



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ**

**Ανάπτυξη συστήματος προβλεπτικού ελέγχου για
ενεργειακά μικροδίκτυα**

Διπλωματική εργασία

Άρτεμις Λιακοπούλου

Τριμελής Συμβουλευτική επιτροπή:

Χ. Σαρίμβεης, Καθηγητής ΣΧΜ (Επιβλέπων)

Π. Ταραντίλη, Καθηγήτρια ΣΧΜ

Μ. Καβουσανάκης, Επ.Καθηγητής ΣΧΜ

Αθήνα, Μάιος 2024

Copyright © Αρτεμις Λιακοπούλου, 2023.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας διπλωματικής 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 ότι θα πρέπει να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

*Η διπλωματική αυτή εργασία αφιερώνεται στους γονείς μου
που με στήριξαν, σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου...*

Πρόλογος

Ο τίτλος την εν λόγω διπλωματικής είναι ο «Ανάπτυξη συστήματος προβλεπτικού ελέγχου για ενεργειακά μικροδίκτυα». Τι σημαίνει όμως προβλεπτικός έλεγχος σε μικροδίκτυο και γιατί αυτό είναι σημαντικό να υπάρχει στα σύγχρονα ενεργειακά συστήματα; Ένα μικροδίκτυο είναι ένας μικρής έκτασης ενεργειακό πλέγμα το οποίο μπορεί να λειτουργεί αυτόνομα ή σε συνδυασμό με ένα μεγαλύτερο ηλεκτρικό πλέγμα. Συνήθως αποτελείται από ποικίλες ενεργειακές πηγές όπως ηλιακούς συλλέκτες, ανεμογεννήτριες και μπαταρίες οι οποίες μπορούν να αποθηκεύουν και να παράγουν ενέργεια. Σήμερα η κοινωνία ζει μέσα σε ένα κλοιό από πολλά δίκτυα τα οποία καθιστούν την σύγχρονη εποχή, την «περίοδο της πληροφορίας, η οποία χαρακτηρίζεται από την έντονη παγκοσμιοποίηση και τη μεγάλη αστικοποίηση με αποτέλεσμα όλες οι κοινωνικές δομές να συγκεντρώνονται γύρω από την παραγωγή και την κατανάλωση. Παρόλα αυτά η δεύτερη «περίοδος της αποκεντροποίησης» έχει ξεκινήσει. Ο κόσμος αντιμετωπίζει μία πολυεπίπεδη απειλή στον ενεργειακό τομέα που περιλαμβάνει αρχικά αύξηση των τιμών στις ασφαλείς και επαρκείς πηγές ενέργειας λόγω της έλλειψής τους, καθώς και τις περιβαλλοντικές καταστροφές από την υπερβολική κατανάλωση ενέργειας και τη χρήση ενεργειακών πηγών, όπως ο άνθρακας και το πετρέλαιο με μεγάλες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Το εθνικό σύστημα ηλεκτρικής ισχύος έτσι ταλαιπωρείται από περιστατικά έλλειψης ηλεκτρικής ενέργειας, προβλήματα ποιότητας ισχύος, συνεχόμενα blackout και απότομες αυξήσεις των τιμών που έχουν οδηγήσει πολλούς πελάτες του οργανισμού παροχής, δηλαδή του μακροδικτύου, στην αναζήτηση άλλων πηγών υψηλής ποιότητας και αξιοπιστίας ηλεκτρικής ενέργειας. Τελικά, όλα τα παραπάνω φαινόμενα εντείνουν την ανάγκη για τη χρήση των Α.Π.Ε (Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας), οι οποίες θα εξασφαλίσουν το δίκτυο ηλεκτροδότησης και όχι μόνο με μικρό περιβαλλοντικό κόστος. Παρ' όλα αυτά, θα πρέπει η διαχείρισή τους να γίνει με βέλτιστο τρόπο αξιοποιώντας τα μικροδίκτυα, προκειμένου οι Α.Π.Ε να είναι πιο αποδοτικές από ότι στο παρελθόν και να αξιοποιούνται πλήρως.

Η διπλωματική αυτή στοχεύει στο να αναλύσει την ανάγκη βελτιστοποίησης του μικροδικτύου και αναδειξεί τη χρησιμότητα που έχει ο έλεγχος στα μικροδίκτυα έτσι ώστε να επωφεληθεί ενεργειακά, οικονομικά και περιβαλλοντολογικά τόσο ο ιδιώτης,

όσο και ο πάροχος ενέργειας. Η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα μικροδίκτυα αυξάνεται συνεχώς και ο προβλεπτικός έλεγχος μπορεί να βοηθήσει στην ενσωμάτωση αυτών των πηγών στο δίκτυο, διατηρώντας παράλληλα τη σταθερότητα και την αξιοπιστία του συστήματος. Μπορεί ταυτόχρονα να μειωθεί το αποτύπωμα του άνθρακα του μικροδικτύου εισάγοντας τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ελαχιστοποιώντας τη χρήση ορυκτών καυσίμων. Τέλος, ο προβλεπτικός έλεγχος μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της αυτονομίας του μικροδικτύου σε περίπτωση διακοπής ρεύματος ή άλλης διαταραχής.

Ευχαριστίες

Για τη συγγραφή της εν λόγω διπλωματικής θα ήθελα προτίστως να ευχαριστήσω τους γονείς μου που με στήριξαν καθ' όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου ηθικά και υλικά. Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Χ.Σαρίμβη Καθηγητή ΣΧΜ. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω το σύνολο των καθηγητών του τμήματος που υπήρξαν καθηγητές μου και με βοήθησαν στην ανάπτυξη των γνώσεων και των δεξιοτήτων που έχω τη δεδομένη στιγμή.

Άρτεμις Λιακοπούλου

Μάιος 2024

Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή.....	12
1.1	Το αντικείμενο και οι στόχοι της εργασίας.....	12
1.2	Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας.....	13
1.3	Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην Ελλάδα.....	14
1.3.1	Ηλιακή Ενέργεια.....	14
1.3.2	Αιολική Ενέργεια.....	15
2	Σημερινό επίπεδο γνώσεων και η συμβολή της διπλωματικής.....	16
2.1	Σημερινό επίπεδο γνώσεων-συμβολή της διπλωματικής.....	16
2.2	Ο προβλεπτικός έλεγχος σε μικροδίκτυο.....	16
3	Συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας.....	28
3.1	Εισαγωγή.....	28
3.2	Περιγραφή φυσικού προβλήματος.....	29
3.2.1	Η αντικειμενική συνάρτηση.....	30
3.2.2	Ισοζύγια θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας.....	33
3.2.3	Μαθηματικό μοντέλο φωτοβολταϊκών μονάδων.....	34
3.2.4	Μαθηματικό μοντέλο ανεμογεννητριών.....	34
3.2.5	Μαθηματικό μοντέλο μCHP.....	35
3.2.6	Μαθηματικό μοντέλο ηλεκτρικών αυτοκινήτων.....	36
3.2.7	Μαθηματικό μοντέλο μονάδων αποθήκευσης θερμότητας.....	37
3.2.8	Μαθηματικό μοντέλο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.....	38
3.2.9	Μαθηματικό μοντέλο μπόιλερ.....	39
3.4	Τεχνολογικά χαρακτηριστικά συστημάτων ενέργειας και ενεργειακές τιμές αγοράς.....	39
4	Η ιστορία των συστημάτων προβλεπτικού ελέγχου.....	44
4.1	Εφαρμογές των συστημάτων προβλεπτικού ελέγχου.....	47
5	Ανάλυση των γραφημάτων λειτουργίας του μικροδικτύου.....	48
5.1	Ανάλυση αρχείων κώδικα που συγγράφηκαν για την υλοποίηση του προσομοιωτή του μικροδικτύου.....	98
	Βιβλιογραφικές αναφορές.....	109
	Εναποθετήριο κώδικα υλοποίησης και ανάλυσης του μικροδικτύου.....	112

Ορολογία (Nomenclature)

Δείκτες/Εκθέτες	
<i>B</i>	Μπόιλερ
<i>CARB TAX</i>	Φόρος άνθρακα
<i>CHP</i>	Μονάδα συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού
<i>d</i>	Διάχυτη ακτινοβολία
<i>DEL</i>	Που διανέμεται
<i>e</i>	Ηλεκτρική
<i>ELEC</i>	Ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο
<i>GRID</i>	Δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας
<i>HEAT</i>	Παραγόμενη θερμότητα
<i>HST</i>	Μονάδα αποθήκευσης θερμότητας
<i>INV</i>	Επένδυση
<i>MAX</i>	Μέγιστο
<i>OM</i>	Λειτουργία και συντήρηση
<i>PUR</i>	Αγορασμένη από το δίκτυο
<i>PV</i>	Φωτοβολταϊκό πάνελ
<i>q</i>	Αριθμός παρατήρησης
<i>rat</i>	Ονομαστική
<i>SAL</i>	Που πωλείται στο δίκτυο
<i>SELF</i>	Για ίδια κατανάλωση
<i>STO</i>	Αποθηκευμένη
<i>tech</i>	Τεχνολογία (Μονάδα συμπαραγωγής ή μπόιλερ)
<i>th</i>	Θερμική
<i>TOTAL</i>	Ολική
<i>VAR</i>	Κυμαινόμενη
Παράμετροι	
A^{PV}	Μέγιστη επιφάνεια των φωτοβολταϊκών συστοιχιών, m^2
CI_{ELEC}	Ποσότητα άνθρακα ανά ηλεκτρική ενέργεια, $kgCO_2/kWh$ ηλεκτρικής ενέργειας
CI_{GAS}	Ποσότητα άνθρακα ανά περιεχόμενο φυσικού αερίου, $kgCO_2/kWh$ φυσικού αερίου
cl	Απώλειες λόγω φόρτισης της μονάδας αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (μπαταρίας)
$CLoad_{i,s,p}^{ELEC}$	Ηλεκτρικό φορτίο για κάθε κτίριο i την εποχή s και την περίοδο p , kW

$C_{Load_{i,s,p}}^{HEAT}$	Θερμικό φορτίο για κάθε κτίριο i την εποχή s και την περίοδο p , kW
C_{OM}^B	Κόστος λειτουργίας και συντήρησης του μπόιλερ, €/kWh
C_{OM}^{CHP}	Κόστος λειτουργίας και συντήρησης της μονάδας συμπαραγωγής, €/kWh
C_{OM}^{EST}	Κόστος λειτουργίας και συντήρησης της μονάδας αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (μπαταρίας), €/kWh
C_{OM}^{HST}	Κόστος λειτουργίας και συντήρησης μονάδας αποθήκευσης θερμότητας, €/kWh
C_{OM}^{PV}	Σταθερό κόστος λειτουργίας φωτοβολταϊκής μονάδας, €/kWh
$C_{p_{rat}}$	Ονομαστική ισχύς, kW/m ²
dl	Απώλειες λόγω εκφόρτισης της μονάδας αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (μπαταρίας)
DRE_{STO}	Άνω όριο στη μείωση της ηλεκτρικής ενέργειας που αποθηκεύεται στη μονάδα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ δύο αλληπάληλων χρονικών περιόδων
DRH_{STO}	Άνω όριο στη μείωση της θερμικής ενέργειας που αποθηκεύεται στη μονάδα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας μεταξύ δύο αλληπάληλων χρονικών περιόδων
DT_i	Αριθμός χρονικών περιόδων που η μονάδα συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού πρέπει να παραμείνει κλειστή αφού σταματήσει να λειτουργεί
$E_{i,MAX}^{CHP}$	Άνω όριο στην ενέργεια που παράγεται από τη μονάδα συμπαραγωγής CHP i , kW
$E_{i,MIN}^{CHP}$	Κάτω όριο στην ενέργεια που παράγεται από τη μονάδα συμπαραγωγής CHP i , kW
ES_{MAX}^{EST}	Άνω όριο στην ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται στη μονάδα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, kW
$F_{GAS,i}$	Φυσικό αέριο που καταναλώνεται από τη μονάδα συμπαραγωγής i κατά τη διάρκεια έναρξης λειτουργίας
HER_k	Λόγος θερμικής προς ηλεκτρική ενέργεια για τη μονάδα συμπαραγωγής ισχύος k
$H_{i,MIN}^B$	Κάτω όριο στη θερμότητα που παράγεται από τον μπόιλερ για κάθε κτίριο i , kW
$H_{i,MAX}^B$	Άνω όριο στη θερμότητα που παράγεται από τον μπόιλερ για κάθε κτίριο i , kW
$H_{i,MAX}^{HST}$	Άνω όριο στη θερμότητα που αποθηκεύεται στη μονάδα αποθήκευσης θερμότητας για κάθε κτίριο i , kW
$P_{i,t}^{Ch,EV}$	Ισχύς φόρτισης του ηλεκτρικού αυτοκινήτου i , κάθε χρονική στιγμή t

$P_{i,t}^{Dch,EV}$	Ισχύς εκφόρτισης του ηλεκτρικού αυτοκινήτου i , κάθε χρονική στιγμή t
P_i^{max}	Μέγιστη ισχύς φόρτισης του ηλεκτρικού αυτοκινήτου i
$SOC_{i,t}^{EV}$	Κατάσταση φόρτισης μπαταρίας ηλεκτρικού αυτοκινήτου i , κάθε χρονική στιγμή t
$SOC_{i,t}^{min}$	Ελάχιστη κατάσταση φόρτισης μπαταρίας ηλεκτρικού αυτοκινήτου i , κάθε χρονική στιγμή t
$SOC_{i,t}^{max}$	Μέγιστη κατάσταση φόρτισης μπαταρίας ηλεκτρικού αυτοκινήτου i , κάθε χρονική στιγμή t
$SOC_{i,t}^{EV,arr}$	Κατάσταση φόρτισης ηλεκτρικού αυτοκινήτου i , όταν φτάνει στο σημείο φόρτισης/εκφόρτισης, , κάθε χρονική στιγμή t
$SOC_{i,t}^{EV,dep}$	Κατάσταση φόρτισης ηλεκτρικού αυτοκινήτου i , όταν φεύγει από το σημείο φόρτισης/εκφόρτισης, , κάθε χρονική στιγμή t
I	Ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο (kW/m^2)
n_{th}^B	Θερμική απόδοση του μπόιλερ, %
n_{ek}^{CHP}	Ηλεκτρική απόδοση της μονάδας συμπαραγωγής ισχύος k , %
n_e^{PV}	Ηλεκτρική απόδοση της φωτοβολταϊκής μονάδας, %
n^{EV}	Απόδοση ηλεκτρικών αυτοκινήτων
P_{SAL}^W	Τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες, €/kWh
P_{SAL}^{EV}	Τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας από τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, €/kWh
P_{SAL}^{CHP}	Τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας από τη μονάδα συμπαραγωγής, €/kWh
P_{SAL}^{PV}	Τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας από τη φωτοβολταϊκή μονάδα την εποχή s και την περίοδο p , €/kWh
ST_i	Αριθμός των αλληπάλληλων χρονικών περιόδων που η μονάδα συμπαραγωγής I πρέπει να παραμείνει σε λειτουργία αλλά σε κατάσταση start-up αφού ξεκινήσει
trl	Απώλειες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, %
URE_{STO}	Άνω όριο στην αύξηση της ηλεκτρικής ενέργειας που αποθηκεύεται στη μονάδα αποθήκευσης μεταξύ δύο αλληπάλληλων χρονικών περιόδων
$URH_{i,STO}$	Άνω όριο στην αύξηση της θερμικής ενέργειας που αποθηκεύεται στη μονάδα αποθήκευσης θερμότητας για το κτίριο i μεταξύ δύο αλληπάλληλων χρονικών περιόδων
UT_i	Αριθμός αλληπάλληλων χρονικών περιόδων που η μονάδα συμπαραγωγής i πρέπει να παραμείνει σε λειτουργία αφού ξεκινήσει

Θετικές μεταβλητές

A_i^{PV}	Επιφάνεια των φωτοβολταϊκών μονάδων σε κάθε κτίριο i , m^2
$C_{CARBTAX}$	Συνολικό περιβαλλοντικό κόστος, €/έτος
C_{PUR}^{GRID}	Συνολικό κόστος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, €/έτος
C_{SAL}^{GRID}	Έσοδα από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο, €/έτος
C_{INV}^B	Κόστος επένδυσης του μπόιλερ, €
C_{INV}^{CHP}	Κόστος επένδυσης της μονάδας συμπαραγωγής CHP, €
C_{INV}^{HST}	Κόστος επένδυσης της μονάδας αποθήκευσης θερμότητας, €
C_{INV}^{PV}	Κόστος επένδυσης της φωτοβολταϊκής μονάδας, €
C_{INV}^{PUMP}	Κόστος επένδυσης της αντλίας μεταφοράς θερμότητας, €
C_{OM}^B	Κόστος λειτουργίας και συντήρησης του μπόιλερ, €/έτος
C_{OP}^B	Κόστος λειτουργίας του μπόιλερ, €/έτος
C_{OM}^{CHP}	Κόστος λειτουργίας και συντήρησης της μονάδας συμπαραγωγής, €/έτος
C_{OP}^{CHP}	Κόστος λειτουργίας της μονάδας συμπαραγωγής, €/έτος
C_{OM}^{EST}	Κόστος λειτουργίας και συντήρησης της μονάδας αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, €/έτος
C_{OM}^{HST}	Κόστος λειτουργίας και συντήρησης της μονάδας αποθήκευσης θερμότητας, €/έτος
C_{TOTAL}	Συνολικό κόστος, €/έτος
$E_{MAX,i,k}^{CHP}$	Μέγιστη παραγόμενη ενέργεια από τη μονάδα συμπαραγωγής CHP, kW
$E_{i,t,SAL}^{CHP}$	Πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια που πωλείται από τη μονάδα συμπαραγωγής CHP για κάθε κτίριο i την περίοδο t , kW
$E_{i,t,SELF}^{CHP}$	Ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται για ίδια κατανάλωση από τη μονάδα συμπαραγωγής CHP για κάθε κτίριο i την περίοδο t , kW
$E_{i,t,STO}^{CHP}$	Ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται από τη μονάδα συμπαραγωγής CHP για κάθε κτίριο i την περίοδο t , kW
$E_{i,t}^{GRID}$	Ηλεκτρική ενέργεια που αγοράζεται από το δίκτυο για κάθε κτίριο i την περίοδο t , kW
$E_{i,t,SAL}^{PV}$	Πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια που πωλείται από τη φωτοβολταϊκή μονάδα για κάθε κτίριο i την περίοδο t , kW
$E_{i,t,SELF}^{PV}$	Ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται για ίδια κατανάλωση από τη φωτοβολταϊκή μονάδα για κάθε κτίριο i την περίοδο t , kW
$E_{i,t,STO}^{PV}$	Ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται από τη φωτοβολταϊκή μονάδα για κάθε κτίριο i την περίοδο t , kW
$E_{i,t,SAL}^W$	Πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια που πωλείται από την ανεμογεννήτρια για κάθε κτίριο i την περίοδο t , kW

$E_{i,t,SELF}^W$	Ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται για ίδια κατανάλωση από την ανεμογεννήτρια για κάθε κτίριο i την περίοδο t , kW
$E_{i,t,STO}^W$	Ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται από την ανεμογεννήτρια για κάθε κτίριο i την περίοδο t , kW
$E_{i,t,SAL}^{EV}$	Πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια που πωλείται από το ηλεκτρικό αυτοκίνητο για κάθε κτίριο i την περίοδο t , kW
$E_{i,t,SELF}^{EV}$	Ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται για ίδια κατανάλωση από το ηλεκτρικό αυτοκίνητο για κάθε κτίριο i την περίοδο t , kW
$H_{i,t,IN}^{HST}$	Πλεονάζουσα θερμότητα που αποθηκεύεται στη μονάδα αποθήκευσης θερμότητας για κάθε κτίριο i την περίοδο t , kW
$H_{i,t,OUT}^{HST}$	Θερμότητα που απελευθερώνεται από τη μονάδα αποθήκευσης θερμότητας για κάθε κτίριο i την περίοδο t για την κάλυψη των θερμικών αναγκών, kW
$H_{i,t,STO}$	Συνολική ενέργεια που αποθηκεύεται στη μονάδα αποθήκευσης θερμότητας για κάθε κτίριο i την περίοδο t , kWh
$H_{i,t,MAX}^{HST}$	Μέγιστη θερμότητα που αποθηκεύεται στη μονάδα αποθήκευσης θερμότητας για κάθε κτίριο i , kW

Δυαδικές μεταβλητές

$V_{i,t}$	1 αν το κτίριο i πουλάει πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο την περίοδο t ; 0 αν αγοράζει από το δίκτυο
$W_{i,k}$	1 αν η μονάδα συμπαραγωγής CHP ισχύος k επιλέγεται για το κτίριο i ; 0 διαφορετικά
$W_{i,t}$	1 αν η μονάδα συμπαραγωγής CHP στο κτίριο i είναι σε λειτουργία; 0 διαφορετικά
$X_{i,t}$	1 αν το κτίριο i πουλάει πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο την περίοδο t ; 0 αν αγοράζει από το δίκτυο
$Y_{i,t}$	1 αν η μονάδα συμπαραγωγής CHP στο κτίριο i ξεκινάει την περίοδο t ; 0 διαφορετικά
$Z_{i,t}$	1 αν η μονάδα συμπαραγωγής CHP στο κτίριο i είναι σε λειτουργία αλλά σε κατάσταση start-up την περίοδο t ; 0 διαφορετικά
$X_{i,t}^{Ch,EV}$	Δυαδική μεταβλητή φόρτισης του ηλεκτρικού αυτοκινήτου i , κάθε χρονική στιγμή t
$X_{i,t}^{Dch,EV}$	Δυαδική μεταβλητή εκφόρτισης του ηλεκτρικού αυτοκινήτου i , κάθε χρονική στιγμή t

Συντομεύσεις

CHP	Combined heat and power	Συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού
-------	-------------------------	--

<i>DER</i>	Distributed energy resources	Πηγές διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας
<i>MILP</i>	Mixed integer linear programming	Μεικτός ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός
<i>MSVI</i>	Monthly seasonal variation index	Μηνιαίος εποχιακός συντελεστής διακύμανσης
<i>HSVI</i>	Hourly seasonal variation index	Ωριαίος εποχιακός συντελεστής διακύμανσης
<i>W</i>	Wind Turbine	Ανεμογεννήτρια
<i>PV</i>	Photovoltaic	Φωτοβολταϊκό
<i>EV</i>	Electrical Vehicle	Ηλεκτρικό Αυτοκίνητο

Ελληνικές Συντομεύσεις

Φ/Β	Φωτοβολταϊκό
Α/Γ	Ανεμογεννήτρια
ΣΗΘ	Μονάδα συμπαραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας

Τίτλος Διπλωματικής εργασίας

«Ανάπτυξη συστήματος προβλεπτικού ελέγχου για ενεργειακά μικροδίκτυα»

Περίληψη

Οι μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν την κύρια πηγή ενέργειας εδώ και δεκαετίες. Ωστόσο, η εκτεταμένη χρήση τους τον περασμένο αιώνα έχει οδηγήσει σε διάφορες αρνητικές συνέπειες, όπως η ατμοσφαιρική ρύπανση, η ρύπανση των υδάτων και η κλιματική αλλαγή. Η καύση των ορυκτών καυσίμων απελευθερώνει στην ατμόσφαιρα πολλά επιβλαβή αέρια όπως το διοξείδιο του άνθρακα, το διοξείδιο του θείου και τα οξείδια του αζώτου, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν αναπνευστικά προβλήματα και άλλα προβλήματα υγείας. Επιπλέον, η εξόρυξη και η μεταφορά μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί να προκαλέσει περιβαλλοντική ζημία και βλάβη στην άγρια ζωή.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Α.Π.Ε), όπως η ηλιακή, η αιολική και η υδροηλεκτρική ενέργεια, γίνονται όλο και πιο δημοφιλείς τα τελευταία χρόνια λόγω των περιβαλλοντικών τους πλεονεκτημάτων. Αυτό συμβαίνει καθώς οι Α.Π.Ε. δεν παράγουν επιβλαβείς εκπομπές και είναι βιώσιμες, δηλαδή μπορούν να αναπληρώνονται με φυσικό τρόπο. Η χρήση Α.Π.Ε. μπορεί επίσης να συμβάλει στη βελτίωση της ενεργειακής ασφάλειας. Επιπλέον, οι Α.Π.Ε. μπορούν να συμβάλουν στη δημιουργία θέσεων εργασίας και στην τόνωση της οικονομικής ανάπτυξης στον τομέα της ενέργειας.

Για να είναι όμως αποδοτικές οι Α.Π.Ε. θα πρέπει να υπάρχουν συστήματα βελτιστοποίησης της απόδοσης τους και παράλληλα να μπορούν αυτά τα συστήματα να επεκτείνονται και να επικοινωνούν με μεγαλύτερα δίκτυα. Το ενεργειακό μικροδίκτυο είναι μια ομάδα διασυνδεδεμένων φορτίων που μπορούν να λειτουργούν ως μια ενιαία ελεγχόμενη οντότητα.

Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας (ΣΔΕ) ενός μικροδικτύου μπορεί να διαμορφωθεί ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που εμπίπτει στην κατηγορία του μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (MILP). Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η ανάπτυξη ενός συστήματος προβλεπτικού ελέγχου (Model Predictive Control) για τη

βελτιστοποίηση της λειτουργίας ενεργειακών μικροδικτύων. Ο στόχος του συστήματος προβλεπτικού ελέγχου είναι να ενσωματώσει διάφορα συστήματα ενεργειακά με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή αξιοποίηση των Α.Π.Ε. σε ένα μικροδίκτυο. Το σύστημα αυτό διαμορφώνει και επιλύει το πρόβλημα MILP σε κάθε διακριτή χρονική στιγμή κατά την οποία λαμβάνονται αποφάσεις για τη διαχείριση του δικτύου, λαμβάνοντας όμως υπόψη ιστορικά χαρακτηριστικά ώστε οι αποφάσεις που λαμβάνονται να ικανοποιούν τους κανόνες λειτουργίας του μικροδικτύου.

Η μεθοδολογία εφαρμόζεται σε μικροδίκτυα που περιλαμβάνουν μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, μπόιλερ, μπαταρία για αποθήκευση ενέργειας, φωτοβολταϊκά πάνελ, ανεμογεννήτριες μικρής κλίμακας καθώς επίσης και ηλεκτρικό αυτοκίνητο που θα φορτίζει και θα εκφορτίζει ανάλογα με της ενεργειακές ανάγκες του συστήματος σε διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια μιας ημέρας.

Title of diploma thesis

Development of a model predictive control systems for energy microgrids

Abstract

Non-renewable energy sources have been the main source of energy for decades. However, their extensive use over the last century has led to various negative consequences, such as air pollution, water pollution and climate change. The combustion of fossil fuels releases many harmful gases into the atmosphere, such as carbon dioxide, sulphur dioxide and nitrogen oxides, which can cause respiratory and other health problems. In addition, the extraction and transport of non-renewable energy sources can cause environmental damage and harm to wildlife.

Renewable energy sources (RES), such as solar, wind and hydropower, have become increasingly popular in recent years due to their environmental benefits. This is because RES do not produce harmful emissions and are sustainable, i.e. they can be replenished naturally. The use of RES can also help to improve energy security. In addition, RES can help create jobs and stimulate economic growth in the energy sector.

But for RES to be efficient, there must be systems to optimise their performance and at the same time these systems must be able to expand and communicate with larger networks. An energy microgrid is a group of interconnected loads that can operate as a single controlled entity.

The energy management system (EMS) of a microgrid can be formulated as an optimization problem that falls under the category of mixed integer linear programming (MILP). In this paper, the development of a Model Predictive Control (MPC) system for optimizing the operation of energy microgrids is considered. The objective of the predictive control system is to integrate various energy systems in such a way that the maximum utilization of RES in a microgrid is achieved. This system formulates and solves the MILP problem at each discrete time instant at which grid management decisions are made, but taking into account historical characteristics so that the decisions made satisfy the microgrid operation rules.

The methodology is applied to microgrids that include combined heat and power plants, boilers, battery for energy storage, photovoltaic panels, small-scale wind turbines as well as an electric car that will charge and discharge according to the energy needs of the system at various times during the day.

1 Εισαγωγή

1.1 Το αντικείμενο και οι στόχοι της εργασίας

Η ανάπτυξη και εφαρμογή συστημάτων διαχείρισης ενέργειας (ΣΔΕ) σε ενεργειακά μικροδίκτυα συντονίζει τις διάφορες μονάδες που απαρτίζουν το μικροδίκτυο και μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στη διασφάλιση της αποδοτικής και αποτελεσματικής χρήσης της ενέργειας που παράγεται από το μικροδίκτυο. Το ΣΔΕ στοχεύει στην ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απωλειών, τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και τη μεγιστοποίηση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αυτό είναι υπεύθυνο να επιλύει ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που εμπίπτει στην κατηγορία του μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (MILP).

Το αντικείμενο της εν λόγω διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός συστήματος ΣΔΕ για ενεργειακά μικροδίκτυα που βασίζεται στις αρχές του προβλεπτικού ελέγχου (model predictive control). Η μεθοδολογία βασίζεται στην ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων και χρήση τεχνολογιών μαθηματικού προγραμματισμού για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης ενός μικροδικτύου που περιέχει ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ηλιακοί συλλέκτες, ανεμογεννήτριες και άλλες πηγές). Το βασικό χαρακτηριστικό των μεθοδολογιών MPC, που είναι η συνεχόμενη διαμόρφωση και επίλυση προβλημάτων μαθηματικής βελτιστοποίησης σε ένα κυλιόμενο χρονικό ορίζοντα επιτρέπει τη συνεχή επικαιροποίηση του μοντέλου με δεδομένα και προβλέψεις καιρικών συνθηκών, ενεργειακών απαιτήσεων και κόστους ηλεκτρικής ενέργειας. Στην διπλωματική εργασία εξετάστηκε πρόβλημα προβλεπτικού ελέγχου που εμπίπτει στην κατηγορία του μικτού γραμμικού ακέραιου προγραμματισμού (Mixed Integer Linear Programming). Το ΣΔΕ που προκύπτει είναι σε θέση να βελτιστοποιήσει τη λειτουργία των μικροδικτύων, μπορεί να λάβει υπόψη του ποικίλους παραμέτρους, όπως ο βέλτιστος προγραμματισμός παραγωγής, η βέλτιστη διαχείριση της ζήτησης, οι περιορισμοί καυσίμων και εκπομπών και τα έσοδα από την πώληση της περίσσειας ενέργειας του συστήματος.

1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Η εν λόγω διπλωματική εργασία διαρθρώνεται σε πέντε το σύνολο κεφάλαια τα οποία είναι αρκετά απαραίτητα το καθένα ξεχωριστά καθώς εισάγει τον αναγνώστη σταδιακά στις έννοιες των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των μεθόδων βελτιστοποίησης αυτών σε περιβάλλον και πλαίσιο μικροδικτύου.

Στο πρώτο και εισαγωγικό κεφάλαιο θα αναλυθούν πρωτίστως το αντικείμενο και οι στόχοι της διπλωματικής εργασίας όπως και εισαγωγικές παρατηρήσεις και πληροφορίες σχετικές με την ηλιακή και την αιολική ενέργεια.

Στο δεύτερο κεφάλαιο θα γίνει λόγος για το σημερινό επίπεδο γνώσεων τόσο ως προς το μοντέλο του προβλεπτικού ελέγχου σε μικροδίκτυο όσο και ως προς τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες, τις ανεμογεννήτριες και τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα.

Στο τρίτο κεφάλαιο θα γίνει μία λεπτομερής μαθηματική ανάλυση η οποία θα αφορά τα μαθηματικά μοντέλα των συστημάτων διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας. Αυτό κρίνεται απολύτως απαραίτητο για την κατανόηση των βασικών εννοιών όπως είναι η αντικειμενική συνάρτηση του ενεργειακού συστήματος, τα μαθηματικά μοντέλα για τα ισοζύγια της θερμικής και της ηλεκτρικής ενέργειας, τις μονάδες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, τη μονάδα συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, την ανεμογεννήτρια, τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες, το ηλεκτρικό αυτοκίνητο καθώς και το μπόιλερ.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μία πιο συγκεκριμένη μελέτη και αναφορά στα συστήματα προβλεπτικού ελέγχου αναλύοντας την ιδιότητα τους και παραθέτοντας πληροφορίες για την ιστορία τους και της εφαρμογές που βρίσκουν τόσο στις Α.Π.Ε όσο και στη βιομηχανία και τη ρομποτική.

Στο πέμπτο κεφάλαιο θα αναλυθεί το ενεργειακό σενάριο δύο κατοικιών και θα αναλυθούν οι γραφικές οι οποίες προκύπτουν από το μοντέλο MPC το οποίο έχει αναπτυχθεί σε περιβάλλον MATLAB.

Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο αναλύονται οι αναφορές τόσο βιβλιογραφικές όσο και οι αναφορές εικόνων.

Στο τέλος βρίσκεται το εναποθετήριο του κώδικα που συγγράφηκε για την υλοποίηση της μεθοδολογίας προβλεπτικού ελέγχου του μικροδικτύου.

1.3 Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην Ελλάδα

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι εκείνες οι ενεργειακές πηγές που αναπληρώνονται με φυσικό τρόπο, χωρίς την παρέμβαση του ανθρώπου και μπορούν να χρησιμοποιηθούν επανειλημμένα χωρίς να εξαντληθούν. Στην Ελλάδα, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας περιλαμβάνουν την υδροηλεκτρική ενέργεια, την αιολική, την ηλιακή, τη γεωθερμική, τη σύγχρονη βιομάζα και την ενέργεια των κυμάτων και των παλιρροιών. Οι πηγές αυτές είναι σημαντικές επειδή συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης της χώρας από τα ορυκτά καύσιμα, τα οποία είναι πεπερασμένα και μη ανανεώσιμα. Επιπλέον, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι φιλικές προς το περιβάλλον και δεν παράγουν επιβλαβείς εκπομπές που συμβάλλουν στην κλιματική αλλαγή. Η Ελλάδα έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο στην υιοθέτηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας τα τελευταία χρόνια. Το 2021, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αντιπροσώπευαν το 29% της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας και η κυβέρνηση στοχεύει να αυξήσει το ποσοστό αυτό στο 61% έως το 2030. Η χώρα έχει επίσης θέσει ως στόχο να προσελκύσει περίπου 30 δισεκατομμύρια ευρώ σε κονδύλια της ΕΕ και ιδιωτικές επενδύσεις για την αναβάθμιση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας και τον υπερδιπλασιασμό της δυναμικότητας πράσινης ενέργειας. Αυτό θα επιτρέψει στην Ελλάδα να καλύψει τις ενεργειακές της ανάγκες με βιώσιμο και φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο [14], [19].

1.3.1 Ηλιακή Ενέργεια

Μία μορφή Α.Π.Ε. που ενσωματώνεται στο εξεταζόμενο μικροδίκτυο είναι η ηλιακή ενέργεια. Ο όρος της ηλιακής ενέργειας χαρακτηρίζει το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο όπως το φως και η θερμότητα που απορροφούνται από διάφορα στοιχεία και ενώσεις στη Γη και μετατρέπονται σε άλλες μορφές ενέργειας. Η τεχνολογία σήμερα αξιοποιεί ένα σχεδόν μηδαμινό ποσοστό της προσπίπτουσας στην επιφάνεια του πλανήτη ηλιακής ενέργειας κυρίως με τρία είδη συστημάτων: τα θερμικά ηλιακά, τα παθητικά ηλιακά και τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Η Ελλάδα είναι πρωτοπόρος χώρα στην Ευρώπη τις τελευταίες δεκαετίες με περίπου ένα εκατομμύριο εγκατεστημένους ηλιακούς θερμοσίφωνες. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα εντάσσονται στον ενεργειακό σχεδιασμό των κτιριακών εγκαταστάσεων. Αυτά, αξιοποιούν την ηλιακή ενέργεια για θέρμανση και φωτισμό των

χώρων. Αφορούν τόσο διατάξεις άμεσου κέρδους που αξιοποιούν τον προσανατολισμό και δομικά υλικά του κτιρίου, όσο και έμμεσου κέρδους στις οποίες συγκαταλέγονται μεταξύ άλλων οι ηλιακοί τοίχοι, οι ηλιακοί χώροι (θερμοκήπια) και τα ηλιακά αίθρια. Επιπλέον, αποτελούν συστήματα χωρίς μηχανολογικές διατάξεις και συμβάλουν σημαντικά στην βελτιστοποίηση του κτιριακού σχεδιασμού. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν την πιο σύνθετη διάταξη. Η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται απευθείας σε ηλεκτρική και μπορεί να αξιοποιηθεί είτε άμεσα σε αυτόνομο σύστημα (οικιακή χρήση), είτε να διανεμηθεί στο δίκτυο ισχύος [16].

1.3.2 Αιολική Ενέργεια

Μία πρόσθετη Α.Π.Ε. που χρησιμοποιείται από το μικροδίκτυο δύο κατοικιών είναι η αιολική ενέργεια. Αυτή δημιουργείται έμμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία, καθώς μέσω της ανομοιόμορφης θέρμανσης της επιφάνειας της γης προκαλείται η μετακίνηση μεγάλων αέριων μαζών από τη μια περιοχή στην άλλη, δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο ανέμους. Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας από τον άνθρωπο αποτελεί μία αρχαία πρακτική τριών χιλιάδων χρόνων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας είναι τα ιστιοφόρα και οι ανεμόμυλοι. Στις μέρες μας για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο οι ανεμογεννήτριες. Οι ανεμογεννήτριες είναι μηχανές οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Η μετατροπή αυτή γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, μέσω της περωτής, πραγματοποιείται η μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική ενέργεια με την μορφή περιστροφής του άξονα της περωτής και στο δεύτερο στάδιο, μέσω της γεννήτριας, επιτυγχάνεται η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική [10].

2 Σημερινό επίπεδο γνώσεων και η συμβολή της διπλωματικής

2.1 Σημερινό επίπεδο γνώσεων-συμβολή της διπλωματικής

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως είναι εμφανές ότι ο προβλεπτικός έλεγχος σε μικροδίκτυο είναι αναπόσπαστο κομμάτι των σύγχρονων ενεργειακών συστημάτων και εμφανίζει πολύ μεγάλο ενδιαφέρον στην μελέτη του, καθώς οι Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κερδίζουν συνεχώς έδαφος ως εναλλακτικός τρόπος παραγωγής ενέργειας ως προς τις συμβατικές μεθόδους. Στις επόμενες ενότητες θα παρουσιαστεί αναλυτικά το σημερινό επίπεδο γνώσεων, καθώς και η συμβολή της διπλωματικής εργασίας, όσον αφορά τον προβλεπτικό έλεγχο σε μικροδίκτυο τόσο σε ένα γενικότερο πλαίσιο όσο και ως προς τα επιμέρους χαρακτηριστικά των Α.Π.Ε. (φωτοβολταϊκές συστοιχίες, ανεμογεννήτριες). Επίσης, θα παρουσιαστεί το σύστημα προβλεπτικού ελέγχου, όπως εφαρμόστηκε στο μικροδίκτυο.

2.2 Ο προβλεπτικός έλεγχος σε μικροδίκτυο

Ο προβλεπτικός έλεγχος στα μικροδίκτυα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι μια τεχνική που αποσκοπεί στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των μικροδικτύων με τον έλεγχο της ροής ισχύος μεταξύ των διαφόρων στοιχείων του συστήματος. Ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής ενέργειας, διασφαλίζοντας παράλληλα ότι το σύστημα λειτουργεί εντός των περιορισμών του. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του συστήματος και στη συνέχεια με τη χρήση αλγορίθμων βελτιστοποίησης για την εύρεση της βέλτιστης στρατηγικής ελέγχου. Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης λαμβάνουν υπόψη τους διάφορους περιορισμούς του συστήματος, όπως η χωρητικότητα των συσκευών αποθήκευσης ενέργειας, η μέγιστη ισχύς εξόδου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και η ζήτηση ενέργειας.

Μία από τις σημαντικότερες πτυχές του προβλεπτικού ελέγχου στα μικροδίκτυα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι η χρήση συσκευών αποθήκευσης ενέργειας. Οι συσκευές αυτές χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση της πλεονάζουσας ενέργειας που παράγεται από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και μη σε περιόδους χαμηλής ζήτησης και την απελευθέρωσή της σε περιόδους υψηλής ζήτησης. Η στρατηγική προβλεπτικού ελέγχου πρέπει να λαμβάνει υπόψη τη χωρητικότητα των συσκευών

αποθήκευσης ενέργειας και να διασφαλίζει ότι χρησιμοποιούνται αποτελεσματικά για την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής ενέργειας.

