποίηση των προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκαν δεκαπέντε (15) καταναλωτές/παραγωγοί με ποικιλομορφία στα χαρακτηριστικά τους. Υπό αυτήν την έννοια η εγκατεστημένη ισχύς καθώς και η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας διαφέρει για κάθε έναν.

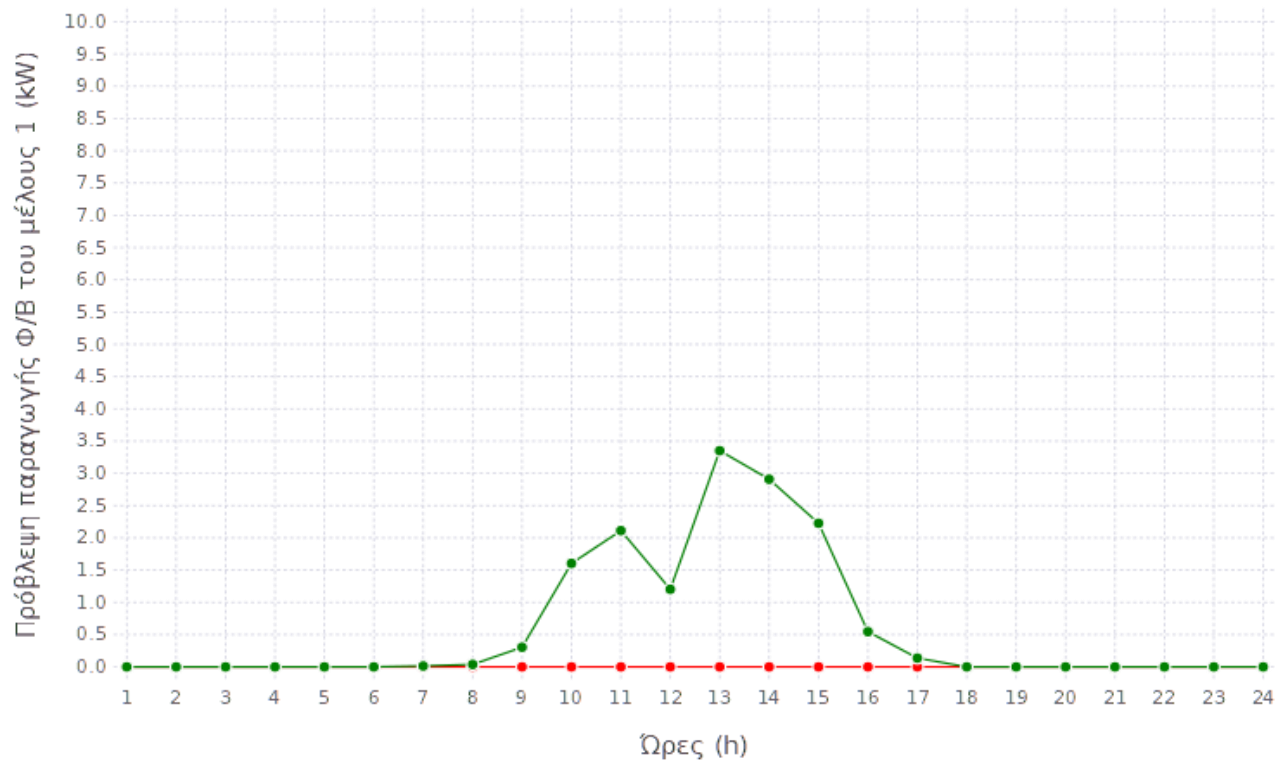
Η καμπύλη πρόβλεψης παραγωγής ενός τυπικού παραγωγού (από Φ/Β) παρουσιάζεται παρακάτω και έχει προκύψει από πραγματικές μετρήσεις από το μικροδίκτυο της περιοχής Γαϊδουρομάντρας της Κύθνου:



Σχήμα 17. Πρόβλεψη Παραγωγής Φωτοβολταϊκού Μέλους 1

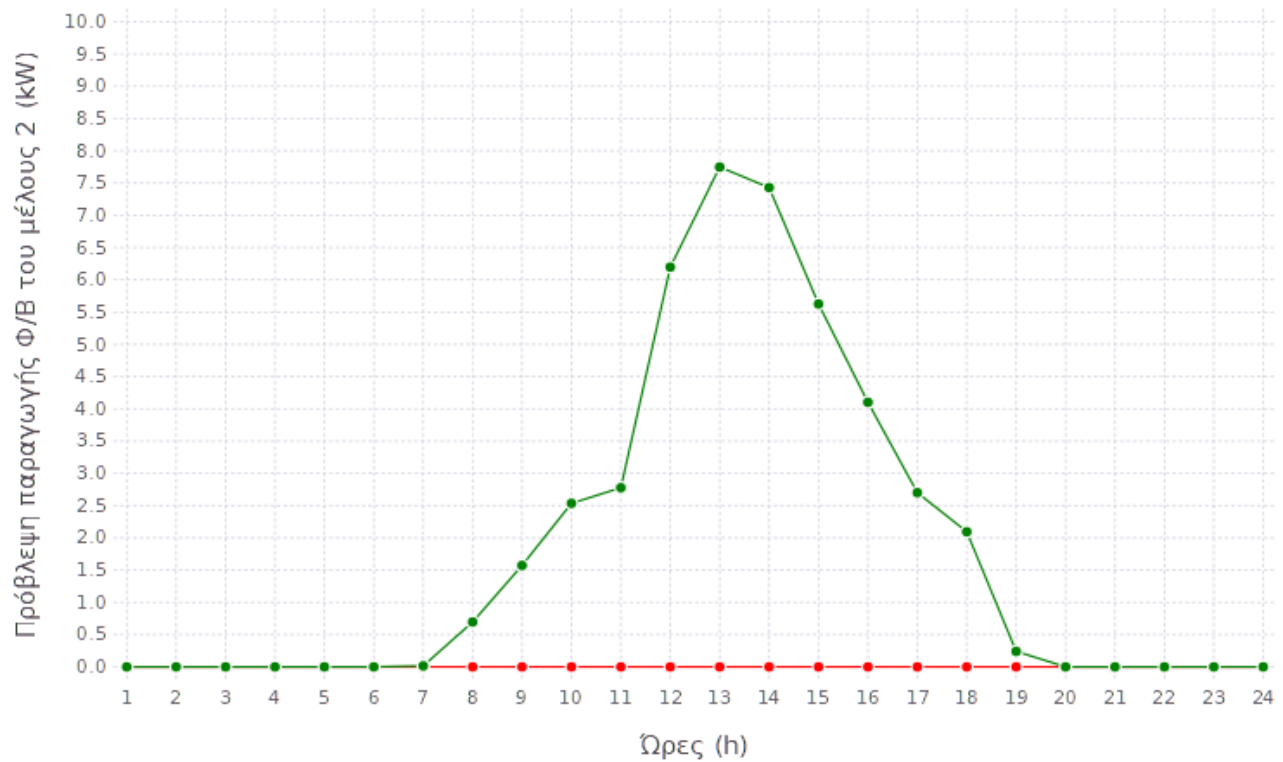
Στο Σχήμα 17 φαίνεται η καμπύλη παραγωγής του Φ/Β που διαθέτει το μέλος 1 μια τυχαία ημέρα κατά τον μήνα Απρίλιο. Διαθέτει μια φωτοβολταϊκή μονάδα μέγιστης ισχύος 6 kWp και όπως φαίνεται η παραγωγή του Φ/Β ξεκινάει στις 07:00 και φτάνει την μέγιστη τιμή της στις 13:00. Η παραγόμενη ισχύς γίνεται μηδέν στις 20:00. Οι διάφορες διακυμάνσεις που φαίνονται κατά την διάρκεια της ημέρας μπορεί να οφείλονται σε καιρικές συνθήκες (σκίαση).

Για τον ίδιο παραγωγό παρατηρούμε πως η παραγόμενη ενέργεια μειώνεται κατά τον Ιανουάριο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 18.



Σχήμα 18. Πρόβλεψη Παραγωγής Φωτοβολταϊκού Μέλους 1

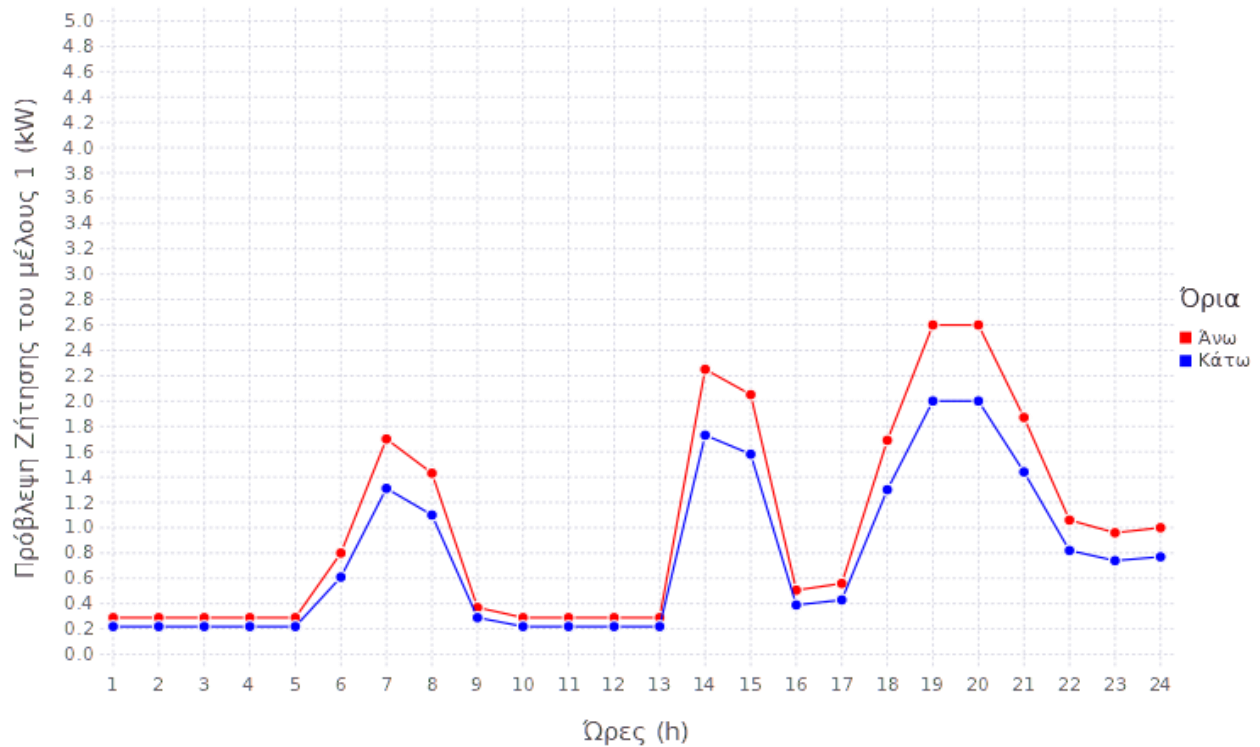
Παρατηρούμε συνολική μείωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και απότομη μείωση στις 12:00 η οποία οφείλεται στις καιρικές συνθήκες.



Σχήμα 19. Πρόβλεψη Παραγωγής Φωτοβολταϊκού Μέλους 2

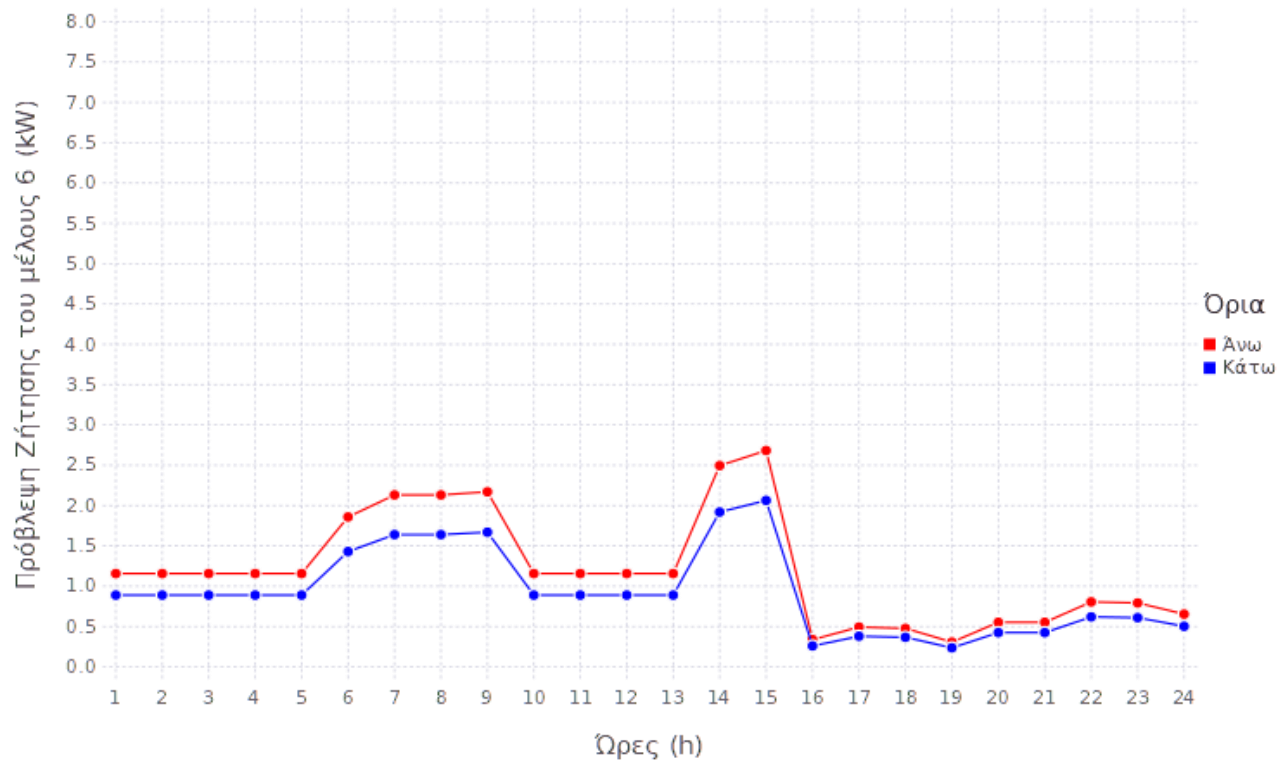
Στο Σχήμα 19 παρουσιάζεται η καμπύλη παραγωγής του Φ/Β του μέλους 2 κατά την ενδεικτική ημέρα τους Απριλίου. Παρατηρούμε πως η εγκατεστημένη ισχύ σε αυτή την περίπτωση είναι 9 kWp.

