



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ**  
**ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

## **Διπλωματική Εργασία**

# **Διαχείριση Ενέργειας Κτηρίου με Φωτοβολταϊκό Σύστημα βασισμένη σε Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση**

**Κωτσέλης Φώτιος**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

**Καθηγητής Κουτρούλης Ευύχιος (Επιβλέπων)**

**Αναπλ. Καθηγητής Γυφτάκης Κωνσταντίνος**

**Καθηγητής Μπούχερ Ματτίας**

**Χανιά 2024**

# Πρόλογος

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο διπλωματικής εργασίας στο τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών (ΗΜΜΥ) του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Ευτύχιο Κουτρούλη για την καθοδήγηση και τις συμβουλές του κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους στενούς μου φίλους, για την αμέριστη συμπαράσταση και στήριξη τους καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία υλοποιείται ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας κτηρίου, που τροφοδοτείται τόσο από το ηλεκτρικό δίκτυο, όσο και από φωτοβολταϊκό σύστημα και τη συστοιχία μπαταριών που διαθέτει. Το παρόν σύστημα αναλαμβάνει να χρονοπρογραμματίζει και να ενεργοποιεί αυτόματα τις συσκευές ενός κτηρίου σε ένα πλήρες εικοσιτετράωρο, φροντίζοντας να αξιοποιεί την ηλιακή ενέργεια με το βέλτιστο δυνατό τρόπο, να ελαχιστοποιεί το κόστος αγοράς από το ηλεκτρικό δίκτυο, να μεριμνά για τη σταθερότητά του και να διατηρεί την θερμική και προσωπική άνεση των χρηστών.

Για την πραγματοποίηση αυτής της προσομοίωσης, λαμβάνεται υπόψη το κτήριο το οποίο θα εισαχθεί στο σύστημα, με τα δομικά και ενεργειακά χαρακτηριστικά του. Επίσης, καταγράφεται η δραστηριότητα και η ενδυματολογική μόνωση των χρηστών που το κατοικούν, καθώς και η τοποθεσία και η ημέρα του έτους με τα αντίστοιχα μετεωρολογικά δεδομένα της, που επηρεάζουν τη θερμοκρασία του και την παραγωγή ενέργειας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.

Παράλληλα, λαμβάνονται υπόψη η κατανάλωση ενέργειας και η διάρκεια των συσκευών του κτηρίου, η απόδοση και το μέγεθος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και των μπαταριών, όπως επίσης και η μεταβαλλόμενη τιμή αγοραπωλησίας ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο.

Με τα παραπάνω δεδομένα, που μπορούν να μεταβάλλονται σε κάθε προσομοίωση, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας δοκιμάζει και εν τέλει επιλέγει τις κατάλληλες ώρες της ημέρας για τη λειτουργία της κάθε συσκευής, συνυπολογίζοντας και το εκάστοτε επιθυμητό χρονικό περιθώριο που θέτει ο χρήστης, καθώς και τη βαρύτητα που επιλέγει να δώσει σε κάθε κριτήριο της βελτιστοποίησης. Κατ' αυτό τον τρόπο επιφέρει ισορροπία στις ανέσεις του χρήστη και στο κόστος κατανάλωσης ενέργειας, εκμεταλλευόμενο στο έπακρο τους διαθέσιμους πόρους του.

Τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης έδειξαν ότι η αξιοποίηση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος σε ένα κτήριο με δυνατότητα αποθήκευσης της περίσσειας ενέργειας δύναται να επιφέρει μείωση του κόστους κατανάλωσης ενέργειας από 20.41 % έως 277 %, με την ανώτατη τιμή να καταγράφεται σε περιόδους που η διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια είναι αυξημένη. Παράλληλα, το κόστος, όπως και τα υπόλοιπα κριτήρια της βελτιστοποίησης που αφορούν τη θερμική άνεση του χρήστη αλλά και τη σταθερότητα του ηλεκτρικού δικτύου, παρουσιάζουν βελτίωση με την ταυτόχρονη χρήση του συστήματος διαχείρισης ενέργειας. Ανάλογα με τη βαρύτητα που δίνεται στα κριτήρια της βελτιστοποίησης αλλά και την εποχή του χρόνου, η χρήση του συστήματος διαχείρισης ενέργειας δύναται να επιφέρει επιπλέον μείωση από 24.71 % έως 93.6 % στο

ημερήσιο κόστος της ενέργειας. Αντίστοιχα, σε σενάρια κατά τα οποία δίνεται η μέγιστη βαρύτητα στο εκάστοτε κριτήριο, η θερμική άνεση του χρήστη δύναται να βελτιωθεί από 41.55 % έως και 100 % και η σταθερότητα του ηλεκτρικού δικτύου από 40.77 % έως και 98.2 %.

## Abstract

In this thesis, a Building Energy Management System (BEMS) is implemented, powered by both the electricity grid and the photovoltaic systems with battery arrays it comprises. This system undertakes to schedule and automatically activate the devices of a building in a full 24-hour cycle, ensuring that solar energy is utilized in the best possible way, minimizing the cost of purchasing energy from the electricity grid, ensuring its stability, and maintaining the thermal and personal comfort of the users.