Τα μικροδίκτυα και οι Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν πολλά πλεονεκτήματα, τα οποία είναι τα εξής [14]:

1) Αισθητικά πλεονεκτήματα:

- Βελτίωση της εικόνας των ανεξάρτητων από το δίκτυο συστημάτων και μείωση της ανάγκης χρήσης των υπέργειων καλωδίων.

2) Οικονομικά πλεονεκτήματα:

- Προβλέψιμο ενεργειακό κόστος (μικρότερο ρίσκο) κατά την εισαγωγή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

3) Λειτουργικά πλεονεκτήματα:

- Προσφορά μεγαλύτερης αξιοπιστίας και ποιότητας ισχύος, ειδικά σε περιοχές όπου οι διακυμάνσεις τάσης είναι συχνές, ή όπου η ενέργεια που προσφέρεται από το δίκτυο δεν είναι αξιόπιστη.
- Αύξηση στην απόδοση των τεχνολογιών συστημάτων διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας.
- Προσφορά ενέργειας σε απομακρυσμένες περιοχές όπου η επιλογή των παραδοσιακών τρόπων διανομής δεν είναι δυνατή. Τέτοιες περιοχές όπως πύργοι κεραιών, μικρά απομακρυσμένα χωριά ή πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου στον ωκεανό βρίσκονται εκτός του ηλεκτρικού δικτύου και επωφελούνται από τα μικροδίκτυα και τις Α.Π.Ε ως βασική πηγή ενέργειας.
- Μείωση της υπερφόρτωσης των γραμμών διανομής.
- Αύξηση αξιοπιστίας του δικτύου.
- Ταχύτερη λήψη άδειας για την εγκατάσταση μικροδικτύων από την αντίστοιχη αναβάθμιση των γραμμών διανομής.

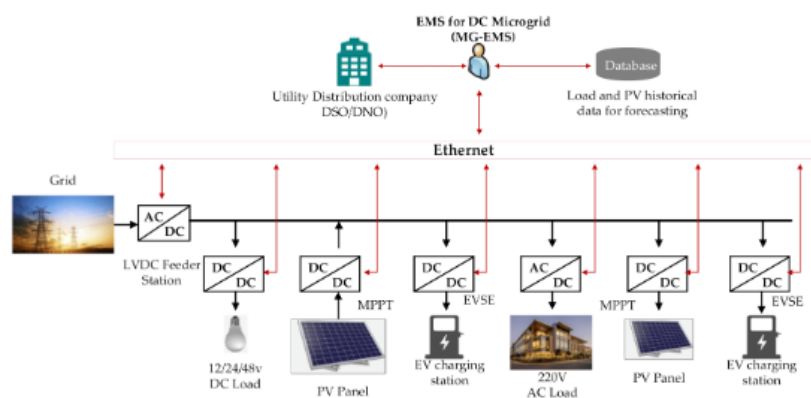
4) Πλεονεκτήματα στην κατεύθυνση της παραγωγής:

- Γρηγορότερη ανταπόκριση στις νέες απαιτήσεις ισχύος.
- Αυξομειώσεις στην εγκατεστημένη ισχύ μπορούν να γίνουν με μικρές προσαυξήσεις, σε πλήρη συμφωνία με τη ζήτηση σε αντίθεση με την κατασκευή μεγάλων, κεντρικών εργοστασίων ενέργειας

κατασκευασμένων για την κάλυψη μελλοντικής κυρίως και όχι τρέχουσας ζήτησης.

5) Πλεονεκτήματα ασφαλείας:

- Ενδυνάμωση ενεργειακής ασφάλειας-εφεδρικής ενέργειας.
- Στην κατεύθυνση της αειφόρου ανάπτυξης:
 - Προσφορά καθαρότερης, πιο αθόρυβης λειτουργίας και μείωση των εκπομπών για κάποιες τεχνολογίες (π.χ. τεχνολογίες που εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια και τον άνεμο και κυψέλες καυσίμου).
 - Μείωση ή αναβολή των αναβαθμίσεων των έργων υποδομής (γραμμές και υποσταθμοί).
 - Αποτελεσματική οικονομική διαχείριση ενέργειας και φορτίου.



Εικόνα 1 Στρατηγική βέλτιστου ελέγχου σε μικροδίκτυο για διαμοιρασμένες ενεργειακές πηγές σε DC μικροδίκτυο.

Η συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού

Η διαδικασία της ταυτόχρονης παραγωγής χρήσιμης και εκμεταλλεύσιμης θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας από την ίδια πηγή ενέργειας είναι γνωστή ως συμπαραγωγή. Στις μονάδες συμπαραγωγής, η πρωτογενής πηγή ενέργειας μπορεί να είναι οποιοδήποτε καύσιμο, ορυκτό ή βιομάζα. Παρόλα αυτά, το φυσικό αέριο είναι το προτιμότερο από όλα καύσιμο αυτή τη στιγμή τόσο για οικονομικούς, όσο και για οικολογικούς λόγους. Ο βαθμός απόδοσης μιας μονάδας συμπαραγωγής μπορεί να αυξηθεί ή και να ξεπεράσει το 90% με τη χρήση θερμικής ενέργειας. Κατά συνέπεια, η συμπαραγωγή παρέχει εξοικονόμηση ενέργειας κατά δεκαπέντε έως σαράντα τοις

εκατό σε σύγκριση με την παροχή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας από λέβητες και παραδοσιακούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αντίστοιχα. Χρησιμοποιούνται μικροσυστήματα συμπαραγωγής μέχρι 10kWe, επειδή η παρούσα εργασία βασίζεται στην έρευνα των διεσπαρμένων συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε επίπεδο νοικοκυριού. Οι γεννήτριες στα σύγχρονα μικροσυστήματα συμπαραγωγής τροφοδοτούνται από έναν κινητήρα, ο οποίος είναι συνήθως μία μηχανή εσωτερικής καύσης (MEK) που τροφοδοτείται με φυσικό αέριο. Φυσικά, σε περιοχές όπου το φυσικό αέριο δίκτυα δεν είναι διαθέσιμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν κινητήρες ντίζελ, προκειμένου η οικονομική βιωσιμότητα του έργου να είναι εγγυημένη. Όσον αφορά τις τουρμπίνες εσωτερικής καύσης και τους μικροστρόβιλους, χρησιμοποιείται το υγρό του συστήματος ψύξης και η θερμότητα των καυσαερίων για την υποστήριξη των θερμικών ή/και ψυκτικών φορτίων, και ο ρότορας της γεννήτριας περιστροφής βρίσκεται σε μια προέκταση του άξονα του κινητήρα. Η χρήση κυψελών καυσίμου, μια επιλογή που απελευθερώνει θερμότητα ως παραπροϊόν και μετατρέπει άμεσα τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια χωρίς καύση, θα πρέπει να συμπεριληφθεί σε αυτό. Το μέγεθος και τα επίπεδα κραδασμών των εμπορικά διαθέσιμων μονάδων μικρο-παραγωγής ενέργειας είναι παρόμοια με εκείνα ενός συμβατικού λέβητα αντίστοιχης δυναμικότητας, τον οποίο συνήθως αντικαθιστούν. Η καλύτερη τεχνολογία επιλέγεται για κάθε περίπτωση με βάση την απαιτούμενη τεχνική και οικονομική αξιολόγηση της. Ωστόσο, η συνολική ιδέα είναι πάντα η ίδια, η οποία είναι η παραγωγή ζεστού νερού για την καθημερινή χρήση στο νοικοκυριό, για τη χειμερινή κεντρική θέρμανση, για τη παραγωγή ψύξης, είτε για τον καλοκαιρινό κλιματισμό είτε για την εξυπηρέτηση ψυκτικά φορτία όλο το χρόνο (όπως ψυγεία), και για την ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για εσωτερική χρήση ή για πώληση στο δίκτυο.

Ωστόσο, είναι προφανές ότι η οικονομική επιτυχία του έργου και το μέγεθος των οφελών εξαρτώνται από το σχετικό κόστος του εξοπλισμού της μονάδας μικρο-παραγωγής και του συμβατικού λέβητα (αρχική αγορά, συντήρηση, διάρκεια ζωής), από το κόστος αγοράς από το δίκτυο και πώλησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, από τις συνολικές ώρες λειτουργίας εντός ενός έτους και από το κόστος των καυσίμων. Φαίνεται ότι υπάρχει ένα παράθυρο 30 ετών για τη χρήση αυτών των τεχνολογιών για σκοπούς ορυκτών καυσίμων. Οι κινητήρες Stirling, οι κυψέλες

καυσίμου και οι κινητήρες εσωτερικής καύσης ήταν μεταξύ των τύπων μονάδων συμπαραγωγής που εξετάστηκαν [11].

Μικροδίκτυο

Τα μικροδίκτυα είναι μικρής κλίμακας, χαμηλής τάσης, συνδυασμένης παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, δίκτυα τροφοδοσίας, τα οποία είναι σχεδιασμένα να τροφοδοτούν ηλεκτρικά και θερμικά φορτία μίας μικρής κοινότητας. Αυτά μπορούν να λειτουργούν χωρίς αυτονομία, όταν είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο, ή αυτόνομα όταν είναι αποσυνδεδεμένα από το κεντρικό δίκτυο. Το μικροδίκτυο είναι ουσιαστικά ένα ενεργό δίκτυο διανομής που αποτελείται από κατανεμημένη ή Διεσπαρμένη Παραγωγή (ΔΠ) και διάφορα φορτία σε τάση διανομής. Οι γεννήτριες ή μικροπαραγωγές είναι ΑΠΕ συγχρονισμένες μεταξύ τους για να παράγουν ενέργεια σε τάση διανομής. Όλες οι μικροπαραγωγές είναι εφοδιασμένες με ηλεκτρονικά ισχύος και έλεγχο, ώστε να λειτουργούν σαν ένα ενιαίο σύστημα και να διατηρούν συγκεκριμένη ποιότητα ισχύος και ενέργεια εξόδου. Με αυτά τα χαρακτηριστικά, το μικροδίκτυο αντιμετωπίζεται από το κύριο σύστημα ως μία ενιαία ελεγχόμενη μονάδα, που πληροί τις τοπικές ενεργειακές ανάγκες με αξιοπιστία και ασφάλεια [18].

Φωτοβολταϊκές συστοιχίες

Ένα από τα συστήματα Α.Π.Ε. που ενσωματώθηκε στο μικροδίκτυο της εργασίας είναι τα φωτοβολταϊκά πάνελ, τα οποία ως γνωστόν λειτουργούν με ηλιακή ενέργεια.

Η ηλιακή ενέργεια είναι μια καθαρή, ανεξάντλητη, ήπια αλλά και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και ως εκ τούτου δεν υπάρχουν περιορισμοί χώρου και χρόνου για την εκμετάλλευσή της. Η ηλιακή ενέργεια θα μπορούσε κανείς να πει ότι χωρίζεται σε τρεις κύριες κατηγορίες εφαρμογών: στα παθητικά ηλιακά συστήματα, στα ενεργητικά ηλιακά συστήματα και στα φωτοβολταϊκά συστήματα. Τη θερμότητα η οποία εκπέμπεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας την εκμεταλλεύονται τα παθητικά και τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα, ενώ τα φωτοβολταϊκά συστήματα στηρίζονται στη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα.



Εικόνα 2 Οι 3 κύριες κατηγορίες εφαρμογών της ηλιακής ενέργειας

Η εκτίμηση της ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο είναι ζωτικής σημασίας, δεδομένου ότι η πλειονότητα των ηλιακών συστημάτων εγκαθίστανται υπό κλίση στο σημείο χρήσης. Επιπλέον, οι άμεσες και διάχυτες συνιστώσες της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο είναι ζωτικής σημασίας για τη μέτρηση της θερμότητας και του φωτός σε ένα κτίριο, καθώς και για τον ακριβή υπολογισμό της ηλεκτρικής ισχύος των φωτοβολταϊκών συστημάτων, το σχεδιασμό των ηλιακών συστημάτων και την εκτίμηση της συνολικής απόδοσής τους. Παρόλο που δεδομένα για τη συνολική και τη διάχυτη ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο είναι διαθέσιμα σε διάφορους μετεωρολογικούς σταθμούς, οι αντίστοιχες τιμές στο κεκλιμένο επίπεδο δεν είναι προσβάσιμες και εκτιμώνται με τη χρήση διαφόρων μοντέλων λαμβάνοντας υπόψη τα στοιχεία της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο. Για τον ακριβή υπολογισμό της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο είναι απαραίτητη η γνώση των συνιστωσών της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο. Δεν μπορεί να αναπτυχθεί ένα μοντέλο για τον υπολογισμό της μόνο από την ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο για δύο πρωταρχικούς λόγους [16]. Ο 1^{ος} λόγος είναι ότι η ηλιακή ακτινοβολία που φθάνει σε μια κεκλιμένη επιφάνεια περιλαμβάνει την ακτινοβολία που ανακλάται από το περιβάλλον, ο 2^{ος} λόγος είναι ότι η γωνία θέασης μιας κεκλιμένης επιφάνειας αποκόπτει μια περιορισμένη στερεά γωνία του ουρανού. Η ακτινοβολία από αυτό το τμήμα του ουρανού εξαρτάται από τη γωνία κλίσης και το αζιμούθιο της επιφάνειας λήψης, καθώς και από την ηλιακή γωνία ανύψωσης και το ηλιακό αζιμούθιο και, τέλος, από τις συνθήκες νέφωσης σε αυτή την περιορισμένη στερεά γωνία.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως οι κατηγορίες των μοντέλων μέτρησης της ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο είναι δύο και είναι τα ισοτροπικά μοντέλα και τα ανισοτροπικά μοντέλα.

Τα ισοτροπικά μοντέλα υπολογίζουν τη διάχυτη ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο, υποθέτοντας ομοιόμορφη κατανομή εντός του ουράνιου θόλου. Οι μεροληπτικές ή υποκειμενικές εκτιμήσεις δεν περιλαμβάνονται στην ανάλυση. Η παραδοχή της ισότροπης διάχυσης της ακτινοβολίας είναι λανθασμένη και έχουν επινοηθεί εναλλακτικά μοντέλα. Αυτά είναι γνωστά ως ανισοτροπικά μοντέλα και ενσωματώνουν τη μερική ανισοτροπία της ατμόσφαιρας. Θεωρούν ότι η αύξηση της διάχυτης ακτινοβολίας είναι συνέπεια της εγγύτητας του Ήλιου (περιηλιακό), καθώς και της φωτεινότητας του ορίζοντα λόγω της εγγύτητάς του (φωτεινότητα του ορίζοντα).

Η αυξανόμενη ζήτηση για ενέργεια σε συνδυασμό με την επιτακτική ανάγκη ελαχιστοποίησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μέσω των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει ωθήσει στην τεράστια εξάπλωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων [16].

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν μία από τις διάφορες εφαρμογές που εντάσσονται στην ομπρέλα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και συγκεντρώνουν σημαντικό ενθουσιασμό στην Ελλάδα. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο αξιοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ενέργεια του ήλιου.

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από ένα ή περισσότερα πάνελ (ή πλαίσια, ή όπως συχνά αποκαλούνται στο εμπόριο, "κρύσταλλα") φωτοβολταϊκών στοιχείων (ή "κυψελών"), μαζί με βασικές συσκευές και εξοπλισμό για τη μετατροπή της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στην επιθυμητή μορφή.

Οι ηλιακές κυψέλες, κρίσιμο συστατικό των φωτοβολταϊκών πλαισίων, είναι ημιαγωγοί λεπτών υμενίων κατάλληλα επεξεργασμένοι σε επίπεδη επιφάνεια. Οι ηλιακές κυψέλες αποτελούνται από επεξεργασμένες πλάκες πυριτίου, ερμητικά κλεισμένες σε πλαστικό για προστασία από την υγρασία και άλλα καιρικά στοιχεία. Η δομή τοποθετείται συνήθως σε πλαίσιο αλουμινίου, παρόμοιο με τα υαλοστάσια των κτιρίων, με πάχος που δεν υπερβαίνει τα 4 έως 5 mm. Ανάλογα με τη χρήση, οι εσωτερικοί υαλοπίνακες συνδέονται μεταξύ τους είτε σε σειρά είτε παράλληλα.



Εικόνα 3 Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα

Ένα τυπικό φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από το φωτοβολταϊκό πάνελ ή τη γεννήτρια ηλιακής ενέργειας και τα ηλεκτρονικά συστήματα που ρυθμίζουν την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία. Στα αυτόνομα μοντέλα, υπάρχει επίσης ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες.

Όταν εκτίθενται στην ηλιακή ακτινοβολία, τα φωτοβολταϊκά πάνελ μετατρέπουν περίπου το 14% της εισερχόμενης ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η μετατροπή γίνεται αθόρυβα, αξιόπιστα και χωρίς καμία περιβαλλοντική επιβάρυνση.

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από μια φωτοβολταϊκή συστοιχία είναι σε μορφή συνεχούς ρεύματος (DC). Εξαιτίας αυτού, οι αρχικές χρήσεις της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας ήταν εφαρμογές συνεχούς τάσης, όπως υπολογιστές τσέπης ("αριθμομηχανές") και δορυφόροι. Ωστόσο, με την αυξανόμενη απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων αναπτύχθηκαν αντιστροφείς για τη μετατροπή της συνεχούς τάσης εξόδου της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε εναλλασσόμενη τάση. Το φωτοβολταϊκό σύστημα μπορεί να τροφοδοτήσει με ρεύμα σύγχρονες εγκαταστάσεις, όπως σπίτια, θερμοκήπια και μονάδες παραγωγής, που συνήθως χρησιμοποιούν συσκευές εναλλασσόμενου ρεύματος.

Η απόδοση του συστήματος αντιπροσωπεύει το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια στο φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Τα πρώτα φωτοβολταϊκά κύτταρα δημιουργήθηκαν τον 19ο αιώνα, αλλά είχαν απόδοση μόνο 1-2%. Το 1954, τα εργαστήρια Bell παρουσίασαν τα πρώτα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου με απόδοση 6%. Με την πάροδο του χρόνου, η αποδοτικότητα στη φωτοβολταϊκή τεχνολογία έχει αυξηθεί. Μια αύξηση της απόδοσης, ακόμη και κατά μία ποσοστιαία μονάδα, θεωρείται επίτευγμα. Επί του

παρόντος, η τυπική απόδοση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου στο Ηνωμένο Βασίλειο κυμαίνεται μεταξύ 12-19%. Σε σύγκριση με άλλα συστήματα (όπως τα συμβατικά, τα αιολικά, τα υδροηλεκτρικά κ.λπ.), αυτό εξακολουθεί να είναι χαμηλό. Ως αποτέλεσμα, το φωτοβολταϊκό σύστημα απαιτεί μεγάλη επιφάνεια για να αποδώσει την επιθυμητή ηλεκτρική ισχύ. Οι συνθήκες για την αξιοποίηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα είναι από τις καλύτερες στην Ευρώπη. Αυτό οφείλεται στη συνολική ενέργεια που λαμβάνει κάθε τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας κατά τη διάρκεια ενός έτους, η οποία κυμαίνεται από 1400-1800 kWh [16].

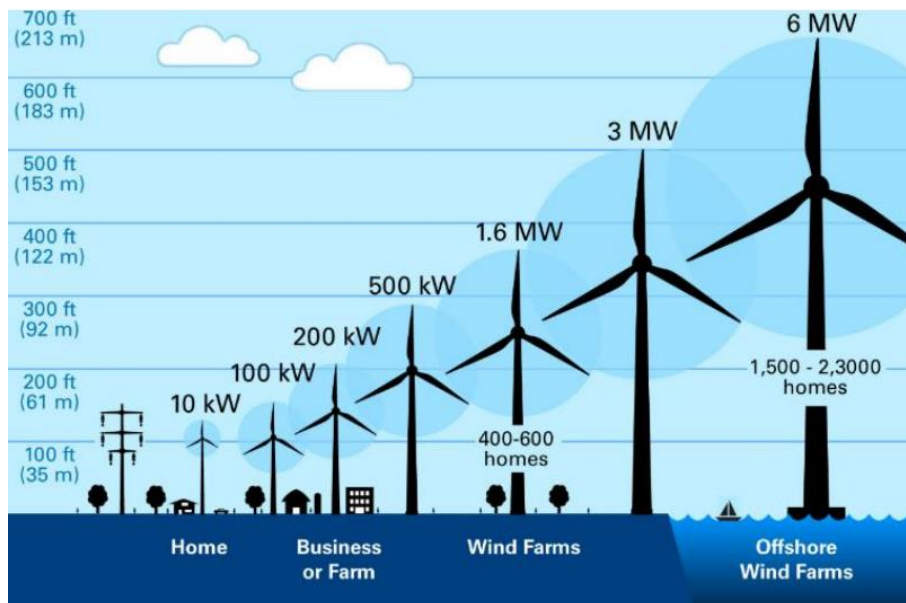
Στην διπλωματική εργασία, το φωτοβολταϊκό πάνελ που εξετάστηκε θεωρήθηκε ότι έχει βαθμό απόδοσης 0.12 και συντελεστή ισχύος $C_{\text{prat}} = 1\text{kW/m}^2$. Ταυτόχρονα, θεωρήθηκε ότι η επιφάνεια κάθε φωτοβολταϊκού πάνελ είναι 10 m^2 .

Ανεμογεννήτριες

Ένα άλλο σύστημα που ενσωματώθηκε στο μικροδίκτυο για παραγωγή ενέργειας είναι οι ανεμογεννήτριες. Προκειμένου να γίνει η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο οι ανεμογεννήτριες (Α/Γ). Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι ανεμογεννήτριες είναι μηχανές οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια και η μετατροπή αυτή γίνεται σε δύο στάδια.

Πιο αναλυτικά, οι Α/Γ ανάλογα με τον προσανατολισμό των αξόνων, διακρίνονται σε δύο τύπους, οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα. Οι Α/Γ οριζόντιου άξονα παρουσιάζουν τα περισσότερα πλεονεκτήματα και έχουν κυριαρχήσει στην πράξη, ενώ Α/Γ κατακόρυφου άξονα μπορούν να εγκατασταθούν κοντά στο έδαφος (π.χ. σε στέγες κτιρίων) και συμπεριφέρονται καλύτερα στις αλλαγές διεύθυνσης ανέμου. Αποτελούν μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική για εφαρμογές στον τομέα των κτιρίων. Στη συνέχεια, ανάλογα με το ύψος της πτερωτής αναπτύσσονται Α/Γ διαφορετικής ισχύος. Στην Εικόνα 4 απεικονίζεται η εξέλιξη των μεγεθών αυτών ανά χρήση. Για οικιακή χρήση χρησιμοποιούνται μικρής κλίμακας Α/Γ ύψους 35m περίπου και ισχύος 10 kW. Όσο αυξάνονται οι ανάγκες που πρέπει να ικανοποιηθούν αυξάνει το μέγεθος και η ισχύς της διάταξης με Α/Γ να φτάνουν τα 200m αποδίδοντας ισχύ 6MW. Οι διατάξεις μπορούν να λειτουργήσουν είτε παράλληλα με το υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο είτε

αυτόνομα και να εγκατασταθούν τόσο στη στεριά, όσο και στη θάλασσα (υπεράκτια αιολικά πάρκα) [10].



Εικόνα 4 Μεγέθη ανεμογεννητριών και απόδοση ισχύος κάθε τύπου

Μαθηματικός υπολογισμός της αιολικής ισχύος:

Η θεωρητική αιολική ισχύς η οποία είναι η ενέργεια του ανέμου στη μονάδα του χρόνου προκύπτει από τη σχέση :

$$P_{\text{ανέμου}} = \frac{1}{2} \rho A V^3(t)$$

Όπου ρ είναι η πυκνότητα του αέρα με μονάδα μέτρησης $\frac{kg}{m^3}$

A είναι η επιφάνεια αναφοράς σε m^2 .

V είναι η ταχύτητα του ανέμου σε $\frac{m}{s}$.

Στην πραγματικότητα όμως ο συντελεστής ισχύος της ανεμογεννήτριας είναι αυτός που καθορίζει το ποσοστό της εκμεταλλεύσιμης ισχύος από τον αέρα. Ο συντελεστής ισχύος είναι μεγαλύτερος όσο μεγαλύτερος είναι ο αεροδυναμικός βαθμός της πτερωτής και ορίζεται ως ο λόγος της μηχανικής ισχύος P_M που παράγεται κατά την περιστροφή των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας προς την στιγμιαία ισχύ του ανέμου $P_{\text{ανέμου}}$. Ακόμα και στην περίπτωση της ιδανικής πτερωτής, ο συντελεστής ισχύος δεν μπορεί να υπερβεί το όριο του Betz (59,3%)

$$C = \frac{P_M}{P_{\text{ανέμου}}} \leq \frac{16}{27} = 0,593$$

Οπότε η ονομαστική ισχύς της ανεμογεννήτριας δίνεται από τη σχέση:

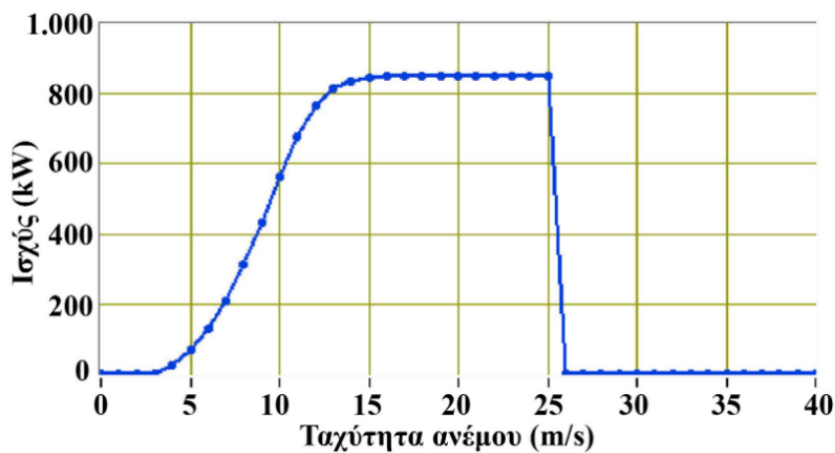
$$P_{\text{Ανεμογεννήτριας}} = \frac{1}{2} C_p \rho n_M n_H A V^3(t)$$

Όπου:

n_M : ο βαθμός απόδοσης του μηχανικού συστήματος

n_H : ο βαθμός απόδοσης ηλεκτρομηχανικής μετατροπής

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η εξάρτηση ισχύος της ανεμογεννήτριας από την ταχύτητα του ανέμου για μια ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 580kW.



Εικόνα 5 Καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας

Είναι εύκολο να παρατηρήσει κανείς από το διάγραμμα ότι υπάρχουν τρία κύρια σημεία λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Το πρώτο είναι στα 5 m/s όπου αρχίζει να λειτουργεί και η γεννήτρια παράγει ρεύμα, το 2^ο είναι μετά τα 15 m/s όπου αποδίδεται η μέγιστη ισχύ της και το 3^ο είναι στα 25 m/s όπου διακόπτεται η λειτουργία της ανεμογεννήτριας προκειμένου να μην καταστραφεί η πτερωτή από μηχανική βλάβη.

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία θεωρήθηκε ανεμογεννήτρια μικρής κλίμακας με συνολικό βαθμό απόδοσης 0,5 και συντελεστή ισχύος $C_{\text{prat}} = 0,05 \text{ kW/turbine}$.

Επιπλέον, στη διπλωματική εργασία η ταχύτητα στην οποία διακόπτεται η λειτουργία της ανεμογεννήτριας προκειμένου να μην καταστραφεί είναι στα 30 m/s.

Ηλεκτρικά αυτοκίνητα

Μία πρόσθετη τεχνολογική εξέλιξη που ενσωματώθηκε στο μικροδίκτυο της εργασίας είναι τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Πιο συγκεκριμένα, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα είναι οχήματα που χρησιμοποιούν ηλεκτρικούς κινητήρες αντί για μηχανές εσωτερικής καύσης. Αυτοί οι κινητήρες λειτουργούν με ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται σε επαναφορτιζόμενες συστοιχίες συσσωρευτών, γνωστές και ως μπαταρίες. Η χρήση ηλεκτρικών αυτοκινήτων έχει πολλά περιβαλλοντικά οφέλη, καθώς δεν απαιτούν ορυκτά καύσιμα και δεν εκπέμπουν ρύπους. Επιπλέον, οι ηλεκτροκινητήρες μπορούν να λειτουργήσουν και ως γεννήτριες, επιστρέφοντας ενέργεια στη μπαταρία κατά το φρενάρισμα ή το ρολάρισμα του αυτοκινήτου.

Τα αυτοκίνητα που κινούνται με ορυκτά καύσιμα σπαταλούν εκατοντάδες φορές περισσότερες πρώτες ύλες σε σύγκριση με αυτά που χρησιμοποιούν ηλεκτρικές μπαταρίες. Σύμφωνα μελέτες η μετάβαση από τα αυτοκίνητα που κινούνται με βενζίνη και ντίζελ στα ηλεκτρικά οχήματα θα αποφέρει σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη.

Κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής μίας μπαταρίας ιόντων λιθίου που χρησιμοποιείται στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα χάνονται μόνο 30 κιλά περίπου πρώτων υλών, σε σύγκριση με 17.000 λίτρα πετρελαίου, σύμφωνα με την ανάλυση του think tank Transport & Environment (T&E) στην οποία είχε πρόσβαση η βρετανική εφημερίδα Guardian. Ο υπολογισμός των πρώτων υλών που απαιτούνται για την κατασκευή αυτοκινήτων αναλογικά με το βάρος τους δείχνει ότι για τα συμβατικά οχήματα αυτές είναι πάνω από 300 φορές περισσότερες.

Η T&E αναφέρει ότι τα οχήματα με ηλεκτρικές μπαταρίες υπερτερούν των συμβατικών ως προς τις απαιτήσεις για πρώτες ύλες, την ενεργειακή απόδοση και το κόστος ενώ εξαλείφουν και τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και άλλων επικίνδυνων αερίων.

Η επιτάχυνση της μετάβασης στα ηλεκτρικά οχήματα ωστόσο, συνεπάγεται σε περιβαλλοντικό κόστος καθώς η αυξημένη παραγωγή μπαταριών απαιτεί εντατικότερη εξόρυξη μετάλλων όπως λίθιο, κοβάλτιο και νικέλιο.

Παρόλα αυτά, η T&E υποστηρίζει πως η εξόρυξη πετρελαίου για καύσιμο είναι πολύ πιο καταστροφική για το περιβάλλον.

Οι εξελίξεις στην τεχνολογία μπαταριών θα μειώσουν την ποσότητα λιθίου, νικελίου και κοβαλτίου που απαιτείται για κάθε αυτοκίνητο, μετριάζοντας την αυξημένη ζήτηση για αυτά τα μέταλλα, μειώνοντας και τις τιμές των οχημάτων. Ταυτόχρονα, νέοι

ρυθμιστικοί κανόνες κυκλικής οικονομίας που θα απαιτούν υψηλότερα ποσοστά ανακυκλωσιμότητας θα μειώσουν περαιτέρω τη ζήτηση.

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς της T&E τα αυτοκίνητα με ηλεκτρικές μπαταρίες θα χρησιμοποιούν 58% λιγότερη ενέργεια από τα συμβατικά στη διάρκεια της ζωής τους και θα εκπέμπουν 64% λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα. Οι εκπομπές ρύπων που συνδέονται με τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα παράγονται κυρίως κατά την παραγωγή μπαταριών, που απαιτεί πολλή ενέργεια, ενώ η πλειοψηφία των εκπομπών που συνδέεται με τα αυτοκίνητα που διαθέτουν κινητήρα εσωτερικής καύσης προέρχονται από τη χρήση αυτών των οχημάτων. Κάποιοι κατασκευαστές κινητήρων εσωτερικής καύσης υποστηρίζουν τα πλεονεκτήματα της μείωσης των εκπομπών ρύπων μέσω υβριδικών μοντέλων που συνδυάζουν ηλεκτροκίνηση και ορυκτά καύσιμα.

3. Συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας

3.1 Εισαγωγή

Η συνεχής αύξηση των σύγχρονων ενεργειακών αναγκών, και η παράλληλη μείωση των συμβατικών ενεργειακών πόρων έχουν αποφέρει καταστροφικά αποτελέσματα στο περιβάλλον. Αυτή η κρίσιμη κατάσταση οδήγησε στην ανάπτυξη συστημάτων διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας, δηλαδή υβριδικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας που εγκαθίστανται στον τελικό χρήστη ή κοντά σε αυτόν. Ο σχεδιασμός και η λειτουργία τέτοιων συστημάτων είναι ένα αρκετά δύσκολο έργο, καθώς πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλοί παράγοντες ο οποίοι συχνά διαφέρουν ανάλογα με τον τόπο εγκατάστασης και λειτουργίας του συστήματος [17].

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί αρχικά η μοντελοποίηση και ο σχεδιασμός των συστημάτων διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας και στη συνέχεια θα μελετηθεί λεπτομερώς η αντικειμενική συνάρτηση καθώς τα μαθηματικά μοντέλα που αφορούν στα ενεργειακά συστήματα που επιλέχθηκαν.

3.2 Περιγραφή του φυσικού προβλήματος

Στην παρούσα εργασία, εξετάζεται μια γειτονιά ως το υπό μελέτη σύστημα διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας και διερευνώνται διάφορες εναλλακτικές λύσεις για την ικανοποίηση των αναγκών σε θερμότητα και ηλεκτρική ενέργεια. Λαμβάνονται υπόψη οι τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής, καθώς και ένα δίκτυο μεταφοράς θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας.

Η γειτονιά αποτελείται από δύο σπίτια, το καθένα με γνωστό προφίλ ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Κάθε κατοικία μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις της μέσω διαφόρων τεχνολογιών, όπως μηχανές συμπαραγωγής, μονάδες θερμικής αποθήκευσης, φωτοβολταϊκά συστήματα, ανεμογεννήτριες, λέβητες και ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Οι μονάδες συμπαραγωγής φυσικού αερίου και τα φωτοβολταϊκά συστήματα εξυπηρετούν τις ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια, ενώ η απελευθερούμενη θερμική ενέργεια ως υποπροϊόν της ηλεκτροπαραγωγής καλύπτει τις θερμικές ανάγκες. Η πλεονάζουσα θερμότητα που παράγεται αποθηκεύεται σε εξειδικευμένες μονάδες θερμικής αποθήκευσης για μελλοντική χρήση. Στην περίπτωση που οι ανάγκες είναι μεγαλύτερες, τότε ο λέβητας τίθεται σε λειτουργία.

Με τον ίδιο τρόπο, όταν η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες, τις ανεμογεννήτριες και τις μονάδες συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού είναι μεγαλύτερη από τις ανάγκες τροφοδοτείται στο ηλεκτρικό δίκτυο και το δίκτυο τροφοδοτεί σε αντίστροφη περίπτωση. Η επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια τιμολογείται, ενώ η πλεονάζουσα ενέργεια τροφοδοτείται στο δίκτυο ως κέρδος για τη γειτονιά.

Το μοντέλο βελτιστοποίησης περιλαμβάνει τα ακόλουθα δεδομένα:

- Το κόστος των φωτοβολταϊκών συστοιχιών, των ανεμογεννητριών, των λεβήτων, των μονάδων συμπαραγωγής, των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, των μονάδων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και των εγκαταστάσεων μικροδικτύου.
- Τα τεχνικά χαρακτηριστικά για κάθε τεχνολογία, καθώς και η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας, του φυσικού αερίου και η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας που πωλείται στο δίκτυο.

- Τα δεδομένα της ηλιακής ακτινοβολίας, της ταχύτητας του αέρα τα οποία απαιτούνται για τον υπολογισμό της ισχύος εξόδου της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και της ανεμογεννήτριας αντίστοιχα.
- Τα δεδομένα της κατάστασης φόρτισης του ηλεκτρικού αυτοκινήτου για κάθε διαφορετική χρονική περίοδο στη διάρκεια της ημέρας καθώς και τη χρονική στιγμή που αυτό ενσωματώνεται στο δίκτυο φόρτισης ή εκφόρτισης.

Για τον υπολογισμό απαιτούνται:

- Η εξέταση της θέσης και της ισχύος των διαφόρων τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής, ο σχεδιασμός του δικτύου μεταφοράς θερμότητας, τα χρονικά προφίλ της ηλεκτρικής και θερμικής παραγωγής ανά κτίριο, και οι ροές θερμικής ενέργειας στο δίκτυο μεταφοράς θερμότητας.
- Η ανταλλαγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας μεταξύ των κτιρίων και του δικτύου, καθώς και η χωρητικότητα των μέσων θερμικής αποθήκευσης αποτελούν κρίσιμες εκτιμήσεις στην προσπάθεια μείωσης του συνολικού κόστους επένδυσης, συμπεριλαμβανομένων των δαπανών για πάγιους, λειτουργικούς και περιβαλλοντικούς σκοπούς.

Η εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει η ανάλυση των μαθηματικών εξισώσεων που συνθέτουν το μοντέλο MILP που αναπτύχθηκε και περιγράφουν την αρχή λειτουργίας των διαφορετικών ενεργειακών συστημάτων που απαρτίζουν το μικροδίκτυο που εξετάζεται.

3.2.1 Η αντικειμενική συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση (1) του μοντέλου της διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού ετήσιου κόστους του ενεργειακού συστήματος μίας οικείας. Η ημερήσια λειτουργία του συστήματος Διεσπαρμένης Παραγωγής Ενέργειας χωρίζεται σε ισόποσες χρονικές περιόδους με διάρκεια 0.25 της μιας ώρας η κάθε μία. Τα συνολικά έσοδα λοιπόν θα απαρτίζονται από τις συνολικές εισροές από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας προς το δίκτυο C_{SAL}^{GRID} . Ακόμα το συνολικό ετήσιο κόστος θα περιλαμβάνει το κόστος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από το

διαδίκτυο C_{PUR}^{GRID} , το ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης, όπως επίσης και το ετήσιο κόστος επένδυσης για τις μονάδες συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού (CHP units) και του μπόιλερ, την πωληθείσα ηλεκτρική ενέργεια από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες, τις ανεμογεννήτριες, τις μονάδες συμπαραγωγής και τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Θα πρέπει να ληφθεί επίσης υπόψη ακόμα και το περιβαλλοντικό κόστος για τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα [7].