Αντίστοιχα υπάρχει διαφοροποίηση ως προς την ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας, όπως παρουσιάζεται στα επόμενα σχήματα.



Σχήμα 20. Πρόβλεψη Ζήτηση Μέλους 1

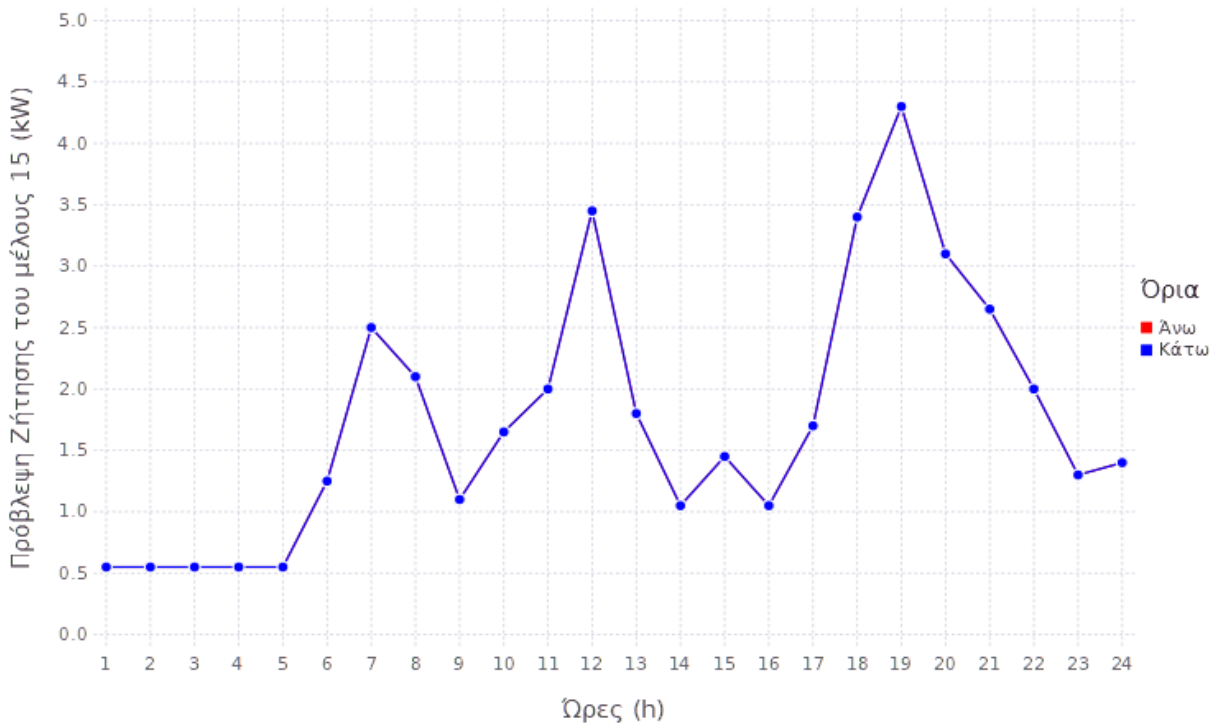
Στο Σχήμα 20 παρουσιάζεται η πρόβλεψη ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας (φορτίο) του μέλους 1 την ίδια ημέρα. Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζονται τα Άνω και Κάτω Όρια της Ζήτησης. Με τον όρο Κάτω Όριο εννοούμε την βασική καμπύλη φορτίου του συγκεκριμένου μέλους, δηλαδή το φορτίο που χρειάζεται να ενσωματώσει την επομένη ημέρα. Καθώς όμως το συγκεκριμένο μέλος διαθέτει ένα ευέλικτο φορτίο το οποίο μπορεί να μετακινήσει κατά την διάρκεια της ημέρας, ορίζεται και το Άνω Όριο. Το ευέλικτο φορτίο θεωρούμε πώς είναι μεγαλύτερο ή ίσο του 5% της βασικής κατανάλωσης. Συνεπώς το μέλος θέλει να ικανοποιήσει την βασική ανάγκη για ηλεκτρική ενέργεια (μπλε γραμμή), αυξημένη κατά ποσοστό μεγαλύτερο ή ίσο του 5%, το οποίο εκφράζει το ευέλικτο φορτίο. Το Άνω Όριο δείχνει την μέγιστη τιμή του ευέλικτου φορτίου του μέλους. Συνεπώς η πραγματική κατανάλωση του μέλους την επόμενη ημέρα θα κινείται ανάμεσα στο Άνω και Κάτω Όριο.



Σχήμα 21. Πρόβλεψη Ζήτηση Μέλους 6

Στο Σχήμα 21 παρουσιάζεται η καμπύλη πρόβλεψης του μέλους 6. Παρατηρούμε ότι διαφέρει από του μέλους 1 ως προς τις ώρες αιχμής.

Στην περίπτωση όπου κάποιο μέλος δεν επιθυμεί να ενσωματώσει κάποιο ευέλικτο φορτίο την επόμενη ημέρα η καμπύλη πρόβλεψης της ζήτησης του παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 22. Πρόβλεψη Ζήτησης χωρίς Ευέλικτο Φορτίο

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 22, το Άνω και το Κάτω όριο συμπίπτουν και το μέλος δεν επιθυμεί να ενσωματώσει κάποιο επιπλέον (ευέλικτο) φορτίο.

4.2 Ενεργειακή Κοινότητα

Καθώς η κοινότητα είναι ευέλικτη στην ποικιλομορφία των μελών της, δεν είναι απαραίτητο να διαθέτουν όλοι μονάδες παραγωγής. Επίσης δεν είναι απαραίτητο να έχουν όλοι την δυνατότητα ευελιξίας στο φορτίο τους. Με τον όρο ευέλικτο φορτίο εννοούμε το φορτίο το οποίο μπορεί να μετακινηθεί μέσα στην μέρα χωρίς να προκαλεί πρόβλημα στους καταναλωτές. Για παράδειγμα η φόρτιση ηλεκτρικών αυτοκινήτων.

Η επίλυση του προβλήματος της βελτιστοποίησης θα προτείνει στα μέλη της κοινότητας τις ώρες κατά τις οποίες η ενσωμάτωση του ευέλικτου φορτίου θα τα επιβαρύνει με το μικρότερο δυνατό κόστος [1]. Οι προτεινόμενες ώρες εξαρτώνται από την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τα Φωτοβολταϊκά των μελών της Κοινότητας, καθώς και από τις ενεργειακές τους ανάγκες.

Επιπλέον, η επίλυση του προβλήματος της βελτιστοποίησης της τοπικής αγοράς έχει ως στόχο τον προσδιορισμό των συναλλαγών μεταξύ των μελών της κοινότητας ώστε να ελαχιστοποιούνται τα συνολικά κόστη και να μεγιστοποιείται το κέρδος των καταναλωτών/παραγωγών.

4.2.1 Ενεργειακή Κοινότητα με 15 μέλη και ευέλικτο φορτίο

Στην πιο απλοϊκή περίπτωση, τα μέλη της κοινότητας επιδιώκουν την ελαχιστοποίηση του κόστους που επιβαρύνονται με την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από τους παρόχους. Προκειμένου το επιτύχουν

επιδιώκουν να αγοράζουν και να πωλούν ενέργεια εντός της κοινότητας. Σε αυτή τη περίπτωση τα μέλη αγοράζουν από τον πάροχο τους μόνο όταν δεν επαρκεί η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια εντός της κοινότητας σε τιμή λιανικής $\gamma_{imp} = 0.11497 \text{ €/kWh}$.

Η ενέργεια που παράγεται εντός της κοινότητας και τελικά δεν καταναλώνεται από τα μέλη της, πωλείται στους εκάστοτε παρόχους σε τιμή $\gamma_{exp} = 0.08 \text{ €/kWh}$. Δεν υπάρχει η δυνατότητα Συμψηφισμού Ενέργειας και Χρήματος.

Επιπλέον, πραγματοποιείται αγοραπωλησία ενέργειας μεταξύ των μελών της κοινότητας σε τιμή $\gamma_{com} = 0.098 \text{ €/kWh}$.

Με αυτό το τρόπο, η τοπική αγορά εντός της κοινότητας είναι οικονομικά συμφέρουσα τόσο για τους καταναλωτές όσο και για τους παραγωγούς. Σε ότι αφορά τους παραγωγούς είναι προτιμότερο να πωλούν την περίσσεια ενέργεια τους σε άλλα μέλη της κοινότητα αφού αποζημιώνονται με 0.098 €/kWh έναντι 0.08 €/kWh που θα τους προσέφερε ο πάροχος τους.

Αντίστοιχα, οι καταναλωτές αγοράζουν ηλεκτρική ενέργεια σε τιμή 0.098 €/kWh έναντι 0.11497 €/kWh αν αγόραζαν από τους προμηθευτές τους.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων της τοπικής αγοράς εντός της κοινότητας παρουσιάζονται στους Πίνακες 1, Πίνακας 2.

Ημέρα	Συνολική Ζήτηση Ενέργειας (kWh)	Ζήτηση που καλύφθηκε από την παραγωγή της κοινότητας (kWh)	Ποσοστό κάλυψης ζήτησης από την κοινότητα (%)	Συνολική Ενέργεια που Αγοράσθηκε τους Προμηθευτές (kWh)	Συνολική Ενέργεια που πωλήθηκε προς τους Προμηθευτές (kWh)
10/1	426.89	152.70	35.77	274.19	56.96
14/4	328.37	159.19	48.48	169.18	304.43
22/7	459.72	251.20	54.64	208.52	372.45
20/10	361.21	151.84	42.04	209.27	219.01
Σ.Μ.Ο	394.05	178.73	45.36	215.29	238.21

Πίνακας 1. Συνολική ενέργεια που συναλλάχθηκε από τα 15 μέλη της κοινότητας με ευέλικτο φορτίο

Ως **Ζήτηση που καλύφθηκε από την παραγωγή της κοινότητας**, σε kWh, ορίζουμε την συνολική ενέργεια που παρήχθη από τα Φ/Β των μελών της κοινότητας και καταναλώθηκε από τους ίδιους ή άλλα μέλη της κοινότητας.

Ως **Συνολική Ενέργεια που Αγοράστηκε από τους Προμηθευτές**, σε kWh, ορίζουμε το άθροισμα της ενέργειας που αγοράστηκε σε λιανική τιμή και εισήχθη στην κοινότητα για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των μελών ($\sum_{j=1}^n \alpha_j = q_{imp}$).

Ως **Συνολική Ενέργεια που πωλήθηκε προς τους Προμηθευτές**, σε kWh, ορίζουμε το άθροισμα της ενέργειας που πωλήθηκε από τα μέλη της κοινότητας στους προμηθευτές ($\sum_{j=1}^n \beta_j = q_{exp}$).

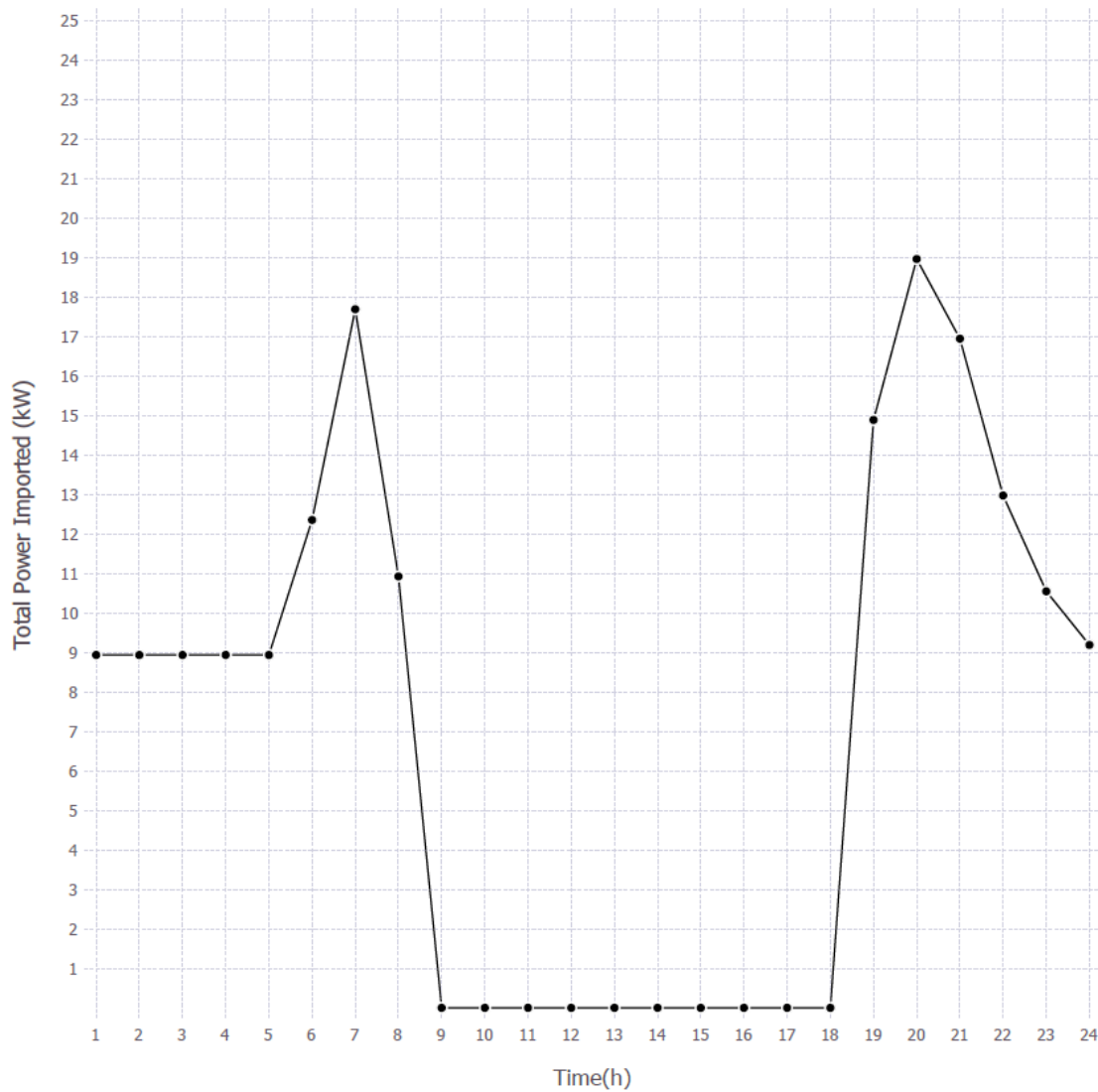
Ημέρα	Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος (€)
10/1	26.97
14/4	-4.90
22/7	-5.74
20/10	6.55
Σ.Μ.Ο	5.72

Πίνακας 2. Συνολική οικονομική επιβάρυνση/όφελος για την κοινότητα.