To carry out this simulation, the building which will be introduced into the system is taken into account, with its structural and energy characteristics. Likewise, the activity and clothing insulation of the users who inhabit it are recorded, as well as the location and day of the year with their corresponding meteorological data, which affect its temperature and the energy production of the photovoltaic panels.

At the same time, the consumption and duration of the building's devices, the efficiency and size of the photovoltaic panels and batteries, as well as the variable purchase price from the electricity grid are taken into account.

With the above data, which can be changed in each simulation, the system tests and ultimately selects the appropriate hours of the day for the operation of each device - for any of those it is allowed to decide on - calculating the desired time range of the user at any given time, as well as the weight it chooses to give to each unit of optimization. In this way, it achieves a balance between user comfort and energy consumption costs, making the most of its available resources.

The optimization results indicated that the utilization of a photovoltaic system in a building with the capability to store surplus energy can lead to a reduction in energy consumption costs ranging from 20.41% to 277%, with the maximum reduction occurring during periods of increased solar energy availability. At the same time, the cost, along with other optimization criteria concerning the user's thermal comfort and the stability of the electrical grid, show improvement with the simultaneous use of the energy management system. Depending on the weight given to the optimization criteria and the time of year, the use of the energy management system can bring about an additional reduction in daily energy costs ranging from 24.71% to 93.6%. Similarly, in scenarios where maximum weight is given to each criterion, the user's thermal comfort can be improved by 41.55% to 100%, and the stability of the electrical grid by 40.77% to 98.2%.

# Keywords

BEMS, Energy Optimization, Photovoltaic Systems, Solar Energy, Battery Storage, Thermal Comfort, Grid Stability, Cost Minimization

# Περιεχόμενα

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>11</b>
1.1 Στόχος της εργασίας .....	11
1.2 Δομή του συστήματος .....	13
1.3 Περιεχόμενα κεφαλαίων .....	14
<b>2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....</b>	<b>15</b>
2.1 Φωτοβολταϊκά συστήματα.....	15
2.2 Μονάδα αποθήκευσης ενέργειας: συστοιχία μπαταριών.....	18
2.3 Ενεργειακή προσομοίωση κτηρίου: EnergyPlus.....	20
2.3.1 Αξιοποίηση του EnergyPlus.....	20
2.3.2 Κατασκευή κτηρίου.....	20
2.3.3 Σύστημα κλιματισμού .....	21
2.3.4 Ηλεκτρικός θερμοσίφωνας.....	23
2.3.5 Καταγεγραμμένο αρχείο καιρού.....	24
2.4 Έξυπνοι μετρητές.....	26
<b>3. ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ .....</b>	<b>28</b>
3.1 Σύστημα διαχείρισης ενέργειας – εισαγωγή .....	28
3.2 Συνάρτηση πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης - κριτήρια επιλογής του συστήματος .....	28
3.2.1 Predicted Thermal Vote - PMV .....	28
3.2.2 Συνολικό κόστος ενέργειας - αλγόριθμος διαχείρισης διαθέσιμων πόρων.....	33
3.2.3 Συντελεστής σταθερότητας δικτύου .....	37
3.2.4 Συντελεστής χρονικής ικανοποίησης χρήστη – Satisfaction Index .....	38
3.2.5 Συνολική συνάρτηση βελτιστοποίησης .....	40
3.3 Μεγιστοποίηση της συνάρτησης βελτιστοποίησης .....	42
3.4 Διαδικασία προσομοίωσης του συστήματος διαχείρισης ενέργειας.....	44
<b>4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>55</b>
4.1 Δεδομένα βελτιστοποίησης .....	55
4.2 Θερινοί μήνες .....	56
4.2.1 Σενάριο 1: Βαρύτητα εξ ολοκλήρου στη διατήρηση του PMV μεταξύ των επιτρεπτών ορίων .....	59
4.2.2 Σενάριο 2: Βαρύτητα εξ ολοκλήρου στην ελαχιστοποίηση του κόστους του χρήστη .....	72
4.2.3 Σενάριο 3: Βαρύτητα εξ ολοκλήρου στο συντελεστή σταθερότητας δικτύου ...	84

4.2.4 Σενάριο 4: Βαρύτητα εξ ολοκλήρου στο συντελεστή χρονικής ικανοποίησης χρήστη .....	90
4.2.5 Σενάριο 5: Εξισορροπημένη βαρύτητα των συντελεστών .....	96
4.3 Χειμερινοί μήνες .....	106
4.3.1 Σενάριο 6: Βαρύτητα εξ ολοκλήρου στη διατήρηση του PMV μεταξύ των επιτρεπτών ορίων .....	110
4.3.2 Σενάριο 7: Βαρύτητα εξ ολοκλήρου στην ελαχιστοποίηση του κόστους του χρήστη .....	121
4.3.3 Σενάριο 8: Βαρύτητα εξ ολοκλήρου στο συντελεστή σταθερότητας δικτύου .	132
4.3.4 Σενάριο 9: Βαρύτητα εξ ολοκλήρου στο συντελεστή χρονικής ικανοποίησης χρήστη .....	143
4.3.5 Σενάριο 10: Εξισορροπημένη βαρύτητα των συντελεστών .....	149
4.4 Εαρινοί μήνες .....	159
4.4.1 Σενάριο 11: Εξισορροπημένη βαρύτητα των συντελεστών .....	162
4.5 Φθινοπωρινοί μήνες .....	168
4.5.1 Σενάριο 12: Εξισορροπημένη βαρύτητα των συντελεστών .....	170
<b>5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>178</b>
<b>6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>184</b>