Η αντικειμενική συνάρτηση με βάση τα παραπάνω θα διαμορφωθεί ως εξής:

$$\min\{C_{TOTAL} = C_{GRID}^{PUR} + C_{CHP}^{OP} + C_B^{OP} + C_{CARBTAX} - C_{CHP}^{SAL} - C_{PV}^{SAL} - C_W^{SAL} - C_{EV}^{SAL}\} \quad (1)$$

Το κόστος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση (2), η οποία περιλαμβάνει τον πολλαπλασιασμό της συνολικής ποσότητας της αγοραζόμενης ηλεκτρικής ενέργειας με την αντίστοιχη τιμή της.

$$C_{GRID}^{PUR} = \delta \cdot \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} E_{i,t}^{GRID} \cdot P_{ELEC_t} \quad (2)$$

Στη συνέχεια το περιβαλλοντικό κόστος από τις εκπομπές θα περιγράφεται στην εξίσωση (3). Φαίνεται πως η εξίσωση λαμβάνει υπόψη της ακόμα και το ποσοστό άνθρακα, της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και του φυσικού αερίου και υπολογίζεται από τη συνολική εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα πολλαπλασιασμένη με το κόστος άνθρακα [7].

$$C_{CARBTAX} = CT \cdot \delta \cdot \left[\frac{\sum_i \sum_t E_{i,t}^{GRID} \cdot CI_{ELEC}}{\left(\frac{E_{i,t,CHP}^{SELF} + E_{i,t,CHP}^{SAL} + E_{i,t,CHP}^{STO}}{n_e^{CHP}} + \frac{H_{i,t}^B}{n_{th}^B} + Z_{i,t} \right)} \cdot CI_{GAS} \right] \quad (3)$$

$$, \forall i \in I, t \in T$$

Τα έσοδα του δικτύου από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο περιγράφονται στην εξίσωση από το άθροισμα των εξισώσεων (4), (5), (6) και (7). Υπολογίζεται από το συνολικό ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που πωλείται στο δίκτυο

από τις μονάδες συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού, τις ανεμογεννήτριες, τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες και τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα πολλαπλασιασμένο με την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας [7].

$$C_{SAL}^{CHP} = \delta \cdot \sum_i \sum_t E_{i,t,SAL}^{CHP} \cdot P_{CHP}^{SAL} \quad (4)$$

$$C_{SAL}^{PV} = \delta \cdot \sum_i \sum_t E_{i,t,SAL}^{PV} \cdot P_{PV}^{SAL} \quad (5)$$

$$C_{SAL}^W = \delta \cdot \sum_i \sum_t E_{i,t,SAL}^W \cdot P_W^{SAL} \quad (6)$$

$$C_{SAL}^{EV} = \delta \cdot \sum_i \sum_t E_{i,t,SAL}^{EV} \cdot P_{EV}^{SAL} \quad (7)$$

, $\forall i \in I, t \in T$

Το συνολικό κόστος λειτουργίας των μονάδων συμπαραγωγής είναι ουσιαστικά το κόστος καυσίμου για τη λειτουργία τους, υπολογισμένο πολλαπλασιάζοντας τη συνολική κατανάλωση καυσίμου με την τιμή του, όπως περιγράφεται στην εξίσωση (8).

$$C_{OP}^{CHP} = \delta \cdot \sum_i \sum_t (E_{i,t,SELF}^{CHP} + E_{i,t,SAL}^{CHP} + E_{i,t,STO}^{CHP}) \cdot (P_{GAS}/n_e^{CHP}) + Z_{i,t} \cdot F_{GAS,i} \cdot P_{GAS} \quad (8)$$

, $\forall i \in I, t \in T$

Το συνολικό κόστος λειτουργίας των μπόιλερ είναι ουσιαστικά το κόστος καυσίμου για τη λειτουργία τους, υπολογισμένο πολλαπλασιάζοντας τη συνολική κατανάλωση καυσίμου με την τιμή του, όπως παρουσιάζεται στην εξίσωση (9) [7].

$$C_{OP}^B = \delta \cdot \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} H_{i,t}^B \cdot \left(\frac{P_{GAS}}{n_{th}^B} \right) \quad (9)$$

, $\forall i \in I, t \in T$

3.2.2 Ισοζύγια θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας

Ένα ισοζύγιο προσφοράς και ζήτησης θα πρέπει να επιτευχθεί για τη θερμική και ηλεκτρική ενέργεια για κάθε κτίριο σε κάθε χρονική στιγμή. Όταν αναφερόμαστε σε ηλεκτρική ενέργεια, οι ανάγκες μπορούν να καλυφθούν με αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο, από την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες, τις μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας μικρής κλίμακας (μCHP), τις ανεμογεννήτριες, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα και από την πλεονάζουσα ενέργεια που παράγεται από τα άλλα κτίρια που απαρτίζουν το μικροδίκτυο μέσω του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Οι θερμικές ανάγκες μπορούν να καλυφθούν από τη θερμότητα που παράγεται από τους μπόιλερ, από τις μονάδες συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού μικρής κλίμακας (μCHP) και από τη θερμότητα που αποθηκεύεται στις μονάδες αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.

Τα ισοζύγια ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας παρουσιάζονται στις εξισώσεις (10) και (11) αντίστοιχα [7].

$$CLoad_{i,t}^{ELEC} = E_{i,t}^{GRID} + E_{i,t,SELF}^{PV} + E_{i,t,SELF}^W + E_{i,t,SELF}^{EV} E_{i,t,SELF}^{CHP} + E_{i,t,OUT}^{EST}, \forall i \in I, t \in T \quad (10)$$

$$\begin{aligned} CLoad_{i,t}^{HEAT} + H_{i,t,IN}^{HST} - H_{i,t,OUT}^{HST} \\ = H_{i,t}^B + (E_{i,t,SELF}^{CHP} + E_{i,t,SAL}^{CHP} + E_{i,t,STO}^{CHP} + E_{i,t,TRA}^{CHP}) \cdot HER \end{aligned} \quad , \forall i \in I, t \in T \quad (11)$$

Επιπλέον, οι παρακάτω εξισώσεις (12), (13) ορίζονται ώστε να αποφευχθεί η ταυτόχρονη πώληση και αγορά ηλεκτρικής ενέργειας με το δίκτυο την ίδια χρονική στιγμή [1], [7].

$$E_{i,t,SAL}^{CHP} + E_{i,t,SAL}^{PV} + E_{i,t,SAL}^W + E_{i,t,SAL}^{EV} \leq M \cdot V_{i,t} \quad , \forall i \in I, t \in T \quad (12)$$

$$E_{i,t}^{GRID} \leq CLoad_{i,t}^{ELEC} \cdot (1 - V_{i,t}) \quad , \forall i \in I, t \in T \quad (13)$$

, όπου M είναι ένα κατάλληλο άνω όριο.

3.2.3 Μαθηματικό μοντέλο φωτοβολταϊκών μονάδων

Οι φωτοβολταϊκές μονάδες παράγουν ηλεκτρική ενέργεια συναρτήσει της εγκατεστημένης ισχύος και της ηλιακής ακτινοβολίας, όπως παρουσιάζεται στις εξισώσεις (14), (15) [1], [7].

$$E_{i,t,SELF}^{PV} + E_{i,t,SAL}^{PV} + E_{i,t,STO}^{PV} \leq A_i^{PV} \cdot I_t \cdot n_e^{PV} \quad , \forall i \in I, t \in T \quad (14)$$

$$E_{i,t,SELF}^{PV} + E_{i,t,SAL}^{PV} + E_{i,t,STO}^{PV} \leq A_i^{PV} \cdot C_{p_{rat}} \quad , \forall i \in I, t \in T \quad (15)$$

Στο παράδειγμα που εξετάστηκε θεωρήθηκε ότι η επιφάνεια κάθε φωτοβολταϊκού πάνελ είναι 10m², η ηλιακή ακτινοβολία δίνεται για την κάθε χρονική στιγμή στη διάρκεια της ημέρας, ο βαθμός απόδοσης του πάνελ είναι 0,12 και η ενέργεια που πωλείται στο δίκτυο έχει τιμή 0,55 €/kWh. Κάθε οικία διαθέτει ένα φωτοβολταϊκό πάνελ.

Ακόμα φαίνεται πως η επιφάνεια κάθε φωτοβολταϊκού αντιστοιχεί σε 10 kW ισχύος, που σύμφωνα με την ελληνική νομοθεσία είναι το άνω όριο στην εγκατάσταση των οικιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων.

3.2.4 Μαθηματικό μοντέλο ανεμογεννητριών

Οι ανεμογεννήτριες παράγουν ηλεκτρική ενέργεια συναρτήσει της ισχύος τους και της ταχύτητας του αέρα κάθε χρονική στιγμή. Αυτό περιγράφεται στην εξίσωση (16).

Ταυτόχρονα, προκειμένου να μην σπάσουν οι ανεμογεννήτριες όταν η ταχύτητα του αέρα είναι μεγάλη, έχει θεωρηθεί μια μέγιστη τιμή ταχύτητας αέρα στον οποίο διακόπτεται η λειτουργία της ανεμογεννήτριας όταν αυτή ξεπεραστεί. Αυτό περιγράφεται στην εξίσωση (17) [1], [10].

$$E_{i,t,SELF}^W + E_{i,t,SAL}^W + E_{i,t,STO}^W \leq Num_{tur_t} \cdot S_t \cdot n_e^W \quad , \forall i \in I, t \in T \quad (16)$$

$$E_{i,t,SELF}^W + E_{i,t,SAL}^W + E_{i,t,STO}^W \leq Num_{tur_t} \cdot C_{W_{rat}} \quad , \forall i \in I, t \in T \quad (17)$$

Στο παράδειγμα που εξετάστηκε θεωρήθηκε ότι ο συντελεστής ισχύος κάθε ανεμογεννήτριας είναι 0,05 kW/turbine, ο βαθμός απόδοσης είναι 0,5, η ταχύτητα του

αέρα στην οποία γίνεται η διακοπή λειτουργείας της ανεμογεννήτριας είναι στα 30m/s και η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας που πωλείται στο δίκτυο είναι 0,034 €/kWh. Η ταχύτητα του αέρα για κάθε χρονική στιγμή στη διάρκεια της ημέρας θεωρείται δεδομένη. Κάθε οικία διαθέτει μία ανεμογεννήτρια μικρής κλίμακας,

3.2.5 Μαθηματικό μοντέλο μCHP

Η λειτουργικότητα της μονάδας CHP συνδέεται με την δυαδική μεταβλητή $Y_{i,t}$ και $X_{i,t}$.

Η $Y_{i,t}$ παίρνει την τιμή 1 όταν η μονάδα CHP ξεκινάει να λειτουργεί ενώ η $X_{i,t}$ παίρνει την τιμή 1 όταν η μονάδα CHP σταματάει να λειτουργεί. Για κάθε χρονική στιγμή ισχύουν οι εξής εξισώσεις (18), (19) [6], [8]:

$$W_{i,t} - W_{i,t-1} = Y_{i,t} - X_{i,t} \quad , \forall i \in I, t \in T \quad (18)$$

$$Y_{i,t} + X_{i,t} \leq 1 \quad , \forall i \in I, t \in T \quad (19)$$

Όταν η μονάδα CHP αρχίζει να λειτουργεί αυτή πρέπει πριν κλείσει να βρίσκεται σε λειτουργία για τουλάχιστον κάποια χρονική περίοδο.

Η εξίσωση (20) περιγράφει την παραπάνω πρόταση [6].

$$\sum_{k=0}^{UT_i-1} W_{i,t+k} \geq UT_i \cdot Y_{i,t} \quad , \forall i \in I, t \in T \quad (20)$$

Η μονάδα CHP όταν αρχίζει να λειτουργεί για κάποιο χρονικό διάστημα τουλάχιστον ST_i χρονικές περιόδους βρίσκεται σε κατάσταση εκκίνησης λειτουργείας. Αυτό συνεπάγεται ότι καταναλώνει καύσιμο αλλά δεν παράγει θερμότητα ή ηλεκτρική ενέργεια. Η εξίσωση (21) περιγράφει αυτή την κατάσταση [6].

$$\sum_{k=0}^{ST_i-1} Z_{i,t+k} \geq ST_i \cdot Y_{i,t} \quad , \forall i \in I, t \in T \quad (21)$$

Η εξίσωση (22) συνεπάγεται ότι η μονάδα CHP βρίσκεται σε κατάσταση μη λειτουργείας τουλάχιστον DT_i χρονικές περιόδους μετά το σταμάτημα λειτουργείας της μονάδας [6].

$$\sum_{k=0}^{DT_i-1} (1 - W_{i,t+k}) \geq DT_i \cdot X_{i,t} \quad , \forall i \in I, t \in T \quad (22)$$

Τα χαρακτηριστικά επίδοσης των μονάδων CHP περιγράφονται στην εξίσωση (23), που δείχνει ότι η μονάδα μCHP δεν μπορεί να παράγει περισσότερη ενέργεια από την

εγκατεστημένη ισχύ. Επιπλέον, υπάρχει και κάποιο κάτω όριο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την μονάδα.

$$W_{i,t} \cdot E_{i,MIN}^{CHP} \leq E_{i,t,SELF}^{CHP} + E_{i,t,SAL}^{CHP} + E_{i,t,STO}^{CHP} \leq W_{i,t} \cdot E_{i,MAX}^{CHP} \quad , \quad (23)$$

$$\forall i \in I, t \in T$$

Στο παράδειγμα που εξετάστηκε το κάτω όριο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τη μονάδα συμπαραγωγής είναι 0,4 ενώ το άνω όριο 1. Επιπλέον, ο βαθμός απόδοσης της μονάδας είναι 0,35.

Επιπλέον, η εξίσωση (24) περιγράφει ότι δεν είναι δυνατή η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη μονάδα CHP, όταν αυτή είναι σε κατάσταση εκκίνησης λειτουργίας.

$$E_{i,t,SELF}^{CHP} + E_{i,t,SAL}^{CHP} + E_{i,t,STO}^{CHP} \leq (1 - Z_{i,t}) \cdot E_{i,MAX}^{CHP} \quad , \forall i \in I, t \in T \quad (24)$$

3.2.6 Μαθηματικό μοντέλο ηλεκτρικών αυτοκινήτων

Σε αυτό το σύστημα θεωρείται ότι το ηλεκτρικό αυτοκίνητο δεν γίνεται να φορτίζει και να εκφορτίζει ταυτόχρονα. Αυτό περιγράφεται από την εξίσωση (25). Επιπλέον, η κατάσταση φόρτισης του ηλεκτρικού αυτοκινήτου δεν μπορεί να ξεπεράσει το άνω όριο φόρτισης του αυτοκινήτου καθώς και να ξεφορτίσει κάτω από το ελάχιστο όριο εκφόρτισης, σύμφωνα με την εξίσωση (26). Το πόσο φορτισμένο είναι το ηλεκτρικό αυτοκίνητο μια χρονική στιγμή εξαρτάται από το στάδιο της φόρτισης που έχει την προηγούμενη χρονική στιγμή και με το αν φορτίζει ή εκφορτίζει. Αυτό περιγράφεται από την εξίσωση (27). Αν φορτίζει η μεταβλητή $P^{Dch,EV}$ είναι 0 ενώ όταν εκφορτίζει η μεταβλητή $P^{Ch,EV}$ είναι 0. Ταυτόχρονα, το αυτοκίνητο μπορεί να φορτίσει και να εκφορτίσει μέχρι μια μέγιστη τιμή, σύμφωνα με τις εξισώσεις (28), (29).

Τέλος, θεωρείται ότι η κατάσταση φόρτισης με την οποία φεύγει το αυτοκίνητο από το σύστημα θα είναι η νέα κατάσταση φόρτισης του ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Αυτό περιγράφεται από την εξίσωση (30) [1], [12].

$$X_{i,t}^{Ch,EV} + X_{i,t}^{Dch,EV} \leq 1 \quad , \quad \forall i \in I, t \in T \quad (25)$$

$$SOC_{i,t}^{min} \leq SOC_{i,t}^{EV} \leq SOC_{i,t}^{max} \quad , \forall i \in I, t \in T \quad (26)$$

$$SOC_{i,t}^{EV} = SOC_{i,t-1}^{EV} + (P_{i,t}^{Ch,EV} \cdot \Delta t \cdot n_{ch}) - (P_{i,t}^{Dch,EV} \cdot \Delta t / n_{Dch}) + SOC_{i,t}^{EV,Arr} ,$$

$$\forall i \in I, t \in T \quad (27)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{Ch,EV} \leq X_{i,t}^{Ch,EV} \cdot P_i^{max} , \forall i \in I, t \in T \quad (28)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{Dch,EV} \leq X_{i,t}^{Dch,EV} \cdot P_i^{max} , \forall i \in I, t \in T \quad (29)$$

$$SOC_{i,t}^{EV} = SOC_{i,t}^{EV,dep} , \forall i \in I, t \in T \quad (30)$$

Στο παράδειγμα που εξετάστηκε θεωρήθηκε ότι είναι γνωστή η κατάσταση φόρτισης του ηλεκτρικού αυτοκινήτου κάθε χρονική στιγμή στη διάρκεια της ημέρας. Ταυτόχρονα, θεωρήθηκε ότι ο βαθμός απόδοσης φόρτισης του αυτοκινήτου είναι 0,9, ο βαθμός απόδοσης εκφόρτισης του ηλεκτρικού αυτοκινήτου είναι 0,95, η ελάχιστη κατάσταση φόρτισης του αυτοκινήτου είναι 25kWh, η χωρητικότητα της μπαταρίας του ηλεκτρικού αυτοκινήτου είναι 50kWh, η μέγιστη ισχύς είναι 50kW και η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας η οποία πωλείται στο δίκτυο από το ηλεκτρικό αυτοκίνητο είναι 0,07 €/kWh. Τέλος, θεωρήθηκε ότι κάθε οικία έχει μόνο ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο.

3.2.7 Μαθηματικό μοντέλο μονάδων αποθήκευσης θερμότητας

Για τη βέλτιστη λειτουργία των μονάδων αποθήκευσης θερμότητας απαιτούνται πρόσθετες εξισώσεις, όπως αναφέρονται παρακάτω. Η εξίσωση (31) απεικονίζει τη ροή θερμότητας μέσω της μονάδας αποθήκευσης θερμότητας. Η θερμότητα που συσσωρεύεται στο τέλος μιας χρονικής περιόδου για κάθε μονάδα είναι ίση με την ποσότητα θερμότητας που αποθηκεύτηκε κατά την προηγούμενη περίοδο σε συνδυασμό με την ανακτηθείσα θερμότητα που αποθηκεύτηκε κατά τη διάρκεια της περιόδου αυτής, μείον τη θερμότητα που δαπανήθηκε για την εκπλήρωση της θερμικής ζήτησης κατά την περίοδο αυτή. Η εξίσωση (32) δηλώνει ότι η θερμότητα που αποθηκεύεται στην αρχή της ημέρας είναι ίση με τη θερμότητα στο τέλος της ημέρας, θεωρώντας μονάδες χρόνου ίσες με χρονικά διαστήματα μιας ώρας. Τέλος η εξίσωση (33) ορίζει την ισχύ του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας [7].

$$H_{i,t,STO} = (1 - e) \cdot H_{i,t-1,STO} + \delta \cdot (H_{i,t,IN}^{HST} - H_{i,t,OUT}^{HST}) , \forall i \in I, t \in T \quad (31)$$

$$H_{i,0,STO} = H_{i,N,STO} , \forall i \in I \quad (32)$$

$$H_{i,t,STO} \leq H_{i,MAX}^{HST}, \forall i \in I, t \in T \quad (33)$$

Η μέγιστη τιμή αποθήκευσης θερμότητας του συστήματος είναι 1.5kW.

3.2.8 Μαθηματικό μοντέλο ισοζυγίου ηλεκτρικής ενέργειας

Η εξίσωση (34) περιγράφει το ισοζύγιο ηλεκτρικής ενέργειας μέσα στο μικροδίκτυο. Είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη οι απώλειες τόσο κατά τη φόρτιση, όσο και κατά την εκφόρτιση της μπαταρίας. Υποθέτουμε ότι η απώλεια κατά τη φόρτιση είναι $cl=10\%$ και κατά την εκφόρτιση $dl=15\%$. Οι εξισώσεις που περιγράφουν την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και τους περιορισμούς που υπάρχουν κατά τη λειτουργία του συστήματος είναι οι εξισώσεις (35) και (36) [7].

$$ES_{t,STO} = ES_{t-1,STO} + (1 - cl) \cdot \sum_i E_{i,t,STO}^{CHP} - (E_{i,t,OUT}^{EST} / (1 - dl)) \cdot \delta, \forall t \in T \quad (34)$$

$$ES_{0,STO} = ES_{N,STO}, \quad (35)$$

$$ES_{t,STO} \leq ES_{MAX}^{EST}, \forall t \in T \quad (36)$$

Η μέγιστη τιμή ηλεκτρικής ενέργειας που αποθηκεύεται στο σύστημα είναι 10kW.

Η αποθήκευση της ενέργειας λειτουργεί σαν μπαταρία που φορτίζει και εκφορτίζει επομένως πρέπει να διασφαλιστεί ότι δεν γίνεται ταυτόχρονη φόρτιση και εκφόρτιση. Αυτό περιγράφεται από τις εξισώσεις (37) και (38) [7], [17].

$$\sum_i (E_{i,t,STO}^{CHP} + E_{i,t,STO}^{PV} + E_{i,t,STO}^W + E_{i,t,STO}^{EV}) \leq N \cdot Y_t^{EST}, \forall i \in I, t \in T \quad (37)$$

$$\sum_i E_{i,t,OUT}^{EST} \leq N \cdot (1 - Y_t^{ELEC}), \forall i \in I, t \in T \quad (38)$$

3.2.9 Μαθηματικό μοντέλο μπόιλερ

Η λειτουργία ενός μπόιλερ περιγράφεται από την εξίσωση (39). Είναι φανερό πως η παραγόμενη θερμότητα από το μπόιλερ δεν θα μπορούσε να ξεπερνά την ονομαστική του ισχύ [5].

$$H_{i,MIN}^B \leq H_{i,t}^B \leq H_{i,MAX}^B, \forall i \in I, t \in T \quad (39)$$

Στο παράδειγμα που εξετάστηκε θεωρήθηκε ότι το κόστος για να λειτουργήσει ο λέβητας είναι 1 €/kWh, ο βαθμός απόδοσής του είναι 0,8, η μέγιστη παραγόμενη θερμότητα είναι 2 Kw. Τέλος, θεωρήθηκε ότι κάθε οικία έχει ένα λέβητα.

3.4 Τεχνολογικά χαρακτηριστικά συστημάτων ενέργειας και ενεργειακές τιμές αγοράς

Το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφηκε προηγουμένως εφαρμόστηκε σε μια γειτονιά της Αθήνας και είχε σκοπό του την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της τόσο σε ηλεκτρική ενέργεια, όσο και για θέρμανση. Αυτό επιτεύχθηκε με τη χρήση φωτοβολταϊκών μονάδων, ανεμογεννητριών, μικρής κλίμακας μονάδων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, δεξαμενών αποθήκευσης ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, λεβήτων και ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Στις επόμενες υποενότητες περιγράφονται λεπτομερώς τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου για τη χρήση του μοντέλου.

Ενεργειακά φορτία

Η λεπτομερής μελέτη των ενεργειακών φορτίων είναι ζωτικής σημασίας για τον σχεδιασμό των συστημάτων διεσπαρμένης παραγωγής.

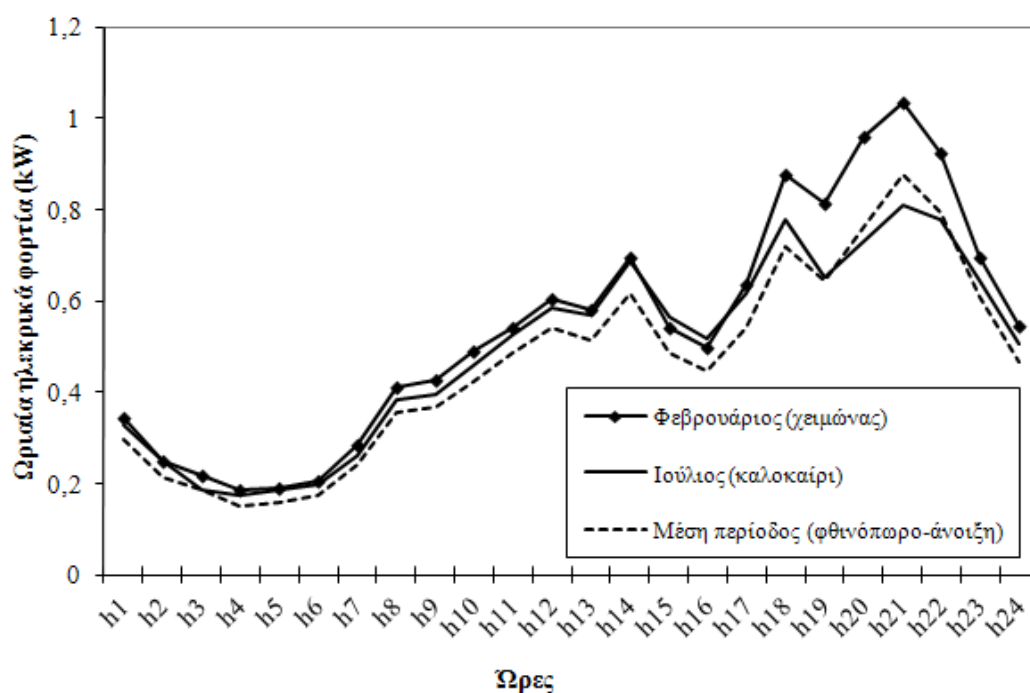
Στην προηγούμενη ενότητα περιγράφηκε λεπτομερώς ένα μαθηματικό μοντέλο του οποίου η εφαρμογή στον πραγματικό κόσμο αποκαλύπτει τα προφίλ ηλεκτρικής ενέργειας ενός μέσου νοικοκυριού. Επειδή τα προφίλ ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζουν μηνιαίες και ωριαίες διακυμάνσεις, ο μηνιαίος δείκτης εποχικής διακύμανσης (MSVI) και ο ωριαίος δείκτης εποχικής διακύμανσης (HSVI) για την περιοχή της Αθήνας χρησίμευσαν ως βάση για την εξαγωγή των προφίλ των άλλων μηνών.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι τα ηλεκτρικά προφίλ περιλαμβάνουν την ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για την ψύξη, η οποία επιτυγχάνεται μέσω ψυκτών συμπίεσης.

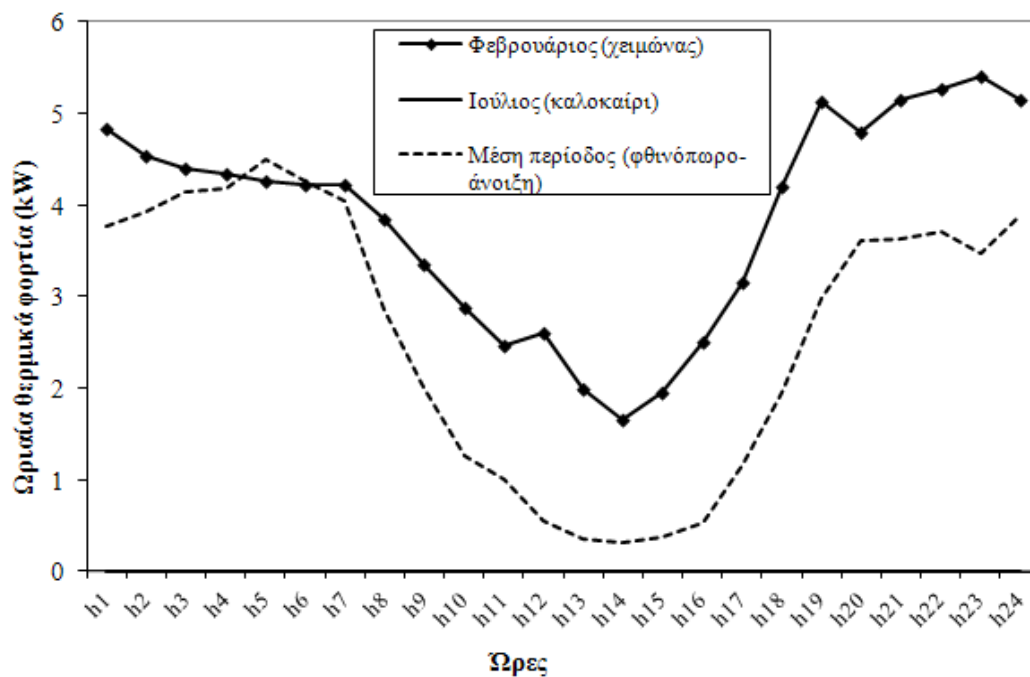
Τα προφίλ της θερμικής και ηλεκτρικής ζήτησης των κτιρίων αξιολογούνται με τη χρήση της κλιμακωτής μεθόδου για την εκτίμηση της ενεργειακής ζήτησης για τη θέρμανση ενός κτιρίου.

Οι εικόνες 6 και 7 παρουσιάζουν τα ηλεκτρικά και θερμικά προφίλ αντιπροσωπευτικών μηνών για ολόκληρο το έτος, καλύπτοντας τις τρεις περιόδους του καλοκαιριού, του χειμώνα και της άνοιξης-φθινοπώρου. Ο Φεβρουάριος και ο Ιούλιος επιλέχθηκαν ως τυπικά παραδείγματα για τον χειμώνα και το καλοκαίρι, αντίστοιχα, ενώ η μέση περίοδος περιλαμβάνει τον Απρίλιο και τον Νοέμβριο.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στο μαθηματικό μοντέλο, η διάρκεια των εποχών (s) ισοδυναμεί με 12 μήνες, ενώ οι περίοδοι (p) αναφέρονται σε 24 ώρες μιας τυπικής ημέρας για κάθε μήνα, όπως καταδεικνύεται στα συνοδευτικά διαγράμματα.



Εικόνα 6 Προφίλ ηλεκτρικής ενέργειας



Εικόνα 7 Προφίλ θερμικής ενέργειας

Δεδομένα αγοράς

Ένας άλλος κρίσιμος παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι τα δεδομένα της αγοράς, συμπεριλαμβανομένου του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας και του φυσικού αερίου. Σύμφωνα με τη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού Α.Ε., η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας ορίζεται σε 0,11 €/kWh [20]. Επιπλέον, οι τιμές πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας για μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (mCHP) και φωτοβολταϊκές μονάδες είναι =0,08785 €/kWh και =0,55 €/kWh αντίστοιχα, όπως αναφέρεται από το Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής στη γενική έκθεση του 2010 [20]. Πρόκειται για την τιμή εξαγοράς ηλεκτρικής ενέργειας που έχει καθοριστεί από την ελληνική κυβέρνηση για φωτοβολταϊκά συστήματα κάτω των 10 kWp και μονάδες συμπαραγωγής ενέργειας και θερμότητας με βάση τοπικά δεδομένα. Οι μονάδες συμπαραγωγής και οι λέβητες χρησιμοποιούν φυσικό αέριο σε τιμή 0,054 €/kWh [2].

Επιπλέον, ο φόρος για το διοξείδιο του άνθρακα αποτιμάται πλέον σε 0,017 €/kg [2]. Το Υπουργείο Περιβάλλοντος, Τροφίμων και Αγροτικών Υποθέσεων αναφέρει ότι η εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα για κάθε κιλοβατώρα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας είναι 0,781 kg/kWh. Αντιθέτως, η εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα για κάθε κιλοβατώρα φυσικού αερίου είναι μόλις 0,184 kg/kWh. Τέλος ο συντελεστής

ηλεκτρικής ενέργειας αφορά την ενέργεια που παράγεται με τη χρήση ελληνικών δεδομένων, ενώ ο συντελεστής φυσικού αερίου βασίζεται στην κατώτερη θερμογόνο δύναμη (LHV) του φυσικού αερίου και αφορά τις κιλοβατώρες του εισαγόμενου καυσίμου [2].

Τεχνολογίες μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας

Στην υποενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα τεχνολογικά χαρακτηριστικά καθώς και οι τιμές κόστους των μονάδων που απαρτίζουν το σύστημα διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας. Τα δεδομένα αυτά είναι πραγματικά δεδομένα αγοράς και προέκυψαν ύστερα από έρευνα στο διαδίκτυο.

Ο Πίνακας 3.1 δείχνει τις υποψήφιες τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν για μελέτη και τα χαρακτηριστικά τους. Τα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν στοιχεία όπως το κόστος λειτουργίας και συντήρησης, τη θερμική και ηλεκτρική απόδοση, την ισχύ κ.ά. για τις τεχνολογίες που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 3.1 Τεχνολογικά χαρακτηριστικά και κόστη των υποψήφιων τεχνολογιών

Τεχνολογία DER	Χαρακτηριστικά	Τιμές
Φωτοβολταϊκή μονάδα		
	A (m ²)	10
	n_e^{PV}	0.12
	Cp_{rat} (kW/m ²)	1
	Ισχύς μονάδος (kWe)	10
Μονάδες συμπαραγωγής		
	n_e^{CHP}	0.35
	HER	0.8
	Ισχύς μονάδος (kWe)	1

Μπίλιερ	Ονομαστική ισχύς max (kW _{th})	2
	n_{th}^B	0.80
Μονάδα αποθήκευσης		
θερμότητας	Ονομαστική ισχύς max (kW _{th})	1.5
	c_{OM}^{HST} (€/kWh)	0.001
Μονάδα αποθήκευσης		
ηλεκτρικής ενέργειας	c_{OM}^{EST} (€/kWh)	0.01
	Απώλεια φόρτισης cl	0.1
	Απώλεια εκφόρτισης dl	0.15
	ES _{STO,max} (kW)	10
Ηλεκτρικά αυτοκίνητα		
	βαθμός απόδοσης φόρτισης	0.9
	Βαθμός απόδοσης εκφόρτισης	0.95
	State of charge (SOC _{max} kWh)	100
	State of charge (SOC _{min} kWh)	50
	Capacity (kWh)	50
	P _{max} (kW)	50

Τα πάγια κόστη των μονάδων συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού μικρής κλίμακας (μCHP), κατάλληλων για οικιακή χρήση, δίνονται στον Πίνακα 3.2 .

Πίνακας 3.2 Ισχύς και κόστος των μονάδων συμπαραγωγής (EST, 2006)

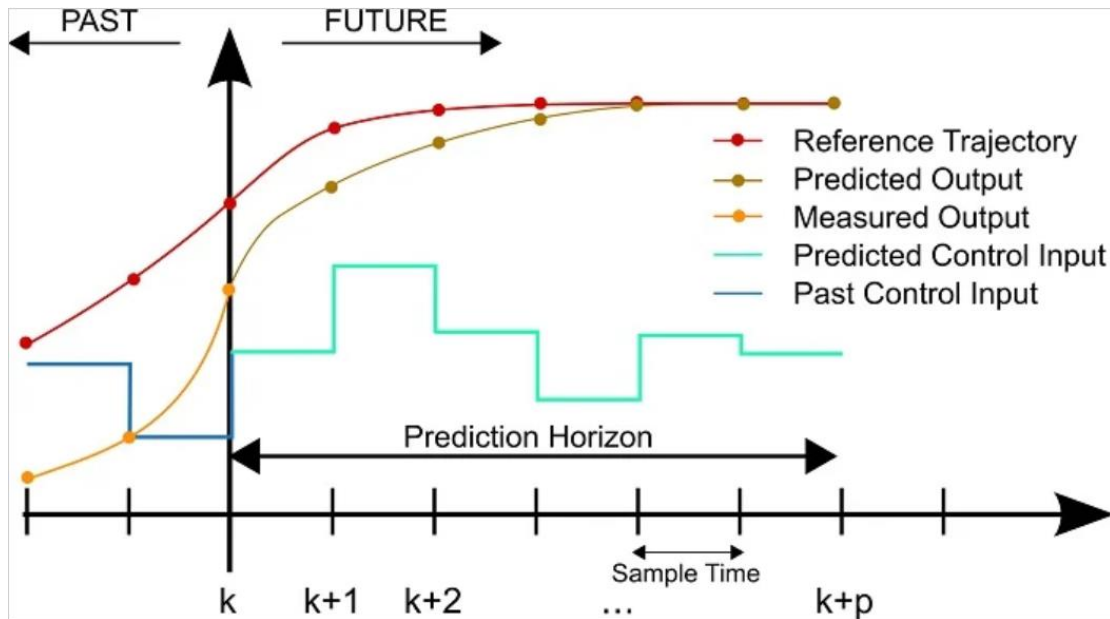
Ισχύς μονάδος συμπαραγωγής (kWe)	Κόστος (€/kWe)
1	1583
5	911
10	835
15	653
25	560

4. Η ιστορία των συστημάτων προβλεπτικού ελέγχου

Η λογική που διέπει το MPC είναι η μετατροπή του προβλήματος ελέγχου σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, έτσι ώστε σε κάθε χρονική στιγμή της δειγματοληψίας να υπολογίζεται μια ακολουθία μελλοντικών τιμών ελέγχου η οποία θα βασίζεται στην επίλυση ενός προβλήματος προβλεπτικού ελέγχου πεπερασμένου ορίζοντα [13].

Τα μοντέλα αυτά προβλέπουν τη συμπεριφορά των εξαρτημένων μεταβλητών (μεταβλητές εξόδου) στο πλαίσιο ενός δυναμικού συστήματος όπου συμβαίνουν αλλαγές στις ανεξάρτητες μεταβλητές (μεταβλητές εισόδου). Τα μοντέλα προβλεπτικού ελέγχου υπολογίζουν τις μελλοντικές τιμές των μεταβλητών εισόδου με την ικανοποίηση όλων των περιορισμών τόσο στις μεταβλητές εισόδου όσο και στις μεταβλητές εξόδου. Στη συνέχεια, ο ελεγκτής για τη σχετική διεργασία λαμβάνει αυτές τις τιμές ως σημεία ρύθμισης. Η προσέγγιση του μοντέλου προβλεπτικού ελέγχου περιγράφεται στην εικόνα 8. Εν συντομία, το μοντέλο αυτό πρέπει να αναλαμβάνει τις απαιτούμενες ενέργειες από την αρχή έως το τέλος, έτσι ώστε η συμπεριφορά του συστήματος να προσεγγίζει τη βέλτιστη συμπεριφορά μετά από έναν καθορισμένο αριθμό βημάτων. Σε κάθε χρονική στιγμή που χρησιμοποιείται το πρόβλημα βελτιστοποίησης, αξιοποιείται μόνο το αρχικό βήμα, το μοντέλο προχωρά ένα βήμα μπροστά και το πρόβλημα επιλύεται ξανά μέχρι να ολοκληρωθεί ο ορίζοντας πρόβλεψης [13].

Τα πλεονεκτήματα του συστήματος προβλεπτικού ελέγχου έγκεινται στην απλή διαχείριση των μεταβλητών (εισόδου, εξόδου και αναφοράς), στην ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας για μεγάλα χρονικά διαστήματα χάρη στην αρχή του κυλιόμενου ορίζοντα και στην προσαρμοστικότητά του σε νέες καταστάσεις [12].



Εικόνα 8 Μοντέλο προβλεπτικού ελέγχου (MPC)

Στο παράδειγμα που εξετάστηκε, ο προβλεπτικός ορίζοντας θεωρήθηκε διάστημα 6 χρονικών περιόδων. Κάθε χρονική περίοδος είναι το 0.25 της ώρας, δηλαδή 15 λεπτά.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, χρησιμοποιώντας το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφηκε στην ενότητα 3, για το βέλτιστο σχεδιασμό του μικροδικτύου με βάση οικονομικά και περιβαλλοντικά κριτήρια αναπτύχθηκε ένα σύστημα προβλεπτικού ελέγχου (MPC) για μία γειτονιά αποτελούμενη από 2 κτίρια, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των τεχνολογιών που απαρτίζουν το σύστημα.

Πιο συγκεκριμένα έγινε υλοποίηση ενός μοντέλου βελτιστοποίησης για το σχεδιασμό ενός μικροδικτύου σε μία γειτονιά. Οι τεχνολογίες οι οποίες υφίστανται στο υπάρχον σύστημα είναι φωτοβολταϊκές συστοιχίες, μονάδες συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού, λέβητες, ανεμογεννήτριες, ηλεκτρικά αυτοκίνητα και συσκευές αποθήκευσης θερμότητας και ηλεκτρισμού. Το μικροδίκτυο αυτό λοιπόν μπορεί να λειτουργεί αυτόνομα ή συνδεδεμένο με το κεντρικό δίκτυο.

Ο έλεγχος πρόβλεψης μοντέλου (MPC) είναι μια στρατηγική ελέγχου που χρησιμοποιείται σε διάφορους τομείς, όπως οι χημικές εγκαταστάσεις και τα διυλιστήρια πετρελαίου, ήδη από τη δεκαετία του 1980. Τα τελευταία χρόνια, έχει αναπτυχθεί επιπρόσθετα για συστήματα ισχύος και ηλεκτρονικά συστήματα .

Η χρήση των μικροδικτύων έχει γίνει μια εναλλακτική λύση για την ενσωμάτωση της διεσπαρμένης παραγωγής για την παροχή ενέργειας σε απομονωμένες κοινότητες . Η σημασία της χρήσης των φυσικών πόρων (ανανεώσιμων πηγών ενέργειας) προκύπτει κατά την εισαγωγή άλλων μορφών βιώσιμης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, υποστηρίζοντας το περιβάλλον, καθώς αυτό το είδος των πόρων δεν ρυπαίνει το περιβάλλον. Τα μικροδίκτυα αποτελούνται από πηγές παραγωγής ενέργειας, όπως ηλιακή, αιολική, βιομάζα, γεωθερμία, υδροηλεκτρική και ορυκτά, μεταξύ άλλων, εκτός από την ενσωμάτωση συστημάτων αποθήκευσης για την τροφοδοσία τοπικών φορτίων.

Στις αρχές της δεκαετίας του 2000, οι ερευνητές άρχισαν να διερευνούν τη χρήση του MPC στα μικροδίκτυα. Οι πρώτες μελέτες επικεντρώθηκαν στην εφαρμογή του MPC στον έλεγχο της ποιότητας ισχύος και του διαμοιρασμού ισχύος σε μικροδίκτυα . Το 2010 διεξήχθη μελέτη για την εφαρμογή των MPC σε τρία ιεραρχικά επίπεδα ελέγχου σε ένα μικροδίκτυο, η οποία επέλυσε τα προβλήματα της ποιότητας ισχύος, του διαμοιρασμού ισχύος, της διαχείρισης ενέργειας και της οικονομικής βελτιστοποίησης. Την τελευταία δεκαετία, έχουν διεξαχθεί αρκετές μελέτες για τη βελτίωση της απόδοσης του MPC σε μικροδίκτυα. Για παράδειγμα, οι εξελίξεις στο MPC που δέχονται διαφορετικούς περιορισμούς του συστήματος έχουν επιλύσει πολλαπλές ανησυχίες σε αβέβαια συστήματα μικροδικτύων [7].