Η **Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος** ορίζεται ως τα συνολικά κόστη (χρήματα) με τα οποία επιβαρύνονται αθροιστικά όλα τα μέλη της κοινότητας. Στην περίπτωση όπου οι τιμές του Πίνακας 2 προκύψουν αρνητικές, συνεπάγεται όφελος για την κοινότητα.

Παρατηρούμε πως τον μήνα Ιανουάριο, η υψηλή ζήτηση ενέργειας σε συνδυασμό με την χαμηλή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας οδηγούν σε αυξημένη χρηματική επιβάρυνση για την κοινότητα. Αντίθετα η αυξημένη ζήτηση τον Ιούλιο δεν επιφέρει αρνητικές επιπτώσεις για την κοινότητα αφού η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι η μέγιστη του έτους.

Η συνολική ενέργεια που εισήχθη στην κοινότητα την αντιπροσωπευτική ημέρα του Απριλίου, δηλαδή η ενέργεια που πούλησαν οι προμηθευτές προς τα μέλη της κοινότητας φαίνεται στο Σχήμα 23.

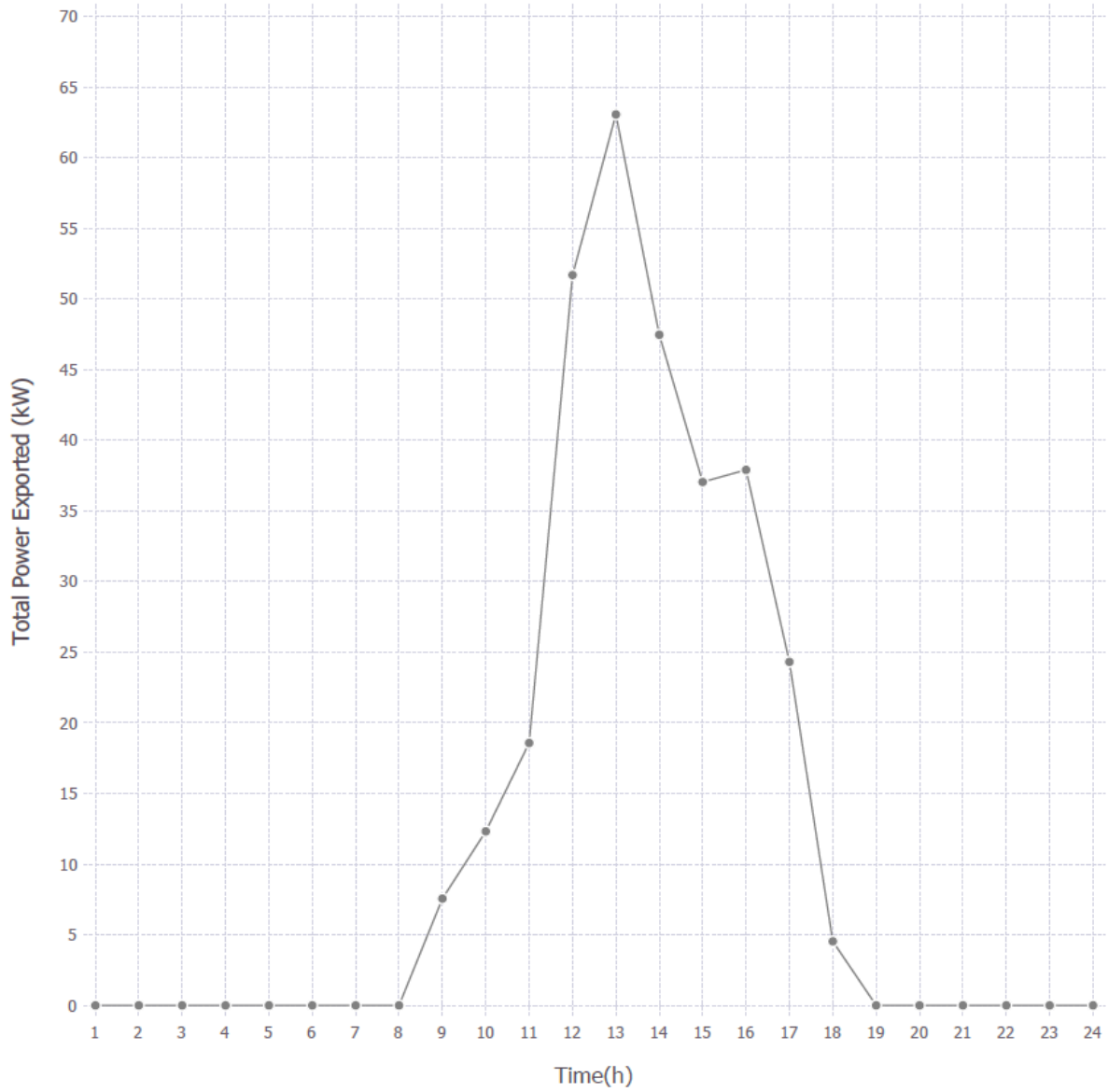


Σχήμα 23. Συνολική Ωριαία Εισαγόμενη ισχύς στη Κοινότητα την αντιπροσωπευτική ημέρα του Απριλίου

Παρατηρούμε πως κατά την διάρκεια της ημέρας, όπου υπάρχει παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά της κοινότητας, η συνολική εισαγόμενη ισχύς είναι μηδενική.

Συνεπώς τα μέλη της κοινότητας ικανοποιούν την ζήτηση τους με ενέργεια που είτε παράγουν οι ίδιοι είτε αγοράζουν από άλλα μέλη της κοινότητας. Με αυτό το τρόπο ελαχιστοποιούν την ενέργεια που αγοράζουν από τους παρόχους τους και συνεπώς το κόστος με το οποίο επιβαρύνονται.

Η συνολική πωληθείσα προς τους παρόχους ενέργεια παρουσιάζεται στο Σχήμα 24.

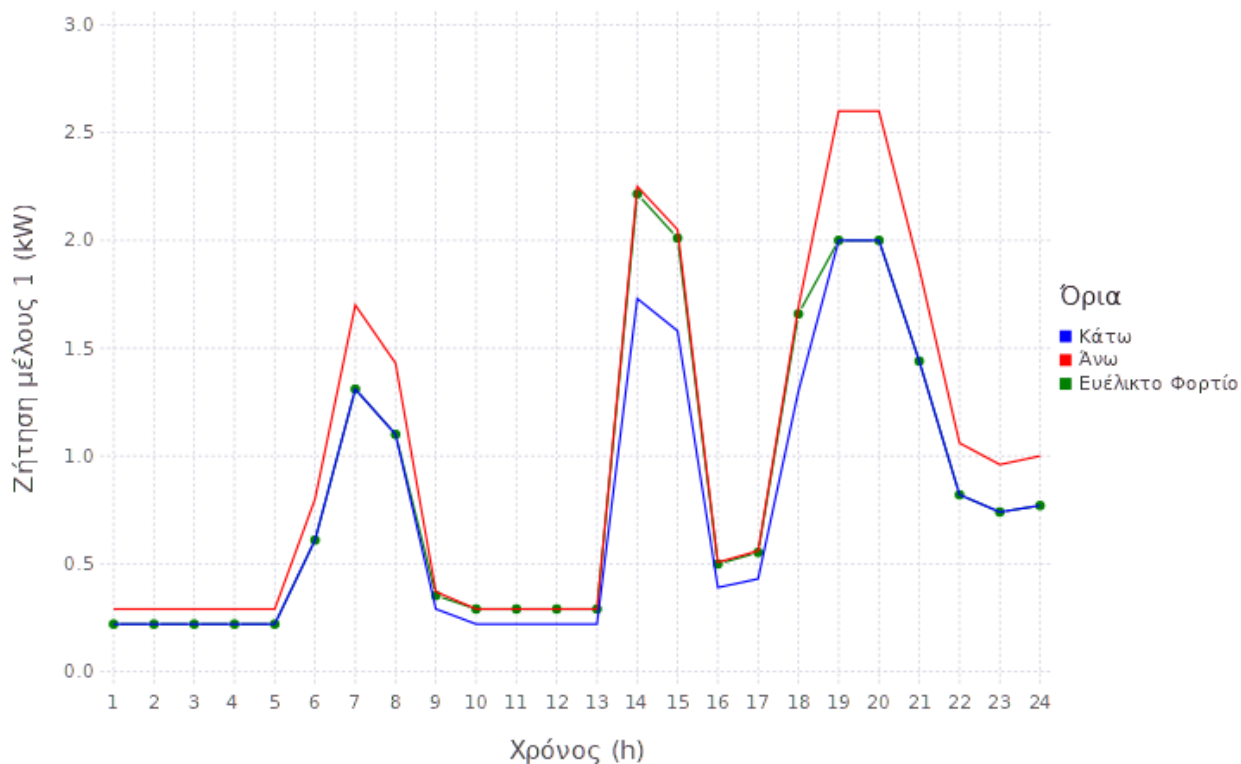


Σχήμα 24. Συνολική Ωριαία Εξαγόμενη Ισχύς από την Κοινότητα

Παρατηρούμε πώς στις 13:00 η συνολική εξαγόμενη ισχύς μεγιστοποιείται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι εκείνη την ώρα η παραγωγή των φωτοβολταϊκών της κοινότητας γίνεται μέγιστη και συνεπώς υπερκαλύπτει τις ανάγκες των μελών.

Επιπλέον, με την επίλυση του προβλήματος προσδιορίζονται και οι ώρες κατά τις οποίες τα μέλη της κοινότητας μπορούν να ενσωματώσουν το ευέλικτο φορτίο τους και να επιβαρυνθούν με τα χαμηλότερα δυνατά κόστη. Όπως ήδη αναφέραμε, στόχος της κοινότητας είναι η ικανοποίηση της βασικής κατανάλωσης των μελών, αυξημένη κατά το ευέλικτο φορτίο που κάθε μέλος επιθυμεί.

Η καμπύλη ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας ενός τυπικού καταναλωτή και οι προτεινόμενες ώρες ένταξης του ευέλικτου φορτίου παρουσιάζονται στο Σχήμα 25.

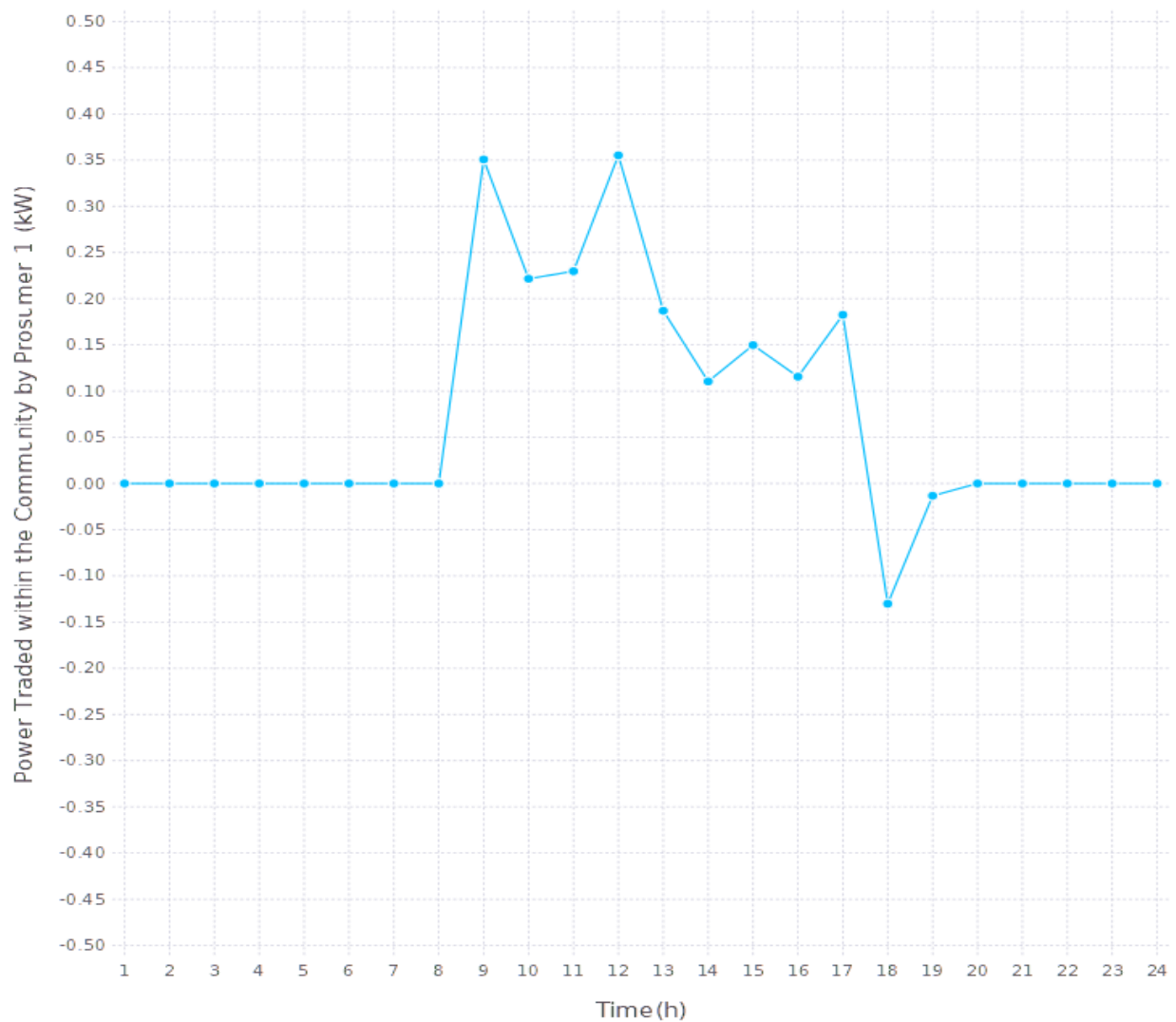


Σχήμα 25. Καμπύλη Ζήτησης και Ευέλικτο Φορτίο ενός τυπικού καταναλωτή

Από το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνουμε πως ο στόχος της κοινότητας να ικανοποιείται η βασική ζήτηση ενέργειας επιτυγχάνεται. Επιπλέον η πράσινη γραμμή (Ευέλικτο Φορτίο) δείχνει στο μέλος πότε