## Κατάλογος Συμβόλων

$PV$	παραγωγή ενέργειας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας ( $kWh$ )
$n$	απόδοση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας
$A$	συνολική έκταση σε τετραγωνικά μέτρα ( $m^2$ )
$I$	ηλιακή ακτινοβολία πρόσπτωσης ( $W / m^2$ )
$T$	θερμοκρασία περιβάλλοντος ( $^{\circ}C$ )
$SOC$	ποσοστό της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας (%)
$availableEnergy$	τρέχουσα αποθηκευμένη ενέργεια της μπαταρίας ( $kWh$ )
$capacity$	συνολική χωρητικότητα της μπαταρίας ( $kWh$ )
$kd$	συντελεστής αυτό-εκφόρτισης της μπαταρίας
$Charge$	ποσοστό φόρτισης της μπαταρίας (%)
$Discharge$	ποσοστό εκφόρτισης της μπαταρίας (%)
$j$	ώρα της ημέρας ( $hour$ )
$M$	επίπεδο δραστηριότητας ( $W / m^2$ )
$W$	μηχανικό έργο του σώματος ( $W / m^2$ )
$f_{cl}$	συντελεστής επιφάνειας ενδυμάτων (clothing surface area factor)
$t_a$	θερμοκρασία αέρα στον εσωτερικό χώρο ( $^{\circ}C$ )
$t_r$	mean radiant temperature ( $^{\circ}C$ )
$h_{cl}$	συντελεστής μεταγωγής θερμότητας [ $W / (m^2 * K)$ ]
$t_{cl}$	θερμοκρασία επιφάνειας των ενδυμάτων ( $^{\circ}C$ )
$I_{cl}$	θερμική μόνωση ρουχισμού ( $m^2 * K / W$ )
$v_{ar}$	ταχύτητα αέρα ( $m / s$ )

<i>PMV</i>	δείκτης θερμικής άνεσης
<i>Shortage</i>	διαφορά των ζητούμενων φορτίων από την προσφερόμενη ενέργεια ( <i>kWh</i> )
<i>receivedEnergy</i>	ενέργεια που ανακτήθηκε από τη μπαταρία ( <i>kWh</i> )
<i>savedEnergy</i>	ενέργεια που δόθηκε στη μπαταρία ( <i>kWh</i> )
<i>Percentage</i>	προσυμφωνημένο ποσοστό πώλησης ενέργειας
<i>Grid</i>	κατανάλωση ενέργειας από το δίκτυο σε μία ώρα ( <i>kWh</i> )
<i>Grid<sub>average</sub></i>	μέση κατανάλωση ενέργειας από το δίκτυο σε ένα πλήρες 24ωρο ( <i>kWh</i> )
<i>a</i>	αρχική επιθυμητή ώρα ενεργοποίησης συσκευής του χρήστη
<i>b</i>	τελική επιθυμητή ώρα ενεργοποίησης συσκευής του χρήστη
<i>t</i>	ώρα ενεργοποίησης της συσκευής
<i>i</i>	αριθμός συσκευής του συστήματος
<i>Sat</i>	συντελεστής χρονικής ικανοποίησης χρήστη
<i>Sat<sub>max</sub></i>	μέγιστη δυνατή τιμή του συντελεστή χρονικής ικανοποίησης χρήστη
<i>PMVpenalty</i>	ποινή απόκλισης από το επιθυμητό εύρος τιμών του PMV
<i>PMVpenalty<sub>max</sub></i>	μέγιστη δυνατή ποινή απόκλισης από το επιθυμητό εύρος τιμών του PMV
$\sigma_m$	συντελεστής σταθερότητας δικτύου
$\sigma_{m,max}$	μέγιστη δυνατή τιμή του συντελεστή σταθερότητας δικτύου
<i>sumCost</i>	συνολικό ημερήσιο κόστος κατανάλωσης ενέργειας
<i>sumCost<sub>max</sub></i>	μέγιστο δυνατό ημερήσιο κόστος κατανάλωσης ενέργειας
$\gamma$	συντελεστής βαρύτητας του κριτηρίου
<i>PSO</i>	Particle Swarm Optimization
<i>HVAC</i>	σύστημα κλιματισμού
<i>WH</i>	ηλεκτρικός θερμοσίφωνας
<i>AC</i>	εναλλασσόμενο ρεύμα
<i>DC</i>	συνεχές ρεύμα