4.1 Εφαρμογές των συστημάτων προβλεπτικού ελέγχου

Ο προβλεπτικός έλεγχος (MPC) έχει χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά σε διάφορες βιομηχανικές διεργασίες, όπως σε χημικά εργοστάσια ή διυλιστήρια πετρελαίου. Ωστόσο, η εφαρμογή του σε ρομποτικά συστήματα σε πραγματικό βιομηχανικό περιβάλλον, όπου αναπόφευκτες αβεβαιότητες μοντελοποίησης και εξωτερικές διαταραχές επηρεάζουν το σύστημα, εξακολουθεί να είναι περιορισμένη.

Η ABB χρησιμοποιεί τον MPC για να βοηθήσει πελάτες από διάφορους τομείς, όπως η εξόρυξη, τα ορυκτά, το τσιμέντο, ο χαρτοπολτός και το χαρτί, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο και οι θαλάσσιοι τομείς. Στον κόσμο της ρομποτικής, το MPC χρησιμοποιείται συχνότερα για το σχεδιασμό και τον έλεγχο αυτόνομων οχημάτων, ρομπότ με υψηλά επίπεδα αυτονομίας και μη γραμμικότητες στα δυναμικά μοντέλα, όπως τα διαστημικά ρομπότ και τα αεροπλάνα, χρησιμοποιούν MPC.

Ένα άλλο παράδειγμα ενός τέτοιου σύνθετου ρομπότ είναι ένας κινητός χειριστής. Αυτά τα ρομπότ πρέπει να διατηρούν τη σταθερότητά τους σε δυναμικά περιβάλλοντα που απαιτούν τη χρήση MPC. Διάφοροι χειριστές διαχείρισης αποθηκών με δυναμική φόρτωση χρησιμοποιούν MPC λόγω προβλημάτων αστάθειας κατά τη χρήση στρατηγικών ελέγχου PID ή προσαρμοστικού ελέγχου.

Το MPC χρησιμοποιείται επίσης σε εργοστάσια με ακριβείς λειτουργίες εργαλειομηχανών, όπου δεν υπάρχουν ανθρώπινες παρεμβάσεις. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το υλικό των κοπτικών εργαλείων είναι πολύ δαπανηρό και σφάλματα μπορεί να οδηγήσουν σε τεράστιες απώλειες. Οι χειριστές ρομπότ γίνονται όλο και πιο δημοφιλείς εφαρμογές σε αυτές τις βιομηχανίες. Δεδομένου ότι υπάρχει υψηλό επίπεδο αβεβαιότητας που σχετίζεται με αυτά τα ρομπότ, ο MPC είναι μία από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες στρατηγικές ελέγχου.

5. Ανάλυση των γραφημάτων λειτουργίας του μικροδικτύου

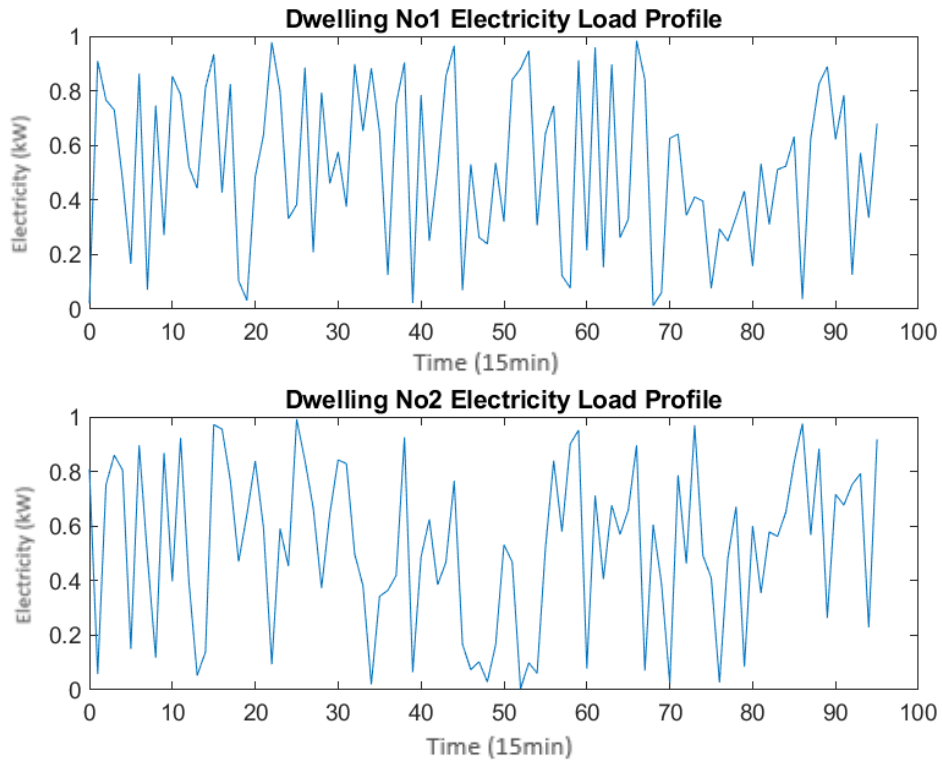
Αυτό το σενάριο αφορά τον σχεδιασμό και την προσομοίωση ενός συστήματος προβλεπτικού ελέγχου (MPC) για οικιακό μικροδίκτυο που χρησιμοποιεί Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Ο κύριος στόχος αυτού του έργου είναι η βελτιστοποίηση της λειτουργίας του μικροδικτύου δύο κατοικιών, το οποίο αποτελείται από ενεργειακά συστήματα, όπως φωτοβολταϊκά πάνελ, μονάδα συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, μπόιλερ, ανεμογεννήτριες, μονάδες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας και ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Το μικροδίκτυο συνήθως λειτουργεί συνδεδεμένο και συγχρονισμένο με το παραδοσιακό κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο (μακροδίκτυο), αλλά μπορεί επίσης να αποσυνδεθεί και να λειτουργήσει αυτόνομα, όπως υπαγορεύουν οι φυσικές ή/και οικονομικές συνθήκες.

Σε αυτό το πλαίσιο, το μικροδίκτυο χρησιμοποιεί ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως ηλιακούς συλλέκτες ή ανεμογεννήτριες, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η προσέγγιση MPC χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της μελλοντικής συμπεριφοράς του μικροδικτύου και τη λήψη αποφάσεων που ελαχιστοποιούν μια ορισμένη συνάρτηση κόστους σε δεδομένο ορίζοντα πρόβλεψης. Αυτή η συνάρτηση κόστους μπορεί να αντιπροσωπεύει διάφορους στόχους, όπως η ελαχιστοποίηση του συνολικού ενεργειακού κόστους, η μείωση της ζήτησης αιχμής ή η μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα [18].

Ο κώδικας που συγγράφηκε για αυτό το μικροδίκτυο είναι μια υψηλού επιπέδου αναπαράσταση της διαδικασίας διατύπωσης και προσομοίωσης MPC [8], [9], [15]. Ξεκινά με την εκκαθάριση όλων των μεταβλητών και των αριθμητικών στοιχείων και στη συνέχεια φορτώνει τα δεδομένα εισόδου και δηλώνει τις μεταβλητές απόφασης για το πρόβλημα βελτιστοποίησης. Ο κύριος βρόχος του προγράμματος προσομοιώνει τη λειτουργία του μικροδικτύου για έναν ορισμένο αριθμό χρονικών βημάτων (N_{sim}). Σε κάθε χρονικό βήμα επιλύει το πρόβλημα βελτιστοποίησης, ενημερώνει την κατάσταση του μικροδικτύου και αποθηκεύει τη λύση. Μετά την προσομοίωση, ελέγχει αν υπήρξαν προβλήματα μη εφικτότητας κατά τη βελτιστοποίηση και εμφανίζει τα αποτελέσματα. Εάν ο χρήστης το επιθυμεί, μπορεί επίσης να δημιουργήσει σχήματα για την οπτικοποίηση αυτών των αποτελεσμάτων. Αυτή η προσομοίωση επιτρέπει στον χρήστη τέλος να αξιολογήσει την απόδοση της προσέγγισης MPC υπό διαφορετικά σενάρια και συνθήκες και να κατανοήσει πώς διάφοροι παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν τη λειτουργία του μικροδικτύου.

Το πρώτο γράφημα της εικόνας 9 έχει τίτλο "Προφίλ ηλεκτρικού φορτίου κατοικίας Νο1" και "Προφίλ ηλεκτρικού φορτίου κατοικίας Νο2". Τα γραφήματα αυτά αντιπροσωπεύουν τα προφίλ φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας για δύο διαφορετικές κατοικίες κατά τη διάρκεια μιας δεδομένης χρονικής περιόδου. Ο άξονας x αντιπροσωπεύει χρονικά διαστήματα, ενώ ο άξονας y υποδεικνύει το φορτίο ηλεκτρικής ενέργειας σε αυτές τις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Τα γραφήματα παρουσιάζουν μια σειρά από κορυφές και κοιλίες, υποδεικνύοντας διακυμάνσεις στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας καθ' όλη τη διάρκεια της παρατηρούμενης περιόδου. Αυτό αποδίδεται σε διαφορετικές δραστηριότητες εντός της κατοικίας που απαιτούν διαφορετικές ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας.

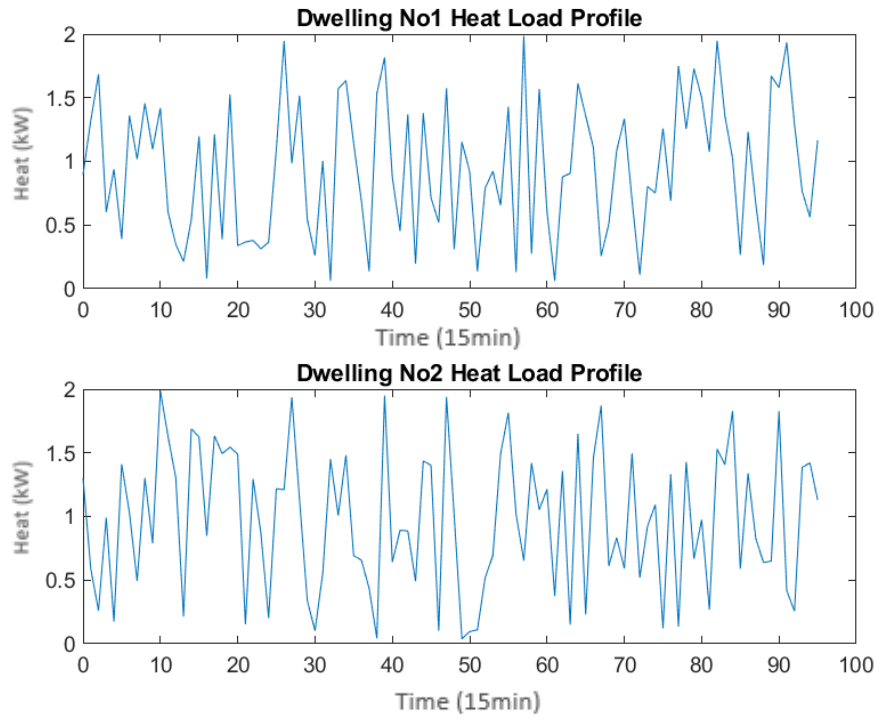
Η ανάλυση αυτών των γραφημάτων συμβάλλει στην κατανόηση των προτύπων κατανάλωσης ενέργειας των μεμονωμένων νοικοκυριών και μπορεί να βοηθήσει τις εταιρείες κοινής ωφέλειας στη βελτιστοποίηση της διανομής ενέργειας και στον προγραμματισμό για τις ώρες αιχμής του φορτίου. Για παράδειγμα, οι περίοδοι υψηλής χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας (αιχμές) αντιστοιχούν σε περιόδους κατά τις οποίες χρησιμοποιούνται συσκευές υψηλής κατανάλωσης ενέργειας, όπως κατά τη διάρκεια του μαγειρέματος ή της θέρμανσης. Αντίθετα, οι περίοδοι χαμηλής χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας (χαμηλές τιμές) υποδηλώνουν περιόδους κατά τις οποίες η κατοικία είναι ακατοίκητη ή οι ένοικοι κοιμούνται. Με την κατανόηση αυτών των μοτίβων, οι εταιρείες κοινής ωφέλειας μπορούν να διαχειρίζονται καλύτερα τους πόρους τους και ακόμη και να εφαρμόζουν στρατηγικές απόκρισης στη ζήτηση για να μετατοπίζουν τη χρήση από τις ώρες αιχμής. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αποδοτικότερη χρήση των ενεργειακών πόρων και σε μείωση του ενεργειακού κόστους για τους καταναλωτές. Επιπλέον, αυτά τα προφίλ φορτίου μπορούν επίσης να είναι χρήσιμα για το σχεδιασμό και τη διαστασιολόγηση συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως ηλιακά φωτοβολταϊκά ή συστήματα αποθήκευσης μπαταριών, για κάθε κατοικία. Με την προσαρμογή του προφίλ παραγωγής ή εκφόρτισης αυτών των συστημάτων στο προφίλ φορτίου, μπορεί κανείς να μεγιστοποιήσει την αυτοκατανάλωση ανανεώσιμης ενέργειας και να ελαχιστοποιήσει την εξάρτηση από το δίκτυο. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε περαιτέρω εξοικονόμηση κόστους και περιβαλλοντικά οφέλη.



Εικόνα 9 Προφίλ ηλεκτρικού φορτίου κατοικίας Νο1 και Νο2

Το γράφημα της παρακάτω εικόνας 10 απεικονίζει τα "Προφίλ θερμικού φορτίου" για δύο διαφορετικές κατοικίες, που ονομάζονται "Κατοικία Νο1" και "Κατοικία Νο2". Παρόμοια με τα προφίλ φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας, αυτά τα γραφήματα δείχνουν τη διακύμανση του θερμικού φορτίου με την πάροδο του χρόνου. Ο άξονας x αντιπροσωπεύει χρονικά διαστήματα, ενώ ο άξονας y υποδεικνύει το θερμικό φορτίο σε αυτές τις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Τα προφίλ θερμικού φορτίου και για τις δύο κατοικίες παρουσιάζουν διακυμάνσεις, υποδεικνύοντας διακυμάνσεις στο θερμικό φορτίο με την πάροδο του χρόνου. Αυτό οφείλεται σε αλλαγές στην εξωτερική θερμοκρασία, στην απόδοση του συστήματος θέρμανσης ή στη συμπεριφορά των ενοίκων.

Η σύγκριση αυτών των προφίλ θερμικού φορτίου με τα προφίλ ηλεκτρικού φορτίου που δόθηκαν προηγουμένως δίνουν πολύτιμες πληροφορίες. Για παράδειγμα, περίοδοι υψηλού φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας συμπίπτουν και στα δύο γραφήματα, υποδεικνύοντας περιόδους κατά τις οποίες χρησιμοποιούνται συσκευές υψηλής κατανάλωσης ενέργειας, όπως ηλεκτρικές θερμάστρες. Από την άλλη πλευρά, εάν οι αιχμές στα προφίλ φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας δεν ευθυγραμμίζονται, αυτό υποδηλώνει τη χρήση μη ηλεκτρικών πηγών θέρμανσης ή ότι άλλες ηλεκτρικές συσκευές συμβάλλουν στο φορτίο ηλεκτρικής ενέργειας. Η κατανόηση αυτών των μοτίβων μπορεί να βοηθήσει στο σχεδιασμό αποδοτικότερων ενεργειακών συστημάτων για κάθε κατοικία και στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του μικροδικτύου. Για παράδειγμα, εάν χρησιμοποιούνται ηλιακοί συλλέκτες, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας θα μπορούσε να προσαρμοστεί στις περιόδους υψηλού φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας και θέρμανσης, μεγιστοποιώντας έτσι τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και μειώνοντας την εξάρτηση από το δίκτυο.



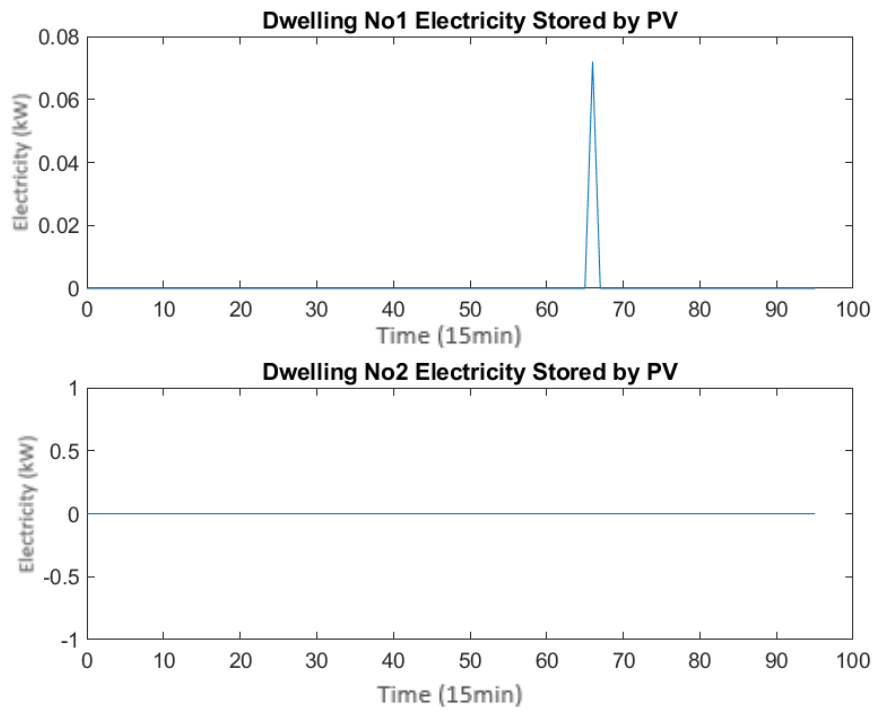
Εικόνα 10 Προφίλ θερμικού φορτίου για τις κατοικίες Νο1 και Νο2

Το γράφημα της εικόνας 11 απεικονίζει την "Αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια από φωτοβολταϊκά συστήματα" για δύο διαφορετικές κατοικίες, με τις ονομασίες "Κατοικία Νο1" και "Κατοικία Νο2". Ο άξονας x αντιπροσωπεύει χρονικά διαστήματα, ενώ ο άξονας y δείχνει την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που αποθηκεύτηκε από τα φωτοβολταϊκά συστήματα σε αυτές τις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές.

Για την κατοικία Νο1, υπάρχει μια σημαντική αιχμή στην αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας περίπου στο σημείο 70 στον άξονα x, υποδεικνύοντας μια απότομη αύξηση της δέσμευσης ή της αποθήκευσης ενέργειας. Αυτό οφείλεται στην αυξημένη έκθεση στο ηλιακό φως ή στην αυξημένη απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων εκείνη τη συγκεκριμένη στιγμή. Τον υπόλοιπο χρόνο, η αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια παραμένει σχετικά χαμηλή ή σταθερή.

Αντίθετα, η κατοικία αριθ. 2 παρουσιάζει μια σταθερή γραμμή στο μηδέν, υποδεικνύοντας καμία αλλαγή ή καμία ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται από τα φωτοβολταϊκά καθ' όλη τη διάρκεια της παρατηρούμενης περιόδου. Αυτό υποδηλώνει τη σταθερή χρήση ενέργειας ίση με την αποθηκευμένη ενέργεια ή την έλλειψη έκθεσης στο ηλιακό φως.

Αυτά τα γραφήματα είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κάθε κατοικία και της συμβολής τους στο συνολικό ενεργειακό μείγμα του μικροδικτύου. Μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό περιόδων υψηλής δέσμευσης ηλιακής ενέργειας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιστάθμιση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο ή να αποθηκευτεί για μεταγενέστερη χρήση. Μπορούν επίσης να αναδείξουν προβλήματα με τα φωτοβολταϊκά συστήματα, όπως υποαπόδοση ή δυσλειτουργία, τα οποία μπορούν στη συνέχεια να αντιμετωπιστούν για τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης και βιωσιμότητας του μικροδικτύου.

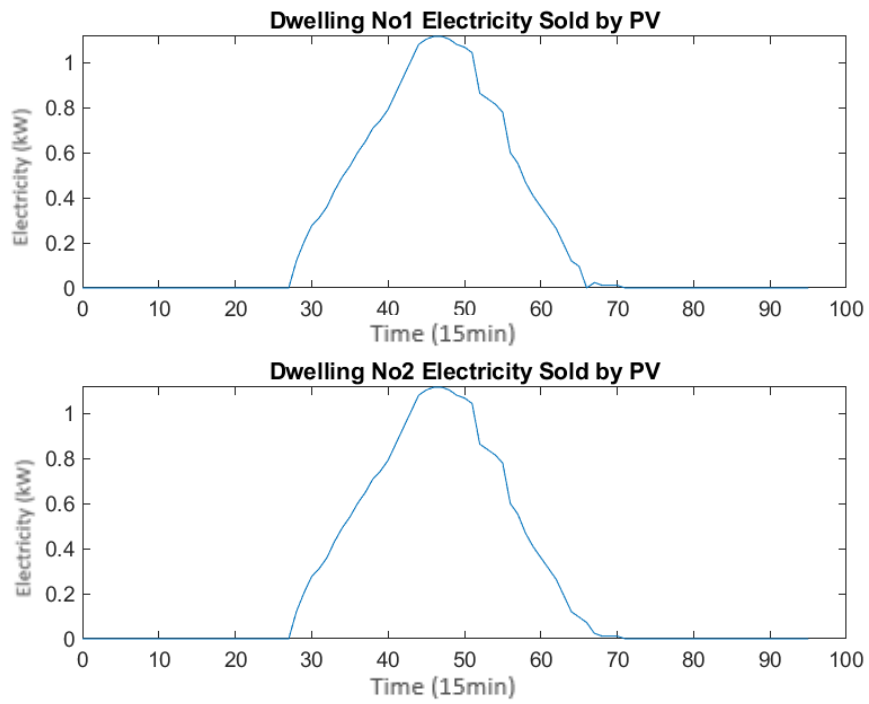


Εικόνα 11 Αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια από φωτοβολταϊκά συστήματα

Το γράφημα της εικόνας 12 απεικονίζει την "Πωληθείσα ηλεκτρική ενέργεια από φωτοβολταϊκά συστήματα" για δύο διαφορετικές κατοικίες, με τις ονομασίες "Κατοικία Νο1" και "Κατοικία Νο2". Ο άξονας x αντιπροσωπεύει χρονικά διαστήματα, ενώ ο άξονας y δείχνει την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που πωλήθηκε από τα φωτοβολταϊκά συστήματα κατά τις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές.

Και για τις δύο κατοικίες, τα γραφήματα παρουσιάζουν παρόμοιο μοτίβο: ξεκινούν από το μηδέν, κορυφώνονται περίπου στο σημείο 50 στον άξονα x και στη συνέχεια επιστρέφουν στο μηδέν. Αυτό το μοτίβο υποδηλώνει ότι η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά συστήματα πωλείται κατά τη διάρκεια συγκεκριμένων περιόδων, πιθανότατα όταν το ηλιακό φως είναι βέλτιστο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η αιχμή υποδηλώνει την ώρα της ημέρας κατά την οποία πωλείται η μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια, η οποία θα μπορούσε να οφείλεται στη βέλτιστη διαθεσιμότητα ηλιακού φωτός για τα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Αυτά τα γραφήματα είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κάθε κατοικία και της συμβολής τους στο συνολικό ενεργειακό μείγμα του μικροδικτύου. Μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό περιόδων υψηλής δέσμευσης ηλιακής ενέργειας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιστάθμιση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο ή να αποθηκευτεί για μεταγενέστερη χρήση.

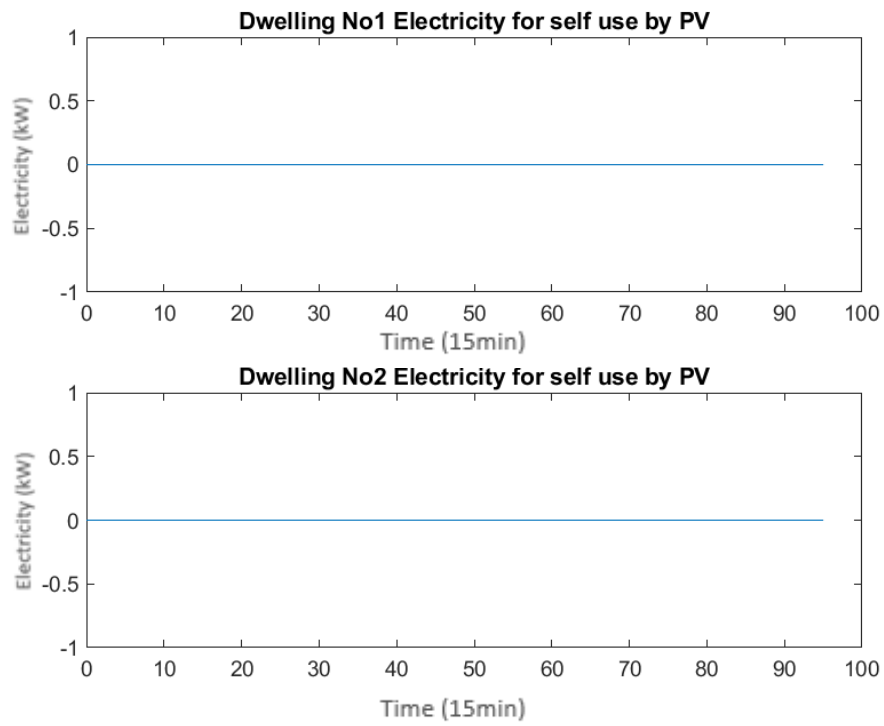


Εικόνα 12 Πωληθείσα ηλεκτρική ενέργεια από φωτοβολταϊκά συστήματα

Το γράφημα της εικόνας 13 απεικονίζει την "Ηλεκτρική ενέργεια για ιδιοκατανάλωση από φωτοβολταϊκά συστήματα" για δύο διαφορετικές κατοικίες, με τις ονομασίες "Κατοικία Νο1" και "Κατοικία Νο2". Ο άξονας x αντιπροσωπεύει τα χρονικά διαστήματα, ενώ ο άξονας y δείχνει την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε από τις ίδιες τις κατοικίες από τα φωτοβολταϊκά συστήματα σε αυτές τις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές.

Και για τις δύο κατοικίες, τα γραφήματα δείχνουν μια σταθερή γραμμή στο μηδέν καθ' όλη τη διάρκεια της χρονικής περιόδου. Αυτό υποδηλώνει ότι καμία ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά συστήματα δεν χρησιμοποιείται για ιδιοκατανάλωση σε αυτές τις κατοικίες κατά τη διάρκεια της παρατηρούμενης περιόδου. Αυτό οφείλεται σε διάφορους λόγους. Για παράδειγμα, όλη η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά συστήματα πωλείται πίσω στο δίκτυο ή αποθηκεύεται για μεταγενέστερη χρήση. Εναλλακτικά, οι κατοικίες είτε είναι ακατοίκητες κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου ή οι ανάγκες των κατοικιών σε ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να καλύπτονται εξ ολοκλήρου από άλλες πηγές.

Αυτά τα γραφήματα παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για τα πρότυπα αυτοκατανάλωσης των κατοικιών και μπορούν να ενημερώσουν για στρατηγικές διαχείρισης και βελτιστοποίησης της ενέργειας στο μικροδίκτυο. Για παράδειγμα, εάν τα φωτοβολταϊκά συστήματα παράγουν περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια από όση χρησιμοποιείται από τις κατοικίες, αυτό θα μπορούσε να υποδηλώνει μια ευκαιρία για αύξηση της αυτοκατανάλωσης, μειώνοντας έτσι την εξάρτηση από το δίκτυο και οδηγώντας σε εξοικονόμηση κόστους. Αντίθετα, εάν τα φωτοβολταϊκά συστήματα δεν παράγουν αρκετή ηλεκτρική ενέργεια για να καλύψουν τις ανάγκες των κατοικιών, αυτό θα μπορούσε να υποδηλώνει την ανάγκη αύξησης της χωρητικότητας των φωτοβολταϊκών συστημάτων ή την εφαρμογή μέτρων ενεργειακής απόδοσης στις κατοικίες. Συνολικά, τα στοιχεία αυτά παρέχουν μια σαφή εικόνα των προτύπων αυτοκατανάλωσης των κατοικιών εντός του μικροδικτύου, η οποία είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική διαχείριση και βελτιστοποίηση της ενέργειας.

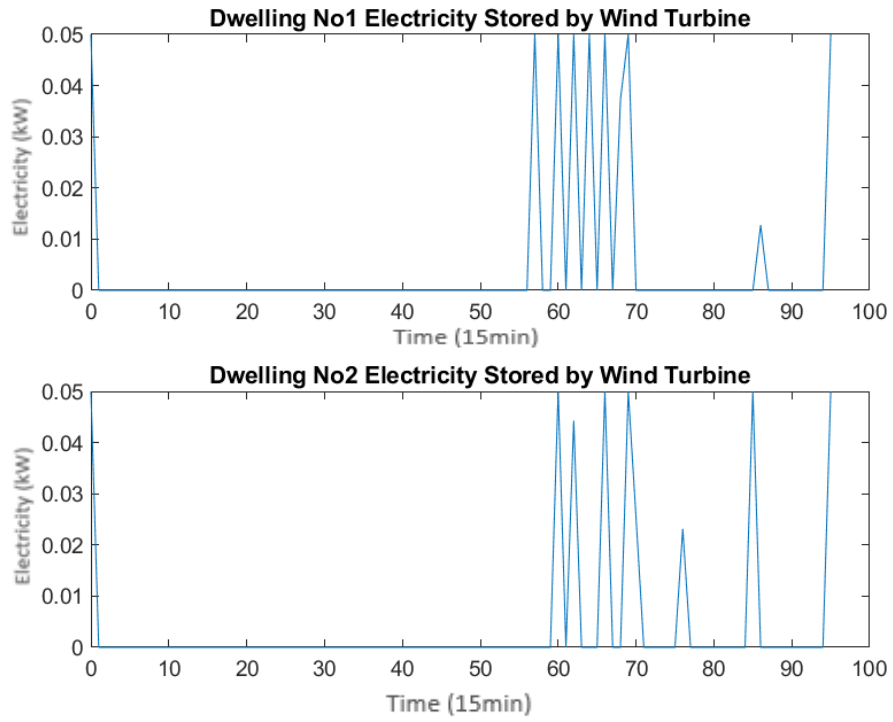


Εικόνα 13 Ηλεκτρική ενέργεια για ιδιοκατανάλωση από φωτοβολταϊκά συστήματα

Το γράφημα της εικόνας 14 απεικονίζει την "Ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται από ανεμογεννήτρια" για δύο διαφορετικές κατοικίες, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως "Κατοικία Νο1" και "Κατοικία Νο2". Ο άξονας x αντιπροσωπεύει και εδώ τα χρονικά διαστήματα, ενώ ο άξονας y υποδεικνύει την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που αποθηκεύεται από τις ανεμογεννήτριες στις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές.

Και για τις δύο κατοικίες, οι γραφικές παραστάσεις παρουσιάζουν παρόμοιο μοτίβο: ξεκινούν από το μηδέν. Αυτό είναι φυσιολογικό καθώς η ταχύτητα του αέρα εκείνες τις χρονικές περιόδους είναι 50m/s, όπου ξεπερνάει την ταχύτητα διακοπής λειτουργίας της ανεμογεννήτριας που είναι 30m/s. Συνέχεια, οι γραφικές παραστάσεις κορυφώνονται περίπου στο σημείο 50 στον άξονα x και στη συνέχεια επιστρέφουν στο μηδέν. Αυτό το μοτίβο υποδηλώνει ότι η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες αποθηκεύεται κατά τη διάρκεια συγκεκριμένων περιόδων, όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι βέλτιστη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η αιχμή υποδηλώνει την ώρα της ημέρας κατά την οποία αποθηκεύεται η μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια, η οποία θα μπορούσε να οφείλεται στις βέλτιστες συνθήκες ανέμου.

Αυτά τα γραφήματα παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την απόδοση των ανεμογεννητριών σε κάθε κατοικία και τη συμβολή τους στο συνολικό ενεργειακό μείγμα του μικροδικτύου. Μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό περιόδων υψηλής δέσμευσης αιολικής ενέργειας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιστάθμιση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο ή να αποθηκευτεί για μεταγενέστερη χρήση.

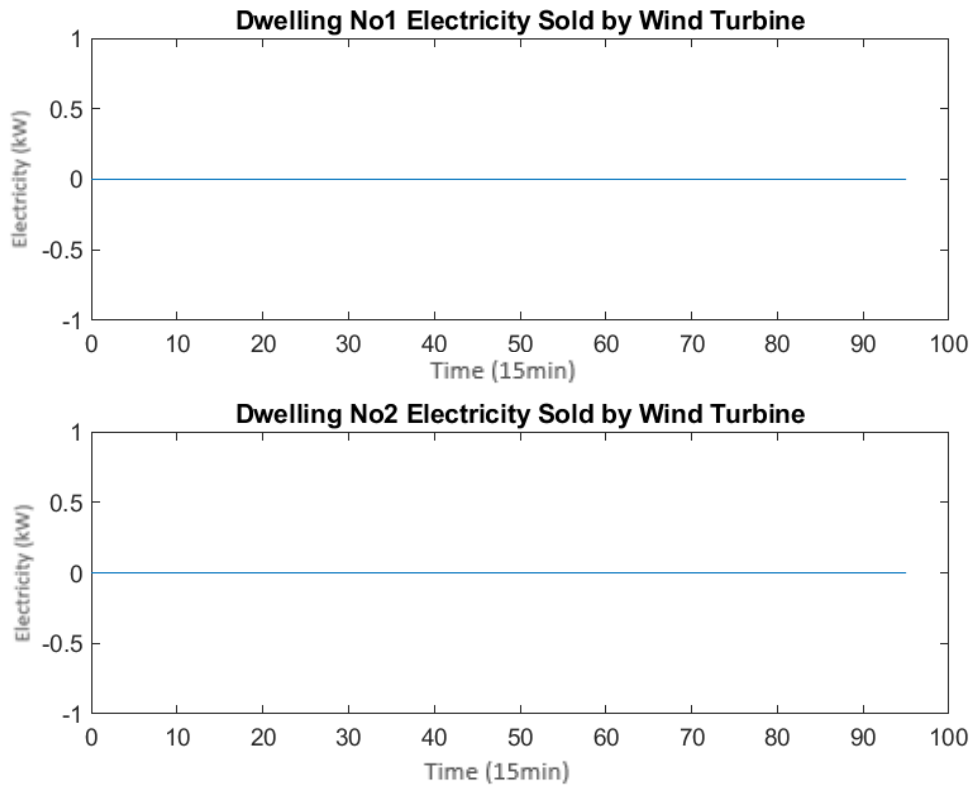


Εικόνα 14 Ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται από ανεμογεννήτρια για δύο διαφορετικές κατοικίες

Το γράφημα της εικόνας 15 απεικονίζει την "Πωληθείσα ηλεκτρική ενέργεια από ανεμογεννήτρια" για δύο διαφορετικές κατοικίες, με τις ονομασίες "Κατοικία Νο1" και "Κατοικία Νο2". Ο άξονας x αντιπροσωπεύει χρονικά διαστήματα, ενώ ο άξονας y δείχνει την ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που πωλήθηκε από τις ανεμογεννήτριες σε αυτές τις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές.

Και για τις δύο κατοικίες, τα γραφήματα δείχνουν μια σταθερή γραμμή στο μηδέν καθ' όλη τη διάρκεια της χρονικής περιόδου. Αυτό υποδηλώνει ότι καμία ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες δεν πωλείται κατά τη διάρκεια της παρατηρούμενης περιόδου. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε διάφορους λόγους. Για παράδειγμα, όλη η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες μπορεί να χρησιμοποιείται για αυτοκατανάλωση ή να αποθηκεύεται για μεταγενέστερη χρήση. Εναλλακτικά, οι κατοικίες μπορεί να είναι ακατοίκητες κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου ή οι ανάγκες των κατοικιών σε ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να καλύπτονται εξ ολοκλήρου από άλλες πηγές.

Τα γραφήματα αυτά παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την απόδοση των ανεμογεννητριών σε κάθε κατοικία και τη συμβολή τους στο συνολικό ενεργειακό μείγμα του μικροδικτύου. Μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό περιόδων υψηλής δέσμευσης αιολικής ενέργειας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιστάθμιση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο ή να αποθηκευτεί για μεταγενέστερη χρήση. Μπορούν επίσης να αναδείξουν προβλήματα με τις ανεμογεννήτριες, όπως υποαπόδοση ή δυσλειτουργία, τα οποία μπορούν στη συνέχεια να αντιμετωπιστούν για να βελτιωθεί η συνολική απόδοση και βιωσιμότητα του μικροδικτύου. Η σύγκριση αυτών των γραφημάτων με τα προφίλ φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας που δόθηκαν προηγουμένως μπορεί να παρέχει περαιτέρω πληροφορίες σχετικά με τις στρατηγικές διαχείρισης και βελτιστοποίησης της ενέργειας για κάθε κατοικία εντός του μικροδικτύου. Για παράδειγμα, οι περίοδοι υψηλού φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας που συμπίπτουν με υψηλή αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες θα μπορούσαν να υποδηλώνουν αποτελεσματική χρήση της αιολικής ενέργειας, μειώνοντας την εξάρτηση από το δίκτυο και οδηγώντας σε οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη. Συνολικά, τα στοιχεία αυτά παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία και την απόδοση των ανεμογεννητριών εντός του μικροδικτύου, ενημερώνοντας διάφορες στρατηγικές για τη διαχείριση και τη βελτιστοποίηση της ενέργειας.

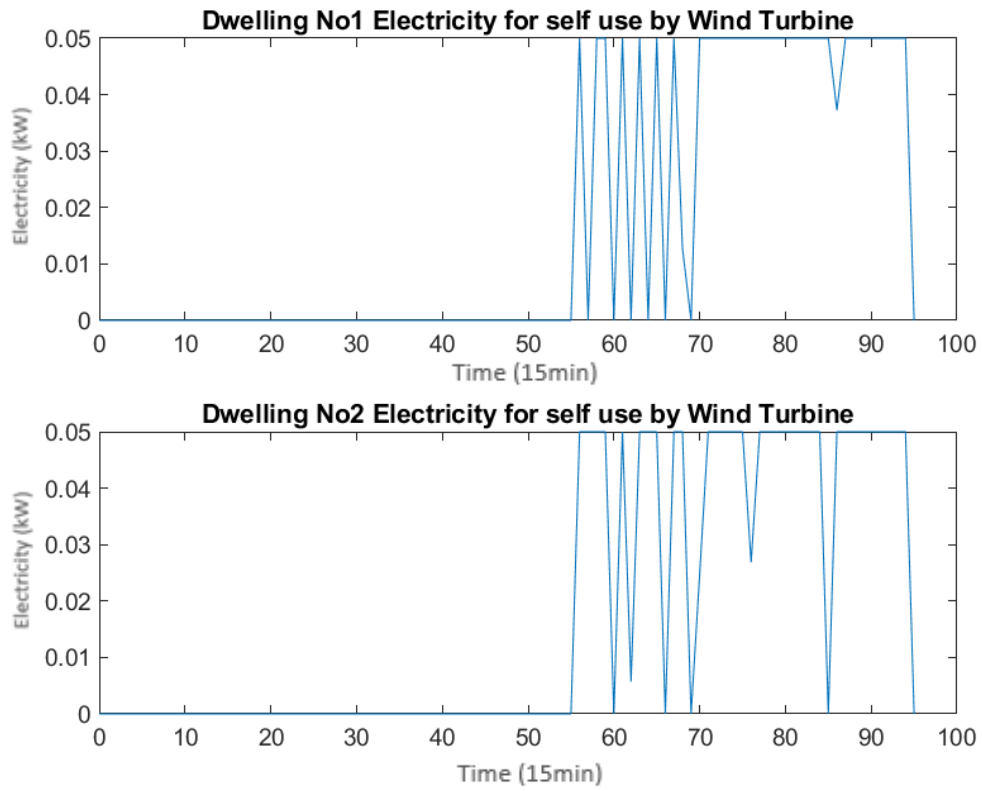


Εικόνα 15 Πωληθείσα ηλεκτρική ενέργεια από ανεμογεννήτρια για δύο διαφορετικές κατοικίες

Το γράφημα της εικόνας 16 απεικονίζει την "Ηλεκτρική ενέργεια για ιδιοκατανάλωση από ανεμογεννήτρια" για δύο διαφορετικές κατοικίες, με τις ονομασίες "Κατοικία Νο1" και "Κατοικία Νο2". Ο άξονας x αντιπροσωπεύει τα χρονικά διαστήματα, ενώ ο άξονας y δείχνει την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε από τις ίδιες τις κατοικίες από τις ανεμογεννήτριες σε αυτές τις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές.