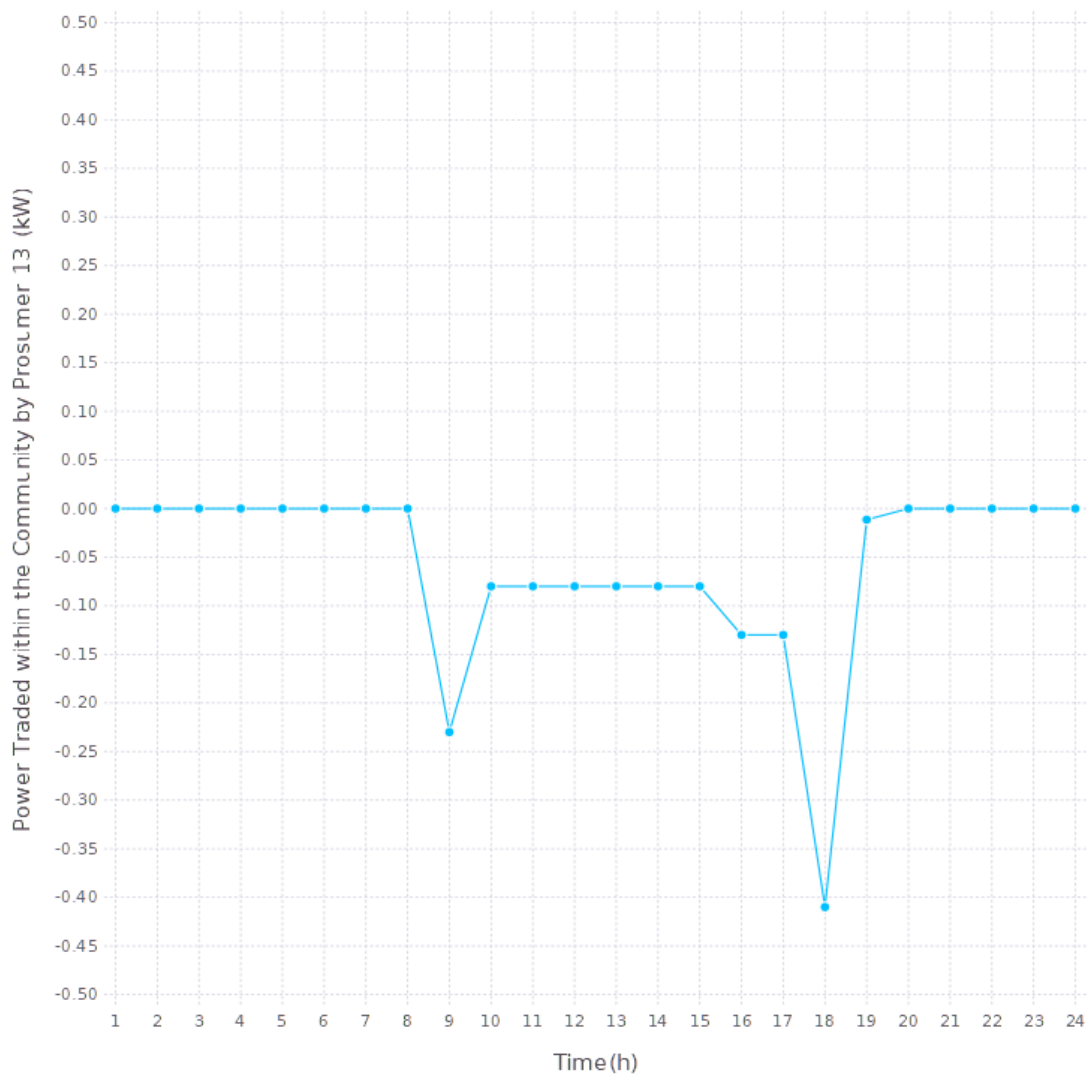
να τοποθετήσει το επιπλέον (ευέλικτο) φορτίο που χρειάζεται με τα ελάχιστα δυνατά κόστη. Κατά τις ώρες της μέγιστης παραγωγής εντός της κοινότητας παρατηρούμε ότι το μέλος έχει την δυνατότητα να καταναλώσει την μέγιστη δυνατή ισχύ καταβάλλοντας και πάλι τα ελάχιστα κόστη (το ευέλικτο φορτίο ταυτίζεται με το μέγιστο όριο). Αν για παράδειγμα το ευέλικτο φορτίο αφορά την φόρτιση ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου, τότε το μέλος της κοινότητας γνωρίζει πότε είναι η οικονομικότερη ώρα μέσα στην διάρκεια της ημέρας και συνεπώς πράττει ανάλογα.

Όπως αναφέραμε, τα μέλη της κοινότητας έχουν την δυνατότητα τόσο να πωλούν ηλεκτρική ενέργεια σε άλλα μέλη όσο και να αγοράζουν από αυτά. Για παράδειγμα η ενέργεια που αγόρασε και πούλησε το μέλος 2 τον Απρίλιο παρουσιάζεται στο Σχήμα 26.



Σχήμα 26. Ενέργεια που ανταλλάχθηκε εντός της κοινότητας

Όταν η παραπάνω καμπύλη είναι θετική σημαίνει πώς το μέλος 2 πουλάει ενέργεια σε άλλα μέλη της κοινότητας ενώ στην αντίθετη περίπτωση αγοράζει ενέργεια από αυτούς. Επιπλέον, καθώς η κοινότητα είναι ευέλικτη ως προς την ποικιλομορφία των μελών, είναι πιθανό κάποιος από αυτούς να μην διαθέτει μονάδα παραγωγής και συνεπώς να αγοράζει συνεχώς από τα υπόλοιπα μέλη, όπως συμβαίνει με το μέλος 13 :



Σχήμα 27. Ενέργεια που ανταλλάχθηκε εντός της κοινότητας

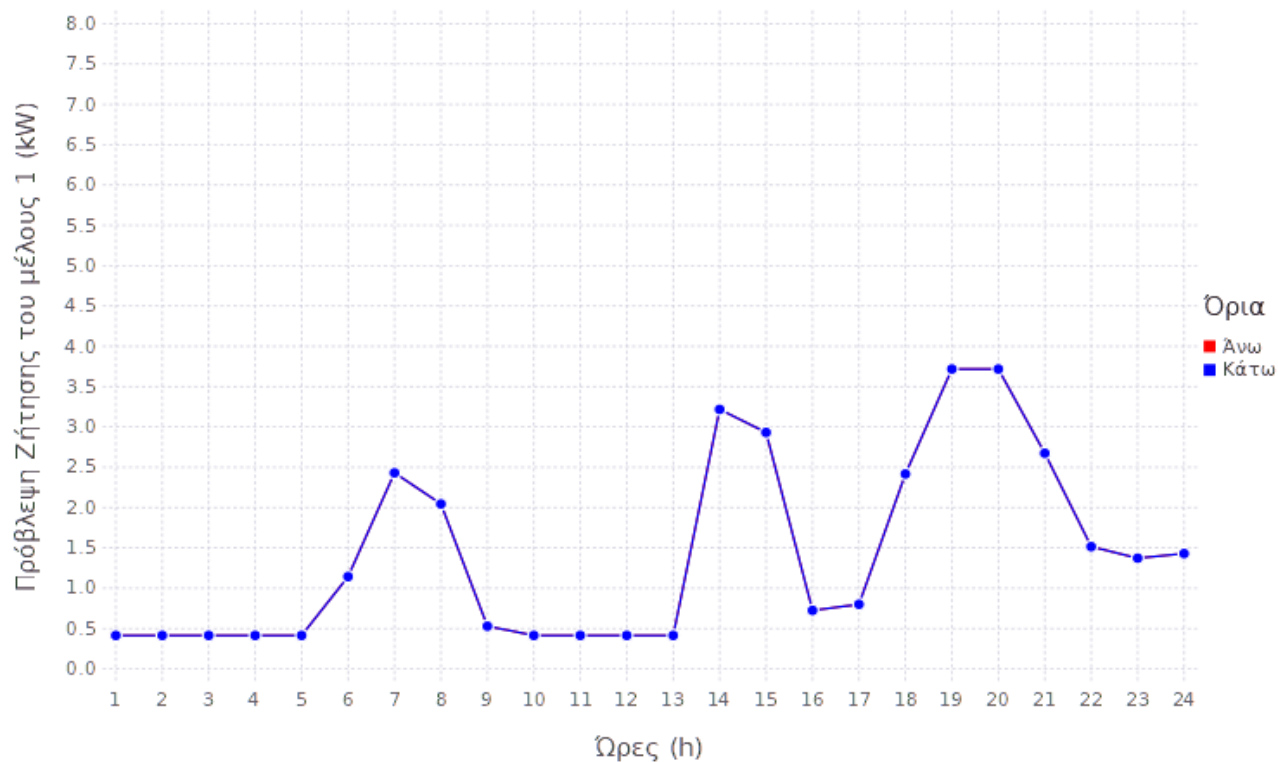
Δι

Οι αρνητικές τιμές του Διαγράμματος δείχνουν πώς το συγκεκριμένο μέλος δεν προσφέρει ενέργεια στην κοινότητα αλλά μόνο αγοράζει, σε τιμή γ_{com} , η οποία είναι χαμηλότερη από αυτήν που του προσφέρει ο προμηθευτής του. Φυσικά την ίδια συμπεριφορά μπορεί να ακολουθήσει ένα μέλος στην

περίπτωση βλάβης ή συντήρησης της μονάδας παραγωγής του, σενάρια το οποίο δεν αναλύεται στην παρούσα Διπλωματική Εργασία.

4.2.2 Ενεργειακή Κοινότητα με 15 μέλη χωρίς ευέλικτο φορτίο

Για λόγους πληρότητας και προκειμένου να αναδείξουμε την συμβολή του ευέλικτου φορτίου στην ελαχιστοποίηση της οικονομικής επιβάρυνσης θεωρούμε πως τα ανωτέρω αναφερθέντα μέλη της κοινότητας δεν διαθέτουν δυνατότητα μετακίνησης του φορτίου τους. Αυτό συνεπάγεται αδυναμία να μετακινήσουν το επιπλέον φορτίο τους κατά την διάρκεια της ημέρας ώστε να ελαχιστοποιήσουν το κόστος με το οποίο επιβαρύνονται για την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών. Σε αυτή τη περίπτωση η καμπύλη πρόβλεψης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας ενός τυπικού μέλους παρουσιάζεται στο Σχήμα 28 .



Σχήμα 28. Πρόβλεψη Ζήτησης χωρίς Ευέλικτο Φορτίο

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για την Κοινότητα με 15 μέλη και χωρίς δυνατότητα ευελιξίας στο φορτίο τους παρουσιάζονται στους Πίνακες 3 και Πίνακας 4.

Ημέρα	Συνολική Ζήτηση Ενέργειας (kWh)	Ζήτηση που καλύφθηκε από την παραγωγή της κοινότητας (kWh)	Ποσοστό κάλυψης ζήτησης από την κοινότητα (%)	Συνολική Ενέργεια που Αγοράστηκε τους Προμηθευτές (kWh)	Συνολική Ενέργεια που πωλήθηκε προς τους Προμηθευτές (kWh)
10/1	426.89	137.97	32.32	288.92	71.69
14/4	328.37	144.34	43.96	184.03	319.28
22/7	459.72	230.41	44.64	229.31	392.24
20/10	361.21	135.5	37.51	225.71	235.35
Σ.Μ.Ο	394.05	162.1	41.14	231.99	254.64

Πίνακας 3. Συνολική ενέργεια που συναλλάχθηκε από τα 15 μέλη της κοινότητας με ευέλικτο φορτίο

Ημέρα	Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος (€)
10/1	27.5
14/4	-4.38
22/7	-5.02
20/10	7.12
Σ.Μ.Ο	6.31

Πίνακας 4. Συνολική οικονομική επιβάρυνση/όφελος για την κοινότητα

Παρατηρούμε πως η Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση αυξάνεται σε σχέση με πριν καθώς τα μέλη της κοινότητας δεν ενσωματώνουν απαραίτητα το επιπλέον φορτίο τους τις ώρες κατά τις οποίες υπάρχει παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά των ιδίων ή άλλων μελών. Συνεπώς αναγκάζονται να αγοράζουν ηλεκτρική ενέργεια από τους προμηθευτές τους σε τιμή υψηλότερη από αυτή της τοπικής αγοράς.

Για παράδειγμα αναγκάζονται να φορτίσουν το ηλεκτρικό τους αυτοκίνητο κατά τις βραδινές ώρες, εφόσον δεν διαθέτουν τεχνολογία ώστε να μετακινήσουν αυτή την διαδικασία τις πρωινές ώρες όπου υπάρχει παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την κοινότητα.

Στον Πίνακα 5 πραγματοποιείται η σύγκριση της Συνολικής Οικονομικής Επιβάρυνσης/Οφέλους μεταξύ της Ενεργειακής Κοινότητας με ευέλικτο φορτίο και χωρίς.

Στον Πίνακα 5 πραγματοποιείται η σύγκριση της Συνολικής Οικονομικής Επιβάρυνσης/Οφέλους μεταξύ της Ενεργειακής Κοινότητας με ευέλικτο και χωρίς ευέλικτο φορτίο.