# 1.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

### 1.1 Στόχος της εργασίας

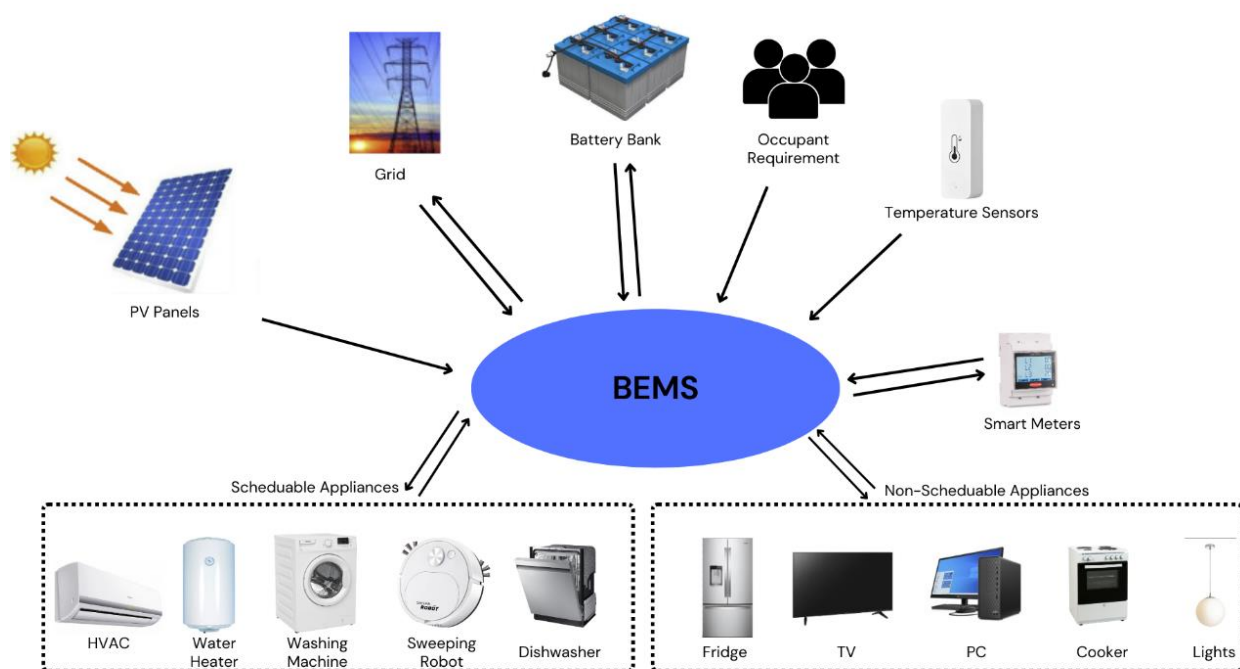
Στη σύγχρονη εποχή, το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται ραγδαία, με τους περισσότερους καταναλωτές να δυσχεραίνονται να ανταπεξέλθουν στις ανάγκες τους [1]. Παράλληλα, η κλιματική κρίση υπενθυμίζει καθημερινά πως υπάρχει ανάγκη προς αναζήτηση λύσεων για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας από ορυκτούς πόρους και κατ' επέκταση μείωση των εκπομπών αερίων που προκύπτουν από την παραγωγή της [2]. Οι καθημερινές συνήθειες των ανθρώπων στις οικίες τους, οι οποίοι συνήθως έχουν άγνοια για τη σωστή χρήση της ενέργειας, εντείνουν το πρόβλημα, το οποίο επεκτείνεται και στην παραγωγή αυτής [3]. Το ηλεκτρικό δίκτυο συχνά αντιμετωπίζει έντονη ζήτηση από τους καταναλωτές σε συγκεκριμένες ώρες της ημέρας, γεγονός που επιβαρύνει τόσο το κόστος όσο και τη σταθερότητά του [4].

Τα τελευταία χρόνια προτείνονται λύσεις που περιλαμβάνουν την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι οποίες μπορούν να μειώσουν σημαντικά την παραδοσιακή ρυπογόνο παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σε χώρες όπως η Ελλάδα, που η ηλιακή ενέργεια βρίσκεται σε περίσσεια, η επένδυση σε φωτοβολταϊκά συστήματα είναι μια σημαντική λύση [5]. Ωστόσο, ακόμη και όσοι έχουν προβεί σε μία τέτοια κίνηση, συχνά δεν αξιοποιούν σωστά και με το βέλτιστο τρόπο την διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια, με αποτέλεσμα να μην βελτιώνουν σημαντικά το πρόβλημα [6].

Στη παρούσα εργασία, λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, αναπτύσσεται ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας σε ένα οικιακό περιβάλλον, το οποίο διαθέτει φωτοβολταϊκό σύστημα και

σύστημα αποθήκευσης της περίσσειας ενέργειας, έτσι ώστε να χρησιμοποιείται ετεροχρονισμένα, ακόμη και όταν η ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι διαθέσιμη. Το κύριο μέλημα και η πρωτοτυπία του συστήματος, όμως, είναι να επιλέγει -κατά τη δική του κρίση- τις ώρες λειτουργίας των ενεργοβόρων συσκευών του σπιτιού, που μπορούν να αυτοματοποιηθούν, έχοντας σκοπό να λειτουργήσουν σε ώρες που συμφέρουν οικονομικά. Παράλληλα, ελέγχει τη θερμική άνεση των χρηστών, έτσι ώστε να είναι στα κατάλληλα επίπεδα ανά την εποχή. Τέλος, φροντίζει να εξομαλύνει τη ζήτηση ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο σε ένα εικοσιτετράωρο, έτσι ώστε να αποφεύγονται οι ώρες αιχμής, οι οποίες αυξάνουν το κόστος παραγωγής και συχνά επιφέρουν προβλήματα στο δίκτυο, όπως μειώσεις τάσεων, ακόμη και ολικές διακοπές ρεύματος.