Και για τις δύο κατοικίες, υπάρχουν περίοδοι όπου η ηλεκτρική ενέργεια για ιδιοχρησιμοποίηση αυξάνεται, υποδεικνύοντας ότι η ανεμογεννήτρια παράγει ενέργεια που χρησιμοποιείται άμεσα από την κατοικία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ταχύτητα του αέρα μέχρι τη χρονική στιγμή 55 είναι 50m/s, όπου ξεπερνά την ταχύτητα διακοπής λειτουργίας της ανεμογεννήτριας που είναι 30m/s και επομένως δε λειτουργεί. Επιπλέον, οι ανάγκες των κατοικιών σε ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να είναι υψηλές κατά τη διάρκεια αυτών των περιόδων, οδηγώντας σε υψηλότερη αυτοκατανάλωση.

Αυτά τα γραφήματα παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τα πρότυπα αυτοκατανάλωσης των κατοικιών και μπορούν να ενημερώσουν για στρατηγικές διαχείρισης και βελτιστοποίησης της ενέργειας στο μικροδίκτυο. Για παράδειγμα, εάν οι ανεμογεννήτριες παράγουν περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια από όση χρησιμοποιούν οι κατοικίες, αυτό θα μπορούσε να υποδηλώνει μια ευκαιρία για αύξηση της αυτοκατανάλωσης, μειώνοντας έτσι την εξάρτηση από το δίκτυο και οδηγώντας σε εξοικονόμηση κόστους. Αντίθετα, εάν οι ανεμογεννήτριες δεν παράγουν αρκετή ηλεκτρική ενέργεια για να καλύψουν τις ανάγκες των κατοικιών, αυτό θα μπορούσε να υποδηλώνει την ανάγκη αύξησης της δυναμικότητας των ανεμογεννητριών ή την εφαρμογή μέτρων ενεργειακής απόδοσης στις κατοικίες. Συνολικά, τα στοιχεία αυτά παρέχουν μια σαφή εικόνα των προτύπων αυτοκατανάλωσης των κατοικιών εντός του μικροδικτύου, η οποία είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική διαχείριση και βελτιστοποίηση της ενέργειας.



Εικόνα 16 Ηλεκτρική ενέργεια για ιδιοκατανάλωση από ανεμογεννήτρια για δύο διαφορετικές κατοικίες

Το γράφημα της εικόνας 17 απεικονίζει την "Ηλεκτρική ενέργεια που πωλείται από EV (ηλεκτρικά οχήματα)" για δύο διαφορετικές κατοικίες, με τις ονομασίες "Κατοικία Νο1" και "Κατοικία Νο2". Ο άξονας x αντιπροσωπεύει πιθανώς χρονικά διαστήματα, ενώ ο άξονας y υποδεικνύει την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που πωλήθηκε από τα EVs σε αυτές τις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές.

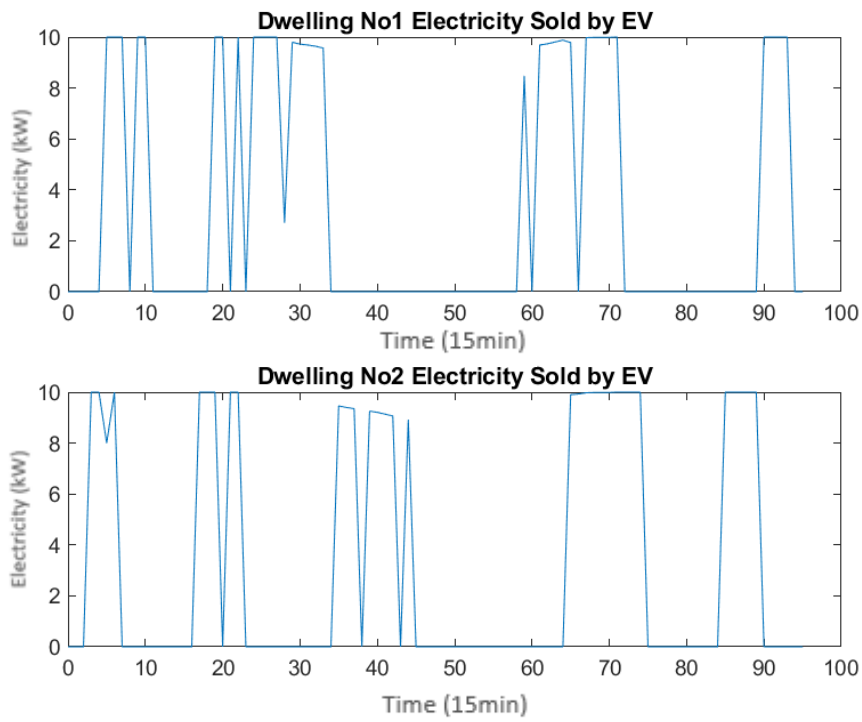
Και για τις δύο κατοικίες, τα γραφήματα παρουσιάζουν παρόμοιο μοτίβο. Ξεκινούν από το μηδέν, κορυφώνονται περίπου στο σημείο 50 στον άξονα x και στη συνέχεια επιστρέφουν στο μηδέν. Αυτό το μοτίβο υποδηλώνει ότι η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τα EVs πωλείται κατά τη διάρκεια συγκεκριμένων περιόδων, πιθανότατα όταν τα EVs δεν χρησιμοποιούνται και η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη. Η αιχμή υποδεικνύει την ώρα της ημέρας κατά την οποία πωλείται η μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια, η οποία θα μπορούσε να οφείλεται στη βέλτιστη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο.

Αυτό που παρουσιάζεται στις γραφικές παραστάσεις είναι κάτι αναμενόμενο καθώς τις χρονικές στιγμές που και για τα δύο ηλεκτρικά αυτοκίνητα οι τιμές των διανυσμάτων EV1 και EV2 είναι 0, δηλαδή έχει θεωρηθεί ότι αυτά δεν φορτίζουν, ούτε εκφορτίζουν.

Έχει θεωρηθεί ότι όταν το ηλεκτρικό αυτοκίνητο φτάσει στο σημείο φόρτισης/εκφόρτισης έχει ήδη μία τιμή φόρτισης της μπαταρίας του. Επιπλέον, έχει θεωρηθεί δεδομένη η στιγμή που το αυτοκίνητο θα φύγει από το σημείο φόρτισης/εκφόρτισης καθώς και η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας τη στιγμή που αυτό θα φύγει. Αυτό έχει υπολογιστή συναρτήσει του χρόνου και της ισχύος του αυτοκινήτου.

Αυτά τα γραφήματα παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την απόδοση των EVs σε κάθε κατοικία και τη συμβολή τους στο συνολικό ενεργειακό μείγμα του μικροδικτύου. Μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό περιόδων υψηλής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τα EVs, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιστάθμιση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο. Η σύγκριση αυτών των γραφημάτων με τα προφίλ φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας που δόθηκαν προηγουμένως μπορεί να δίνει περαιτέρω πληροφορίες σχετικά με τις στρατηγικές διαχείρισης και βελτιστοποίησης της ενέργειας για κάθε κατοικία εντός του μικροδικτύου. Για παράδειγμα, οι περίοδοι υψηλού φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας που συμπίπτουν με υψηλή παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από τα EVs θα μπορούσαν να

υποδηλώνουν αποτελεσματική χρήση της ενέργειας των EVs, μειώνοντας την εξάρτηση από το δίκτυο και οδηγώντας σε οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη.



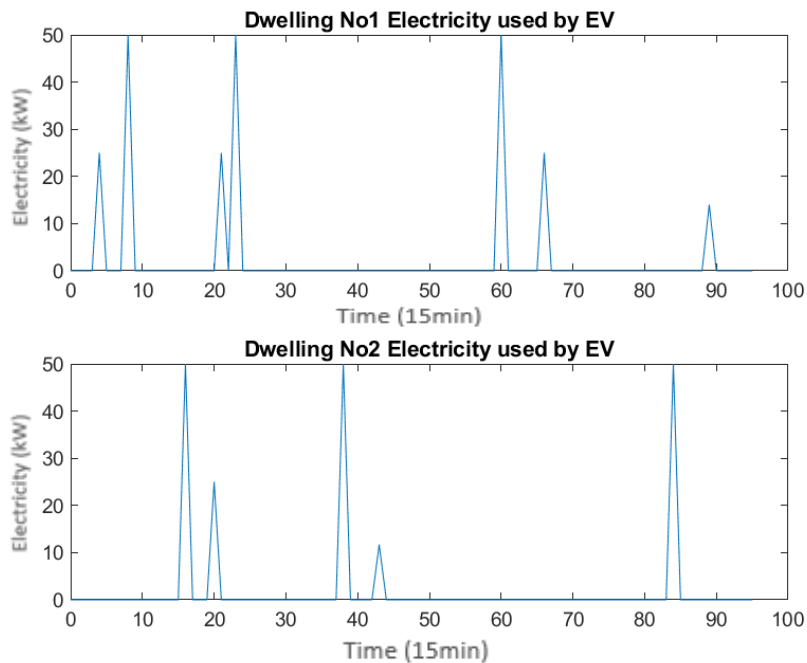
Εικόνα 17 Ηλεκτρική ενέργεια που πωλείται από EV (ηλεκτρικά οχήματα) για δύο διαφορετικές κατοικίες

Το γράφημα της εικόνας 18 απεικονίζει την "Ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται από τα ηλεκτρικά οχήματα (EV)" για δύο διαφορετικές κατοικίες, με τις ονομασίες "Κατοικία Νο1" και "Κατοικία Νο2". Ο άξονας x αντιπροσωπεύει πιθανότατα χρονικά διαστήματα, ενώ ο άξονας y υποδεικνύει την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται από τα EVs σε αυτές τις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές.

Και για τις δύο κατοικίες, υπάρχουν περίοδοι κατά τις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια για ιδιοχρησιμοποίηση αυξάνεται, υποδεικνύοντας ότι τα EV χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια αυτών των περιόδων. Αυτό θα μπορούσε να οφείλεται σε διάφορους λόγους. Για παράδειγμα, οι κατοικίες μπορεί να είναι κατειλημμένες κατά τη διάρκεια αυτών των περιόδων, οδηγώντας σε υψηλότερη χρήση των EVs. Εναλλακτικά, τα EVs μπορεί να φορτίζονται κατά τη διάρκεια αυτών των περιόδων, οδηγώντας σε υψηλότερη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα αποτελέσματα των γραφικών παραστάσεων είναι αναμενόμενα βλέποντας τις τιμές των διανυσμάτων EV1 και EV2, που αφορούν την παρουσία των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στο σημείο φόρτισης/εκφόρτισης καθώς και τις τιμές της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας τις χρονικές στιγμές που το ηλεκτρικά αυτοκίνητά φτάνουν και φεύγουν από το σημείο φόρτισης/εκφόρτισης.

Αυτά τα γραφήματα παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τα πρότυπα χρήσης των EVs σε κάθε κατοικία και μπορούν να ενημερώσουν για στρατηγικές διαχείρισης και βελτιστοποίησης της ενέργειας εντός του μικροδικτύου. Για παράδειγμα, εάν τα EVs χρησιμοποιούνται περισσότερο κατά τη διάρκεια περιόδων υψηλής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά συστήματα ή τις ανεμογεννήτριες, αυτό θα μπορούσε να υποδηλώνει αποτελεσματική χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μειώνοντας την εξάρτηση από το δίκτυο και οδηγώντας σε εξοικονόμηση κόστους. Αντίθετα, εάν τα EV χρησιμοποιούνται περισσότερο σε περιόδους χαμηλής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αυτό θα μπορούσε να υποδηλώνει την ανάγκη αύξησης της δυναμικότητας των συστημάτων ανανεώσιμης ενέργειας ή την εφαρμογή μέτρων ενεργειακής απόδοσης στις κατοικίες.



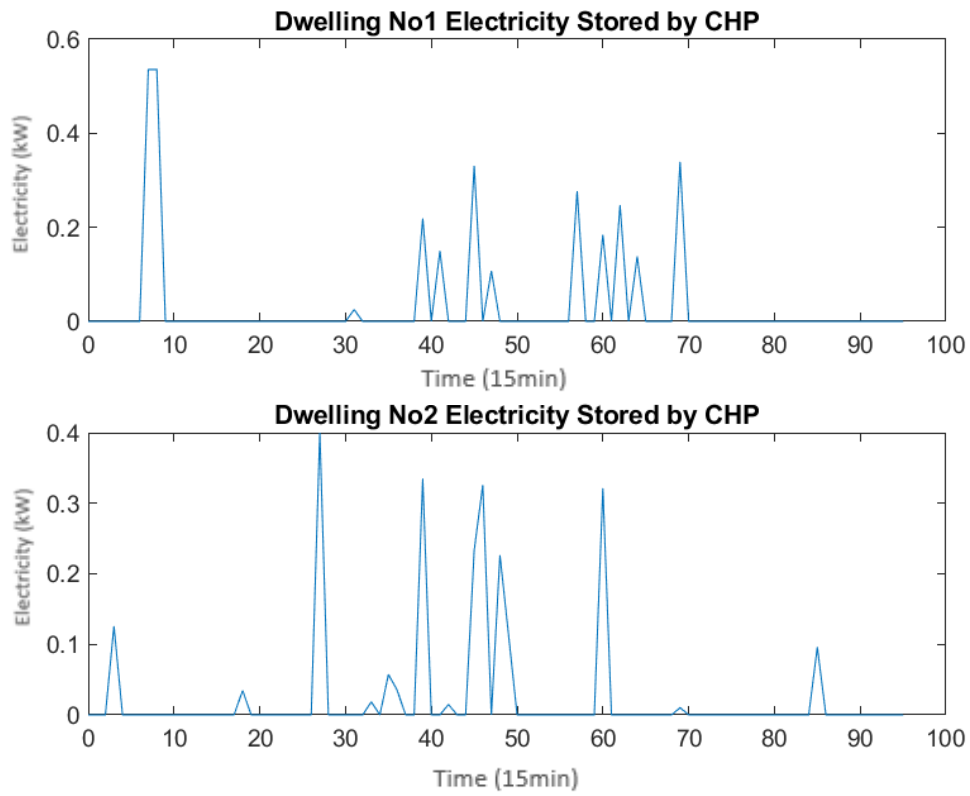
Εικόνα 18 Ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται από τα ηλεκτρικά οχήματα (EV) για δύο διαφορετικές κατοικίες

Στο παράδειγμα που εξετάστηκε θεωρήθηκε ότι όταν τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα βρίσκονται στο σημείο φόρτισης/εκφόρτισης αυτά είτε θα φορτίζουν προκειμένου να φτάσουν την επιθυμητή τιμή κατάσταση της μπαταρίας τη χρονική στιγμή που θα φύγουν από το σημείο φόρτισης/εκφόρτισης, είτε αυτά θα εκφορτίζουν και θα πωλείται ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο. Επομένως, είτε θα χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια, είτε όταν έχουν περίσσεια και βρίσκονται στο σημείο φόρτισης/εκφόρτισης θα την πωλούν στο δίκτυο. Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα δεν έχουν στόχο να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια για αποθήκευση στην κάθε κατοικία και επομένως δεν παρουσιάζεται η γραφική Electricity stored by EV.

Το γράφημα της εικόνας 19 απεικονίζει την "Αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια από τη ΣΗΘ (συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας)" για δύο διαφορετικές κατοικίες, με τις ονομασίες "Κατοικία Νο1" και "Κατοικία Νο2". Ο άξονας x αντιπροσωπεύει χρονικά διαστήματα, ενώ ο άξονας y υποδεικνύει την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που αποθηκεύτηκε από τα συστήματα ΣΗΘ κατά τις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές.

Και για τις δύο κατοικίες, υπάρχουν περίοδοι κατά τις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια για ιδιοχρησιμοποίηση αυξάνεται, υποδεικνύοντας ότι τα συστήματα ΣΗΘ παράγουν ενέργεια που αποθηκεύεται για μεταγενέστερη χρήση. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε διάφορους λόγους. Για παράδειγμα, τα συστήματα ΣΗΘ μπορεί να λειτουργούν με υψηλή απόδοση κατά τη διάρκεια αυτών των περιόδων, οδηγώντας σε υψηλότερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Εναλλακτικά, οι ανάγκες των κατοικιών σε ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να είναι χαμηλές κατά τη διάρκεια αυτών των περιόδων, οδηγώντας σε υψηλότερη αποθήκευση.

Τα γραφήματα αυτά παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την απόδοση των συστημάτων ΣΗΘ σε κάθε κατοικία και τη συμβολή τους στο συνολικό ενεργειακό μείγμα του μικροδικτύου. Μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό περιόδων υψηλής δέσμευσης ενέργειας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιστάθμιση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο ή να αποθηκευτεί για μεταγενέστερη χρήση. Μπορούν επίσης να αναδείξουν προβλήματα με τα συστήματα ΣΗΘ, όπως υποαπόδοση ή δυσλειτουργία, τα οποία μπορούν στη συνέχεια να αντιμετωπιστούν για τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης και βιωσιμότητας του μικροδικτύου. Η σύγκριση αυτών των γραφημάτων με τα προφίλ φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας που δόθηκαν προηγουμένως μπορεί να παράσχει περαιτέρω πληροφορίες σχετικά με τις στρατηγικές διαχείρισης και βελτιστοποίησης της ενέργειας για κάθε κατοικία εντός του μικροδικτύου. Για παράδειγμα, οι περίοδοι υψηλού φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας που συμπίπτουν με υψηλή αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας από τα συστήματα ΣΗΘ θα μπορούσαν να υποδηλώνουν αποτελεσματική χρήση της ενέργειας ΣΗΘ, μειώνοντας την εξάρτηση από το δίκτυο και οδηγώντας σε οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη.

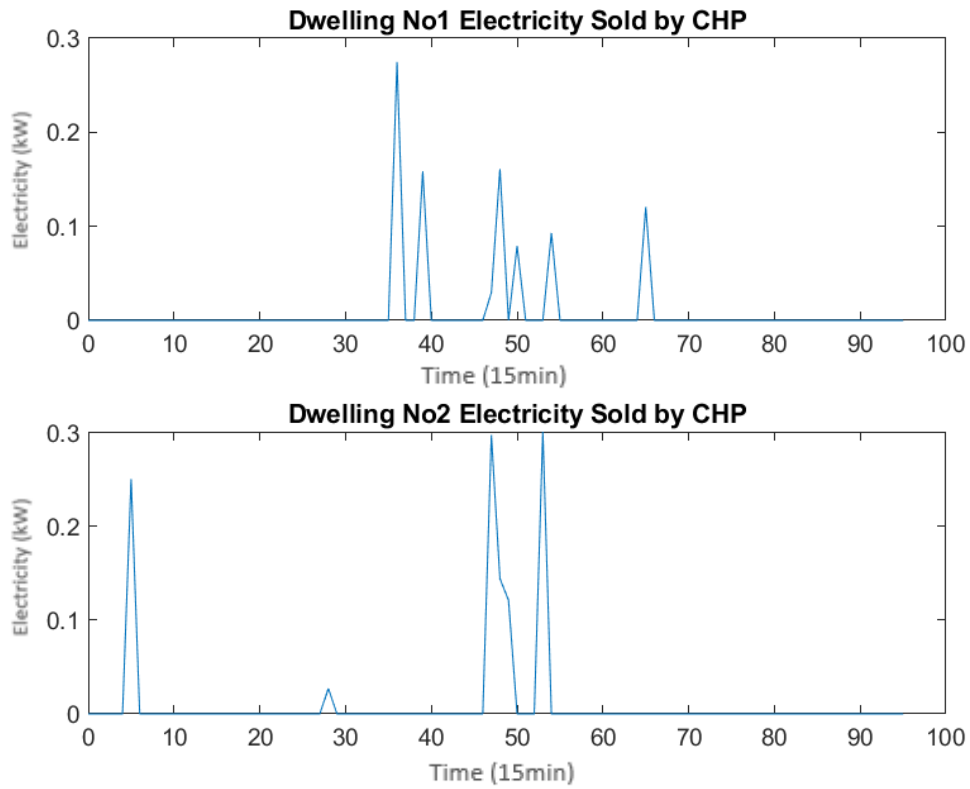


Εικόνα 19 Αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια από τη CHP(συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας) για δύο διαφορετικές κατοικίες

Το γράφημα της εικόνας 20 σχήμα απεικονίζει την "Ηλεκτρική ενέργεια που πωλείται από ΣΗΘ (συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας)" για δύο διαφορετικές κατοικίες, με τις ονομασίες "Κατοικία Νο1" και "Κατοικία Νο2". Ο άξονας x αντιπροσωπεύει χρονικά διαστήματα, ενώ ο άξονας y υποδεικνύει την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που πωλήθηκε από τα συστήματα ΣΗΘ κατά τις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές.

Και για τις δύο κατοικίες, τα γραφήματα παρουσιάζουν παρόμοιο μοτίβο: ξεκινούν από το μηδέν, κορυφώνονται περίπου στο σημείο 50 στον άξονα x και στη συνέχεια επιστρέφουν στο μηδέν. Αυτό το μοτίβο υποδηλώνει ότι η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τα συστήματα ΣΗΘ πωλείται κατά τη διάρκεια συγκεκριμένων περιόδων, πιθανότατα όταν τα συστήματα ΣΗΘ λειτουργούν με υψηλή απόδοση. Η αιχμή υποδηλώνει την ώρα της ημέρας κατά την οποία πωλείται η μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια, η οποία θα μπορούσε να οφείλεται στη βέλτιστη ζήτηση στο δίκτυο.

Αυτά τα γραφήματα παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την απόδοση των συστημάτων ΣΗΘ σε κάθε κατοικία και τη συμβολή τους στο συνολικό ενεργειακό μείγμα του μικροδικτύου. Μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό περιόδων υψηλής δέσμευσης ενέργειας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιστάθμιση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο ή να αποθηκευτεί για μεταγενέστερη χρήση. Μπορούν επίσης να αναδείξουν προβλήματα με τα συστήματα ΣΗΘ, όπως υποαπόδοση ή δυσλειτουργία, τα οποία μπορούν στη συνέχεια να αντιμετωπιστούν για τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης και βιωσιμότητας του μικροδικτύου. Η σύγκριση αυτών των γραφημάτων με τα προφίλ φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας που δόθηκαν προηγουμένως μπορεί να παράσχει περαιτέρω πληροφορίες σχετικά με τις στρατηγικές διαχείρισης και βελτιστοποίησης της ενέργειας για κάθε κατοικία εντός του μικροδικτύου, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως.

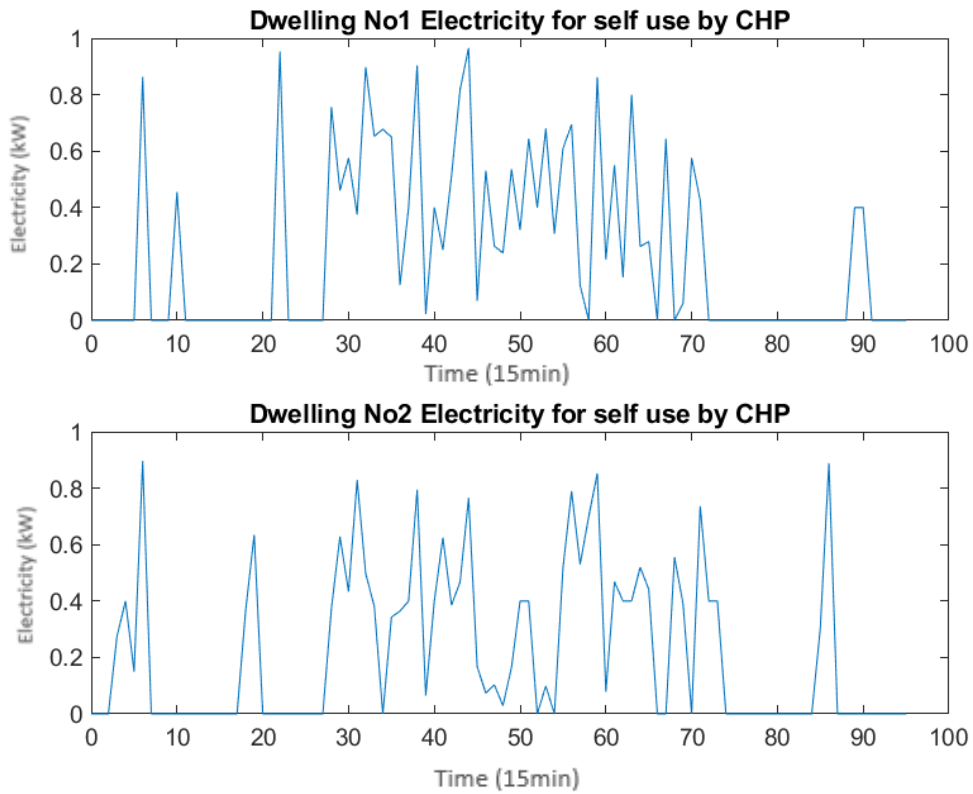


Εικόνα 20 Ηλεκτρική ενέργεια που πωλείται από CHP (συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας) για δύο διαφορετικές κατοικίες

Το γράφημα της εικόνας 21 απεικονίζει την "Ηλεκτρική ενέργεια για ιδιοκατανάλωση με συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας" για δύο διαφορετικές κατοικίες, με τις ονομασίες "Κατοικία Νο1" και "Κατοικία Νο2". Ο άξονας x αντιπροσωπεύει χρονικά διαστήματα, ενώ ο άξονας y δείχνει την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε από τις ίδιες τις κατοικίες από τα συστήματα ΣΗΘ κατά τις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές.

Και για τις δύο κατοικίες, υπάρχουν περίοδοι κατά τις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια για ιδιοχρησιμοποίηση κορυφώνεται, υποδεικνύοντας ότι τα συστήματα ΣΗΘ παράγουν ενέργεια που χρησιμοποιείται απευθείας από την κατοικία. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε διάφορους λόγους. Για παράδειγμα, τα συστήματα ΣΗΘ μπορεί να λειτουργούν με υψηλή απόδοση κατά τη διάρκεια αυτών των περιόδων, οδηγώντας σε υψηλότερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Εναλλακτικά, οι ανάγκες των κατοικιών σε ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να είναι υψηλές κατά τη διάρκεια αυτών των περιόδων, οδηγώντας σε υψηλότερη αυτοκατανάλωση.

Αυτά τα γραφήματα παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για τα πρότυπα αυτοκατανάλωσης των κατοικιών και μπορούν να ενημερώσουν για στρατηγικές διαχείρισης και βελτιστοποίησης της ενέργειας στο μικροδίκτυο. Για παράδειγμα, εάν τα συστήματα ΣΗΘ παράγουν περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια από όση χρησιμοποιούν οι κατοικίες, αυτό θα μπορούσε να υποδηλώνει μια ευκαιρία για αύξηση της αυτοκατανάλωσης, μειώνοντας έτσι την εξάρτηση από το δίκτυο και οδηγώντας σε εξοικονόμηση κόστους. Αντίθετα, εάν τα συστήματα ΣΗΘ δεν παράγουν αρκετή ηλεκτρική ενέργεια για να καλύψουν τις ανάγκες των κατοικιών, αυτό θα μπορούσε να υποδηλώνει την ανάγκη αύξησης της δυναμικότητας των συστημάτων ΣΗΘ ή την εφαρμογή μέτρων ενεργειακής απόδοσης στις κατοικίες.

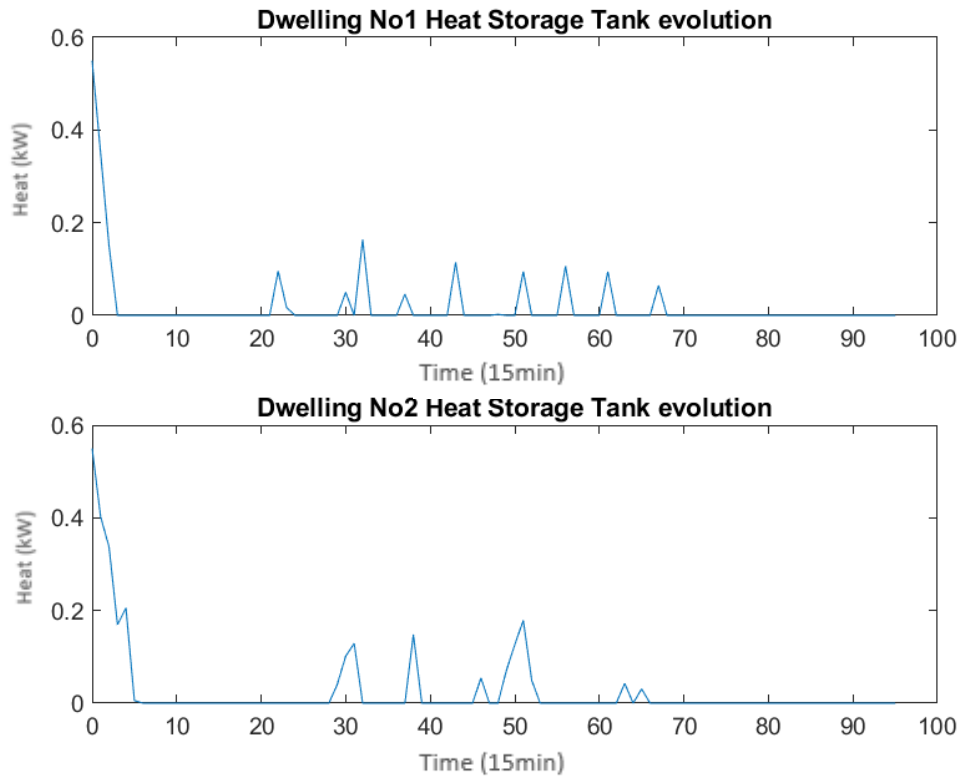


Εικόνα 21 Ηλεκτρική ενέργεια για ιδιοκατανάλωση με συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας για δύο διαφορετικές κατοικίες

Το γράφημα της εικόνας 22 απεικονίζει την "Εξέλιξη της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας" για δύο διαφορετικές κατοικίες, με τις ονομασίες "Κατοικία Νο1" και "Κατοικία Νο2". Ο άξονας x αντιπροσωπεύει χρονικά διαστήματα, ενώ ο άξονας y υποδεικνύει το επίπεδο αποθήκευσης θερμότητας σε αυτές τις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές.

Και για τις δύο κατοικίες, υπάρχουν περίοδοι όπου το επίπεδο αποθήκευσης θερμότητας αυξάνεται, υποδεικνύοντας ότι οι δεξαμενές αποθήκευσης θερμότητας συσσωρεύουν θερμότητα κατά τη διάρκεια αυτών των περιόδων. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε διάφορους λόγους. Για παράδειγμα, οι κατοικίες μπορεί να παράγουν περίσσεια θερμότητας κατά τη διάρκεια αυτών των περιόδων, οδηγώντας σε υψηλότερη αποθήκευση. Εναλλακτικά, οι θερμικές ανάγκες των κατοικιών μπορεί να είναι χαμηλές κατά τη διάρκεια αυτών των περιόδων, οδηγώντας σε υψηλότερη αποθήκευση.

Αυτά τα γραφήματα παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την απόδοση των δεξαμενών αποθήκευσης θερμότητας σε κάθε κατοικία και τη συμβολή τους στο συνολικό ενεργειακό μείγμα του μικροδικτύου. Μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό περιόδων υψηλής δέσμευσης θερμότητας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιστάθμιση της κατανάλωσης θερμότητας ή να αποθηκευτεί για μεταγενέστερη χρήση. Μπορούν επίσης να αναδείξουν προβλήματα με τις δεξαμενές αποθήκευσης θερμότητας, όπως υποαπόδοση ή δυσλειτουργία, τα οποία μπορούν στη συνέχεια να αντιμετωπιστούν για να βελτιωθεί η συνολική απόδοση και βιωσιμότητα του μικροδικτύου. Η σύγκριση αυτών των γραφημάτων με τα προφίλ θερμικού φορτίου που δόθηκαν προηγουμένως μπορεί να παράσχει περαιτέρω πληροφορίες σχετικά με τις στρατηγικές διαχείρισης και βελτιστοποίησης της ενέργειας για κάθε κατοικία εντός του μικροδικτύου. Για παράδειγμα, περίοδοι υψηλού θερμικού φορτίου που συμπίπτουν με υψηλή αποθήκευση θερμότητας θα μπορούσαν να υποδηλώνουν αποτελεσματική χρήση της αποθηκευμένης θερμότητας, μειώνοντας την εξάρτηση από το δίκτυο και οδηγώντας σε οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη.

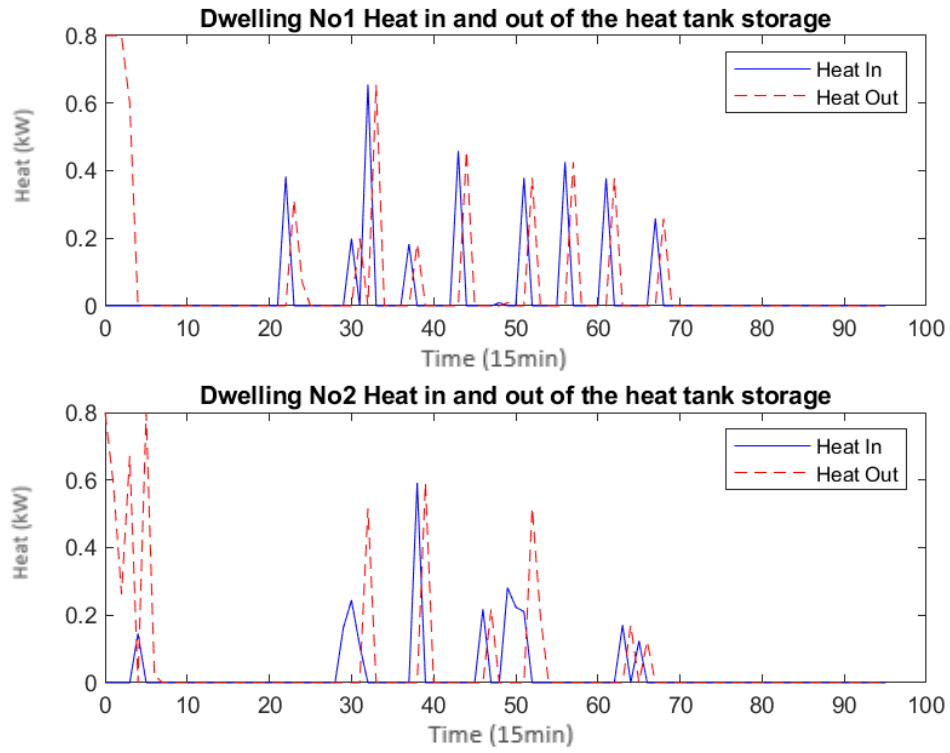


Εικόνα 22 Εξέλιξη της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας για δύο διαφορετικές κατοικίες

Το γράφημα της εικόνας 23 απεικονίζει την "είσοδο και έξοδο θερμότητας από την αποθήκη της δεξαμενής θερμότητας" για δύο διαφορετικές κατοικίες, με τις ονομασίες "Κατοικία Νο1" και "Κατοικία Νο2". Ο άξονας x αντιπροσωπεύει χρονικά διαστήματα, ενώ ο άξονας y υποδεικνύει το επίπεδο θερμότητας στις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές.

Και για τις δύο κατοικίες, υπάρχουν περίοδοι όπου το επίπεδο θερμότητας αυξάνεται, υποδεικνύοντας ότι οι δεξαμενές αποθήκευσης θερμότητας είτε συσσωρεύουν θερμότητα (Heat In) είτε την απελευθερώνουν (Heat Out). Αυτό μπορεί να οφείλεται σε διάφορους λόγους. Για παράδειγμα, οι κατοικίες μπορεί να παράγουν περίσσεια θερμότητας κατά τη διάρκεια αυτών των περιόδων, οδηγώντας σε υψηλότερη αποθήκευση. Εναλλακτικά, οι θερμικές ανάγκες των κατοικιών μπορεί να είναι υψηλές κατά τη διάρκεια αυτών των περιόδων, οδηγώντας σε υψηλότερη απελευθέρωση.

Αυτά τα γραφήματα παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την απόδοση των δεξαμενών αποθήκευσης θερμότητας σε κάθε κατοικία και τη συμβολή τους στο συνολικό ενεργειακό μείγμα του μικροδικτύου. Μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό περιόδων υψηλής δέσμευσης θερμότητας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιστάθμιση της κατανάλωσης θερμότητας ή να αποθηκευτεί για μεταγενέστερη χρήση. Μπορούν επίσης να αναδείξουν προβλήματα με τις δεξαμενές αποθήκευσης θερμότητας, όπως υποαπόδοση ή δυσλειτουργία, τα οποία μπορούν στη συνέχεια να αντιμετωπιστούν για να βελτιωθεί η συνολική απόδοση και βιωσιμότητα του μικροδικτύου. Η σύγκριση αυτών των γραφημάτων με τα προφίλ θερμικού φορτίου που δόθηκαν προηγουμένως μπορεί να παράσχει περαιτέρω πληροφορίες σχετικά με τις στρατηγικές διαχείρισης και βελτιστοποίησης της ενέργειας για κάθε κατοικία εντός του μικροδικτύου. Για παράδειγμα, περίοδοι υψηλού θερμικού φορτίου που συμπίπτουν με υψηλή αποθήκευση θερμότητας θα μπορούσαν να υποδηλώνουν αποτελεσματική χρήση της αποθηκευμένης θερμότητας, μειώνοντας την εξάρτηση από το δίκτυο και οδηγώντας σε οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη.

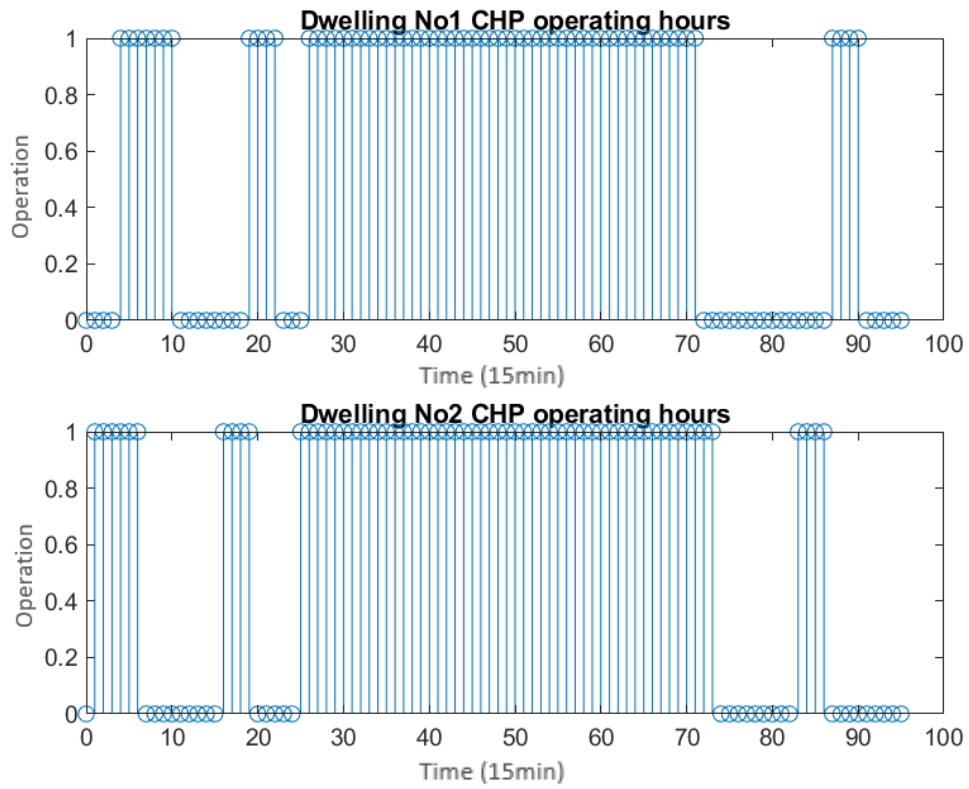


Εικόνα 23 είσοδος και έξοδος θερμότητας από την αποθήκη της δεξαμενής θερμότητας για δύο διαφορετικές κατοικίες

Το γράφημα της εικόνας 24 απεικονίζει τις "Ώρες λειτουργίας CHP (Combined Heat and Power)" για δύο διαφορετικές κατοικίες, με τις ονομασίες "Κατοικία Νο1" και "Κατοικία Νο2". Ο άξονας x αναπαριστά χρονικά διαστήματα, ενώ ο άξονας y είναι δυαδικός, υποδεικνύοντας αν το σύστημα ΣΗΘ είναι ενεργοποιημένο (1) ή απενεργοποιημένο (0) τις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές.