Ημέρα	Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος χωρίς Ευέλικτο Φορτίο (€)	Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος με Ευέλικτο Φορτίο (€)	Ποσοστό Μεταβολής (%)
10/1	27.5	26.97	-1.93
14/4	-4.38	-4.90	11.87
22/7	-5.02	-5.74	14.34
20/10	7.12	6.55	-8.01
Σ.Μ.Ο	6.31	5.72	-9.35

Πίνακας 5. Σύγκριση 15μελούς κοινότητας με και χωρίς ευέλικτο φορτίο

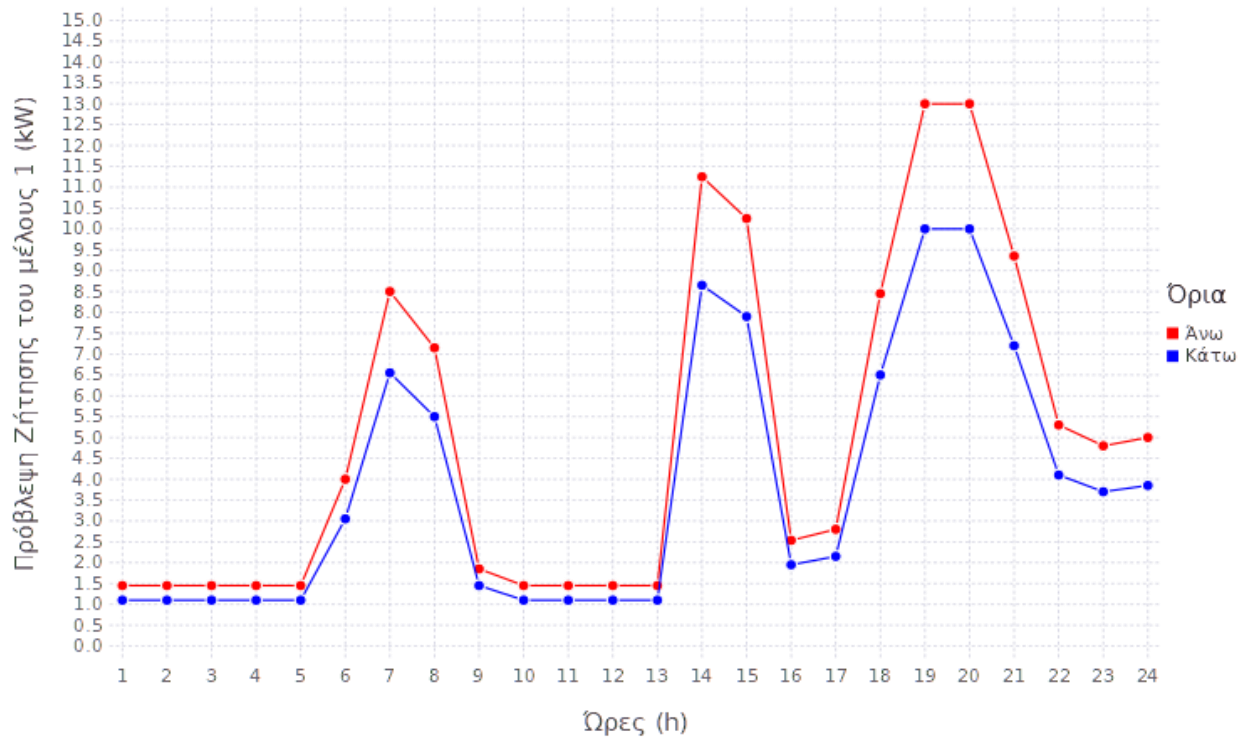
Παρατηρούμε πως η δυνατότητα μετακίνησης ενός ποσοστού της τάξεως του 10% του συνολικού φορτίου επιφέρει μείωση της Συνολικής Οικονομικής Επιβάρυνσης σε ποσοστό 9.35%. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα μέλη της κοινότητας ενσωματώνουν το επιπλέον φορτίο τους τις ώρες όπου υπάρχει παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την κοινότητα και συνεπώς ελαχιστοποιούν την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από τους προμηθευτές τους.

4.2.3 Ενεργειακή Κοινότητα με 100 μέλη

Για περαιτέρω ανάλυση και διερεύνηση του θέματος, θεωρούμε μια Ενεργειακή Κοινότητα η οποία αποτελείται από εκατό (100) μέλη και των οποίων η καμπύλη ζήτησης παράγεται τυχαία με την συνάρτηση rand της γλώσσας Julia. Υπό αυτήν την έννοια, ακολουθούμε το ίδιο μοτίβο ως προς τις ώρες αιχμής, όμως με διαφορετική συμφωνημένη ισχύ παροχής για κάθε μέλος. Συνεπώς εντάσσουμε στην Ενεργειακή Κοινότητα διαφορετικές κτιριακές εγκαταστάσεις και ακολουθώντας ποικιλομορφία στην ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα αποτελέσματα της Κοινότητας θα τα συγκρίνουμε με το σενάριο όπου οι παραπάνω 100 καταναλωτές ήταν αυτοπαραγωγοί.

Για παράδειγμα η καμπύλη φορτίου ενός μέλους που δημιουργήθηκε από την γεννήτρια τυχαίων αριθμών φαίνεται στο Σχήμα 29.



Σχήμα 29. Καμπύλη Ζήτησης με τυχαιότητα

Σε ότι αφορά τις καμπύλες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των μελών, χρησιμοποιείται και πάλι η συνάρτηση rand και παράγει τυχαίες τιμές της εγκατεστημένης ισχύος, μεταξύ 2 kWp και 10 kWp.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ακολουθούν στους Πίνακας 6, Πίνακας 7.

Ημέρα	Συνολική Ζήτηση Ενέργειας (kWh)	Ζήτηση που καλύφθηκε από την παραγωγή της κοινότητας (kWh)	Ποσοστό κάλυψης ζήτησης από την παραγωγή της κοινότητας (%)	Συνολική Ενέργεια που Αγοράστηκε από τους Προμηθευτές (kWh)	Συνολική Ενέργεια που πωλήθηκε προς τους προμηθευτές (kWh)
10/1	6946.24	1429.64	20.58	5516.61	0
14/4	5395.79	2341.95	43.40	2963.49	723.66
22/7	7480.26	3699.95	49.46	3780.31	549.13
20/10	5943.36	2256.06	37.96	3687.3	276.33
Σ.Μ.Ο	6441.41	2431.9	38.49	3986.93	387.28

Πίνακας 6. Συνολική ενέργεια που συναλλάχθηκε από τα 100 μέλη της κοινότητας με ευέλικτο φορτίο

Ημέρα	Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος (€)
10/1	634.24
14/4	282.06
22/7	391.57
20/10	401.82
Σ.Μ.Ο	447.42

Πίνακας 7. Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος

4.2.3 Ενεργειακή Κοινότητα με 30 μέλη και Ευέλικτο φορτίο

Θεωρούμε πώς η Ενεργειακή Κοινότητα αποτελείται από 30 μέλη με τα χαρακτηριστικά αυτών να ακολουθούν τα χαρακτηριστικά της παραπάνω κοινότητας με 15 μέλη. Υπό αυτήν την έννοια τα μέλη της μεγαλύτερης κοινότητας είναι ανά δύο ίδια. Στόχος είναι η σύγκριση μεταξύ της 15μελούς και 30μελούς κοινότητας ώστε να δούμε το οικονομικό αντίκτυπο που έχει ο διπλασιασμός των μελών μιας κοινότητας. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στους Πίνακας 8, Πίνακας 9.

Ημέρα	Συνολική Ζήτηση Ενέργειας (kWh)	Ζήτηση που καλύφθηκε από την παραγωγή της κοινότητας (kWh)	Ποσοστό κάλυψης ζήτησης από την παραγωγή της κοινότητας (%)	Συνολική Ενέργεια που Αγοράσθηκε από τους Προμηθευτές (kWh)	Συνολική Ενέργεια που πωλήθηκε προς τους προμηθευτές (kWh)
10/1	757.66	296.74	39.17	460.91	122.57
14/4	582.81	289.21	49.62	293.60	638.03
22/7	815.94	461.55	56.57	354.38	783.75
20/10	641.09	278.77	43.48	362.32	462.92
Σ.Μ.Ο	699.38	331.57	47.41	367.80	501.82

Πίνακας 8. Συνολική ενέργεια που συναλλάχθηκε από τα 30 μέλη της κοινότητας με ευέλικτο φορτίο

Ημέρα	Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος (€)
10/1	39.08
14/4	-17.29
22/7	-21.96
20/10	4.62
Σ.Μ.Ο	1.11

Πίνακας 9. Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος

Στη συνέχεια πραγματοποιείται η σύγκριση της 15μελούς κοινότητας με την 30μελή ώστε να μελετηθούν οι οικονομικές επιπτώσεις από τον διπλασιασμό του μεγέθους της κοινότητας.

Ημέρα	Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος 15μελούς Κοινότητας (€)	Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος 30μελούς Κοινότητας (€)	Ποσοστό Μεταβολής (%)
10/1	26.97	39.08	44.90
14/4	-4.9	-17.29	-252.86
22/7	-5.74	-21.96	-282.56
20/10	6.55	4.62	-29.47
Σ.Μ.Ο	5.72	1.11	-80.59

Πίνακας 10. Σύγκριση 15μελούς και 30μελούς Κοινότητας

Παρατηρούμε συνεπώς πως ο διπλασιασμός των μελών της κοινότητας προκαλεί την μείωση της συνολικής οικονομικής επιβάρυνσης κατά 80.59%. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αυξήθηκε η παραγόμενη ενέργεια από τους φωτοβολταϊκούς σταθμούς, συνεπώς ικανοποιείται μεγαλύτερο μέρος φορτίο. Επιπλέον παρατηρούμε ότι αυξάνεται σημαντικά το ποσοστό κάλυψης της ζήτησης από παραγόμενη ενέργεια εντός της κοινότητας για τον ίδιο λόγο.

4.3 Αυτοπαραγωγή

Ως αυτοπαραγωγός ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε αναφέρεται ο παραγωγός ηλεκτρικής ενέργειας, κυρίως για την δική του χρήση, ο οποίος διοχετεύει τυχόν πλεόνασμα της ενέργειας αυτής στο δίκτυο. Με τον όρο Δίκτυο εννοείται το σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας της Δημόσιας Επιχείρησης

Ηλεκτρισμού Α.Ε (ΔΕΗ Α.Ε) που είναι εγκατεστημένο στην ελληνική επικράτεια , το οποίο αποτελείται από γραμμές μέσης και χαμηλής τάσης και εγκαταστάσεις διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και από γραμμές και εγκαταστάσεις υψηλής τάσης που έχουν ενταχθεί σε αυτό.

Σύμφωνα με την παρ. 5 του άρθρου 13 του ν.3548/2006, ο αυτοπαραγωγός θα αποζημιωθεί με Τιμή Αναφοράς (Τ.Α) για το πλεόνασμα της παραγόμενης ενέργειάς του, το οποίο μπορεί να ανέλθει μέχρι το 20% της συνολικά παραγόμενης από τους σταθμούς του ηλεκτρικής ενέργειας, σε ετήσια βάση. Οι ρυθμίσεις που αφορούν τους αυτοπαραγωγούς εμπλουτίστηκαν από το νόμο Ν.3851/2010 και τον πιο πρόσφατο Ν.4414/2016.

Σύμφωνα με το Ν.4602/2019 η Τιμή Αναφοράς προκύπτει ως:

$T.A=1,05*$ (μεσοσταθμική Τιμή Αναφοράς που προέκυψε κατά τις 3 προηγούμενες πριν την τελευταία ανταγωνιστικές διαδικασίες.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η τελική τιμή προσφοράς για αυτοπαραγωγούς που διαθέτουν μονάδα ΑΠΕ ισχύος μικρότερη ή ίση των 500 kW, ορίζεται για το έτος 2018 στα 0.08 €/kWh ενώ για το έτος 2020 ορίζεται στα 0.07 €/kWh. Η καταμέτρηση της παραγόμενης ενέργειας πραγματοποιείται ταυτόχρονα με την καταμέτρηση της ενέργειας που καταναλώνεται και η πίστωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ακολουθεί τους κύκλους χρέωσης της καταναλισκόμενης. Η εκκαθάριση γίνεται από τον προμηθευτή.

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας θα χρησιμοποιήσουμε σαν σενάριο αναφοράς τους αυτοπαραγωγούς με εγκατεστημένη ισχύ μικρότερη ή ίση των 10 kW.

Υπό αυτήν την έννοια θεωρούμε ότι οι 12 από τους παραπάνω εξεταζόμενους καταναλωτές είναι κάτοχοι μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Φωτοβολταϊκά στοιχεία) με εγκατεστημένη ισχύ μικρότερη ή ίση των 10 kW και αποζημιώνονται για το πλεόνασμα της ενέργειας τους, όπως ορίστηκε προηγουμένως, με τιμή 80 €/MWh. Για τις τέσσερις αντιπροσωπευτικές ημέρες του έτους καταγράφουμε την ενέργεια που παρήγαγαν, την ενέργεια που ιδιοκατανάλωσαν και το πλεόνασμα ενέργειας που διοχέτευσαν. Σαν κόστος ή επιβάρυνση των καταναλωτών ορίζουμε το κόστος της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από τους προμηθευτές τους (σε λιανική τιμή) μείον τα χρήματα που

εξοικονόμησαν από την κατανάλωση της παραγόμενης από αυτούς ενέργεια και τα έσοδα από την πώληση της πλεονάζουσας ενέργειας. Στην περίπτωση που ο παραπάνω δείκτης προκύψει αρνητικός, σημαίνει πώς ο εκάστοτε αυτοπαραγωγός έχει κέρδος.

Ως λιανική τιμή αγοράς θέτουμε $\gamma_{imp} = 114.97 \text{ €/MWh}$, (0.11497 €/kWh), η οποία αντιστοιχεί στο οικιακό τιμολόγιο, και ως τιμή πώλησης από τον αυτοπαραγωγό θέτουμε $\gamma_{exp}=80 \text{ €/MWh}$, (0.08 €/kWh).

Εφόσον στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούμε τέσσερις αντιπροσωπευτικές ημέρες του χρόνου τα αποτελέσματα που ακολουθούν είναι ημερήσια και αθροιστικά για τους δεκαπέντε καταναλωτές/παραγωγούς που θεωρήσαμε.

Τα αποτελέσματα του σεναρίου αυτοπαραγωγής παρουσιάζονται στους Πίνακας 11, Πίνακας 12.