Το σύστημα δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες του να δώσουν την ανάλογη βαρύτητα στα κριτήρια που αναφέρθηκαν και παράλληλα τους επιτρέπει να θέσουν τα όρια λειτουργίας της κάθε συσκευής, έτσι ώστε η καινοτομία αυτή να είναι φιλική προς εκείνους και να μην εμποδίζει την άνεσή τους, με σκοπό τη σταδιακή και ομαλή τους προσαρμογή.



Σχήμα 1.1: Διάγραμμα του συστήματος.

## 1.2 Δομή του συστήματος

Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται η δομή του Building Energy Management System (BEMS) . Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας δέχεται ενέργεια από το φωτοβολταϊκό σύστημα, από τη συστοιχία μπαταριών, καθώς και από το ηλεκτρικό δίκτυο. Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα, το σύστημα δύναται επίσης να προσφέρει ενέργεια στη συστοιχία μπαταριών και στο ηλεκτρικό δίκτυο, στην περίπτωση που η ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά είναι σε περίσσεια και δεν καταναλώνεται εξ ολοκλήρου από το σύστημα. Ο αλγόριθμος αυτός θα αναλυθεί παρακάτω.

Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας, επιπλέον, δέχεται δεδομένα από τους χρήστες με βάση τις προτιμήσεις τους, όπως επίσης από αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας, που δίνουν πληροφορίες για τις εσωτερικές συνθήκες του κτηρίου και από τους έξυπνους μετρητές, που λαμβάνουν πληροφορία για την ωριαία κυμαινόμενη τιμή αγοραπωλησίας ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο.

Οι έξυπνοι μετρητές στέλνουν, επίσης, πληροφορίες στην εταιρεία παραγωγής σε πραγματικό χρόνο, σε ό,τι αφορά την ωριαία κατανάλωση ενέργειας από το κτήριο, διαδικασία που διευκολύνει το χρονοπρογραμματισμό της παραγωγής και λαμβάνουν ταυτόχρονα πληροφορία για τα τιμολόγια αγοραπωλησίας του ηλεκτρικού ρεύματος.

Οι προγραμματιζόμενες συσκευές αφορούν φορτία, τα οποία μπορούν να ενεργοποιηθούν αυτόματα και οι χρήστες τους δεν έχουν συγκεκριμένη προτίμηση για την ακριβή ώρα που θα λειτουργήσουν, παρά μόνο ζητούν να έχουν εκτελέσει την εργασία τους μέχρι κάποια χρονική στιγμή μέσα σε ένα εικοσιτετράωρο. Για παράδειγμα, το πλυντήριο ρούχων είναι μια προγραμματιζόμενη συσκευή για το σύστημα διαχείρισης ενέργειας, καθώς ο χρήστης εφόσον την έχει προετοιμάσει καταλλήλως (τοποθέτηση ρούχων, απορρυπαντικών) τότε μπορεί να λειτουργήσει ακόμα και όταν εκείνος απουσιάζει. Η ίδια λογική μπορεί να ακολουθηθεί και από το κλιματισμό, καθώς ο χρήστης μπορεί να ζητήσει να λειτουργήσει κατά τις απογευματινές ώρες το χειμώνα, έτσι ώστε να βρεθεί σε ιδανικές συνθήκες όταν επιστρέψει στην οικία του, χωρίς όμως να απαιτεί να ενεργοποιηθεί συγκεκριμένη ώρα, υπό την εποπτεία του.

Οι μη-προγραμματιζόμενες συσκευές είναι φορτία, τα οποία ο χρήστης ζητά να λειτουργήσουν την ακριβή ώρα που ενεργοποιούνται και συνήθως δεν μπορούν να λειτουργήσουν αυτόνομα. Για παράδειγμα, ο χρήστης ζητά να ζεστάνει το φαγητό του στις εστίες της ηλεκτρικής κουζίνας σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή και οφείλει να ελέγχει τη λειτουργία της για λόγους πρακτικότητας και ασφάλειας.

Ως αποτέλεσμα, λοιπόν, το BEMS υπολογίζει την βέλτιστη ώρα έναρξης λειτουργίας των προγραμματιζόμενων συσκευών, παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια και ταυτόχρονα λαμβάνει την ωριαία κατανάλωσή τους. Όσον αφορά τις μη-προγραμματιζόμενες συσκευές, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας έχει περιορισμένες δυνατότητες και παρέχει απλώς ενέργεια την στιγμή που την απαιτούν, λαμβάνοντας, ταυτόχρονα, πληροφορία για την κατανάλωση αυτής.

### 1.3 Περιεχόμενα κεφαλαίων

Η δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εξής:

- Κεφάλαιο 2: παρουσιάζονται πληροφορίες για καθένα δομικό στοιχείο του συστήματος. Περιλαμβάνει το φωτοβολταϊκό σύστημα, τη συστοιχία μπαταριών, τον έξυπνο μετρητή και το πρόγραμμα EnergyPlus που αφορά την προσομοίωση της λειτουργίας ενός κτηρίου και την πληροφορία των εσωτερικών του συνθηκών.
- Κεφάλαιο 3: παρουσιάζονται πληροφορίες για τη χρήση της συνάρτησης βελτιστοποίησης στο MATLAB, με σκοπό την εύρεση της εκάστοτε βέλτιστης λύσης για κάθε σενάριο που δίνεται στο σύστημα διαχείρισης ενέργειας. Περιλαμβάνει την επεξήγηση των κριτηρίων που επηρεάζουν τη συνάρτηση βελτιστοποίησης.
- Κεφάλαιο 4: γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων του συστήματος διαχείρισης ενέργειας για διαφορετικά σενάρια, καθένα από τα οποία αποτελεί ξεχωριστή είσοδο δεδομένων σε αυτό. Τα σενάρια διαχωρίζονται με βάση την εποχή του χρόνου κατά την οποία πραγματοποιείται μία προσομοίωση και την βαρύτητα που δίνεται στα κριτήρια που επηρεάζουν τη συνάρτηση βελτιστοποίησης.
- Κεφάλαιο 5: αναλύονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν ύστερα από την αξιοποίηση του συστήματος διαχείρισης ενέργειας και πραγματοποιείται παρουσίαση των αποτελεσμάτων του καθώς και των ενδεχόμενων επεκτάσεων που επιδέχεται.

---

# 2.

## ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

---

### 2.1 Φωτοβολταϊκά συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν βασικό κομμάτι των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αποτελούν συστήματα συνδεδεμένων διατάξεων που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική. Ανάλογα με το μέγεθος, την απόδοση και την γεωγραφική τους θέση, μπορούν να τροφοδοτήσουν από ένα μικρό φορτίο, όπως ένας αριθμητικός υπολογιστής ή ένα φωτιστικό κήπου, μέχρι ένα μεγάλο μέρος των καταναλωτών ενός ηλεκτρικού δικτύου [7].

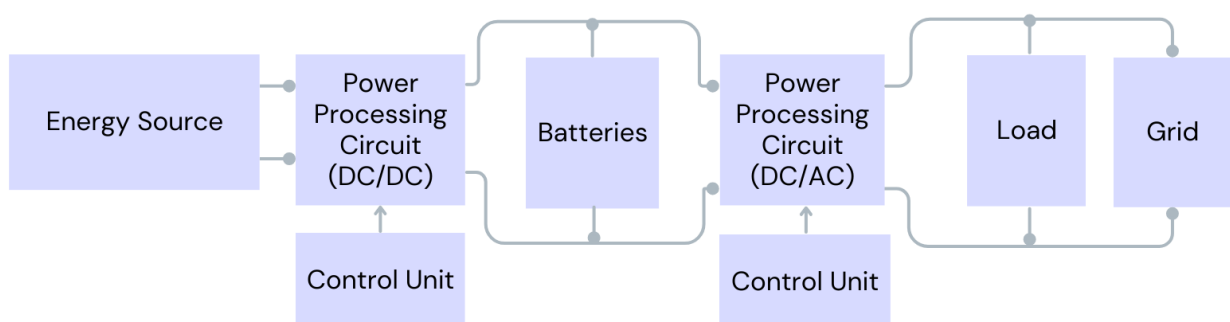
Στην παρούσα εργασία, τα φωτοβολταϊκά συστήματα αξιοποιούνται σε επίπεδο αναγκών μίας μέσης συμβατικής οικίας, οι συστοιχίες των οποίων τοποθετούνται συνήθως στην οροφή των κτηρίων, ή σε κάποιο ελεύθερο χώρο σε οικόπεδο χωρίς εμπόδια. Η μελέτη για την σωστή τοποθέτησή τους είναι άκρως σημαντική, προκειμένου να αποδίδουν το μέγιστο δυνατό. Η συνηθέστερη επιλογή είναι η τοποθέτηση τους σε νότιο προσανατολισμό και η κλίση από το οριζόντιο επίπεδο εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής εγκατάστασης [8].

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό των φωτοβολταϊκών, είναι η παραγωγή συνεχούς ρεύματος (DC). Ωστόσο, τα φορτία στις οικίες λειτουργούν με εναλλασσόμενο ρεύμα (AC), όπως αυτό που παρέχει το ηλεκτρικό δίκτυο. Συγκεκριμένα, στην Ελλάδα οι εταιρείες ηλεκτρικής ενέργειας παρέχουν στους καταναλωτές εναλλασσόμενο ρεύμα τάσης 230 V και συχνότητας 50 Hz. Επομένως, εφόσον το σύστημα διαχείρισης ενέργειας που περιγράφεται στην παρούσα εργασία είναι υβριδικό, δηλαδή τα φορτία τροφοδοτούνται τόσο από το ηλεκτρικό δίκτυο όσο και από το φωτοβολταϊκό σύστημα με συνεχείς εναλλαγές, θα πρέπει να ρυθμιστεί με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να παρέχει ακριβώς τον ίδιο τύπο ηλεκτρικού ρεύματος, προκειμένου να επικρατεί ομαλότητα και ασφάλεια. Συνεπώς, μεσολαβούν επιπλέον εξαρτήματα που επεξεργάζονται το ηλεκτρικό ρεύμα που καταλήγει στους ρευματολήπτες της οικίας [9].

Το συνολικό σύστημα χωρίζεται στις εξής κατηγορίες [10]:

- Πηγή ενέργειας: οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες που βρίσκονται εξωτερικά και λαμβάνουν την ηλιακή ενέργεια.
- Κύκλωμα επεξεργασίας ισχύος: αποτελείται από μετατροπείς ισχύος DC/DC και DC/AC, οι οποίοι μετασχηματίζουν το ηλεκτρικό ρεύμα.
- Μονάδα ελέγχου: αποτελείται από αναλογικά/ψηφιακά κυκλώματα, μικροελεγκτές και άλλα συστήματα ελέγχου που επεμβαίνουν στα κυκλώματα επεξεργασίας ισχύος και τα ρυθμίζουν καταλλήλως.