Και για τις δύο κατοικίες, υπάρχουν περίοδοι κατά τις οποίες το σύστημα ΣΗΘ λειτουργεί, που υποδεικνύονται από τις κάθετες γραμμές που φτάνουν μέχρι το $y=1$. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε διάφορους λόγους. Για παράδειγμα, οι κατοικίες μπορεί να έχουν υψηλή ανάγκη σε ζήτηση θερμότητας κατά τη διάρκεια αυτών των περιόδων, γεγονός που οδηγεί στη λειτουργία του συστήματος ΣΗΘ. Επίσης, οι ανάγκες των κατοικιών σε ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να είναι υψηλές κατά τη διάρκεια αυτών των περιόδων, γεγονός που οδηγεί στη λειτουργία του συστήματος ΣΗΘ.

Τα γραφήματα αυτά παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για τα πρότυπα λειτουργίας των συστημάτων ΣΗΘ σε κάθε κατοικία και τη συμβολή τους στο συνολικό ενεργειακό μείγμα του μικροδικτύου. Μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό περιόδων υψηλής δέσμευσης ενέργειας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιστάθμιση της κατανάλωσης ενέργειας ή να αποθηκευτεί για μεταγενέστερη χρήση. Μπορούν επίσης να αναδείξουν προβλήματα με τα συστήματα ΣΗΘ, όπως υποαπόδοση ή δυσλειτουργία, τα οποία μπορούν στη συνέχεια να αντιμετωπιστούν για να βελτιωθεί η συνολική απόδοση και βιωσιμότητα του μικροδικτύου. Η σύγκριση αυτών των γραφημάτων με τα προφίλ ενεργειακού φορτίου που δόθηκαν προηγουμένως μπορεί να παράσχει περαιτέρω πληροφορίες σχετικά με τις στρατηγικές διαχείρισης και βελτιστοποίησης της ενέργειας για κάθε κατοικία εντός του μικροδικτύου.



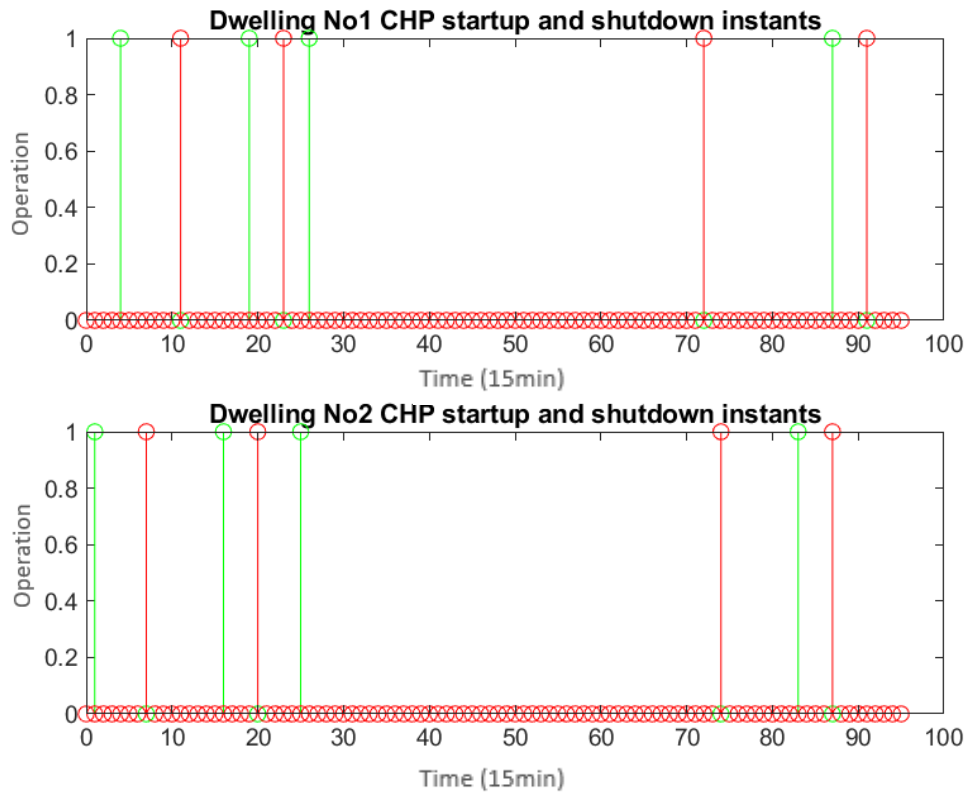
Εικόνα 24 Ωρες λειτουργίας CHP (Combined Heat and Power) για δύο διαφορετικές κατοικίες

Το γράφημα της εικόνας 25 απεικονίζει τις "Στιγμές εκκίνησης και διακοπής λειτουργίας της ΣΗΘ (συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας)" για δύο διαφορετικές κατοικίες, με τις ονομασίες "Κατοικία Νο1" και "Κατοικία Νο2". Ο άξονας x αντιπροσωπεύει χρονικά διαστήματα, ενώ ο άξονας y είναι δυαδικός, υποδεικνύοντας αν το σύστημα ΣΗΘ εκκινεί (πράσινο) ή κλείνει (κόκκινο) τις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές.

Και για τις δύο κατοικίες, υπάρχουν περίοδοι κατά τις οποίες το σύστημα ΣΗΘ εκκινεί και σβήνει, που υποδεικνύονται από τις πράσινες και κόκκινες κατακόρυφες γραμμές αντίστοιχα. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε διάφορους λόγους. Για παράδειγμα, οι κατοικίες μπορεί έχουν υψηλή ανάγκη σε ζήτηση ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας κατά τη διάρκεια αυτών των περιόδων, γεγονός που οδηγεί στη λειτουργία του συστήματος ΣΗΘ.

Παρατηρώντας τις γραφικές παραστάσεις φαίνεται ότι πριν αρχίσει να λειτουργεί η κάθε μονάδα συμπαραγωγής υπάρχει ένα χρονικό διάστημα που αυτή είναι εκτός λειτουργίας. Αυτό είναι το αναμενόμενο, αφού ορίστηκε ως δεδομένο όταν τεθεί σε λειτουργία η κάθε μονάδα θα υπάρχει ένα Δt εκκίνησης λειτουργίας.

Τα γραφήματα αυτά παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για τα πρότυπα λειτουργίας των συστημάτων ΣΗΘ σε κάθε κατοικία και τη συμβολή τους στο συνολικό ενεργειακό μείγμα του μικροδικτύου. Μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό περιόδων υψηλής δέσμευσης ενέργειας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιστάθμιση της κατανάλωσης ενέργειας ή να αποθηκευτεί για μεταγενέστερη χρήση.



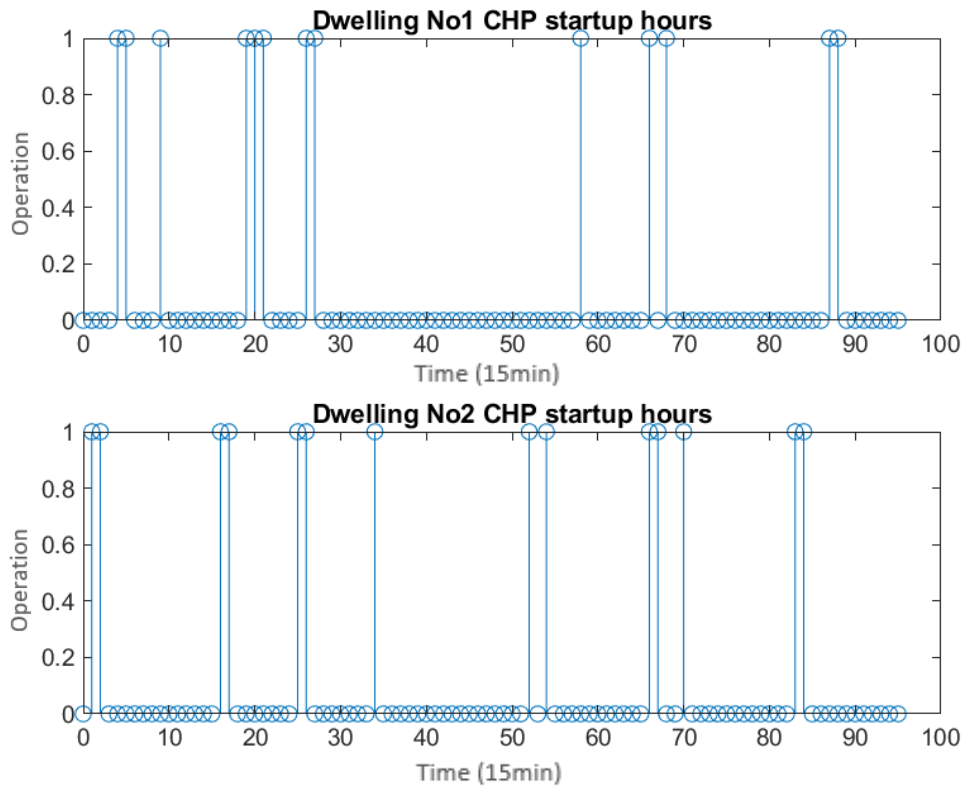
Εικόνα 25 Στιγμές εκκίνησης και διακοπής λειτουργίας της CHP (συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας) για δύο διαφορετικές κατοικίες

Το γράφημα της εικόνας 26 απεικονίζει τις "Ώρες εκκίνησης CHP (συνδυασμένη θερμότητα και ισχύς)" για δύο διαφορετικές κατοικίες, με τις ονομασίες "Κατοικία Νο1" και "Κατοικία Νο2". Ο άξονας x αντιπροσωπεύει πιθανώς χρονικά διαστήματα, ενώ ο άξονας y είναι δυαδικός, υποδεικνύοντας αν το σύστημα ΣΗΘ είναι απενεργοποιημένο (0) ή ξεκινά (1) τις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές.

Και για τις δύο κατοικίες, υπάρχουν περίοδοι κατά τις οποίες το σύστημα ΣΗΘ εκκινεί, που υποδεικνύονται από τις κάθετες γραμμές που φτάνουν μέχρι το $y=1$. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε διάφορους λόγους που σχετίζονται με την ενεργειακή ζήτηση των κατοικιών κάθε χρονική στιγμή.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, εξετάζοντας τα αποτελέσματα των γραφικών παραστάσεων παρατηρείται ότι πριν αρχίσει να λειτουργεί η κάθε μονάδα συμπαραγωγής υπάρχει ένα χρονικό διάστημα που αυτή είναι εκτός λειτουργίας. Αυτό είναι το αναμενόμενο, αφού ορίστηκε ως δεδομένο όταν τεθεί σε λειτουργία η κάθε μονάδα θα υπάρχει ένα Δt εκκίνησης λειτουργίας.

Τα γραφήματα αυτά παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για τα πρότυπα λειτουργίας των συστημάτων ΣΗΘ σε κάθε κατοικία και τη συμβολή τους στο συνολικό ενεργειακό μείγμα του μικροδικτύου. Μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό περιόδων υψηλής δέσμευσης ενέργειας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιστάθμιση της κατανάλωσης ενέργειας ή να αποθηκευτεί για μεταγενέστερη χρήση.

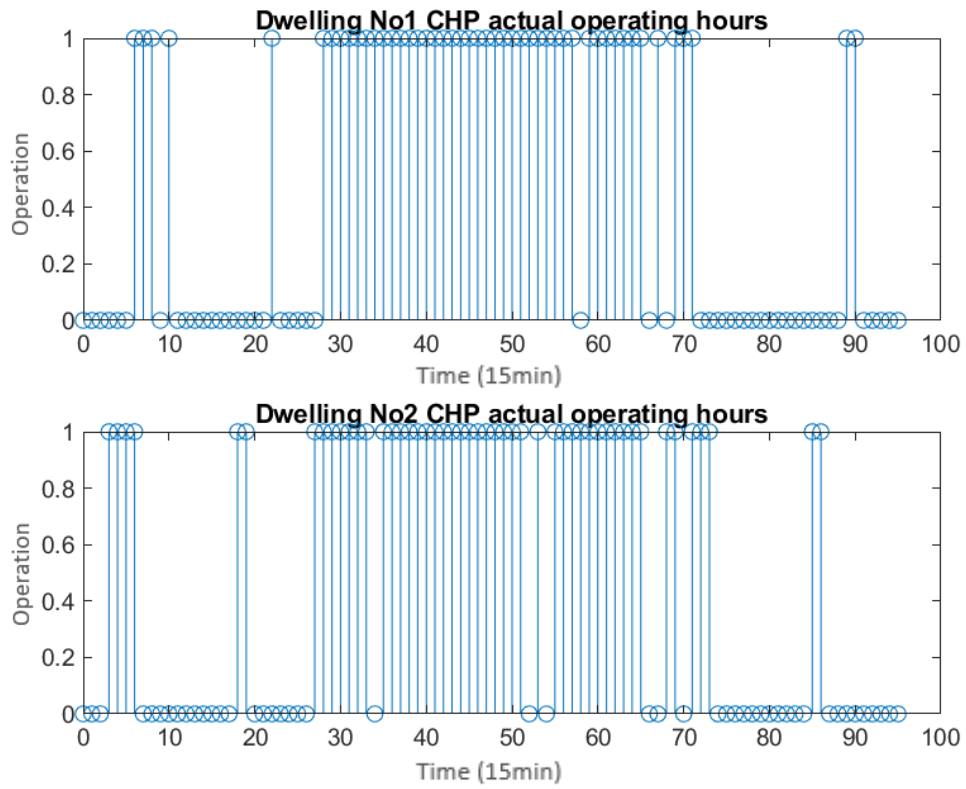


Εικόνα 26 Ώρες εκκίνησης CHP (συνδυασμένη θερμότητα και ισχύς) για δύο διαφορετικές κατοικίες

Το γράφημα της εικόνας 27 απεικονίζει τις "Πραγματικές ώρες λειτουργίας CHP (Combined Heat and Power)" για δύο διαφορετικές κατοικίες, με τις ονομασίες "Κατοικία Νο1" και "Κατοικία Νο2". Ο άξονας x αναπαριστά χρονικά διαστήματα, ενώ ο άξονας y είναι δυαδικός, υποδεικνύοντας εάν το σύστημα ΣΗΘ είναι απενεργοποιημένο (0) ή λειτουργεί (1) τις συγκεκριμένες ώρες.

Και για τις δύο κατοικίες, υπάρχουν περίοδοι κατά τις οποίες το σύστημα ΣΗΘ λειτουργεί, που υποδεικνύονται από τις κάθετες γραμμές που φτάνουν μέχρι το $y=1$. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε λόγους που αναλύθηκαν προηγουμένως.

Τα γραφήματα αυτά παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για τα πρότυπα λειτουργίας των συστημάτων ΣΗΘ σε κάθε κατοικία και τη συμβολή τους στο συνολικό ενεργειακό μείγμα του μικροδικτύου. Για παράδειγμα, οι περίοδοι υψηλού ενεργειακού φορτίου που συμπίπτουν με τη λειτουργία των συστημάτων ΣΗΘ θα μπορούσαν να υποδηλώνουν αποτελεσματική χρήση της ενέργειας ΣΗΘ, μειώνοντας την εξάρτηση από το δίκτυο και οδηγώντας σε οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη.



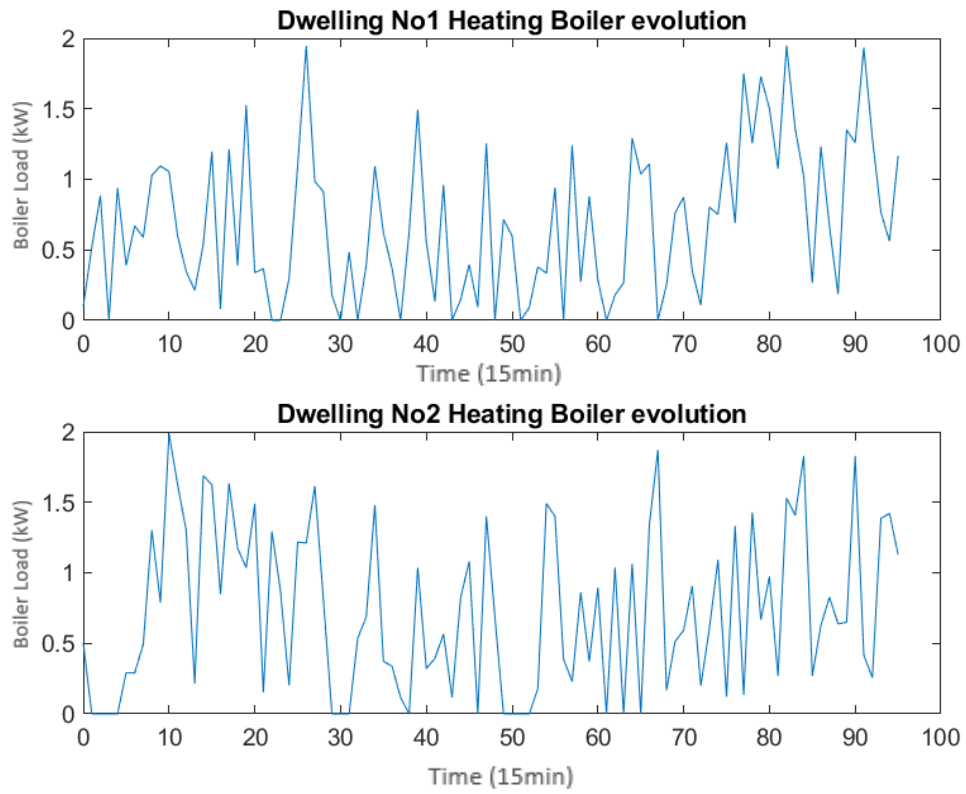
Εικόνα 27 Πραγματικές ώρες λειτουργίας CHP (Combined Heat and Power) για δύο διαφορετικές κατοικίες

Το γράφημα της εικόνας 28 απεικονίζει την "Εξέλιξη του λέβητα θέρμανσης" για δύο διαφορετικές κατοικίες, με τις ονομασίες "Κατοικία Νο1" και "Κατοικία Νο2". Ο άξονας x αντιπροσωπεύει χρονικά διαστήματα, ενώ ο άξονας y υποδεικνύει το επίπεδο θερμότητας στις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές.

Και για τις δύο κατοικίες, υπάρχουν περίοδοι όπου το επίπεδο θερμότητας παρουσιάζει διακυμάνσεις, υποδεικνύοντας ότι ο λέβητας θέρμανσης λειτουργεί κατά τη διάρκεια αυτών των περιόδων. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε διάφορους λόγους. Για παράδειγμα, οι κατοικίες μπορεί να παράγουν υπερβολική θερμότητα κατά τη διάρκεια αυτών των περιόδων, με αποτέλεσμα τη λειτουργία του λέβητα θέρμανσης. Εναλλακτικά, οι θερμικές ανάγκες των κατοικιών μπορεί να είναι υψηλές κατά τη διάρκεια αυτών των περιόδων, γεγονός που οδηγεί στη λειτουργία του λέβητα θέρμανσης.

Οι πληροφορίες που παρέχουν οι γραφικές παραστάσεις είναι αναμενόμενες καθώς η μέγιστη ισχύς των μπόιλερ δεν ξεπερνάει την ονομαστική τους ισχύ που έχει οριστεί στα 2 kW.

Αυτά τα γραφήματα παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για τα πρότυπα λειτουργίας των λέβητων θέρμανσης σε κάθε κατοικία και τη συμβολή τους στο συνολικό ενεργειακό μείγμα του μικροδικτύου. Μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό περιόδων υψηλής δέσμευσης θερμότητας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιστάθμιση της κατανάλωσης θερμότητας ή να αποθηκευτεί για μεταγενέστερη χρήση. Μπορούν επίσης να αναδείξουν προβλήματα με τους λέβητες θέρμανσης, όπως υποαπόδοση ή δυσλειτουργία, τα οποία μπορούν στη συνέχεια να αντιμετωπιστούν για τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης και βιωσιμότητας του μικροδικτύου. Η σύγκριση αυτών των γραφημάτων με τα προφίλ θερμικού φορτίου που δόθηκαν προηγουμένως μπορεί να παράσχει περαιτέρω πληροφορίες σχετικά με τις στρατηγικές διαχείρισης και βελτιστοποίησης της ενέργειας για κάθε κατοικία εντός του μικροδικτύου. Για παράδειγμα, οι περίοδοι υψηλού θερμικού φορτίου που συμπίπτουν με τη λειτουργία των λέβητων θέρμανσης θα μπορούσαν να υποδηλώνουν αποτελεσματική χρήση της ενέργειας του λέβητα, μειώνοντας την εξάρτηση από το δίκτυο και οδηγώντας σε οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη.



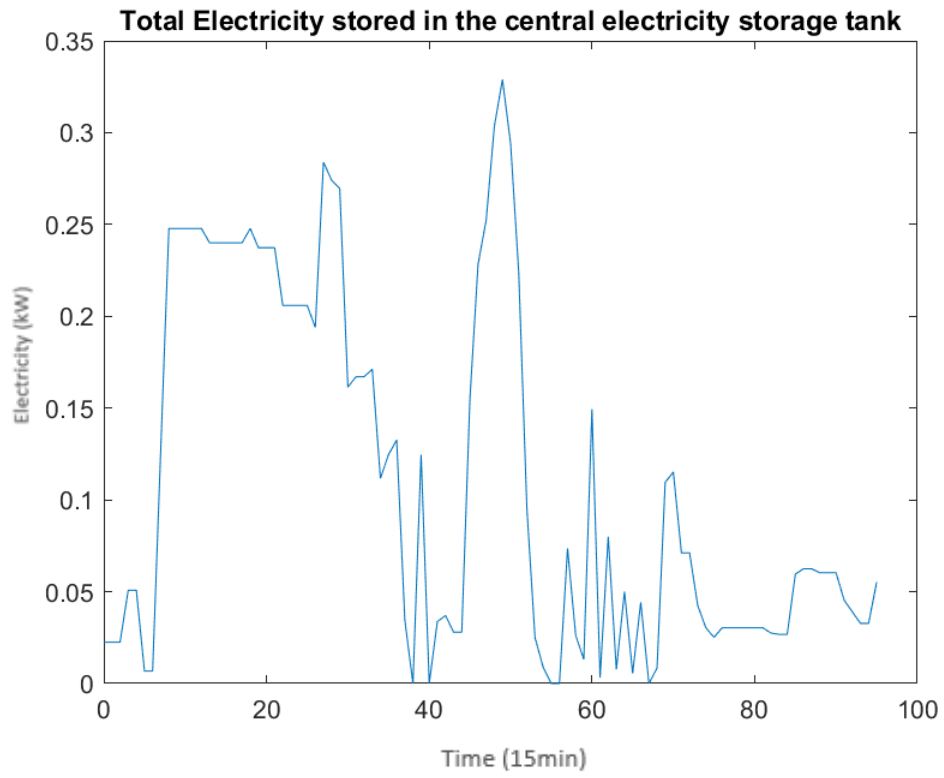
Εικόνα 28 Χρονική παρατήρηση της ενέργειας του λέβητα θέρμανσης για δύο διαφορετικές κατοικίες

Το γράφημα της εικόνας 29 απεικονίζει τη "συνολική ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται στην κεντρική δεξαμενή αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας" με την πάροδο του χρόνου. Ο άξονας x αντιπροσωπεύει χρονικά διαστήματα, ενώ ο άξονας y υποδεικνύει την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που αποθηκεύτηκε σε αυτές τις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές.

Το γράφημα δείχνει ένα κυμαινόμενο μοτίβο των επιπέδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχουν περίοδοι κατά τις οποίες το επίπεδο αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται, γεγονός που υποδηλώνει ότι αποθηκεύεται περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας στην κεντρική δεξαμενή. Αντίθετα, υπάρχουν περίοδοι κατά τις οποίες το επίπεδο αποθήκευσης μειώνεται, γεγονός που υποδηλώνει ότι η αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται.

Οι τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας που παρουσιάζονται στο γράφημα για τις διαφορετικές χρονικές στιγμές έχουν δημιουργηθεί συναρτήσει των τιμών ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας που είναι δεδομένες για κάθε χρονική στιγμή στη διάρκεια της ημέρας.

Στο πλαίσιο ενός μικροδικτύου, το γράφημα αυτό παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία και την απόδοση της κεντρικής δεξαμενής αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό περιόδων υψηλής δέσμευσης ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιστάθμιση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας ή να αποθηκευτεί για μεταγενέστερη χρήση. Μπορεί επίσης να αναδείξει περιόδους υψηλής χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες θα μπορούσαν να υποδηλώνουν την ανάγκη για πρόσθετες πηγές ενέργειας ή μέτρα αποδοτικότητας. Συνολικά, το σχήμα αυτό παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τις στρατηγικές διαχείρισης και βελτιστοποίησης της ενέργειας εντός του μικροδικτύου. Ενημερώνει διάφορες στρατηγικές για τη διαχείριση και βελτιστοποίηση της ενέργειας, όπως ο προγραμματισμός της παραγωγής και της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, η εξισορρόπηση φορτίου και η απόκριση στη ζήτηση. Με την αποτελεσματική διαχείριση και βελτιστοποίηση της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, το μικροδίκτυο μπορεί να διασφαλίσει μια αξιόπιστη και βιώσιμη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, να μειώσει την εξάρτηση από το δίκτυο και να οδηγήσει σε οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη.

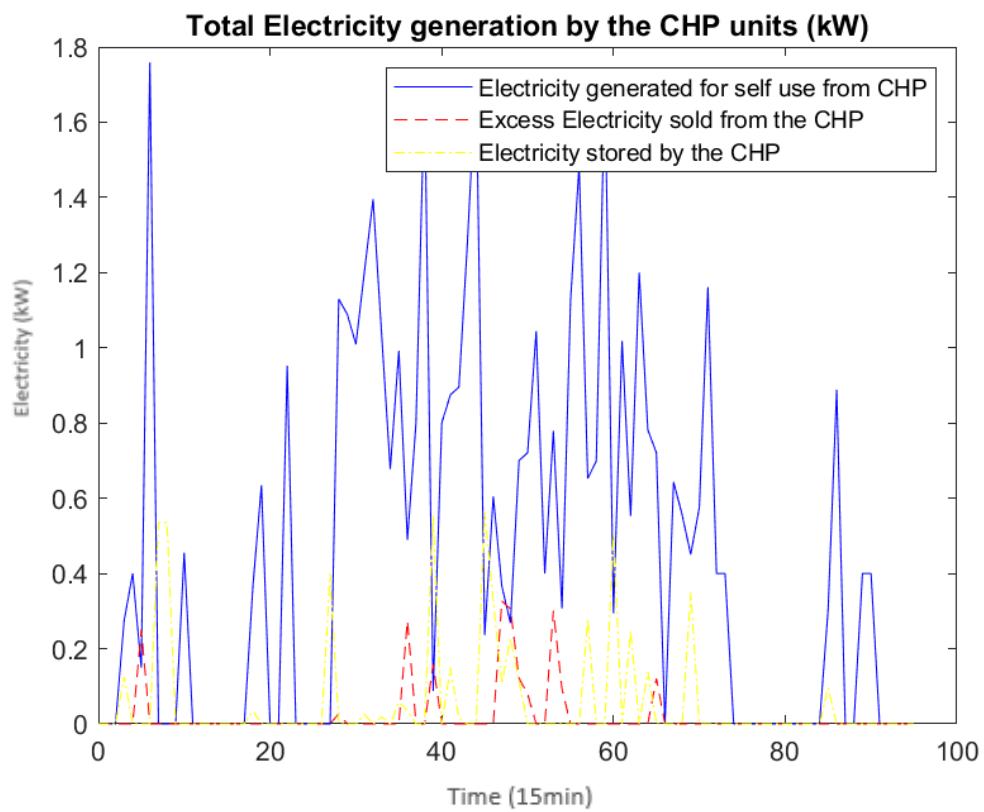


Εικόνα 29 συνολική ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται στην κεντρική δεξαμενή αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

Το γράφημα της εικόνας 30 απεικονίζει τη "Συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (CHP)" με την πάροδο του χρόνου. Ο άξονας x αντιπροσωπεύει χρονικά διαστήματα, ενώ ο άξονας y υποδεικνύει την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας σε kW. Υπάρχουν τρεις διαφορετικές γραμμές στο γράφημα:

- Ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται για ίδια χρήση από τη ΣΗΘ (μπλε συμπαγής γραμμή). Αυτή η γραμμή αντιπροσωπεύει την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τις μονάδες ΣΗΘ και χρησιμοποιείται απευθείας εντός του μικροδικτύου. Είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση της ενέργειας που παράγεται και καταναλώνεται επιτόπου, γεγονός που μπορεί να βοηθήσει στη βελτιστοποίηση της χρήσης ενέργειας και στη μείωση της εξάρτησης από εξωτερικές πηγές ενέργειας.
- Περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας που πωλείται από τη ΣΗΘ (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή). Αυτή η γραμμή υποδεικνύει την ποσότητα της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας που δεν χρησιμοποιείται εσωτερικά αλλά πωλείται εξωτερικά. Βοηθά στην κατανόηση του πόσο πλεονάζουσα ενέργεια παράγεται, η οποία μπορεί να αποτελέσει πηγή εσόδων ή μπορεί να υποδεικνύει μια ευκαιρία βελτιστοποίησης των επιπέδων παραγωγής.
- Ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται από τη ΣΗΘ (κίτρινη διακεκομμένη γραμμή). Αυτή η γραμμή δείχνει πόση ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται για μελλοντική χρήση. Είναι ζωτικής σημασίας για τη διαχείριση των κενών μεταξύ ζήτησης και προσφοράς, διασφαλίζοντας ότι υπάρχει πάντα αρκετή ενέργεια διαθέσιμη για την κάλυψη της ζήτησης, ιδίως κατά τη διάρκεια των περιόδων αιχμής της χρήσης ή των διακοπών.

Στο πλαίσιο ενός μικροδικτύου, αυτό το πολυδιάγραμμα παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία και την απόδοση των μονάδων ΣΗΘ. Μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό περιόδων υψηλής δέσμευσης ενέργειας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιστάθμιση της κατανάλωσης ενέργειας ή να αποθηκευτεί για μεταγενέστερη χρήση. Μπορεί επίσης να αναδείξει περιόδους υψηλής χρήσης ενέργειας, οι οποίες θα μπορούσαν να υποδηλώνουν την ανάγκη για πρόσθετες πηγές ενέργειας ή μέτρα απόδοσης.



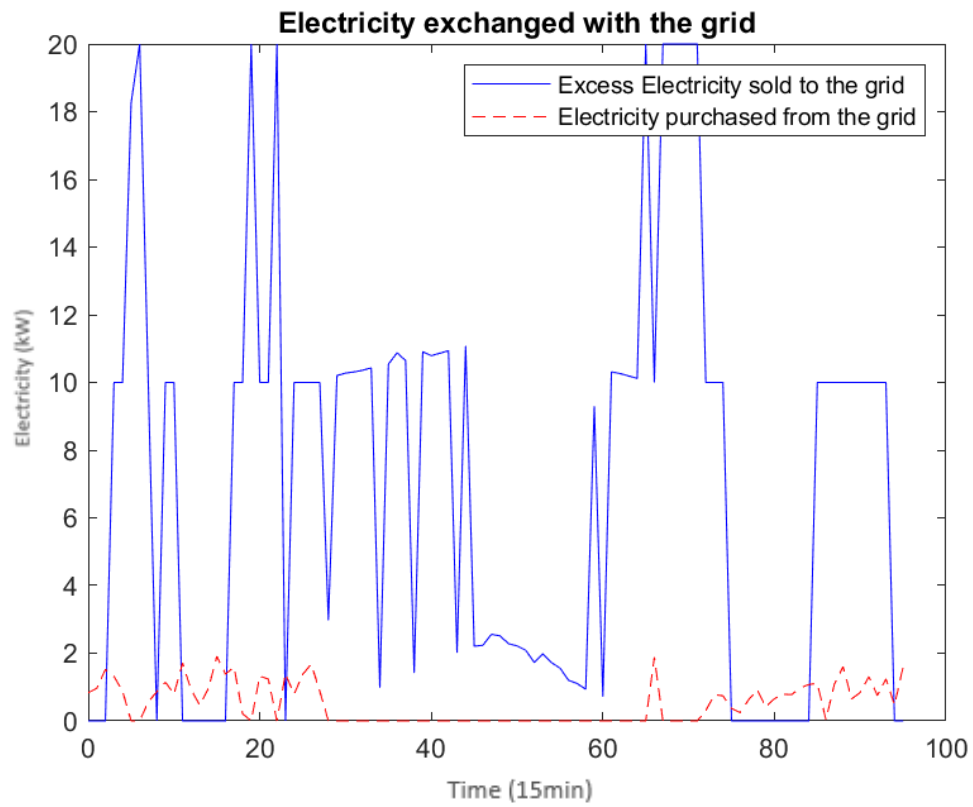
Εικόνα 30 Συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (CHP)

Το γράφημα της εικόνας 31 απεικονίζει την "Ηλεκτρική ενέργεια που ανταλλάσσεται με το δίκτυο" με την πάροδο του χρόνου. Ο άξονας x αντιπροσωπεύει χρονικά διαστήματα, ενώ ο άξονας y υποδεικνύει την ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχουν δύο διαφορετικές γραμμές στο γράφημα:

Η πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια που πωλείται στο δίκτυο (μπλε συμπαγής γραμμή). Αυτή η γραμμή αντιπροσωπεύει την ποσότητα της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από το μικροδίκτυο και πωλείται πίσω στο κύριο δίκτυο. Αυτή θα μπορούσε να είναι ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από διάφορες πηγές εντός του μικροδικτύου, όπως ηλιακά πάνελ (E_PV_Sal_opt), ανεμογεννήτριες (E_Wind_Sal_opt), συστήματα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (E_CHP_Sal_opt) ή ηλεκτρικά οχήματα (E_EV_Sal_opt), η οποία δεν χρησιμοποιείται τοπικά και επομένως πωλείται πίσω στο κύριο δίκτυο.

Ηλεκτρική ενέργεια που αγοράζεται από το δίκτυο (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή). Αυτή η γραμμή αντιπροσωπεύει την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που αγοράζει το μικροδίκτυο από το κύριο δίκτυο. Αυτό συμβαίνει συνήθως όταν η τοπική παραγωγή εντός του μικροδικτύου δεν επαρκεί για να καλύψει τη ζήτηση, οπότε πρέπει να αντληθεί πρόσθετη ισχύς από το κύριο ηλεκτρικό δίκτυο.

Στο πλαίσιο ενός μικροδικτύου, αυτό το πολυγράφημα παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία και την απόδοση των ενεργειακών πόρων του μικροδικτύου. Μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό περιόδων υψηλής παραγωγής ενέργειας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιστάθμιση της κατανάλωσης ενέργειας ή να αποθηκευτεί για μεταγενέστερη χρήση. Μπορεί επίσης να αναδείξει περιόδους υψηλής ζήτησης ενέργειας, οι οποίες θα μπορούσαν να υποδηλώνουν την ανάγκη για πρόσθετες πηγές ενέργειας ή μέτρα αποδοτικότητας



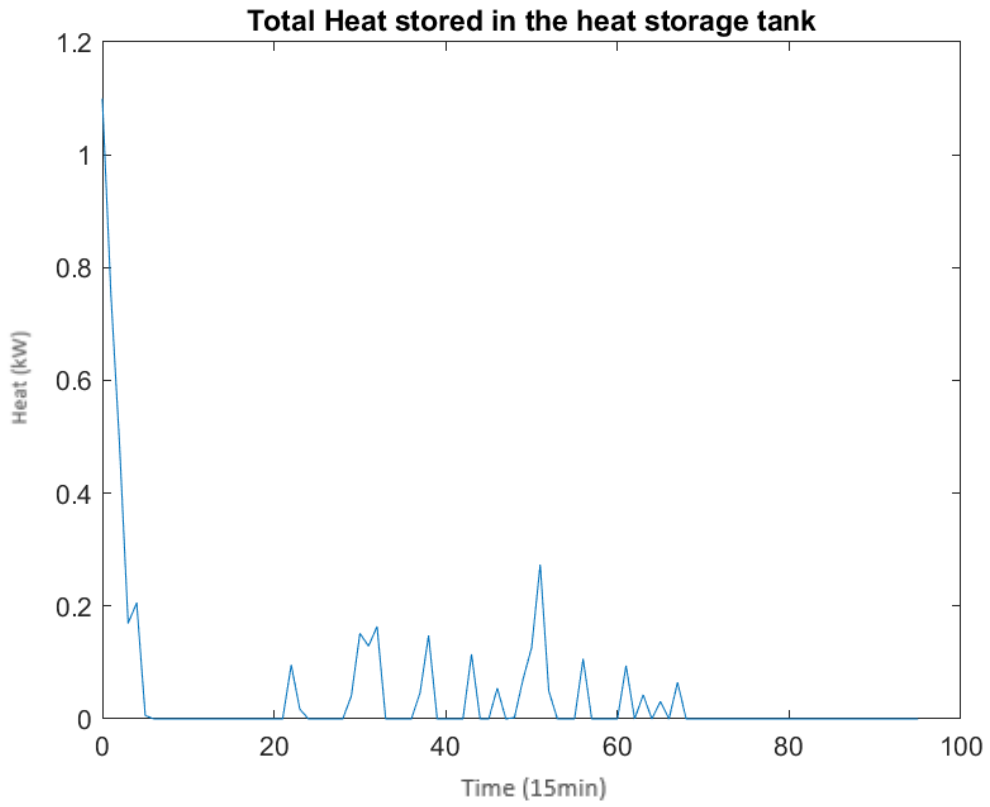
Εικόνα 31 Ηλεκτρική ενέργεια που ανταλλάσσεται με το δίκτυο

Το γράφημα της εικόνας 32 αντιπροσωπεύει τη "Συνολική θερμότητα που αποθηκεύεται στη δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας" με την πάροδο του χρόνου. Ο άξονας x αντιπροσωπεύει πιθανότατα χρονικά διαστήματα, ενώ ο άξονας y υποδεικνύει την ποσότητα της αποθηκευμένης θερμότητας.

Το γράφημα δείχνει ένα κυμαινόμενο μοτίβο των επιπέδων αποθήκευσης θερμότητας. Υπάρχουν περίοδοι κατά τις οποίες το επίπεδο αποθήκευσης θερμότητας αυξάνεται, υποδεικνύοντας ότι αποθηκεύεται περίσσεια θερμότητας στη δεξαμενή. Αντίθετα, υπάρχουν περίοδοι όπου το επίπεδο αποθήκευσης μειώνεται, γεγονός που υποδηλώνει ότι η αποθηκευμένη θερμότητα χρησιμοποιείται.

Οι πληροφορίες που παρέχει η γραφική παράσταση είναι αναμενόμενες καθώς η μέγιστη ισχύς της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας δεν ξεπερνάει την ονομαστική του ισχύ που έχει οριστεί ως μέγιστη στο 1.5 kW.

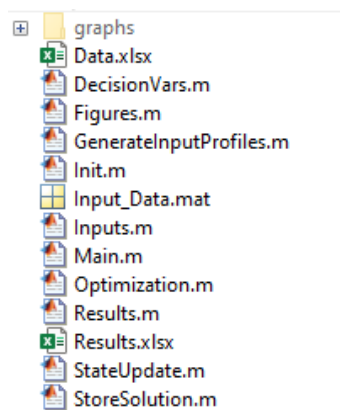
Στο πλαίσιο ενός μικροδικτύου, το γράφημα αυτό παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για τη λειτουργία και την απόδοση της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας. Μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό περιόδων υψηλής δέσμευσης θερμότητας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιστάθμιση της κατανάλωσης θερμότητας ή να αποθηκευτεί για μεταγενέστερη χρήση. Μπορεί επίσης να αναδείξει περιόδους υψηλής χρήσης θερμότητας, οι οποίες θα μπορούσαν να υποδηλώνουν την ανάγκη για πρόσθετες πηγές ενέργειας ή μέτρα απόδοσης. Συνολικά, το σχήμα αυτό παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τις στρατηγικές διαχείρισης και βελτιστοποίησης της ενέργειας εντός του μικροδικτύου. Ενημερώνει διάφορες στρατηγικές για τη διαχείριση και βελτιστοποίηση της ενέργειας, όπως ο προγραμματισμός της παραγωγής και της κατανάλωσης θερμότητας, η εξισορρόπηση φορτίου και η απόκριση στη ζήτηση. Με την αποτελεσματική διαχείριση και βελτιστοποίηση της αποθήκευσης θερμότητας, το μικροδίκτυο μπορεί να διασφαλίσει μια αξιόπιστη και βιώσιμη παροχή θερμότητας, να μειώσει την εξάρτηση από το δίκτυο και να οδηγήσει σε οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη.