Ημέρα	Συνολική Ζήτηση (kWh)	Ζήτηση που καλύφθηκε από την παραγωγή του αυτοπαραγωγού	Ποσοστό ιδιοκατανάλωσης (%)	Ενέργεια που Αγοράστηκε από τους Προμηθευτές (kWh)	Συνολική Εγγεόμενη Ενέργεια (πλεονάζουσα) (kWh)	Συνολική Ενέργεια που τελικά πωλήθηκε προς τους Προμηθευτές (kWh)
10/1	426.89	113.79	26.66	313.10	95.87	26.66
14/4	328.37	115.04	35.03	213.33	194.03	35.03
22/7	459.72	191.27	41.61	268.45	431.38	41.61
20/10	361.21	113.5	31.61	247.71	257.35	31.42
Σ.Μ.Ο	394.05	133.4	33.85	260.65	244.66	33.68

Πίνακας 11. Συνολική ενέργεια που συναλλάχθηκε από 15 αυτοπαραγωγούς

Στον Πίνακας 11 παρουσιάζεται η συνολική ζήτηση των αυτοπαραγωγών, η ενέργεια που αγόρασαν από τους προμηθευτές τους για την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών, η ενέργεια που δεν κατανάλωσαν και διοχέτευσαν στο δίκτυο (**Εγγεόμενη Ενέργεια (πλεονάζουσα)**) καθώς και το ποσοστό της ενέργειας που κατανάλωσαν από την ενέργεια που οι ίδιοι παρήγαγαν (**Ποσοστό Ιδιοκατανάλωσης**).

Με **Σ.Μ.Ο** συμβολίζουμε τον σταθμισμένο μέσο όρο των τεσσάρων αντιπροσωπευτικών ημερών.

Ημέρα	Συνολικά Έσοδα από την πώληση ενέργειας (€)	Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος (€)
10/1	1.53	34.47
14/4	3.1	21.43
22/7	6.9	23.97
20/10	4.12	24.36
Σ.Μ.Ο	3.91	26.06

Πίνακας 12. Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος

Με τον όρο **Συνολικά Έσοδα από την πώληση ενέργειας** ορίζεται το άθροισμα των εσόδων όλων των υπό εξέταση αυτοπαραγωγών που λαμβάνουν για το πλεόνασμα της παραγόμενης ενέργειας και το οποίο μπορεί να ανέλθει μέχρι το 20% της συνολικά παραγόμενης από τους σταθμούς τους ηλεκτρικής ενέργειας, σε ετήσια βάση. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας θεωρούμε πως η εκκαθάριση πραγματοποιείται σε 24ωρο κύκλο. Ως **Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος (€)** ορίζεται η διαφορά των χρηματικών μονάδων που καταβάλει ο εκάστοτε αυτοπαραγωγός στον προμηθευτή του για την κάλυψη των ενεργειακών του αναγκών και των εσόδων από την πώληση της πλεονάζουσας ενέργειας, όπως ορίστηκε προηγουμένως.

Τα αθροιστικά ημερήσια κόστη για τις αντιπροσωπευτικές ημέρες για τα σενάρια της Αυτοπαραγωγής και της προτεινόμενης Τοπικής Αγοράς παρουσιάζονται στον Πίνακα 13.

Ημέρα	Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος Αυτοπαραγωγής (€)	Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος Ενεργειακής Κοινότητας (€)	Ποσοστό Μεταβολής (%)
10/1	34.47	26.97	-21.76
14/4	21.43	-4.90	-122.87
22/7	23.97	-5.74	-123.95
20/10	24.36	6.55	-73.11
Σ.Μ.Ο	26.06	5.72	-78.06

Πίνακας 13. Σύγκριση Αυτοπαραγωγής και Τοπικής Αγοράς Ενεργειακής Κοινότητας.

Από τον Πίνακα 14 συμπεραίνουμε πως η μείωση της χρηματικής επιβάρυνσης των καταναλωτών για την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών ανέρχεται σε ποσοστό 78.06% ετησίως, με την υιοθέτηση της τοπικής αγοράς εντός της Ενεργειακής Κοινότητας.

Θεωρούμε ότι η συνολική επιβάρυνση για την πλήρη εγκατάσταση του Φωτοβολταϊκού σταθμού (φωτοβολταϊκά πλαίσια, inverter, σύστημα στήριξης κ.α.) ανέρχεται σε 11.000€. Επιπλέον, στην περίπτωση όπου οι καταναλωτές δεν είχαν εγκαταστήσει φωτοβολταϊκά στις στέγες τους, θα αγόραζαν όλη την ενέργεια που χρειάζονται για την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών και συνεπώς το συνολικό ετήσιο κόστος θα ανερχόταν σε 16.530 €. Επομένως, η ετήσια απόδοση της επένδυσης παρουσιάζεται στον συγκριτικό Πίνακα 14.

	Συνολική Ετήσια Επιβάρυνση (€)	Ετήσια Απόδοση Επένδυσης (€)
Αυτοπαραγωγή	9511	7020
Ενεργειακή Κοινότητα	2088	14442

Πίνακας 14. Ετήσια Απόδοση Επένδυσης

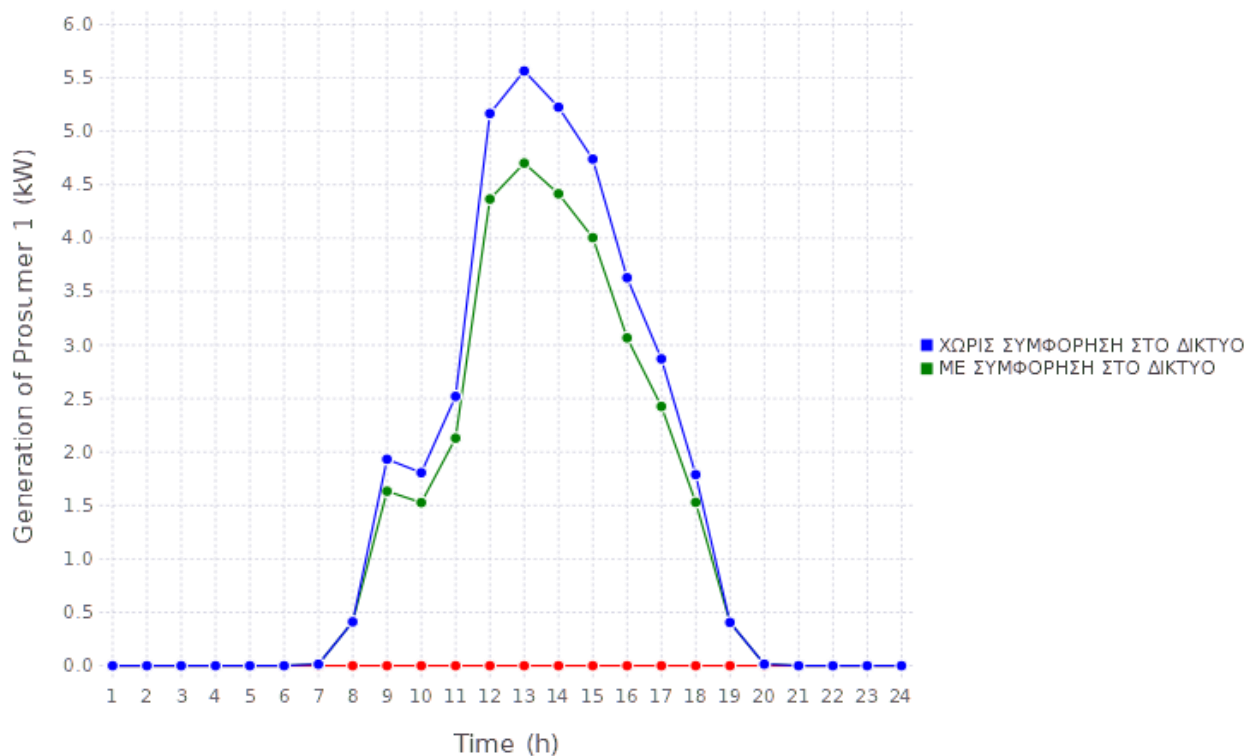
Ένας άλλος δείκτης αξιολόγησης των μοντέλων αγοράς αποτελεί η συνολική χρήση του δικτύου και συστήματος. Ορίζουμε σαν Συνολική χρήση του Δικτύου Διανομής το άθροισμα της αγορασθείσας και πωληθείσας ενέργειας με τον προμηθευτή, δηλαδή εξαιρούμε από το άθροισμα την ιδιοκατανάλωση και την ενέργεια που διακινήθηκε εντός της Ενεργειακής Κοινότητας.

Ημέρα	Συνολική Ζήτηση Ενέργειας (kWh)	Συνολική Χρήση Δικτύου Διανομής από Αυτοπαραγωγή (kWh)	Συνολική Χρήση Δικτύου Διανομής από την Κοινότητα (kWh)	Ποσοστό Αποσυμφόρησης Δικτύου (%)
10/1	426.89	408.97	331.15	19.03
14/4	328.37	407.36	473.61	-16.26
22/7	459.72	699.83	580.97	16.98
20/10	361.21	505.06	428.28	15.20
Σ.Μ.Ο	394.05	505.31	453.50	10.25

Πίνακας 15. Αποσυμφόρηση Δικτύου με την Τοπική Αγορά.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 15, με την υιοθέτηση του μοντέλου της τοπικής αγοράς επιτυγχάνεται αποσυμφόρηση του δικτύου κατά ποσοστό 10.25% ετησίως. Αυτός ο δείκτης αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα για τις Ενεργειακές Κοινότητες αφού η αποσυμφόρηση του Δικτύου συνεπάγεται μεγαλύτερο περιθώριο ένταξης καινούριων μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε.

Παρατηρούμε ότι η αρνητική τιμή στο ποσοστό αποσυμφόρησης τον Απρίλιο συνεπάγεται συμφόρηση του Δικτύου Διανομής λόγω της λειτουργίας της τοπικής αγοράς εντός της Ενεργειακής Κοινότητας. Αυτό οφείλεται στην σχετικά χαμηλή ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και ταυτόχρονα στην υψηλή παραγωγή εκείνο τον μήνα. Σε τέτοιες περιπτώσεις μεγάλης συμφόρησης, ο διαχειριστής μπορεί έπειτα από αίτημα προς τον διαχειριστή κοινότητας να ζητήσει μείωση της εγχεόμενης ενέργειας, δηλαδή μείωσης της στάθμης παραγωγής των φωτοβολταϊκών της κοινότητας. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, δηλαδή τον Απρίλιο, ο διαχειριστής της κοινότητας μπορεί να θέσει κατάλληλη τιμή στον συντελεστή $coef_{exp,g}$ της συνάρτησης g , όπως αυτή ορίστηκε στο Κεφάλαιο 3, και συνεπώς να μειώσει την στάθμη παραγωγής των Φωτοβολταϊκών της κοινότητας, όπως φαίνεται Σχήμα 30.



Σχήμα 30. Μείωση Παραγωγής για Αποσυμφόρηση του Δικτύου

Σε αυτό το σενάριο η συνολική χρήση του Δικτύου ή Συστήματος είναι 403.46 kWh, δηλαδή μειώνεται κατά 15% για την εξυπηρέτηση του διαχειριστή Δικτύου. Παράλληλα μειώνονται και τα έσοδα των μελών της Ενεργειακής Κοινότητας, λόγω του ελέγχου της παραγόμενης ενέργειας από τους σταθμούς τους. Για αυτό το λόγο θα αποζημιωθούν με τιμή $\gamma_{\text{exp}} = 0.08 \text{ €/kWh}$.

Παρ' όλα αυτά, στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν έχει μελετηθεί η προσφορά επικουρικών υπηρεσιών στο δίκτυο διανομής και συνεπώς το παραπάνω παράδειγμα χρησιμοποιείται ώστε να δείξουμε την ευελιξία και την προσφορά της Ενεργειακής Κοινότητας.

Επιπλέον, για λόγους διερεύνησης θεωρούμε εκατό (100) τυχαίους αυτοπαραγωγούς ώστε να πραγματοποιηθεί η σύγκριση με την περίπτωση της Ενεργειακής Κοινότητας που αποτελείται από ισάριθμα μέλη. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ακολουθούν στους Πίνακας 16, Πίνακας 17.

Ημέρα	Συνολική Ζήτηση Ενέργειας (kWh)	Συνολική Ενέργεια που Αγοράστηκε από τους Προμηθευτές (kWh)	Εγγεόμενη (πλεονάζουσα) ενέργεια (kWh)	Ποσοστό Ιδιοκατανάλωσης (%)
10/1	6954.41	5683.42	158.65	18.27603
14/4	5405.36	3619.57	1379.74	33.03739
22/7	7480.26	4744.47	1513.28	36.57346
20/10	5891.05	4253.84	895.19	27.79148
Σ.Μ.Ο	6432.77	260.65	244.66	28.91959

Πίνακας 16. Συνολική Ενέργεια που συναλλάχθηκε από 100 Αυτοπαραγωγούς

Ημέρα	Συνολικά Έσοδα από την πώληση ενέργειας (€)	Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος των Αυτοπαραγωγών (€)
10/1	12.21	641.21
14/4	50.65	365.49
22/7	67.92	477.55
20/10	40.52	448.55
Σ.Μ.Ο	42.825	483.2

Πίνακας 17. Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος

Η σύγκριση του κόστους και συνεπώς της τελικής επιβάρυνσης των καταναλωτών εμφανίζεται στον Πίνακα 18.

Ημέρα	Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος των 100 Αυτοπαραγωγών (€)	Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος των 100 μελών της Ενεργειακής Κοινότητας (€)	Ποσοστό Μεταβολής (%)
10/1	641.21	634.24	-1.09
14/4	365.49	282.06	-22.83
22/7	477.55	392.57	-17.79
20/10	448.55	401.42	-10.51
Σ.Μ.Ο	483.2	447.42	-7.4

Πίνακας 18. Σύγκριση 100 τυχαίων καταναλωτών

4.4 Σταθερή Εγγυημένη Τιμή

Πρόκειται για παραγωγούς που αποζημιώνονται με σταθερή τιμή 0.08 €/kWh για την ενέργεια που παράγουν και διοχετεύουν στο δίκτυο. Δεν κάνουν ιδιοκατανάλωση ούτε ενεργειακό συμψηφισμό. Αντίθετα πραγματοποιείται λογιστικός συμψηφισμός ο οποίος στα πλαίσια της παρούσας εργασίας ακολουθεί 24ωρο κύκλο. Η τιμή αποζημίωσης είναι σταθερή και ισχύει για 25 έτη από την στιγμή σύναψης της σύμβασης.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του προγράμματος παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στους ακόλουθους Πίνακας 19, Πίνακας 20.