Όταν το ηλεκτρικό ρεύμα έχει αποκτήσει την κατάλληλη μορφή κατά την έξοδό του από τα παραπάνω συστήματα, είναι πλέον σε θέση να διαμοιραστεί στα φορτία της οικίας, στη μονάδα αποθήκευσης αλλά και στο ηλεκτρικό δίκτυο, προκειμένου να αξιοποιηθεί και από άλλους καταναλωτές. Η συνδεσμολογία του φωτοβολταϊκού συστήματος απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Περιγραφή συνδεσμολογίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων.



Η παραγωγή ενέργειας ανά ώρα από το φωτοβολταϊκό σύστημα εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση [11]:

$$PV(j) = n * A * I(j) * (1 - 0.005 * T(j)) \quad (2.1)$$

όπου:

$PV$  η παραγωγή της φωτοβολταϊκής συστοιχίας ( $kWh$ ),

$n$  η απόδοση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας,

$A$  η συνολική επιφάνεια σε τετραγωνικά μέτρα ( $m^2$ ),

$I$  η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας πρόσπτωσης ( $W / m^2$ ),

$T$  η θερμοκρασία περιβάλλοντος ( $^{\circ}C$ ), και

$j$  η ώρα της ημέρας ( $hour$ ).

Η απόδοση και η επιφάνεια είναι στατικά μεγέθη και δεν αλλάζουν κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου. Ωστόσο, η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία είναι μεταβλητά μεγέθη και αλλάζουν ανά ώρα. Στην παρούσα εργασία, λαμβάνεται μία τιμή ανά ώρα, η οποία είναι η μέση τιμή της ώρας αυτής. Επομένως, είναι σαφές ότι τους καλοκαιρινούς μήνες, σε μία χώρα όπως η Ελλάδα, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά είναι αυξημένη, λόγω της έντονης ηλιακής ακτινοβολίας. Οι τιμές παραγωγής το χειμώνα είναι πολύ χαμηλότερες, γεγονός που καθιστά απαραίτητο ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας, έτσι ώστε να αξιοποιείται πλήρως οποιοδήποτε ποσό ενέργειας.

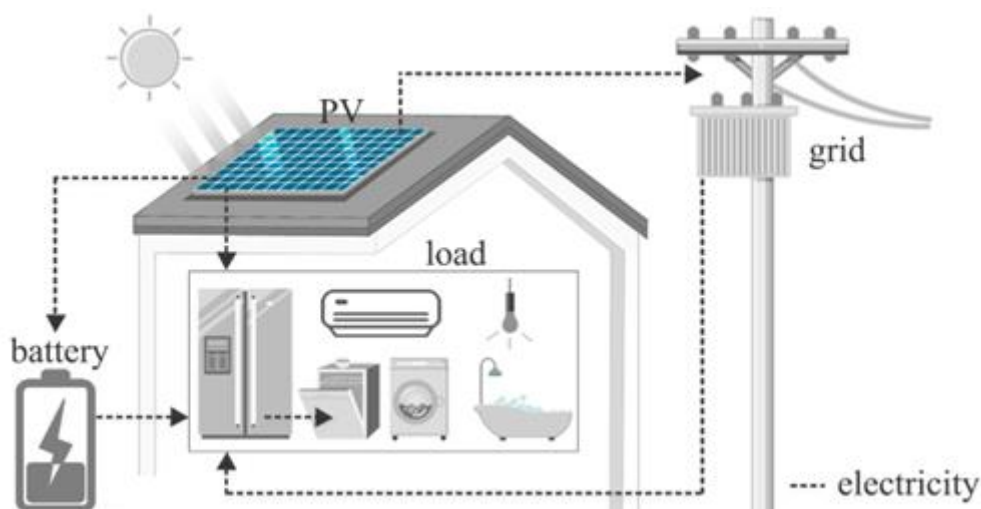


Σχήμα 2.2: Απεικόνιση φωτοβολταϊκών σε στέγη κτηρίου [12].

## 2.2 Μονάδα αποθήκευσης ενέργειας: συστοιχία μπαταριών

Ένα επιπλέον βασικό δομικό στοιχείο για το σύστημα διαχείρισης ενέργειας που αναλύεται, είναι η συστοιχία μπαταριών. Η παρουσία της είναι απαραίτητη, καθώς εάν υπάρξει περίσσεια ενέργειας από το φωτοβολταϊκό σύστημα - δηλαδή σε κάποια χρονική στιγμή το ζητούμενο φορτίο είναι μικρότερο από τη διαθέσιμη ενέργεια - αποθηκεύεται για μελλοντική χρήση. Οι καταναλωτές έχουν την ευκαιρία να αξιοποιήσουν το πλεόνασμα αυτό σε κάποια χρονική στιγμή που το ζητούμενο φορτίο είναι μεγαλύτερο από τη παρεχόμενη ενέργεια, όπως συμβαίνει το βράδυ. Εάν η συστοιχία μπαταριών έχει μεγάλη χωρητικότητα, δύναται σε ορισμένα συστήματα να καλύψει το έλλειμα ακόμη και για ολόκληρα εικοσιτετράωρα, όπως για παράδειγμα σε ημέρες με έντονη συννεφιά και ελάχιστη παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά [13]. Συνεπώς, με την παρουσία της, η ηλιακή ενέργεια αξιοποιείται περισσότερο και η ζήτηση από το ηλεκτρικό δίκτυο μειώνεται.