Εικόνα 32 Συνολική θερμότητα που αποθηκεύεται στη δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας

5.1 Ανάλυση αρχείων κώδικα που συγγράφηκαν για την υλοποίηση του προσομοιωτή του μικροδικτύου

Σε αυτή την υποενότητα θα γίνει αναλυτική παρουσίαση των αρχείων κώδικα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να σχεδιαστεί ο προσομοιωτής (Model Predictive Controller) του μικροδικτύου. Το πρόβλημα MILP επιλύεται με την εργαλειοθήκη gurobi. Συνολικά το project αποτελείται από 10 αρχεία κώδικα τα οποία φαίνονται στην παρακάτω εικόνα



Εικόνα 33 Απεικόνιση των αρχείων του project MPC (Model Predictive Control)

Στη συνέχεια θα γίνει η ανάλυση κάθε αρχείο κώδικα που συγγράφηκε.

Αρχείο Main.m

Αυτό το αρχείο MATLAB είναι το βασικό αρχείο το οποίο χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ενός μικροδικτύου χρησιμοποιώντας μια υλοποίηση ενός συστήματος Model Predictive Control (MPC). Το μικροδίκτυο έχει σχεδιαστεί για να χρησιμοποιεί Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Η διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης στο πλαίσιο του MPC χρησιμοποιεί δυαδικές μεταβλητές, οι οποίες είναι μια κοινή μαθηματική προσέγγιση για την αναπαράσταση διακριτών αποφάσεων, όπως οι καταστάσεις ενεργοποίησης/απενεργοποίησης.

Ο κώδικας ξεκινά με την εκκαθάριση όλων των προηγούμενων δεδομένων και μεταβλητών από το χώρο εργασίας του MATLAB για να εξασφαλιστεί μια καθαρή εκκίνηση. Στη συνέχεια, προχωρά στη φόρτωση των δεδομένων εισόδου και δηλώνει τις μεταβλητές απόφασης για το πρόβλημα βελτιστοποίησης. Ο κύριος βρόχος του προγράμματος εκτελεί έναν καθορισμένο αριθμό προσομοιώσεων (N_{sim}). Σε κάθε επανάληψη του βρόχου, εκτελεί τη βελτιστοποίηση, ενημερώνει την κατάσταση του συστήματος και αποθηκεύει τη λύση. Αυτή η επαναληπτική διαδικασία επιτρέπει στο MPC να λαμβάνει μια σειρά βελτιστοποιημένων αποφάσεων με την πάροδο του χρόνου, προσαρμοζόμενο στις αλλαγές της κατάστασης του συστήματος.

Ο κώδικας περιλαμβάνει επίσης διαγνωστική έξοδο για τον έλεγχο θεμάτων μη εφικτότητας. Εάν δεν υπάρχουν ζητήματα μη εφικτότητας, εμφανίζει την ένδειξη "No infeasibility issues!!!". Εάν υπάρχει πρόβλημα, εμφανίζει την ένδειξη "Something has gone terribly wrong". Αφού ολοκληρωθούν οι προσομοιώσεις, τα αποτελέσματα επεξεργάζονται και εμφανίζονται. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εμφανίσει τα αποτελέσματα που προέκυψαν μέσω ενός πλαισίου διαλόγου. Εάν ο χρήστης επιλέξει την εμφάνιση των αποτελεσμάτων, καλείται η συνάρτηση Figures για τη δημιουργία των σχετικών γραφικών παραστάσεων. Το έργο αυτό αποτελεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για το σχεδιασμό και τον έλεγχο ενός μικροδικτύου με τη χρήση MPC και ΑΠΕ, παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την απόδοση και τη σκοπιμότητα τέτοιων συστημάτων(οι πληροφορίες αυτές είναι οι γραφικές οι οποίες παρουσιάστηκαν στην ενότητα 5.1).

Αρχείο Inputs.m

Το αρχείο Inputs.m είναι υπεύθυνο για τη φόρτωση και την επεξεργασία των δεδομένων εισόδου που απαιτούνται για την προσομοίωση του μικροδικτύου. Τα δεδομένα εισόδου αποθηκεύονται σε ένα αρχείο Excel με όνομα Data.xlsx. Το σενάριο ελέγχει πρώτα αν πρόκειται για την πρώτη εκτέλεση ή αν έχουν αλλάξει τα δεδομένα εισόδου. Εάν ναι, διαβάζει τα δεδομένα εισόδου από το αρχείο Excel και τα αποθηκεύει σε ένα αρχείο MATLAB για ταχύτερη πρόσβαση σε μελλοντικές εκτελέσεις.

Στη συνέχεια, το σενάριο φορτώνει τα δεδομένα εισόδου στο χώρο εργασίας του MATLAB. Εξάγει διάφορες παραμέτρους από τα δεδομένα εισόδου, όπως τον αριθμό των κατοικιών (dwel_num), τον αριθμό των θέσεων στο χώρο στάθμευσης (rpros_num) και διάφορες άλλες παραμέτρους που σχετίζονται με την κατάσταση του συστήματος, όπως την κατάσταση φόρτισης των EV (SOCarr, SOCdep), το φορτίο ηλεκτρισμού και θερμότητας (CLoad_Elec, CLoad_Heat) και την απόδοση της φόρτισης και εκφόρτισης των μπαταριών των EV (n_ch, n_dch).

Το σενάριο εξάγει επίσης παραμέτρους που σχετίζονται με τον ορίζοντα ελέγχου και προσομοίωσης (N_c, N_sim), τον χρόνο διακριτοποίησης (d) και διάφορες άλλες παραμέτρους που σχετίζονται με τις φυσικές ιδιότητες του συστήματος, όπως η επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε κάθε κατοικία (A_PV), ο αριθμός των ανεμογεννητριών σε κάθε κατοικία (Num_Turbines) και η ένταση άνθρακα της ηλεκτρικής ενέργειας και του φυσικού αερίου (CI_Elec, CI_Gas).

Τέλος, το σενάριο εξάγει παραμέτρους που σχετίζονται με το κόστος λειτουργίας και συντήρησης διαφόρων στοιχείων του συστήματος, όπως ο λέβητας (C_OM_B), η δεξαμενή αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (C_OM_Est) και η δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας (C_OM_Hst). Αυτές οι παράμετροι είναι ζωτικής σημασίας για το πρόβλημα βελτιστοποίησης που επιλύει το κύριο πρόγραμμα για τον έλεγχο του μικροδικτύου. Το αρχείο Inputs.m παίζει επομένως κρίσιμο ρόλο στη ρύθμιση της προσομοίωσης παρέχοντας όλα τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου.

Αρχείο DecisionVars.m

Το αρχείο DecisionVars.m είναι υπεύθυνο για τη δήλωση των μεταβλητών απόφασης που χρησιμοποιούνται στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Αυτές οι μεταβλητές αντιπροσωπεύουν τις διάφορες πτυχές του συστήματος μικροδικτύου που μπορούν να ελεγχθούν ή που επηρεάζουν τη λειτουργία του συστήματος.

Οι μεταβλητές απόφασης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: σχετικές με το κόστος και σχετικές με την ενέργεια. Οι μεταβλητές απόφασης που σχετίζονται με το κόστος περιλαμβάνουν το συνολικό κόστος για την αγοραζόμενη ηλεκτρική ενέργεια (C_Grid_Pur), το λειτουργικό κόστος της ΣΗΘ (C_CHP_Or), το λειτουργικό κόστος του λέβητα (C_B_Or), το συνολικό περιβαλλοντικό κόστος (C_Carb_Tax), το λειτουργικό κόστος της δεξαμενής αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (C_EST), το λειτουργικό κόστος της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας (C_HST) και τα έσοδα από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο από τις μονάδες ΣΗΘ (C_CHP_Sal), τις φωτοβολταϊκές μονάδες (C_PV_Sal), το σύστημα ανεμογεννητριών (C_Wind_Sal) και το EV (C_EV_Sal). Οι μεταβλητές Pch και Pdch αντιπροσωπεύουν τις kWh φόρτισης και εκφόρτισης του EV, αντίστοιχα.

Οι μεταβλητές απόφασης που σχετίζονται με την ενέργεια αντιπροσωπεύουν τις διάφορες ροές ενέργειας στο σύστημα. Αυτές περιλαμβάνουν την αγοραζόμενη ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο (E_Grid), την πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια που πωλείται από τη μονάδα ΣΗΘ (E_CHP_Sal), την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται για ιδιοκατανάλωση από τη μονάδα ΣΗΘ (E_CHP_Self), την αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια από τη μονάδα ΣΗΘ (E_CHP_Sto), την ηλεκτρική ενέργεια που παραδίδεται από τη μονάδα ΣΗΘ μέσω των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (E_CHP_Tra), και παρόμοιες μεταβλητές για τα συστήματα Φ/Β και Αιολικής ενέργειας. Η μεταβλητή E_OUT_Est αντιπροσωπεύει την ηλεκτρική ενέργεια που απελευθερώνεται από τη δεξαμενή αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.

Αυτές οι μεταβλητές απόφασης χρησιμοποιούνται στο πρόβλημα βελτιστοποίησης για τον προσδιορισμό της βέλτιστης λειτουργίας του συστήματος μικροδικτύου. Δηλώνονται ως αντικείμενα sdrvar, τα οποία χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση μεταβλητών απόφασης σε προβλήματα βελτιστοποίησης στην εργαλειοθήκη YALMIP, μια δημοφιλή εργαλειοθήκη για τη μοντελοποίηση και την επίλυση

προβλημάτων βελτιστοποίησης στο MATLAB. Η συνάρτηση `germat` χρησιμοποιείται για τη δημιουργία πινάκων αυτών των μεταβλητών για κάθε κατοικία και κάθε περίοδο στον ορίζοντα ελέγχου. Αυτό επιτρέπει στο πρόβλημα βελτιστοποίησης να εξετάζει τη λειτουργία του συστήματος σε πολλαπλές περιόδους και για πολλαπλές κατοικίες. Το αρχείο `DecisionVars.m` παίζει έτσι κρίσιμο ρόλο στη διαμόρφωση του προβλήματος βελτιστοποίησης που επιλύει το κύριο πρόγραμμα για τον έλεγχο του μικροδικτύου.

Αρχείο Optimization.m

Το αρχείο `Optimization.m` είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία και την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης που καθορίζει τη βέλτιστη λειτουργία του συστήματος μικροδικτύου. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης διατυπώνεται ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, όπου ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους (C_Total) με την επιφύλαξη διαφόρων περιορισμών.

Η αντικειμενική συνάρτηση C_Total είναι ένα σταθμισμένο άθροισμα διαφόρων μεταβλητών απόφασης που σχετίζονται με το κόστος, συμπεριλαμβανομένου του κόστους της αγοραζόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, του λειτουργικού κόστους της ΣΗΘ, του λειτουργικού κόστους του λέβητα, του περιβαλλοντικού κόστους, του λειτουργικού κόστους της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας και του εισοδήματος από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο από τις μονάδες ΣΗΘ, τις φωτοβολταϊκές μονάδες, το σύστημα ανεμογεννητριών και το EV. Η αντικειμενική συνάρτηση συσσωρεύεται στον ορίζοντα ελέγχου N_c .

Οι περιορισμοί αντιπροσωπεύουν τους φυσικούς και λειτουργικούς περιορισμούς του συστήματος μικροδικτύου. Σε αυτούς περιλαμβάνονται οι σχέσεις προσφοράς-ζήτησης, οι περιορισμοί αλληλεπίδρασης με το δίκτυο και οι περιορισμοί στη λειτουργία της μονάδας ΣΗΘ, της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας και της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Για παράδειγμα, οι σχέσεις προσφοράς-ζήτησης διασφαλίζουν ότι η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας καλύπτεται από το άθροισμα της ηλεκτρικής ενέργειας που αγοράζεται από το δίκτυο και της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τα συστήματα ΣΗΘ, Φ/Β και ανεμογεννήτριας. Οι περιορισμοί αλληλεπίδρασης του δικτύου απαγορεύουν στον πελάτη να αγοράζει και να πουλάει ενέργεια ταυτόχρονα.

Οι περιορισμοί περιλαμβάνουν επίσης την αρχικοποίηση δυαδικών μεταβλητών στην αρχή κάθε επανάληψης, περιορισμούς που σχετίζονται με τη λειτουργία των ανεμογεννητριών, των φωτοβολταϊκών, των μονάδων συμπαραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας και περιορισμούς που σχετίζονται με την κατάσταση φόρτισης των EVs. Οι περιορισμοί παρουσιάζονται στο αρχείο Optimization.m.

Το αρχείο Optimization.m διαδραματίζει έτσι κρίσιμο ρόλο στον προσδιορισμό της βέλτιστης λειτουργίας του συστήματος μικροδικτύου επιλύοντας αυτό το πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς. Η λύση αυτού του προβλήματος παρέχει τις βέλτιστες αποφάσεις για τη λειτουργία του συστήματος μικροδικτύου, όπως η ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που πρέπει να αγοραστεί από το δίκτυο, η ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που πρέπει να παραχθεί με τη χρήση των συστημάτων ΣΗΘ, Φ/Β, ηλεκτρικών αυτοκινήτων, ανεμογεννητριών και η λειτουργία των δεξαμενών αποθήκευσης θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτές οι αποφάσεις χρησιμοποιούνται στο κύριο πρόγραμμα για τον έλεγχο του συστήματος μικροδικτύου.

Αρχείο StateUpdate.m

Το αρχείο StateUpdate.m είναι υπεύθυνο για την ενημέρωση της κατάστασης του συστήματος μετά από κάθε επανάληψη του προβλήματος βελτιστοποίησης. Η κατάσταση του συστήματος περιλαμβάνει τις τιμές των μεταβλητών απόφασης και άλλων παραμέτρων που αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου.

Το σενάριο ξεκινά με τον έλεγχο για τιμές NaN στη μεταβλητή απόφασης Y. Εάν βρεθούν τιμές NaN, καταγράφει ένα μήνυμα. Αυτό είναι σημαντικό για τη διασφάλιση της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης.

Στη συνέχεια, το σενάριο αποθηκεύει τις τρέχουσες τιμές των μεταβλητών απόφασης και άλλων παραμέτρων σε τοπικές μεταβλητές. Αυτές περιλαμβάνουν την αποθήκευση θερμότητας (H_STO_0), την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας (ES_STO_0) και τις δυαδικές μεταβλητές W_0, X_0, Y_0, Z_0 και U_0. Αποθηκεύει επίσης τις τελευταίες τιμές των μεταβλητών απόφασης φόρτισης (CH_Last) και εκφόρτισης (DCH_Last) και την κατάσταση φόρτισης των EVs (E_SOCev_Last).

Στη συνέχεια, το σενάριο ενημερώνει τις δυαδικές μεταβλητές W_opt, Z_opt, Y_opt, X_opt και U_opt για το επόμενο χρονικό βήμα. Οι μεταβλητές αυτές υποδεικνύουν αν

ο ΣΗΘ πρέπει να βρίσκεται σε διαδικασία εκκίνησης ή τερματισμού λειτουργίας στην αρχή του επόμενου ορίζοντα ελέγχου.

Τέλος, το σενάριο επικαιροποιεί τις καταστάσεις λειτουργίας, εκκίνησης και τερματισμού λειτουργίας του ΣΗΘ για κάθε κατοικία. Για κάθε κατοικία, ελέγχει αν ο ΣΗΘ λειτουργεί, εκκινεί ή κλείνει και ενημερώνει τους αντίστοιχους μετρητές (UT, ST, DT). Εάν η ΣΗΘ λειτουργεί, ο μετρητής λειτουργίας UT μειώνεται κατά 1 ή μηδενίζεται στη μέγιστη τιμή του εάν φτάσει το 0. Ομοίως, εάν η ΣΗΘ εκκινεί, ο μετρητής εκκίνησης ST μειώνεται κατά 1 ή μηδενίζεται στη μέγιστη τιμή του εάν φτάσει το 0. Εάν η ΣΗΘ κλείνει, ο μετρητής τερματισμού DT μειώνεται κατά 1 ή μηδενίζεται στη μέγιστη τιμή του εάν φτάσει το 0.

Το αρχείο StateUpdate.m παίζει επομένως κρίσιμο ρόλο στην ενημέρωση της κατάστασης του συστήματος μετά από κάθε επανάληψη του προβλήματος βελτιστοποίησης. Αυτό διασφαλίζει ότι η κατάσταση του συστήματος αναπαρίσταται με ακρίβεια στην επόμενη επανάληψη του προβλήματος βελτιστοποίησης, επιτρέποντας στο πρόβλημα βελτιστοποίησης να λαμβάνει ακριβείς αποφάσεις με βάση την τρέχουσα κατάσταση του συστήματος.

Αρχείο StoreSolution.m

Το αρχείο StoreSolution.m είναι υπεύθυνο για την αποθήκευση της τρέχουσας λύσης του προβλήματος βελτιστοποίησης μετά από κάθε επανάληψη. Αυτό είναι σημαντικό για την παρακολούθηση της εξέλιξης του συστήματος με την πάροδο του χρόνου και για την αρχικοποίηση της κατάστασης του συστήματος στην επόμενη επανάληψη.

Το σενάριο αποθηκεύει τις τρέχουσες τιμές των μεταβλητών απόφασης και άλλων παραμέτρων στις αντίστοιχες μεταβλητές _opt. Αυτές περιλαμβάνουν την αυτοχρησιμοποίηση, την αποθήκευση και την πωλούμενη ηλεκτρική ενέργεια από τα συστήματα Φ/Β (E_PV_Self_opt, E_PV_Sto_opt, E_PV_Sal_opt), τις ανεμογεννήτριες (E_Wind_Self_opt, E_Wind_Sto_opt, E_Wind_Sal_opt), τη ΣΗΘ (E_CHP_Self_opt, E_CHP_Sto_opt, E_CHP_Sal_opt), το κόστος της αγοραζόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο (C_Grid_Pur_opt), το περιβαλλοντικό κόστος (C_Carb_Tax_opt), το εισόδημα από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο από τα συστήματα Φ/Β (C_PV_Sal_opt), ανεμογεννήτριες (C_Wind_Sal_opt), CHP

(C_CHP_Sal_opt) και η ηλεκτρική ενέργεια που απελευθερώνεται από τη δεξαμενή αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (E_OUT_Est_opt).

Το σενάριο αποθηκεύει επίσης τις τρέχουσες τιμές των μεταβλητών απόφασης που σχετίζονται με τα EV, συμπεριλαμβανομένης της αυτοχρησιμοποίησης και της πωλούμενης ηλεκτρικής ενέργειας (E_EV_Self_opt, E_EV_Sal_opt), της κατάστασης φόρτισης (E_SOCev_opt) και του εισοδήματος από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο (C_EV_Sal_opt). Η ισχύς φόρτισης και εκφόρτισης των EVs (Pch_opt, Pdch_opt) αποθηκεύεται επίσης.

Τέλος, το σενάριο αποθηκεύει τις τρέχουσες τιμές των μεταβλητών απόφασης που σχετίζονται με το σύστημα θερμότητας, συμπεριλαμβανομένης της εισόδου και της εξόδου θερμότητας από τη δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας (H_IN_Hst_opt, H_OUT_Hst_opt), της αποθήκευσης θερμότητας (H_STO_opt), του λειτουργικού κόστους της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας (C_HST_opt), του λειτουργικού κόστους του λέβητα (C_B_Or_opt) και της θερμότητας που παράγεται από τον λέβητα (H_B_opt).

Το αρχείο StoreSolution.m διαδραματίζει έτσι κρίσιμο ρόλο στην παρακολούθηση της εξέλιξης του συστήματος με την πάροδο του χρόνου και στην παροχή της αρχικής κατάστασης για την επόμενη επανάληψη του προβλήματος βελτιστοποίησης. Αυτό διασφαλίζει ότι το πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να λάβει ακριβείς αποφάσεις με βάση την τρέχουσα κατάσταση του συστήματος.

Αρχείο Results.m

Το αρχείο Results.m είναι υπεύθυνο για την παρουσίαση και την αποθήκευση των αποτελεσμάτων του προβλήματος βελτιστοποίησης. Υπολογίζει το συνολικό κόστος και τις ροές ενέργειας στο σύστημα και γράφει τα αποτελέσματα αυτά σε ένα αρχείο Excel για περαιτέρω ανάλυση.

Το σενάριο υπολογίζει αρχικά το συνολικό κόστος και τις ροές ενέργειας στο σύστημα. Αυτά περιλαμβάνουν το συνολικό κόστος της αγοραζόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο (Total_grid_pur), το συνολικό περιβαλλοντικό κόστος (Total_carb_tax), το συνολικό εισόδημα από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο από τις φωτοβολταϊκές μονάδες (Total_PV_sal), το σύστημα ανεμογεννητριών

(Total_Wind_sal), τις μονάδες CHP (Total_CHP_sal) και το EV (Total_EV_sal). Υπολογίζει επίσης το συνολικό λειτουργικό κόστος της δεξαμενής αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (Total_EST), της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας (Total_HST), του λέβητα (Total_B_Op) και της ΣΗΘ (Total_CHP_Op). Το συνολικό κόστος του συστήματος (Total_cost) υπολογίζεται στη συνέχεια ως το άθροισμα αυτών των δαπανών.

Στη συνέχεια, το σενάριο προετοιμάζει την εγγραφή αυτών των αποτελεσμάτων σε ένα αρχείο Excel με όνομα Results.xlsx. Για κάθε κατοικία, δημιουργεί έναν πίνακα Res που περιέχει τις βέλτιστες τιμές των μεταβλητών απόφασης και άλλων παραμέτρων για την εν λόγω κατοικία. Γράφει αυτόν τον πίνακα σε ένα φύλλο του αρχείου Excel με όνομα DwellingNo_i, όπου i είναι ο αριθμός της κατοικίας.

Τέλος, το σενάριο γράφει το συνολικό κόστος και τις ροές ενέργειας (Totals) και την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας (Elec_Storage) σε ξεχωριστά φύλλα στο αρχείο Excel. Τα αποτελέσματα αυτά παρέχουν μια ολοκληρωμένη επισκόπηση της λειτουργίας του συστήματος μικροδικτύου και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω ανάλυση και λήψη αποφάσεων.

Το αρχείο Results.m διαδραματίζει επομένως κρίσιμο ρόλο στην παρουσίαση και αποθήκευση των αποτελεσμάτων του προβλήματος βελτιστοποίησης. Με την εγγραφή αυτών των αποτελεσμάτων σε ένα αρχείο Excel, επιτρέπει την εύκολη πρόσβαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων, διευκολύνοντας τη λήψη αποφάσεων και την περαιτέρω έρευνα.

Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην ανάπτυξη συστήματος προβλεπτικού ελέγχου για ενεργειακά μικροδίκτυα, με στόχο τη βελτιστοποίηση της απόδοσής τους και την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Α.Π.Ε) σε αυτά. Τα κύρια συμπεράσματα της μελέτης είναι ότι επιτυγχάνονται τα εξής:

1. **Μείωση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων:** Η χρήση προβλεπτικού ελέγχου σε ενεργειακά μικροδίκτυα συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και άλλων επιβλαβών αερίων, προάγοντας τη βιώσιμη χρήση των Α.Π.Ε. και ελαχιστοποιώντας την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα. Η συμβολή στην προστασία του περιβάλλοντος και στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής είναι ζωτικής σημασίας για το μέλλον του πλανήτη.
2. **Βελτίωση Αποδοτικότητας:** Ο προβλεπτικός έλεγχος επιτρέπει την καλύτερη διαχείριση των ενεργειακών πόρων, ενσωματώνοντας τις Α.Π.Ε. και εξισορροπώντας την παραγωγή και την κατανάλωση ενέργειας. Αυτό οδηγεί σε πιο αποδοτική χρήση της ενέργειας και σε μείωση του κόστους λειτουργίας.
3. **Ενεργειακή Ασφάλεια και Αυτονομία:** Η εφαρμογή προβλεπτικού ελέγχου αυξάνει την ανθεκτικότητα των μικροδικτύων, εξασφαλίζοντας την αυτονομία τους σε περιπτώσεις διακοπών ρεύματος ή άλλων διαταραχών, δεδομένου ότι υπάρχει αποθήκευση ενέργειας. Αυτή εξασφαλίζεται αφού μέσω της εφαρμογής του προβλεπτικού ελέγχου MPC επιτυγχάνεται βέλτιστη διαχείριση ενέργειας. Ταυτόχρονα, η δυνατότητα αυτόνομης λειτουργίας των μικροδικτύων βελτιώνει την ενεργειακή ασφάλεια και μειώνει την εξάρτηση από το μακροδίκτυο.
4. **Οικονομικά Οφέλη:** Η βελτιστοποίηση των μικροδικτύων μέσω του προβλεπτικού ελέγχου οδηγεί σε οικονομικά οφέλη τόσο για τους καταναλωτές, όσο και για τους παρόχους ενέργειας. Η μείωση του κόστους ενέργειας και η αύξηση της αποδοτικότητας δημιουργούν νέες ευκαιρίες για οικονομική ανάπτυξη στον τομέα της ενέργειας.

Μελλοντικοί στόχοι

Οι μελλοντικοί στόχοι για τη βελτίωση εφαρμογής του προβλεπτικού ελέγχου σε ενεργειακά μικροδίκτυα περιλαμβάνουν διάφορες επεκτάσεις, που μπορούν να βελτιώσουν περαιτέρω την απόδοση των ΣΔΕ. Αναλυτικότερα, οι βασικοί στόχοι μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

1. Ανάπτυξη Προηγμένων Αλγορίθμων Προβλεπτικού Ελέγχου:

- **Μηχανική Μάθηση και Τεχνητή Νοημοσύνη:** Η χρήση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης και τεχνητής νοημοσύνης για την ανάλυση μεγάλων δεδομένων και την πρόβλεψη της ζήτησης και της παραγωγής ενέργειας. Αυτοί οι αλγόριθμοι μπορούν να βελτιστοποιηθούν συνεχώς καθώς λαμβάνουν νέα δεδομένα.
- **Μη γραμμικά δυναμικά Μοντέλα:** Ενσωμάτωση μοντέλων που μοντελοποιούν με μεγαλύτερη ακρίβεια τις μη γραμμικές δυναμικές των συστημάτων που απαρτίζουν το μικροδίκτυο, όπως τα συστήματα συμπαραγωγής.

2. Βελτιστοποίηση Διαχείρισης Ενέργειας:

- **Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης:** Χρήση μη γραμμικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης για την επίλυση των μη γραμμικών προβλημάτων βελτιστοποίησης με πιθανή χρήση στοχαστικών αλγορίθμων όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι.

3. Αυτοματοποίηση και Ευφυΐα:

Περαιτέρω αυτοματοποίηση των διαδικασιών ελέγχου με ανάπτυξη ψηφιακού διδύμου (digital twin) του συστήματος και διασύνδεση με συσκευές Internet of Things (IOT) συστημάτων που μπορούν να αντιδρούν σε πραγματικό χρόνο σε αλλαγές στις συνθήκες του δικτύου.

Τέλος, άλλος ένας πρόσθετος μελλοντικός στόχος για την εξέλιξη της εφαρμογής προβλεπτικού ελέγχου είναι η διασύνδεση πολλών μικροδικτύων, επιτρέποντας τη συνεργασία και την ανταλλαγή ενέργειας.

Αναφορές

Εικόνα 1 Στρατηγική βέλτιστου ελέγχου σε μικροδίκτυο για διαμοιρασμένες ενεργειακές πηγές σε DC μικροδίκτυο.....	18
Εικόνα 2 Οι 3 κύριες κατηγορίες εφαρμογών της ηλιακής ενέργειας.....	21
Εικόνα 3 Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα.....	23
Εικόνα 4 Μεγέθη ανεμογεννητριών και απόδοση ισχύος κάθε τύπου.....	25
Εικόνα 5 Καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας.....	26
Εικόνα 6 Προφίλ ηλεκτρικής ενέργειας.....	40
Εικόνα 7 Προφίλ θερμικής ενέργειας.....	41
Εικόνα 8 Μοντέλο προβλεπτικού ελέγχου (MPC).....	45
Εικόνα 9 Προφίλ ηλεκτρικού φορτίου κατοικίας Νο1 και Νο2.....	50
Εικόνα 10 Προφίλ θερμικού φορτίου για τις κατοικίες Νο1 και Νο2.....	52
Εικόνα 11 Αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια από φωτοβολταϊκά συστήματα.....	54
Εικόνα 12 Πωληθείσα ηλεκτρική ενέργεια από φωτοβολταϊκά συστήματα.....	56
Εικόνα 13 Ηλεκτρική ενέργεια για ιδιοκατανάλωση από φωτοβολταϊκά συστήματα.....	58
Εικόνα 14 Ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται από ανεμογεννήτρια για δύο διαφορετικές κατοικίες.....	60
Εικόνα 15 Πωληθείσα ηλεκτρική ενέργεια από ανεμογεννήτρια για δύο διαφορετικές κατοικίες.....	62
Εικόνα 16 Ηλεκτρική ενέργεια για ιδιοκατανάλωση από ανεμογεννήτρια για δύο διαφορετικές κατοικίες.....	64
Εικόνα 17 Ηλεκτρική ενέργεια που πωλείται από EV (ηλεκτρικά οχήματα) για δύο διαφορετικές κατοικίες.....	67
Εικόνα 18 Ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται από τα ηλεκτρικά οχήματα (EV) για δύο διαφορετικές κατοικίες.....	69
Εικόνα 19 Αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια από τη CHP(συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας) για δύο διαφορετικές κατοικίες.....	71
Εικόνα 20 Ηλεκτρική ενέργεια που πωλείται από CHP (συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας) για δύο διαφορετικές κατοικίες.....	73
Εικόνα 21 Ηλεκτρική ενέργεια για ιδιοκατανάλωση με συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας για δύο διαφορετικές κατοικίες.....	75
Εικόνα 22 Εξέλιξη της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας για δύο διαφορετικές κατοικίες.....	77
Εικόνα 23 είσοδος και έξοδος θερμότητας από την αποθήκη της δεξαμενής θερμότητας για δύο διαφορετικές κατοικίες.....	79
Εικόνα 24 Ώρες λειτουργίας CHP (Combined Heat and Power) για δύο διαφορετικές κατοικίες.....	81
Εικόνα 25 Στιγμές εκκίνησης και διακοπής λειτουργίας της CHP (συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας) για δύο διαφορετικές κατοικίες ...	83
Εικόνα 26 Ώρες εκκίνησης CHP (συνδυασμένη θερμότητα και ισχύς) για δύο διαφορετικές κατοικίες.....	85
Εικόνα 27 Πραγματικές ώρες λειτουργίας CHP (Combined Heat and Power) για δύο διαφορετικές κατοικίες.....	87
Εικόνα 28 Χρονική παρατήρηση της ενέργειας του λέβητα θέρμανσης για δύο διαφορετικές κατοικίες.....	89

Εικόνα 29 συνολική ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται στην κεντρική δεξαμενή αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας	91
Εικόνα 30 Συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (CHP)	93
Εικόνα 31 Ηλεκτρική ενέργεια που ανταλλάσσεται με το δίκτυο.....	95
Εικόνα 32 Συνολική θερμότητα που αποθηκεύεται στη δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας.....	97
Εικόνα 33 Απεικόνιση των αρχείων του project MPC (Model Predictive Control) ...	98

Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1] Alberto Bemporad, Manfred Morari. (1999). Control of systems intergating logic, dynamics, and constraints. *Journal of Automatica*, 35, pp. 407-427
- [2] Carbon Tax Center. (2010). *Where Carbon is Taxed*. Retrieved from www.carbontax.org.
- [3] Di Zhang, Nilay Shah, Lazaros G. Papageorgiou. (2013). Energy Conversion and Management, pp. 209-222, Retrieved from www.elsevier.com/locate/enconman
- [4] E.D. Mehleri, H.Sarimveis, N.C. Markatos, L.G. Papageorgiou. (2013). Optimal design and operation of distributed energy systems: Application to Greek residential sector. *Journal of Renewable Energy*, 51, pp. 331-342.
- [5] E.D. Mehleri, L.G. Papageorgiou, N.C. Markatos, H.Sarimveis. Model Predictive Control for Residential Microgrids-Application to a Neighbourhood Level-Greece
- [6] E.D. Mehleri, H.Sarimveis, L.G. Papageorgiou , N.C. Markatos. Model Predictive Control of Distributed Energy Resources
- [7] Eugenia D.Mehleri, Haralambos Sarimveis, Nikolaos C. Markatos, Lazaros G. Papageorgiou. (2012). A mathematical programming approach for optimal design of distributed energy systems at the neighbourhood level. *Journal of Energy*, 44, pp. 96-104
- [8] H. Paul Williams. (2013). Model Building in Mathematical Programming, Fifth Edition
- [9] Johan Lofberg. (2004). YALMIP: A toolbox modeling and optimization in MATLAB. Switzerland
- [10] Leary J., A. While, R. Howell, “Locally manufactured wind power technology for sustainable rural electrification”, *Energy Policy*, vol.43, pp. 173-183, 2012
- [11] M.Houwing. (2010). Smart Heat and Power Utilizing the Flexibility of Micro Cogeneration
- [12] Miadreza Shafie-khah, Morteza Vahid-Ghavidel, Marialaura Di Somma, Giorgio Graditi, Pierluigi Siano, Joao P.S. Catalao. (2019). Management of renewable-based multi-energy microgrids in the presence of electric vehicles. *Journal of Renewable Power Generation*

- [13] Oguzhan Kaya. (2020). Hierarchical MPC for Energy Management of Multi-Energy Systems
- [14] Shahzad U., “The Need For Renewable Energy Sources”, *International Journal of Information Technology and Electrical Engineering*, 2015
- [15] Tom M. Cavalier, Panos M. Pardalos, Allen L. Soyster. (1990). Modeling and integer programming techniques applied to propositional calculus. *Journal of Computers Opns Res.*, Vol. 17, No. 6, pp.561-570
- [16] Winfried H., “PV solar electricity industry: Market growth and perspective”, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol.90, pp. 3285-3311, 2006
- [17] Yahong Chen, Changhong Deng, Dinglin Li, Man Chen. (2020). Quantifying cumulative effects on energy storage SOC and application of Hybrid-MPC approach to microgrid. *Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 117
- [18] Yan Zhang, Fanlin Meng, Rui Wang, Wanlu Zhu, Xiao-Jun Zeng. (2018). A Stochastic MPC based Approach to Integrated Energy Management in Microgrids. *Journal of Sustainable Cities and Society*
- [19] Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής. (2010). *Νόμος 3851/2010, Επιτάχυνση της ανάπτυξης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και άλλες διατάξεις σε θέματα αρμοδιότητας του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, Άρθρο 5*. Retrieved from www.ypeka.gr.
- [20] Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού Α.Ε. (2010). *Οικιακά τιμολόγια*. Retrieved from www.dei.gr.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

Εναποθετήριο κώδικα υλοποίησης και ανάλυσης του μικροδικτύου.