Ημέρα	Συνολική Ζήτηση (kWh)	Συνολική Ενέργεια που Αγοράστηκε από τους Προμηθευτές (kWh)	Συνολική Ενέργεια που Πωλήθηκε προς τους Προμηθευτές (kWh)
10/1	426.89	426.89	209.66
14/4	328.37	328.37	463.62
22/7	459.72	459.72	622.65
20/10	361.21	361.21	370.85
Σ.Μ.Ο	394.05	394.05	416.70

Πίνακας 19. Συνολική Ενέργεια που συναλλάχθηκε στην Σταθερή Εγγυημένη Τιμή.

Ημέρα	Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος (€)
10/1	32.31
14/4	0.66
22/7	7.12
20/10	11.86
Σ.Μ.Ο	12.99

Πίνακας 20. Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος

Η **Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος** ορίζεται ως η διαφορά του αθροίσματος των εξόδων των εξεταζόμενων καταναλωτών και του αθροίσματος των εσόδων αυτών. Συνεπώς οι θετικές τιμές του υποδεικνύουν χρηματική αξία με την οποία επιβαρύνονται οι εξεταζόμενοι, ενώ αν προκύψει αρνητική τιμή συνεπάγεται κέρδος.

Τα αθροιστικά ημερήσια κόστη για τις αντιπροσωπευτικές ημέρες για τα σενάρια του Ειδικού Προγράμματος Ανάπτυξης και της προτεινόμενης Τοπικής Αγοράς παρουσιάζονται στον Πίνακα 21.

Ημέρα	Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος της Σταθερής Εγγυημένης Τιμής (€)	Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος της Ενεργειακής Κοινότητας (€)	Ποσοστό Μεταβολής (%)
10/1	32.31	26.97	-16.53
14/4	0.66	-4.90	-842.42
22/7	7.12	-5.74	-180.62
20/10	11.86	6.55	-46.70
Σ.Μ.Ο	12.99	5.72	-55.97

Πίνακας 21. Σύγκριση Σταθερής Εγγυημένης Τιμής και Τοπικής Αγοράς

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 21 τα συνολικά κόστη μειώνονται κατά 55.97% με την υιοθέτηση της τοπικής αγοράς εντός της Ενεργειακής Κοινότητας.

Με το συνολικό κόστος της επένδυσης να ανέρχεται όπως και πριν στις 11.000 € και την συνολική επιβάρυνση για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών χωρίς την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών να ανέρχεται σε 16.530 € προκύπτει ο

Πίνακας 22.

	Συνολική Ετήσια Επιβάρυνση (€)	Ετήσια Απόδοση Επένδυσης (€)
Σταθερή Εγγυημένη Τιμή	4369	12161
Ενεργειακή Κοινότητα	2088	14442

Πίνακας 22. Ετήσια Απόδοση Επένδυσης

4.5 Ενεργειακός Συμψηφισμός

Ενεργειακός Συμψηφισμός (Net Metering) παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από σταθμό ΑΠΕ αυτοπαραγωγού ορίζεται ο συμψηφισμός της παραγόμενης με την καταναλισκόμενη ενέργεια στην εγκατάσταση του παραγωγού, η οποία βρίσκεται στο ίδιο ή όμορο χώρο με το σταθμό Α.Π.Ε όπως τροποποιήθηκε από την υπουργική απόφαση ΦΕΚ 759/Β 2019. Αντίστοιχα στον Εικονικό Ενεργειακό Συμψηφισμό (virtual net metering) η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να γίνεται σε εγκαταστάσεις από τις οποίες τουλάχιστον η μία δεν βρίσκεται στο ίδιο ή όμορο χώρο με το σταθμό ΑΠΕ. Το πλεόνασμα ενέργειας διοχετεύεται στο δίκτυο και ο κάτοχος δεν αποζημιώνεται για αυτό. Η εκκαθάριση σε αυτή τη περίπτωση πραγματοποιείται σε κύκλο τριών ετών.

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκε το μοντέλο του Ενεργειακού Συμφηφισμού με 24ωρο κύκλο εκκαθάρισης. Ο 24ωρος κύκλος εκκαθάρισης αποτελεί μία παραδοχή στην παρούσα εργασία και βασίζεται στο ενδεχόμενο να υιοθετηθεί στο μέλλον. Οι καταναλωτές και ιδιοκτήτες σταθμού Α.Π.Ε έχουν την δυνατότητα ιδιοκατανάλωσης κατά τις ώρες όπου παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, ενώ το πλεόνασμα αυτής έχουν την δυνατότητα να το καταναλώσουν τις υπόλοιπες ώρες του 24ωρο χωρίς χρηματική επιβάρυνση. Η πλεονάζουσα ενέργεια που δεν καταναλώθηκε από τον κάτοχο της μονάδας Α.Π.Ε διοχετεύεται στο Σύστημα ή Δίκτυο χωρίς να αποζημιώνεται.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του Ενεργειακού Συμφηφισμού για τους 15 χρήστες που θεωρήθηκαν αρχικά παρουσιάζονται στους Πίνακας 23, Πίνακας 24.

Ημέρα	Συνολική Ζήτηση (kWh)	Ζήτηση που καλύφθηκε από τον σταθμό του παραγωγού	Ποσοστό Ιδιοκατανάλωσης (%)	Συνολική Ενέργεια που Αγοράστηκε από τους Προμηθευτές (kWh)	Συνολική Ενέργεια που διοχετεύτηκε στο Δίκτυο (kWh)
10/1	426.89	177.67	41.62	249.22	32
14/4	328.37	120.56	36.71	207.81	343.06
22/7	459.72	375.25	81.63	84.47	247.4
20/10	361.21	254.3	70.04	106.91	116.55
Σ.Μ.Ο	394.05	195.1	49.51	162.10	184.75

Πίνακας 23. Συνολική ενέργεια που συναλλάχθηκε στον Ενεργειακό Συμφηφισμό

Ως **ποσοστό ιδιοκατανάλωσης** ορίζεται το ποσοστό της ενέργειας που κατανάλωσαν από την ενέργεια που οι ίδιοι παρήγαγαν.

Ημέρα	Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος (€)
10/1	28.65
14/4	8.78
22/7	9.71
20/10	12.29
Σ.Μ.Ο	14.86

Πίνακας 24. Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος

Στον Πίνακα 24 παρουσιάζονται τα συνολικά κόστη με τα οποία επιβαρύνονται οι 15 καταναλωτές/παραγωγοί.

Τα συνολικά κόστη για τις αντιπροσωπευτικές ημέρες για τα σενάρια του Ενεργειακού Συμφηφισμού και της προτεινόμενης Τοπικής Αγοράς παρουσιάζονται στον Πίνακα 25.

Ημέρα	Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος Ενεργειακού Συμφηφισμού (€)	Συνολική Οικονομική Επιβάρυνση/Όφελος Ενεργειακής Κοινότητας (€)	Ποσοστό Μεταβολής (%)
10/1	28.65	26.97	-5.86
14/4	8.78	-4.90	-155.81
22/7	9.71	-5.74	-159.28
20/10	12.29	6.55	-46.70
Σ.Μ.Ο	14.86	5.72	-61.51

Πίνακας 25. Σύγκριση Ενεργειακού Συμφηφισμού και Τοπικής Αγοράς

Σύμφωνα με τον Πίνακα 25, τα συνολικά κόστη μειώνονται κατά 61.51% ετησίως με την υιοθέτηση της τοπικής αγοράς εντός των Ενεργειακών Κοινοτήτων.

Με το συνολικό κόστος της επένδυσης να ανέρχεται όπως και πριν στις 11.000 € και την συνολική επιβάρυνση για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών χωρίς την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών να ανέρχεται σε 16.530 € προκύπτει ο Πίνακας 26.

	Συνολική Ετήσια Επιβάρυνση (€)	Ετήσια Απόδοση Επένδυσης (€)
Ενεργειακός Συμφηφισμός	5424	11106
Ενεργειακή Κοινότητα	2088	14442

Πίνακας 26. Ετήσια Απόδοση και Χρόνος Απόσβεσης

4.6 Αξιολόγηση των Αποτελεσμάτων των Προσομοιώσεων

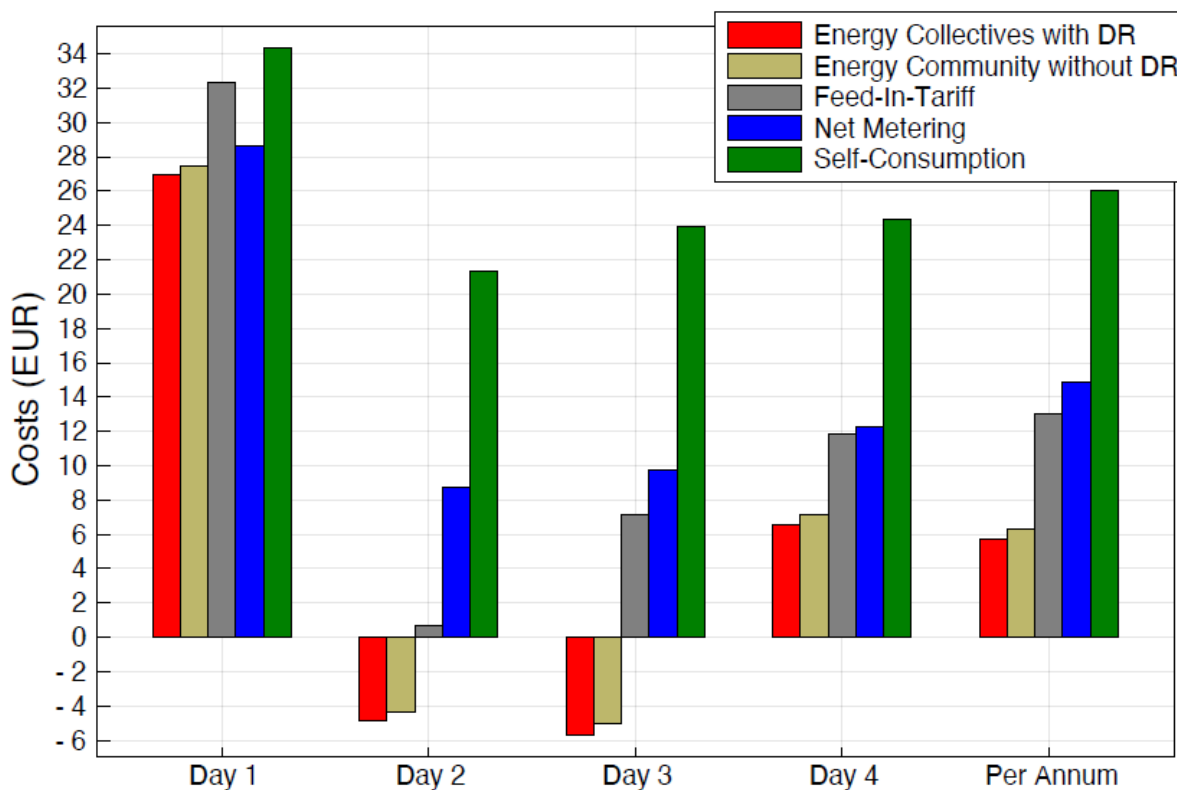
Η προτεινόμενη μορφή αποκεντρωμένης αγοράς στα πλαίσια των Ενεργειακών Κοινοτήτων επιφέρει τόσο οικονομικά όσο και κοινωνικά οφέλη. Υπό αυτή την έννοια:

- Παρατηρείται συνολική μείωση της μέσης χρηματικής επιβάρυνσης των καταναλωτών με δυνατότητα μετακίνησης του φορτίου τους (ευέλικτο) συγκριτικά με το σενάριο της αδυναμίας μετακίνησης σε ποσοστό **9.35%**.
- Παρατηρείται μείωση της συνολικής χρηματικής επιβάρυνσης κατά **80.59%** όταν ο αριθμός των μελών της Ενεργειακής Κοινότητας διπλασιάζεται.
- Παρατηρείται συνολική μείωση της μέσης χρηματικής επιβάρυνσης των καταναλωτών συγκριτικά με το σενάριο της Αυτοπαραγωγής σε ποσοστό **78.05 %**.
- Παρατηρείται συνολική μείωση της μέσης χρηματικής επιβάρυνσης των καταναλωτών συγκριτικά με το Σενάριο του Σταθερής Εγγυημένης Τιμής σε ποσοστό **55.97%**.
- Παρατηρείται συνολική μείωση της μέσης χρηματικής επιβάρυνσης των καταναλωτών συγκριτικά με το Σενάριο του Ενεργειακού Συμψηφισμού σε ποσοστό **61.51%**.

Επιπλέον, η ενσωμάτωση όλο και περισσότερων μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε και Σ.Η.Θ.Υ.Α προϋποθέτει τον μη κορεσμό του Συστήματος και Δικτύου και ακολούθως της αποσυμφόρηση τόσο του Διασυνδεδεμένου όσο κι του μη Διασυνδεδεμένου Συστήματος και Δικτύου. Η προτεινόμενη τοπική αγορά εντός των Ενεργειακών Κοινοτήτων συμβάλει στην αποσυμφόρηση ως εξής :

- Παρατηρείται συνολική μέση μείωση χρήσης του Συστήματος και του Δικτύου συγκριτικά με το Σενάριο της Αυτοπαραγωγής σε ποσοστό **10.25%**
- Σε περίπτωση συμφόρησης στο Δίκτυο οι καταναλωτές/παραγωγοί που είναι μέλη της ενεργειακής κοινότητας μειώνουν την παραγόμενη από αυτούς ενέργεια και συνεπώς συμβάλλουν στην αποσυμφόρηση του δικτύου.