Αρχείο Main.m

```
%-----  
%           Centralized Model Predictive Control  
%           (Residential Microgrids)  
%-----  
%Program Sumarry  
%In this program an MPC formulation for microgrids using RES is designed.  
%For the optimization problem formulation, binary variables are used.  
%  
yalmip ('clear')  
close all;  
clear all; clc  
  
%% Input Data  
Inputs  
%% Optimization Problem Variable Declaration  
DecisionVars  
%% MAIN PRG  
Init  
  
for t=1:N_sim  
  
    Optimization  
  
    StateUpdate  
  
    StoreSolution  
end  
  
%% Diagnostics output  
if Diag==0  
    disp('No infeasibility issues!!!')  
else  
    disp('Something has gone terribly wrong')  
end  
  
Results  
  
dlgDisplayRes = questdlg('Do you want to display the obtained results',  
'Display Results', 'Yes', 'No', 'No');  
if strcmp(dlgDisplayRes, 'Yes')  
    Figures  
end
```

Αρχείο Inputs.m

```
dlgDataInputs = questdlg('Is this the first run or any Input Data change  
made', 'Input Data', 'Yes', 'No', 'No');  
  
if strcmp(dlgDataInputs, 'Yes')  
    Input_Data = xlsread('Data.xlsx', 'Input_Data', 'A1:CW132');  
    save Input_Data  
end  
  
load Input_Data  
  
dwel_num = 2; % Number of  
dwellings  
plpos_num = 2; % Number of  
positions in the parking lot  
  
A = Input_Data(1:10,2);  
E = Input_Data(28,6:101)';  
D = Input_Data(29,6:101)';  
S = Input_Data(30,6:101)';  
Arr1 = Input_Data(31,6:101)';  
Arr2 = Input_Data(32,6:101)';  
ev1 = Input_Data(33,6:101)';  
ev2 = Input_Data(34,6:101)';  
dep1 = Input_Data(35,6:101)';  
dep2 = Input_Data(36,6:101)';  
B = Input_Data(1:1+dwel_num-1,6:101);  
C = Input_Data(14:14+dwel_num-1,6:101);  
  
N_c = Input_Data(63,3); % Control Horizon  
N_sim = Input_Data(62,3); % Simulation  
Horizon  
d = Input_Data(64,3); % discretization  
time  
Y_1 = ones(dwel_num,1); % Column matrix of  
all ones  
Y_2 = ones(plpos_num,1); % Column matrix of  
all ones  
  
% EV input data  
n_ch = Input_Data(120,7); % Efficiency of EV  
battery charge  
n_dch = Input_Data(121,7); % Efficiency of EV  
battery discharge  
Num_EV = Input_Data(122,7); % Number of EV in  
every dwelling  
SOCmax = Input_Data(123,7); % Max state of  
charge of the EV  
SOCmin = Input_Data(124,7); % Min state of  
charge of the EV  
Pmax = Input_Data(126,7); % Max charging  
power of EV in the parking lot
```

```

SOCarr1 = [Arr1; Arr1(1:N_c)];
SOCarr2 = [Arr2; Arr2(1:N_c)];
SOCarr = [SOCarr1, SOCarr2]; % State of charge
of EV for every t that arrives in the parking lot
EV1 = [ev1; ev1(1:N_c)]; % Binary value that
confirms if the EV is charging/discharging based on the fact that there can
be only 2 EV in the PL
EV2 = [ev2; ev2(1:N_c)]; % Binary value that
confirms if the EV is charging/discharging based on the fact that there can
be only 2 EV in the PL
EV = [EV1, EV2];
SOCdep1 = [dep1; dep1(1:N_c)];
SOCdep2 = [dep2; dep2(1:N_c)];
SOCdep = [SOCdep1, SOCdep2]; % State of charge
of EV for every t that departs from the parking lot
P_EV_Sal = Input_Data(127,7); % Price of selling
excess electricity from EV, €/kWh

CLoad_Elec = [B B(:,1:N_c)]; % Customer
electricity load for every dwelling i at period t, kW
CLoad_Heat = [C C(:,1:N_c)]; % Customer heat
load for every dwelling i at period t, kW

% General Problem Parameters (Constants)
A_PV = Input_Data(70:70+dwel_num-1,1); % Surface of the PV
panels in every dwelling i, m^2
Num_Turbines = Input_Data(70:70+dwel_num-1,5); % Number of Wind
turbines in every dwelling i
CI_Elec = Input_Data(56,3); % Carbon intensity
of electricity, kg CO2/kWh electricity
CI_Gas = Input_Data(57,3); % Carbon intensity
of natural gas, kg CO2/kWh natural gas
c1 = Input_Data(51,3); % Charge loss of
the electrical storage tank

C_OM_B = Input_Data(46,3); % Operational and
maintenance cost of boiler, €/kWh
C_OM_Est = Input_Data(48,3); % Operational and
maintenance cost of electrical storage tank, €/kWh
C_OM_Hst = Input_Data(54,3); % Operational and
maintenance cost of heat storage tank, €/kWh
CP_Rat = Input_Data(70:70+dwel_num-1,2); % Rated capacity of
the PV panels, kW/ m^2
CW_Rat = Input_Data(70:70+dwel_num-1,6); % Rated capacity of
the Wind turbine, kW/ turbine
CT = Input_Data(58,3); % Carbon tax of
CO2, €/kg
d1 = Input_Data(52,3); % Discharge loss of
the electrical storage tank
DRH = Input_Data(121:121+dwel_num-1,1); % Upper bound on
the decrease of the heat stored in the storage tank for dwelling i between
two consecutive periods
DRE = Input_Data(49,3); % Upper bound on
the decrease of the electricity stored in the electricity tank between two
consecutive periods
DT_max = Input_Data(83:83+dwel_num-1,1); % Number of
consecutive time periods the CHP unit i must be shut-down after stopping

```



```

e = Input_Data(121:121+dwel_num-1,3); % Heat loss
coefficient in the heat storage tank, kWh/h
E_CHP_max = Input_Data(83:83+dwel_num-1,4); % Upper bound on
energy generated by the CHP unit i, kW
E_CHP_min = Input_Data(83:83+dwel_num-1,5); % Lower bound on
energy generated by the CHP unit i, kW
ES_EST_max = Input_Data(53,3); % Upper bound on
electricity stored in the electrical storage tank, kW
F_Gas = Input_Data(83:83+dwel_num-1,6); % Natural gas
consumed by CHP unit i during start-up, KW
HER = Input_Data(83:83+dwel_num-1,7); % Heat to
electricity ratio
H_B_min = Input_Data(96:96+dwel_num-1,2); % Lower bound on
heat generated by the boiler for every dwelling i, kW
H_B_max = Input_Data(96:96+dwel_num-1,1); % Upper bound on
heat generated by the boiler for every dwelling i, kW
H_HST_max = A(1:dwel_num); % Upper bound on
heat stored in the heat storage tank for every dwelling i, kW
M = Input_Data(59,3); % Upper bound for
selling electrical energy to the Grid
N = Input_Data(60,3); % Upper bound for
the electrical storage charging procedure
n_th_B = Input_Data(47,3); % Thermal
efficiency of the boiler, %
n_e_CHP = Input_Data(83:83+dwel_num-1,8); % Electrical
efficiency of the CHP unit, %
n_e_PV = Input_Data(70:70+dwel_num-1,3); % Electrical
efficiency of the PV panel, %
n_e_Wind = Input_Data(70:70+dwel_num-1,7); % Electrical
efficiency of the Wind turbine, %
It = [D; D(1:N_c)]; % Irradiance at
period t , kW/ m^2
Speed = [S; S(1:N_c)]; % Wind speed at
period t , mph
P_Elec = [E; E(1:N_c)]; % Grid electricity
price at period t, €/kWh
P_Gas = Input_Data(61,3); % Natural gas
price, €/KWh
P_CHP_Sal = Input_Data(45,3); % Price of selling
excess electricity from CHP, €/kWh
P_PV_Sal = Input_Data(44,3); % Price of selling
excess electricity from PV, €/kWh
P_Wind_Sal = Input_Data(66,3); % Price of selling
excess electricity from Wind turbine, €/kWh
ST_max = Input_Data(83:83+dwel_num-1,2); % Number of
consecutive time periods the CHP unit i must be in operation but still in
start-up mode after start-up
tr1 = Input_Data(65,3); % Transmission line
losses
URH = Input_Data(121:121+dwel_num-1,2); % Upper bound on
the increase of the heat stored in the storage tank for dwelling i between
two consecutive periods
URE = Input_Data(50,3); % Upper bound on
the increase of the electricity stored in the electricity tank between two
consecutive periods
UT_max = Input_Data(83:83+dwel_num-1,3); % Number of
consecutive time periods the CHP unit i must be in operation after start-up

```

Αργείο DecisionVars.m

```
% Cost related decision vars
C_Grid_Pur = sdpvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));           % Total
cost for purchased electricity, €
% cellfun(@(x) disp(value(x)), C_Grid_Pur)
C_CHP_Op = sdpvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));           %
Operational cost of CHP, €
C_B_Op = sdpvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));           %
Operational cost of boiler, €
C_Carb_Tax = sdpvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));         % Total
environmental cost, €
C_EST = sdpvar(repmat(1,1,N_c),repmat(1,1,N_c));                   %
Operational cost of electricity storage tankt, €
C_HST = sdpvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));           %
Operational cost of heat storage tankt, €
C_CHP_Sal = sdpvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));         %
Income from selling electricity to the grid from the CHP units, €
C_PV_Sal = sdpvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));         %
Income from selling electricity to the grid from the PV units, €
C_Wind_Sal = sdpvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));        %
Income from selling electricity to the grid from the Wind turbine system, €

C_EV_Sal = sdpvar(repmat(plpos_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));         %
Income from selling electricity to the grid from the EV,€

Pch = sdpvar(repmat(plpos_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));             % kWh
of EV charging

Pdch = sdpvar(repmat(plpos_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));           % kWh
of EV discharging

% Energy related decision vars
E_Grid = sdpvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));           %
Purchased electricity from the grid for every dwelling i at period t, kW
E_CHP_Sal = sdpvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));         %
Excess electricity sold from CHP unit for every dwelling i at period h, kW
E_CHP_Self = sdpvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));        %
Electricity generated for self-use from CHP unit for every dwelling i at
period t, kW
E_CHP_Sto = sdpvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));         %
Electricity stored from CHP unit for every dwelling i at period t ,kW
E_CHP_Tra = sdpvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));         %
Electricity delivered from CHP unit through electyricity transmission lines
for every dwelling i at period t, kW
E_PV_Sal = sdpvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));         %
Excess electricity sold from PV for every dwelling i at period t, kW
E_PV_Self = sdpvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));        %
Electricity generated for self-use from PV for every dwelling i at period
t, kW
E_PV_Sto = sdpvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));         %
Electricity stored from PV for every dwelling i at period t, kW
E_PV_Tra = sdpvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));         %
Electricity delivered from PV through electyricity transmission lines for
every dwelling i at period t, kW
```

```

E_Wind_Sal = sdpvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));           %
Excess electricity sold from Wind turbine for every dwelling i at period t,
kW
E_Wind_Self = sdpvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));         %
Electricity generated for self-use from Wind turbine for every dwelling i
at period t, kW
E_Wind_Sto = sdpvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));         %
Electricity stored from Wind turbine for every dwelling i at period t, kW
E_Wind_Tra = sdpvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));         %
Electricity delivered from Wind turbine through electyricity transmission
lines for every dwelling i at period t, kW
E_OUT_Est = sdpvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));         %
Electricity released by the electricity storage tank to meet the
electricity load for every dwelling i at period t, kW
ES_STO = sdpvar(repmat(1,1,N_c),repmat(1,1,N_c));                   %
Electricity stored in the electricity storage tank at period t, kWh
H_B = sdpvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));               %
Generated heat by the boiler for every dwelling i at period t, kW
H_IN_Hst = sdpvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));         %
Excess heat stored at the storage tank for every dwelling i at period t ,
kW
H_OUT_Hst = sdpvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));         % Heat
released by the storage tank for every dwelling i at period t to meet the
heating load, kW
H_STO = sdpvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));             % Total
heat stored at the storage tank for every dwelling i at period t , kWh

E_SOCev = sdpvar(repmat(plpos_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));         % State
of charge of each electrical vehicle , kWh

W_sum = sdpvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));
% cellfun(@(x) disp(value(x)), W_sum)
Z_sum = sdpvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));
X_sum = sdpvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));

% Binary vars
V = binvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));                 % 1 if
dwelling i may sell excess electricity to the grid at period t; 0 if it may
buy from the grid
W = binvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));                 % 1 if
the CHP unit in dwelling i is in operation during period t; 0 otherwise
X = binvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));                 % 1 if
the CHP unit in dwelling i shuts down in period t; 0 otherwise
Y = binvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));                 % 1 if
the CHP unit in dwelling i starts up in period t; 0 otherwise
Z = binvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));                 % 1 if
the CHP unit in dwelling i is in operation but still in start-up mode
during period t; 0 otherwise
Y_Elec = binvar(repmat(1,1,N_c),repmat(1,1,N_c));                   % 1 if
electricity is stored in the electrical storage tank at period t; 0 if
electricity is extracted from the electricity storage tank at period t

CH = binvar(repmat(plpos_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));               % 1 if
the EV in dwelling i is charging during period t; 0 otherwise
DCH = binvar(repmat(plpos_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));             % 1 if
the EV in dwelling i is discharging in period t; 0 otherwise

```

```
U = binvar(repmat(dwel_num,1,N_c),repmat(1,1,N_c));
```

Αργείο Optimization.m

```
constraints = [];  
C_Total = 0;  
  
for k=1:N_c  
  
    % Objective Function  
    C_Total = C_Total + d * (Y_1' * (C_Grid_Pur{k} + C_CHP_Op{k} +  
C_B_Op{k} + C_Carb_Tax{k} + C_HST{k} - C_CHP_Sal{k} - C_PV_Sal{k} -  
C_Wind_Sal{k}) - Y_2' * C_EV_Sal{k} + C_EST{k});  
  
    constraints = [constraints, C_Grid_Pur{k} == E_Grid{k} * P_Elec(t+k-  
1,1), 0 <= C_Grid_Pur{k}];  
    constraints = [constraints, C_CHP_Op{k} == ((E_CHP_Sal{k} +  
E_CHP_Sto{k} + E_CHP_Self{k}) .* (P_Gas ./ n_e_CHP) + (Z{k} .* F_Gas) .*  
P_Gas) , 0 <= C_CHP_Op{k}];  
    constraints = [constraints, C_B_Op{k} == H_B{k} * (P_Gas/n_th_B), 0 <=  
C_B_Op{k}];  
    constraints = [constraints, C_Carb_Tax{k} == CT * ((E_Grid{k} *  
CI_Elec) + (((E_CHP_Sal{k} + E_CHP_Sto{k} + E_CHP_Self{k}) ./ n_e_CHP) +  
(H_B{k} ./ n_th_B) + Z{k} .* F_Gas) * CI_Gas), 0 <= C_Carb_Tax{k}];  
    constraints = [constraints, C_CHP_Sal{k} == E_CHP_Sal{k} * P_CHP_Sal, 0  
<= C_CHP_Sal{k}];  
    constraints = [constraints, C_PV_Sal{k} == E_PV_Sal{k} * P_PV_Sal, 0 <=  
C_PV_Sal{k}];  
    constraints = [constraints, C_Wind_Sal{k} == E_Wind_Sal{k} *  
P_Wind_Sal, 0 <= C_Wind_Sal{k}];  
  
    constraints = [constraints, C_EV_Sal{k} == Pdch{k} * P_EV_Sal, 0 <=  
C_EV_Sal{k}];  
  
    constraints = [constraints, C_EST{k} == C_OM_Est * ES_STO{k}, 0 <=  
C_EST{k}];  
    constraints = [constraints, C_HST{k} == C_OM_Hst * H_STO{k}, 0 <=  
C_HST{k}];  
  
    % Supply-Demand Relationships  
    constraints = [constraints, CLoad_Elec(:,t+k-1) == E_Grid{k} +  
E_OUT_Est{k} + E_CHP_Self{k} + E_PV_Self{k} + E_Wind_Self{k}];  
    constraints = [constraints, CLoad_Heat(:,t+k-1) + H_IN_Hst{k} -  
H_OUT_Hst{k} == H_B{k} + (E_CHP_Sal{k} + E_CHP_Sto{k} + E_CHP_Self{k}) .*  
HER];  
  
    % Grid Interaction Constraints  
    % The following constraints are set to prohibit the customer from  
buying and  
    % selling energy at the same time  
    constraints = [constraints, E_CHP_Sal{k} + E_PV_Sal{k} + E_Wind_Sal{k}  
+ Pdch{k} <= M .* V{k}];  
    constraints = [constraints, E_Grid{k} <= CLoad_Elec(:,t+k-1)' * (1 -  
V{k})];  
  
    % CHP Unit & Heat Storage Tank & Electricity Storage  
    constraints = [constraints, 0 <= E_CHP_Sal{k}, 0 <= E_CHP_Self{k}, 0 <=  
E_CHP_Sto{k}];  
    constraints = [constraints, 0 <= E_PV_Sal{k}, 0 <= E_PV_Sto{k}, 0 <=  
E_PV_Self{k}];  
end
```

```

constraints = [constraints, 0 <= E_Wind_Sal{k}, 0 <= E_Wind_Sto{k}, 0
<= E_Wind_Self{k}];

constraints = [constraints, 0 <= E_OUT_Est{k}, 0 <= ES_STO{k}];
constraints = [constraints, 0 <= H_B{k}, 0 <= H_IN_Hst{k}, 0 <=
H_OUT_Hst{k}, 0 <= H_STO{k}];

if (parsum(k+t-1,1) == 0)
    Pmax_used(:,1) = 0;
elseif (parsum(k+t-1,1) == 1)
    if EV(k+t-1,1) == 1
        Pmax_used(1,1) = Pmax;
        Pmax_used(2,1) = 0;
    end
    if EV(k+t-1,2) == 1
        Pmax_used(1,1) = 0;
        Pmax_used(2,1) = Pmax;
    end
else
    Pmax_used(:,1) = Pmax/2;
end

if k==1 % Initialization of binary vars at the beginning of every
iteration
    constraints = [constraints, H_STO{k} == (1-e) .* H_STO_0 + d *
(H_IN_Hst{k} - H_OUT_Hst{k})];
    constraints = [constraints, -DRH(:,1) <= H_STO{k} - H_STO_0 <=
URH(:,1)];
    constraints = [constraints, ES_STO{k} == ES_STO_0 + d * (1-c1) *
(Y_1' * (E_CHP_Sto{k} + E_PV_Sto{k} + E_Wind_Sto{k} - (E_OUT_Est{k}./(1-
d1))))];
    constraints = [constraints, -DRE(:,1) <= ES_STO{k} - ES_STO_0 <=
URE(:,1)];
    constraints = [constraints, E_SOCEv{k} == (E_SOCEv_Last+
(d*n_ch*Pch{k}) - (d*Pdch{k}/n_dch) + SOCarr(k+t-1,:))' .* EV(k+t-1,:)'];

    constraints = [constraints, W{k} - W_0 == Y{k} - X{k}];

else
    constraints = [constraints, H_STO{k} == (1-e) .* H_STO{k-1} + d *
(H_IN_Hst{k} - H_OUT_Hst{k})];
    constraints = [constraints, -DRH(:,1) <= H_STO{k} - H_STO{k-1} <=
URH(:,1)];
    constraints = [constraints, ES_STO{k} == ES_STO{k-1} + d * (1-c1) *
(Y_1' * (E_CHP_Sto{k} + E_PV_Sto{k} + E_Wind_Sto{k} - (E_OUT_Est{k}./(1-
d1))))];
    constraints = [constraints, -DRE <= ES_STO{k} - ES_STO{k-1} <= URE];
    constraints = [constraints, E_SOCEv{k} == (E_SOCEv{k-1} +
(d*n_ch*Pch{k}) - (d*Pdch{k}/n_dch) + SOCarr(k+t-1,:))' .* EV(k+t-1,:)'];
    constraints = [constraints, W{k} - W{k-1} == Y{k} - X{k}];

end
constraints = [constraints, H_STO{k} <= H_HST_max(:,1)];
constraints = [constraints, ES_STO{k} <= ES_EST_max];
constraints = [constraints, Y_1' * (E_CHP_Sto{k} + E_PV_Sto{k} +
E_Wind_Sto{k}) <= N * Y_Elec{k}];
constraints = [constraints, Y_1' * E_OUT_Est{k} <= N * (1-Y_Elec{k})];

```

```

constraints = [constraints, Y{k} + X{k} <= 1];
constraints = [constraints, (U{k}) .* E_CHP_min(:,1) <= E_CHP_Sal{k} +
E_CHP_Sto{k} + E_CHP_Self{k}, E_CHP_Sal{k} + E_CHP_Sto{k} + E_CHP_Self{k}
<= (U{k}) .* E_CHP_max(:,1)];
constraints = [constraints, W{k}+(1-Z{k})-2*U{k}>=0, W{k}+(1-Z{k})-
U{k}<=1];

for dwel = 1:dwel_num
    if k<=N_c-UT_max(dwel,1)
        for j = 0:(UT(dwel,1)-1)
            if UT(dwel,1) == UT_max(dwel,1)
                constraints = [constraints, (1-Y{1,k}(dwel,1)) +
W{1,k+j}(dwel,1) >= 1];
            else
                if k == 1
                    constraints = [constraints, (1-W_0) +
W{1,k+j}(dwel,1) >= 1];
                else
                    constraints = [constraints, (1-W{1,k}(dwel,1)) +
W{1,k+j}(dwel,1) >= 1];
                end
            end
        end
    else
        for j = 0:N_c-k
            constraints = [constraints, (1-Y{k}) + W{k+j} >= 1];
        end
    end

    if k<=N_c-ST_max(dwel,1)
        for j = 0:(ST(dwel,1)-1)
            if ST(dwel,1) == ST_max(dwel,1)
                constraints = [constraints, (1-Y{1,k}(dwel,1)) +
Z{1,k+j}(dwel,1) >= 1];
            else
                if k == 1
                    constraints = [constraints, (1-Z_0) +
Z{1,k+j}(dwel,1) >= 1];
                else
                    constraints = [constraints, (1-Z{1,k}(dwel,1)) +
Z{1,k+j}(dwel,1) >= 1];
                end
            end
        end
    else
        for j = 0:N_c-k
            constraints = [constraints, (1-Y{k}) + Z{k+j} >= 1];
        end
    end

    if k<=N_c-DT_max(dwel,1)
        for j = 0:(DT(dwel,1)-1)
            if DT(dwel,1) == DT_max(dwel,1)
                constraints = [constraints, (X{1,k}(dwel,1)) +
W{1,k+j}(dwel,1) <= 1];
            else
                if k == 1
                    constraints = [constraints, -W_0 + W{1,k+j}(dwel,1)
<= 0];
                end
            end
        end
    end
end

```

```

        end
    end
end
else
    for j = 0:N_c-k
        constraints = [constraints, X{k} + W{k+j} <= 1];
    end
end
end

% Back-up Boiler
constraints = [constraints, H_B_min(:,1) <= H_B{k} <= H_B_max(:,1)];

% PV Array
constraints = [constraints, E_PV_Sal{k} + E_PV_Sto{k} + E_PV_Self{k} <=
A_PV(:,1) .* It(k+t-1,1) .* n_e_PV];
constraints = [constraints, E_PV_Sal{k} + E_PV_Sto{k} + E_PV_Self{k} <=
A_PV(:,1) .* CP_Rat];

% Wind System
constraints = [constraints, E_Wind_Sal{k} + E_Wind_Sto{k} +
E_Wind_Self{k} <= Num_Turbines(:,1) .* Speed(k+t-1,1) .* n_e_Wind];
constraints = [constraints, E_Wind_Sal{k} + E_Wind_Sto{k} +
E_Wind_Self{k} <= Num_Turbines(:,1) .* CW_Rat];

if Speed(k+t-1,:) > 30
    constraints = [constraints, E_Wind_Sto{k} == E_Wind_Sto_0];
    constraints = [constraints, E_Wind_Sal{k} == E_Wind_Sal_0];
    constraints = [constraints, E_Wind_Self{k} == E_Wind_Self_0];
end

% EV

%% Calculating the power of charging/discharging of every EV in
accordance with the number of EVs that are present in the PL

constraints = [constraints, CH{k} + DCH{k} <= ones(plpos_num,1)];
%Eq.49 from paper
constraints = [constraints, CH{k} >= zeros(plpos_num,1)];
constraints = [constraints, DCH{k} >= zeros(plpos_num,1)];
constraints = [constraints, zeros(plpos_num,1) <= Pch{k}, Pch{k} <=
CH{k}.*Pmax_used]; %Eq.52 from paper
constraints = [constraints, zeros(plpos_num,1) <= Pdch{k}, Pdch{k} <=
DCH{k}.*Pmax_used]; %Eq.53 from paper
constraints = [constraints, SOCmin .* EV(k+t-1,:) <= E_SOCev{k},
E_SOCev{k} <= SOCmax .* EV(k+t-1,:)]; %Eq. 50 from paper

end

constraints = [constraints, H_STO_0 == H_STO{N_c}];
constraints = [constraints, ES_STO_0 == ES_STO{N_c}];

%options = sdpsettings('solver', 'mosek', 'mosek.MSK_IPAR_OPTIMIZER',
'MSK_OPTIMIZER_MIXED_INT');
options = sdpsettings('solver', 'gurobi');
controller = optimize(constraints, C_Total, options);

% Optimization diagnostics for mosek solver
if controller.problem == 0

```



```

    Diag(1,t) = 0; %Problem is feasible
elseif controller.problem == 1 %Problem is infeasible
    Diag(1,t) = 1;
else
    Diag(1,t) = 2;%Something else happened
end

%disp(yalmiperror(controller.problem));

%check for is NaN in a loop
for i = 1:numel(X)
    X_numeric = value(X{i}); % Convert sdpvar to numeric
    %disp(['Numeric values in cell ', num2str(i), ' of X:']);
    %disp(X_numeric)
    if any(isnan(X_numeric))
        %disp(['Cell ', num2str(i), ' in X contains NaN values']);
    end
end
end

```

Αρχείο StateUpdate.m

```
% Store to local vars the initialization vector for the next

%check for is NaN in a loop
for i = 1:numel(Y)
    Y_numeric = value(Y{i}); % Convert sdpvar to numeric
    %disp(['Numeric values in cell ', num2str(i), ' of Y:']);
    %disp(Y_numeric)
    if any(isnan(Y_numeric))
        %disp(['Cell ', num2str(i), ' in Y contains NaN values']);
    end
end

% optimization call

H_STO_0 = value(H_STO{1});
ES_STO_0 = value(ES_STO{1});
W_0 = value(W{1});
X_0 = value(X{1});
Y_0 = value(Y{1});
Z_0 = value(Z{1});
U_0 = value(U{1});

CH_Last = value(CH{1});
DCH_Last = value(DCH{1});
E_S0Cev_Last = value(E_S0Cev{1});

% The following are needed to indicate whether the CHP needs to be in
% start-up or shut-down procedure at the beginning of the next control
% horizon

W_opt(:,t) = W_0;
Z_opt(:,t) = Z_0;
Y_opt(:,t) = Y_0;
X_opt(:,t) = X_0;
U_opt(:,t) = U_0;

CHP_op = zeros(dwel_num,1);
CHP_startup = zeros(dwel_num,1);
CHP_shutdown = zeros(dwel_num,1);

for z = 1:dwel_num
    if t-UT_max(z,1)<=0
        for v = t:-1:1
            %if ~isnan(Y_opt(z,v)) && Y_opt(z,v)
            if Y_opt(z,v)
                CHP_op(z,1) = 1;
            end
        end
    else
        for v = t:-1:(t-UT_max(z,1))
            %if ~isnan(Y_opt(z,v)) && Y_opt(z,v) > 0.5
            if Y_opt(z,v) > 0.5
                CHP_op(z,1) = 1;
            end
        end
    end
end
```

```

end
if t-ST_max(z,1)<=0
    for v = t:-1:1
        if Y_opt(z,v) > 0.5
            CHP_startup(z,1) = 1;
        end
    end
else
    for v = t:-1:(t-ST_max(z,1))
        if Y_opt(z,v) > 0.5
            CHP_startup(z,1) = 1;
        end
    end
end
if t-DT_max(z,1)<=0
    for v = t:-1:1
        if X_opt(z,v) > 0.5
            CHP_shutdown(z,1) = 1;
        end
    end
else
    for v = t:-1:(t-DT_max(z,1))
        if X_opt(z,v) > 0.5
            CHP_shutdown(z,1) = 1;
        end
    end
end

if CHP_op(z,1) > 0.5
    if UT(z,1)> 0.5
        UT(z,1) = UT(z,1) - 1;
    else
        UT(z,1) = UT_max(z,1);
    end
    CHP_op(z,1) = 0;
end
if CHP_startup(z,1) > 0.5
    if ST(z,1)> 0.5
        ST(z,1) = ST(z,1) - 1;
    else
        ST(z,1) = ST_max(z,1);
    end
    CHP_startup(z,1) = 0;
end
if CHP_shutdown(z,1) > 0.5
    if DT(z,1)> 0.5
        DT(z,1) = DT(z,1) - 1;
    else
        DT(z,1) = DT_max(z,1);
    end
    CHP_shutdown(z,1) = 0;
end
end
end

```

Αρχείο StoreSolution.m

% Store current solution of the optimization problem.

```
E_PV_Self_opt(:,t) = value(E_PV_Self{1});
E_PV_Sto_opt(:,t) = value(E_PV_Sto{1});
E_PV_Sal_opt(:,t) = value(E_PV_Sal{1});
E_Wind_Self_opt(:,t) = value(E_Wind_Self{1});
E_Wind_Sto_opt(:,t) = value(E_Wind_Sto{1});
E_Wind_Sal_opt(:,t) = value(E_Wind_Sal{1});
C_Grid_Pur_opt(:,t) = value(C_Grid_Pur{1});
C_Carb_Tax_opt(:,t) = value(C_Carb_Tax{1});
C_PV_Sal_opt(:,t) = value(C_PV_Sal{1});
C_Wind_Sal_opt(:,t) = value(C_Wind_Sal{1});
Y_Elec_opt(:,t) = value(Y_Elec{1});
E_OUT_Est_opt(:,t) = value(E_OUT_Est{1});
E_Grid_opt(:,t) = value(E_Grid{1});
ES_STO_opt(:,t) = value(ES_STO{1});
C_EST_opt(:,t) = value(C_EST{1});

E_EV_Self_opt(:,t) = value(Pch{1});
E_EV_Sal_opt(:,t) = value(Pdch{1});
E_SOCEv_opt(:,t) = value(E_SOCEv{1});
C_EV_Sal_opt(:,t) = value(C_EV_Sal{1});

Pch_opt(:,t) = value(Pch{1});
Pdch_opt(:,t) = value(Pdch{1});

E_CHP_Self_opt(:,t) = value(E_CHP_Self{1});
E_CHP_Sto_opt(:,t) = value(E_CHP_Sto{1});
E_CHP_Sal_opt(:,t) = value(E_CHP_Sal{1});
C_CHP_Sal_opt(:,t) = value(C_CHP_Sal{1});
C_CHP_Op_opt(:,t) = value(C_CHP_Op{1});
H_IN_Hst_opt(:,t) = value(H_IN_Hst{1});
H_OUT_Hst_opt(:,t) = value(H_OUT_Hst{1});
H_STO_opt(:,t) = value(H_STO{1});
C_HST_opt(:,t) = value(C_HST{1});
C_B_Op_opt(:,t) = value(C_B_Op{1});
V_opt(:,t) = value(V{1});

H_B_opt(:,t) = value(H_B{1});
```

Αργείο Results.m

```
% Results Presentation
```

```
Total_grid_pur = (Y_1'*C_Grid_Pur_opt) * ones(N_sim,1);
Total_carb_tax = (Y_1'*C_Carb_Tax_opt) * ones(N_sim,1);
Total_PV_sal = (Y_1'*C_PV_Sal_opt) * ones(N_sim,1);
Total_Wind_sal = (Y_1'*C_Wind_Sal_opt) * ones(N_sim,1);
Total_CHP_sal = (Y_1'*E_CHP_Sal_opt) * ones(N_sim,1);

Total_EV_sal = (Y_2'*E_EV_Sal_opt) * ones(N_sim,1);

Total_sal = Total_PV_sal + Total_Wind_sal + Total_CHP_sal + Total_EV_sal;
Total_EST = C_EST_opt * ones(N_sim,1);
Total_HST = (Y_1'*C_HST_opt) * ones(N_sim,1);
Total_B_Op = (Y_1'*C_B_Op_opt) * ones(N_sim,1);
Total_CHP_Op = (Y_1'*C_CHP_Op_opt) * ones(N_sim,1);
Total_cost = Total_grid_pur + Total_carb_tax + Total_EST + Total_HST +
Total_B_Op + Total_CHP_Op - Total_PV_sal - Total_Wind_sal - Total_CHP_sal -
Total_EV_sal;
Totals = [Total_cost Total_grid_pur Total_carb_tax Total_CHP_Op Total_HST
Total_EST Total_B_Op Total_sal];

strfilrename = 'Results.xlsx';
strSpreadFirstPart = 'DwellingNo_';
for i = 1:dwel_num
    Res = [E_PV_Self_opt(i,:); E_PV_Sto_opt(i,:); E_PV_Sal_opt(i,:);
          C_Grid_Pur_opt(i,:); C_Carb_Tax_opt(i,:); C_PV_Sal_opt(i,:);
          E_OUT_Est_opt(i,:); E_Grid_opt(i,:); E_CHP_Self_opt(i,:);
          E_CHP_Sto_opt(i,:);
          E_CHP_Sal_opt(i,:); C_CHP_Sal_opt(i,:); C_CHP_Op_opt(i,:);
          H_IN_Hst_opt(i,:); H_OUT_Hst_opt(i,:); H_STO_opt(i,:);
          C_HST_opt(i,:); C_B_Op_opt(i,:); H_B_opt(i,:); W_opt(i,:);
          Z_opt(i,:); Y_opt(i,:); X_opt(i,:); V_opt(i,:); U_opt(i,:);
          E_Wind_Self_opt(i,:); E_Wind_Sto_opt(i,:); E_Wind_Sal_opt(i,:);
          C_Wind_Sal_opt(i,:);
          E_EV_Self_opt(i,:); E_EV_Sal_opt(i,:); C_EV_Sal_opt(i,:);];

    strSpreadLastPart = num2str(i);
    strSread = strcat(strSpreadFirstPart,strSpreadLastPart);
    xlswrite(strfilrename, Res, strSread, 'B2');
end
Elec_Storage = [ES_STO_opt(1,:); C_EST_opt(1,:);Y_Elec_opt(1,:)];

xlswrite(strfilrename, Elec_Storage, 'Electricity Storage Tank', 'B2');
xlswrite(strfilrename, Totals, 'Total', 'B2');
```

Αρχείο Figures.m

```
T = 0:N_sim-1;
    fig_num = 1;

    % Electricity and heat load profiles per dwelling
    figure(fig_num)
    for j = 1:dwel_num
        subplot(dwel_num,1,j);
        plot(T,CLoad_Elec(j,1:N_sim))
        %title(['Dwelling No', num2str(j), ' Electricity Load
Profile'])
        title_str = ['Dwelling No', num2str(j), ' Electricity Load
Profile'];
        title(title_str)
        saveas(gcf, [title_str, '.png'])
    end

    fig_num = fig_num + 1;
    figure(fig_num)
    for j = 1:dwel_num
        subplot(dwel_num,1,j);
        plot(T,CLoad_Heat(j,1:N_sim))
        %title(['Dwelling No', num2str(j), ' Heat Load Profile'])
        title_str = ['Dwelling No', num2str(j), ' Heat Load Profile'];
        title(title_str)
        saveas(gcf, [title_str, '.png'])
    end

    % PV

    fig_num = fig_num + 1;
    figure(fig_num)
    for j = 1:dwel_num
        subplot(dwel_num,1,j);
        plot(T,E_PV_Sto_opt(j,:))
        %title(['Dwelling No', num2str(j), ' Electricity Stored by
PV'])
        title_str = ['Dwelling No', num2str(j), ' Electricity Stored by
PV'];
        title(title_str)
        saveas(gcf, [title_str, '.png'])
    end

    fig_num = fig_num + 1;
    figure(fig_num)
    for j = 1:dwel_num
        subplot(dwel_num,1,j);
        plot(T,E_PV_Sal_opt(j,:))
        %title(['Dwelling No', num2str(j), ' Electricity Sold by PV'])
        title_str = ['Dwelling No', num2str(j), ' Electricity Sold by
PV'];
        title(title_str)
        saveas(gcf, [title_str, '.png'])
    end

    fig_num = fig_num + 1;
    figure(fig_num)
```

```

    for j = 1:dwel_num
        subplot(dwel_num,1,j);
        plot(T,E_PV_Self_opt(j,:))
        %title(['Dwelling No', num2str(j), ' Electricity for self use
by PV'])
        title_str = ['Dwelling No', num2str(j), ' Electricity for self
use by PV'];
        title(title_str)
        saveas(gcf, [title_str, '.png'])
    end

    % Wind System

    fig_num = fig_num + 1;
    figure(fig_num)
    for j = 1:dwel_num
        subplot(dwel_num,1,j);
        plot(T,E_Wind_Sto_opt(j,:))
        %title(['Dwelling No', num2str(j), ' Electricity Stored by Wind
Turbine'])
        title_str = ['Dwelling No', num2str(j), ' Electricity Stored by
Wind Turbine'];
        title(title_str)
        saveas(gcf, [title_str, '.png'])
    end

    fig_num = fig_num + 1;
    figure(fig_num)
    for j = 1:dwel_num
        subplot(dwel_num,1,j);
        plot(T,E_Wind_Sal_opt(j,:))
        %title(['Dwelling No', num2str(j), ' Electricity Sold by Wind
Turbine'])
        title_str = ['Dwelling No', num2str(j), ' Electricity Sold by
Wind Turbine'];
        title(title_str)
        saveas(gcf, [title_str, '.png'])
    end

    fig_num = fig_num + 1;
    figure(fig_num)
    for j = 1:dwel_num
        subplot(dwel_num,1,j);
        plot(T,E_Wind_Self_opt(j,:))
        %title(['Dwelling No', num2str(j), ' Electricity for self use
by Wind Turbine'])
        title_str = ['Dwelling No', num2str(j), ' Electricity for self
use by Wind Turbine'];
        title(title_str)
        saveas(gcf, [title_str, '.png'])
    end

    % EV

    fig_num = fig_num + 1;
    figure(fig_num)
    for j = 1:plpos_num
        subplot(plpos_num,1,j);

```

```

        plot(T,E_EV_Sal_opt(j,:))
        %title(['Dwelling No', num2str(j), ' Electricity Sold by EV'])
        title_str = ['Dwelling No', num2str(j), ' Electricity Sold by
EV'];
        title(title_str)
        saveas(gcf, [title_str, '.png'])
    end

    fig_num = fig_num + 1;
    figure(fig_num)
    for j = 1:plpos_num
        subplot(plpos_num,1,j);
        plot(T,E_EV_Self_opt(j,:))
        %title(['Dwelling No', num2str(j), ' Electricity used by EV'])
        title_str = ['Dwelling No', num2str(j), ' Electricity used by
EV'];
        title(title_str)
        saveas(gcf, [title_str, '.png'])
    end

    % CHP

    fig_num = fig_num + 1;
    figure(fig_num)
    for j = 1:dwel_num
        subplot(dwel_num,1,j);
        plot(T,E_CHP_Sto_opt(j,:))
        %title(['Dwelling No', num2str(j), ' Electricity Stored by CHP'])
        title_str = ['Dwelling No', num2str(j), ' Electricity Stored by
CHP'];
        title(title_str)
        saveas(gcf, [title_str, '.png'])
    end

    fig_num = fig_num + 1;
    figure(fig_num)
    for j = 1:dwel_num
        subplot(dwel_num,1,j);
        plot(T,E_CHP_Sal_opt(j,:))
        %title(['Dwelling No', num2str(j), ' Electricity Sold by CHP'])
        title_str = ['Dwelling No', num2str(j), ' Electricity Sold by
CHP'];
        title(title_str)
        saveas(gcf, [title_str, '.png'])
    end

    fig_num = fig_num + 1;
    figure(fig_num)
    for j = 1:dwel_num
        subplot(dwel_num,1,j);
        plot(T,E_CHP_Self_opt(j,:))
        %title(['Dwelling No', num2str(j), ' Electricity for self use
by CHP'])
        title_str = ['Dwelling No', num2str(j), ' Electricity for self
use by CHP'];
        title(title_str)
        saveas(gcf, [title_str, '.png'])
    end
end

```



```

% Heat Storage

fig_num = fig_num + 1;
figure(fig_num)
for j = 1:dwel_num
    subplot(dwel_num,1,j);
    plot(T, H_STO_opt(j,:))
    %title(['Dwelling No', num2str(j), ' Heat Storage Tank
evolution'])
    title_str = ['Dwelling No', num2str(j), ' Heat Storage Tank
evolution'];
    title(title_str)
    saveas(gcf, [title_str, '.png'])
end

fig_num = fig_num + 1;
figure(fig_num)
for j = 1:dwel_num
    subplot(dwel_num,1,j);
    plot(T, H_IN_Hst_opt(j,:), 'b')
    hold on
    plot(T, H_OUT_Hst_opt(j,:), '--r')
    legend('Heat In', 'Heat Out')
    %title(['Dwelling No', num2str(j), ' Heat in and out of the
heat tank storage'])
    title_str = ['Dwelling No', num2str(j), ' Heat in and out of
the heat tank storage'];
    title(title_str)
    saveas(gcf, [title_str, '.png'])
end

fig_num = fig_num + 1;
figure(fig_num)
for j = 1:dwel_num
    subplot(dwel_num,1,j);
    stem(T, W_opt(j,:))
    %title(['Dwelling No', num2str(j), ' CHP operating hours'])
    title_str = ['Dwelling No', num2str(j), ' CHP operating
hours'];
    title(title_str)
    saveas(gcf, [title_str, '.png'])
end

fig_num = fig_num + 1;
figure(fig_num)
for j = 1:dwel_num
    subplot(dwel_num,1,j);
    stem(T, Y_opt(j,:), 'g')
    hold on
    stem(T, X_opt(j,:), 'r')
    hold off
    %title(['Dwelling No', num2str(j), ' CHP startup and shutdown
instants'])
    title_str = ['Dwelling No', num2str(j), ' CHP startup and
shutdown instants'];
    title(title_str)
    saveas(gcf, [title_str, '.png'])
end

```

```

fig_num = fig_num + 1;
figure(fig_num)
for j = 1:dwel_num
    subplot(dwel_num,1,j);
    stem(T, Z_opt(j,:))
    %title(['Dwelling No', num2str(j), ' CHP startup hours'])
    title_str = ['Dwelling No', num2str(j), ' CHP startup hours'];
    title(title_str)
    saveas(gcf, [title_str, '.png'])
end

fig_num = fig_num + 1;
figure(fig_num)
for j = 1:dwel_num
    subplot(dwel_num,1,j);
    stem(T, U_opt(j,:))
    %title(['Dwelling No', num2str(j), ' CHP actual operating
hours'])
    title_str = ['Dwelling No', num2str(j), ' CHP actual operating
hours'];
    title(title_str)
    saveas(gcf, [title_str, '.png'])
end

fig_num = fig_num + 1;
figure(fig_num)
for j = 1:dwel_num
    subplot(dwel_num,1,j);
    plot(T, H_B_opt(j,:))
    %title(['Dwelling No', num2str(j), ' Heating Boiler
evolution'])
    title_str = ['Dwelling No', num2str(j), ' Heating Boiler
evolution'];
    title(title_str)
    saveas(gcf, [title_str, '.png'])
end

% Totals

fig_num = fig_num + 1;
figure(fig_num)
plot(T, ES_STO_opt(:))
%title('Total Electricity stored in the central electricity storage
tank')
title_str = 'Total Electricity stored in the central electricity
storage tank';
title(title_str)
saveas(gcf, [title_str, '.png'])

fig_num = fig_num + 1;
figure(fig_num)
plot(T, Y_1' * E_CHP_Self_opt, 'b')
%title('Total Electricity generation by the CHP units (kW)')
title_str = 'Total Electricity generation by the CHP units (kW)';
title(title_str)
hold on
plot(T, Y_1' * E_CHP_Sal_opt, '--r')
plot(T, Y_1' * E_CHP_Sto_opt, '-.y')
hold off

```

```

        legend('Electricity generated for self use from CHP', 'Excess
Electricity sold from the CHP', 'Electricity stored by the
CHP', 'Location', 'northeast')
        saveas(gcf, [title_str, '.png'])

        fig_num = fig_num + 1;
        figure(fig_num)
        plot(T, Y_1' * E_PV_Sal_opt + Y_1' * E_Wind_Sal_opt + Y_1' *
E_CHP_Sal_opt + Y_2' * E_EV_Sal_opt, 'b')
        hold on
        plot(T, E_Grid_opt(1,:) + E_Grid_opt(2,:), '--r')
        hold off
        %title('Electricity exchanged with the grid')
        title_str = 'Electricity exchanged with the grid';
        title(title_str)
        legend('Excess Electricity sold to the grid', 'Electricity purchased
from the grid', 'Location', 'northeast')
        saveas(gcf, [title_str, '.png'])

        fig_num = fig_num + 1;
        figure(fig_num)
        plot(T, Y_1' * H_STO_opt)
        %title('Total Heat stored in the heat storage tank')
        title_str = 'Total Heat stored in the heat storage tank';
        title(title_str)
        saveas(gcf, [title_str, '.png'])

        % Create a new folder named 'graphs' in the current directory
        if ~exist('graphs', 'dir')
            mkdir('graphs')
        end

        % Get a list of all .png files in the current directory
        list = dir('*.png');

        % Move each .png file to the 'graphs' folder
        for i = 1:length(list)
            movefile(list(i).name, 'graphs')
        end
end

```