Οι παραπάνω συγκρίσεις φαίνονται γραφικά στα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 31. Συνολική Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Όπου

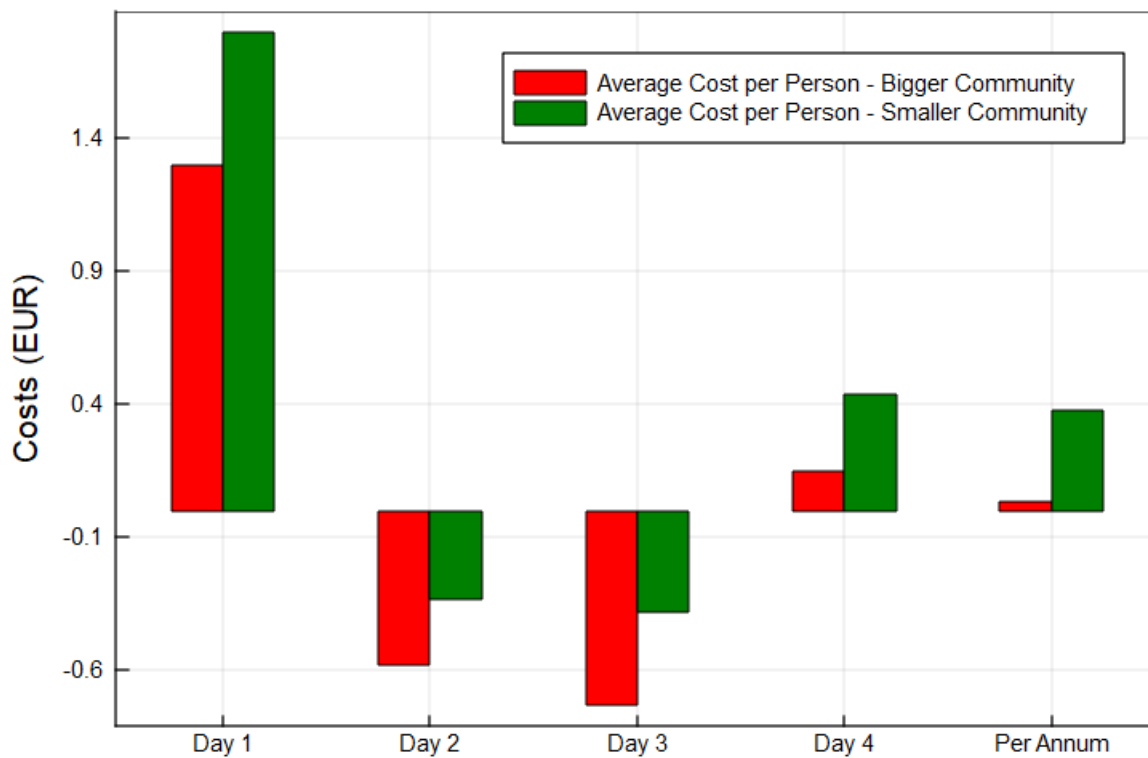
Energy Collectives with DR: Ενεργειακή Κοινότητα με 15 μέλη και ευέλικτο φορτίο

Energy Collectives without DR: Ενεργειακή Κοινότητα με 15 μέλη χωρίς ευέλικτο φορτίο

Feed-In-Tariff: Σταθερή Εγγυημένη τιμή

Net Metering: Ενεργειακός Συμψηφισμός

Self-Consumption: Αυτοπαραγωγή



Σχήμα 32. Σύγκριση μεγάλης και μικρής Κοινότητας

Όπου

Bigger Community: Ενεργειακή Κοινότητα με 15 μέλη

Smaller Community: Ενεργειακή Κοινότητα με 30 μελη

5. Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκε το μοντέλο βελτιστοποίησης με την χρήση του πακέτου JuMP της γλώσσας προγραμματισμού Julia και εφαρμογή στην αποκεντρωμένη αγορά στα πλαίσια Ενεργειακών Κοινοτήτων, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3. Οι μεταβλητές του προβλήματος αντιστοιχούν σε φυσικά μεγέθη όπως είναι η παραγόμενη και καταναλισκόμενη ενέργεια καθώς και η χρηματική επιβάρυνση και αποζημίωση των καταναλωτών/παραγωγών. Επιπλέον μοντελοποιήθηκε η συμπεριφορά και οι ανάγκες των μελών της Ενεργειακής Κοινότητας και διερευνήθηκε η επίδραση αυτών στην τελική βέλτιστη λύση του προβλήματος.

Για την υλοποίηση των σεναρίων που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4, θεωρήθηκε μια Ενεργειακή Κοινότητα αποτελούμενη από δεκαπέντε (15) μέλη με ποικιλομορφία στα χαρακτηριστικά τους. Ως εκ τούτου, δώδεκα (12) από αυτούς διαθέτουν μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε, με διαφορετική εγκατεστημένη ισχύ, και δεκατρείς (13) από αυτούς έχουν την δυνατότητα να μετακινήσουν ένα μέρος του φορτίου τους εντός της ημέρας.

Η επίλυση του προβλήματος μας παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις κατάλληλες ροές ενέργειας και χρήματος ώστε τελικά το κόστος επιβάρυνσης των καταναλωτών για την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών να ελαχιστοποιείται.

Τέλος, η σύγκριση με υφιστάμενες ή μελλοντικές τιμολογιακές πολιτικές που πραγματοποιήθηκε στο Κεφάλαιο 4 παρέχει πληροφορίες σχετικά με την βιωσιμότητα του προτεινόμενου εναλλακτικού μοντέλου.

5.2 Πλεονεκτήματα της Προτεινόμενης Αγοράς

Η αποκεντρωμένη μορφή αγοράς που προτάθηκε δίνει τη δυνατότητα σε παραγωγούς και καταναλωτές να πραγματοποιούν αγοραπωλησίες χωρίς την ύπαρξη ενός κεντρικού μεσάζοντα. Ιδιαίτερα στα πλαίσια των Ενεργειακών Κοινοτήτων η υιοθέτηση της συγκεκριμένης μορφής επιτρέπει στα μέλη της να ανταλλάσσουν την περίσσεια ενέργειας που παράγουν και με αυτόν τον τρόπο να ελαχιστοποιούν το συνολικό κόστος της ενέργειας. Καθώς θεωρήσαμε πως η τιμή συναλλαγής εντός της κοινότητας αποτελεί τον μέσο όρο της λιανικής τιμής αγοράς και πώλησης από και προς τον προμηθευτή, αντίστοιχα, το προτεινόμενο μοντέλο είναι οικονομικά συμφέρον τόσο ως προς τη μεριά του παραγωγού όσο και του καταναλωτή. Υπό αυτήν την έννοια, τα μέλη της κοινότητας αγοράζουν ηλεκτρική ενέργεια από άλλα μέλη σε τιμή χαμηλότερη από αυτή του προμηθευτή τους. Αντίστοιχα, πωλούν ενέργεια εντός της κοινότητας σε τιμή υψηλότερη από αυτή του προμηθευτή τους.

Προσδίδει σημαντικό ρόλο στους καταναλωτές/παραγωγούς αφού έχουν την δυνατότητα να συμμετέχουν ενεργά στην διαχείριση της παραγωγής και ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Παράλληλα επιτυγχάνουν την βέλτιστη κατανομή των πόρων και συνεπώς μεγιστοποιούν την ενεργειακή τους αποδοτικότητα. Με αυτό το τρόπο ελαχιστοποιούνται τα κόστη της κάλυψης των ενεργειακών τους αναγκών.

Επιπλέον παρατηρούμε πως η δυνατότητα μετακίνησης ενός φορτίου μέσα στην ημέρα παρέχει την δυνατότητα στους καταναλωτές να μειώσουν σημαντικά την χρηματική επιβάρυνση για την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών. Για παράδειγμα, ένα φορτίο το οποίο θα μπορούσε να μετακινηθεί μέσα στην ημέρα είναι η φόρτιση ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Εντούτοις, η ανάπτυξη τεχνολογικά προηγμένων οικιακών συσκευών συμβάλλει σημαντικά στην ευελιξία και τελικά στην αποδοτικότερη διαχείριση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.

Το προτεινόμενο μοντέλο αποκεντρωμένης αγοράς μπορεί πολύ εύκολα να υιοθετηθεί και σε άλλα πλαίσια, εκτός αυτού των Ενεργειακών Κοινοτήτων. Υπό αυτήν την έννοια, δύναται να αποτελέσει κεντρικό άξονα στη σύναψη οικονομικών σχέσεων μεταξύ παραγωγών και καταναλωτών που παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις ως προς την ζήτηση και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχει συνεπώς ευελιξία σε ότι αφορά τόσο τα τεχνικά χαρακτηριστικά των καταναλωτών/παραγωγών όσο και στις προσδοκίες αυτών. Το πλεονέκτημα αυτό αποδεικνύεται από το σενάριο των 100 τυχαίων μελών που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4.

Παράλληλα συμβάλει στην κοινωνική προσφορά και αλληλεγγύη αφού υπάρχει η δυνατότητα δωρεάν διάθεσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας έπειτα από την σύμφωνη γνώμη των μελών της Ενεργειακής Κοινότητας.

Τα παραπάνω πλεονεκτήματα προσφέρουν σημαντικά κίνητρα στους καταναλωτές ώστε να εγκαταστήσουν μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε.

Με το τρόπο αυτό συμβάλουν σημαντικά στην επίτευξη των εθνικών στόχων για συμμετοχή της ενέργειας που παράγεται από Α.Π.Ε στην ακαθάριστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε ποσοστό τουλάχιστον 60%.

5.3 Προτάσεις για Μελλοντική Εύρενα

Η περαιτέρω ανάπτυξη και βελτίωση του αλγορίθμου δύναται να παρέχει πληροφορίες στην περίπτωση όπου τα μέλη της Ενεργειακής Κοινότητας διαθέτουν τεχνολογία αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. συσσωρευτές) καθώς και στην περίπτωση ύπαρξης διαφορετικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. μικρές ανεμογεννήτριες).

Επιπλέον, το μοντέλο της αποκεντρωμένης αγοράς δύναται να μελετηθεί και εκτός τα πλαίσια των Ενεργειακών Κοινοτήτων, ή σε συνδυασμό με άλλες αγορές, όπως είναι οι υβριδικές ομότιμες αγορές.

Βιβλιογραφία

- [1] Fabio Moret , Pierre Pinson , «Energy Collectives : a Community and Fairness based Approach to Future Electricity Markets».
- [2] Tiago Sousa, Tiago Soares, Pierre Pinson, Fabio Moret, Thomas Baroche , Ettiene Sorin, «Peer-to-Peer and community-based markets: A comprehensive review».
- [3] Chenghua Zhang, Jianzhong Wu, Chao Long, Meng Cheng, «Review of Existing Peer-to-Peer Energy Trading Projects,» 2016.
- [4] Pierre Pinson, «Day-ahead electricity markets,» Technical University of Denmark, Denmark, 2018.
- [5] Wayes Tushar, Chau Yuen, Hamed Mohsenian-Rad, Tapan Saha , H. Vincent Poor, Kristin L. Wood, «Transforming Energy Networks via Peer-toPeer Energy Trading,» IEEE SIGNAL PROCESSING MAGAZINE, 2018.
- [6] Charilaos Akasiadis, Georgios Chalkiadakis, «Decentralised Large-Scale Electricity Consumption Shifting by Prosumers Cooperatives».
- [7] Pierre Pinson, Thomas Baroche, Fabio Moret, Tiago Sousa, Etienne Sorin , Shi You, «The Emergence of Consumer-centric Electricity Markets».
- [8] Parag , Yael and Sovacool , Benjamin K, «Electricity Market Design for the Prosumer Era,» *Sussex Research Online*, 2016.
- [9] Sjors Hijgenaar, Zekeriya Erkin, Tamas Keviczky, Jos Siemons, Ralph Bisschops, Alexander Verbraeck, «A Decentralised Energy Trading Architecture for Future Smart Grid Load Balancing,» 2017.
- [10] Thomas Morstyn, Niall Farrell, Sarah J. Darby, Malcolm D. McCulloch, «Using peer-to-peer energy-trading platforms to incentivize prosumers to form federated power plants».
- [11] Chao Long, Jianzhong Wu , Chenghua Zhang, Lee Thomas , Meng Cheng, Nick Jenkins, «Peer-to-Peer Energy Trading in a Community Microgrid,» Cardiff University, Cardiff, UK.

[12] Chenghua Zhang, Jianzhong Wu, Meng Cheng, Yue Zhou, Chao Long, «A Bidding System for Peer-to-Peer Energy Trading in a Grid-connected Microgrid,» 2016.

[13] Mustafa A. Mustafa, Sara Cleemput, Aysajan Abidin, «A Local Electricity Trading Market: Security Analysis».

Ελληνική Νομοθεσία

1. ΝΟΜΟΣ ΥΠ' ΑΡΙΘΜ. 2773/1999: Απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας – Ρύθμιση θεμάτων ενεργειακής πολιτικής και λοιπές διατάξεις.
2. ΝΟΜΟΣ ΥΠ' ΑΡΙΘΜ. 3468/2006: Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές.
3. ΝΟΜΟΣ ΥΠ' ΑΡΙΘΜ. 4001/2011: Για τη λειτουργία Ενεργειακών Αγορών Ηλεκτρισμού και Φυσικού Αερίου, για Έρευνα, Παραγωγή και δίκτυα μεταφοράς Υδρογονανθράκων και άλλες ρυθμίσεις.
4. ΝΟΜΟΣ ΥΠ' ΑΡΙΘΜ. 4414/2016: Νέο καθεστώς στήριξης των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Συμπααραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης – Διατάξεις για το νομικό και λειτουργικό διαχωρισμό των κλάδων προμήθειας και διανομής στην αγορά του φυσικού αερίου και άλλες διατάξεις.
5. ΝΟΜΟΣ ΥΠ' ΑΡΙΘΜ. 4513/2018: Ενεργειακές Κοινότητες και άλλες διατάξεις.
6. ΝΟΜΟΣ ΥΠ' ΑΡΙΘΜ. 4602/2019: Έρευνα, εκμετάλλευση και διαχείριση του γεωθερμικού δυναμικού της Χώρας, σύσταση Ελληνικής Αρχής Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, ιδιοκτησιακός διαχωρισμός δικτύων διανομής φυσικού αερίου και άλλες διατάξεις.

Κώδικες

1. Κώδικας Διαχειριστή Α.Π.Ε & Εγγυήσεων Προέλευσης (ΔΑΠΕΕΠ), Νοέμβριος 2019. (<http://www.lagie.gr/rythmistiko-plaisio/kodik-es-kanonismoi/>)
2. Κώδικας Διαχείρισης του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΔΔΗΕ), Οκτώβριος 2016. (http://www.rae.gr/site/file/system/docs/codes_new/)
3. Κώδικας Διαχείρισης του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ), Νοέμβριος 2019. (<http://www.admie.gr/rythmistiko-plaisio/kodik-es-egcheiridia/>)