Οι δυνατότητες του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας εξαρτώνται από το είδος, τη χωρητικότητα αλλά και την απόδοσή της συστοιχίας μπαταριών. Η συνηθέστερη επιλογή για συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σε συμβατικές οικίες είναι η μπαταρία φωσφορικού σιδήρου λιθίου ( $\text{LiFePO}_4$ ). Χαρακτηρίζεται από μεγάλη χωρητικότητα και απόδοση, αυξημένη διάρκεια ζωής και είναι φιλική προς το περιβάλλον. Επίσης υπάρχει μεγάλη διάθεση στην αγορά, γεγονός που την καθιστά προσιτή - αναλογικά με το συνολικό κόστος του συστήματος - παράγοντας που λαμβάνεται υπόψη, προκειμένου οι καταναλωτές να αποσβένουν την αρχική τους επένδυση σε σύντομο χρονικό διάστημα. Μειονεκτεί ως προς το μέγεθος σε σχέση με άλλες γνωστές κατηγορίες, όπως οι ιόντων λιθίου, ωστόσο σε εφαρμογές που αφορούν κτήρια αυτό δεν αποτελεί σημαντικό πρόβλημα [11].



Σχήμα 2.3: Απεικόνιση συνδεσμολογίας μπαταρίας φωτοβολταϊκού συστήματος [14].

Ανά ώρα, η συστοιχία μπαταριών βρίσκεται σε ένα State Of Charge (SOC), δηλαδή χαρακτηρίζεται από την κατάσταση φόρτισής της. Το μέγεθος αυτό περιγράφεται ως το ποσοστό της διαθέσιμης της ενέργειας προς τη συνολική της χωρητικότητα [15]:

$$SOC(j) = \frac{availableEnergy(j)}{capacity} \quad (2.2)$$

όπου:

*SOC* το ποσοστό της κατάστασης φόρτισης (%),

*availableEnergy* η τρέχουσα αποθηκευμένη ενέργεια (kWh),

*capacity* η συνολική χωρητικότητα (kWh) και

*j* η ώρα της ημέρας (hour).

Για παράδειγμα αν μία συστοιχία μπαταριών έχει συνολική χωρητικότητα 7.2 kWh και βρίσκεται σε  $SOC = 60\%$ , τότε διαθέτει 4.32 kWh αποθηκευμένη ενέργεια.

Ανά ώρα, επίσης, μπορεί να φορτίζεται, να εκφορτίζεται, ή να μην αλλάζει κατάσταση φόρτισης. Στην πραγματικότητα, ακόμη και εάν δεν καταναλώνεται ενέργεια από μία συστοιχία μπαταριών, εκείνη σταδιακά θα εκφορτίζεται - δηλαδή θα χάνει ένα ποσοστό από τη διαθέσιμη ενέργειά της - με ρυθμό ανάλογο του συντελεστή αυτό-εκφόρτισης *kd* από τον οποίο χαρακτηρίζεται. Όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής, τόσο μικρότερη είναι η ενέργεια που χάνεται, άρα και η απόδοση αυξάνεται. Η εξίσωση που περιγράφει τη παραπάνω διαδικασία είναι η εξής [11]:

$$SOC(j) = kd * SOC(j - 1) + Charge(j) - Discharge(j) \quad (2.3)$$

όπου:

*SOC* η κατάσταση φόρτισης (%),

*kd* ο συντελεστής αυτο-εκφόρτισης,

*Charge* το ποσοστό φόρτισης (%),

*Discharge* το ποσοστό εκφόρτισης (%) και

*j* η ώρα της ημέρας (hour).

Όπως περιγράφει η παραπάνω εξίσωση (2.3), το ποσοστό της τρέχουσας ώρας εξαρτάται από εκείνο της προηγούμενης ώρας πολλαπλασιασμένο με το συντελεστή αυτό-εκφόρτισης, και προστίθεται ή αφαιρείται το ποσοστό φόρτισης/εκφόρτισης ενέργειας, ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται η συστοιχία μπαταριών. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται συστοιχία μπαταριών των  $7.2\text{ kWh}$  ή ισοδύναμα  $150\text{Ah}$  στα  $48\text{V}$  με  $\text{maxSOC} = 100\%$  και  $\text{minSOC} = 20\%$ , όπου  $\text{maxSOC}$  και  $\text{minSOC}$  το μέγιστο και το ελάχιστο, αντίστοιχα, επιτρεπόμενο όριο φόρτισης/εκφόρτισης της συστοιχίας μπαταριών. Τα παραπάνω όρια ορίζονται για λόγους προστασίας και αύξησης διάρκειας ζωής.

## 2.3 Ενεργειακή προσομοίωση κτηρίου: EnergyPlus

### 2.3.1 Αξιοποίηση του EnergyPlus

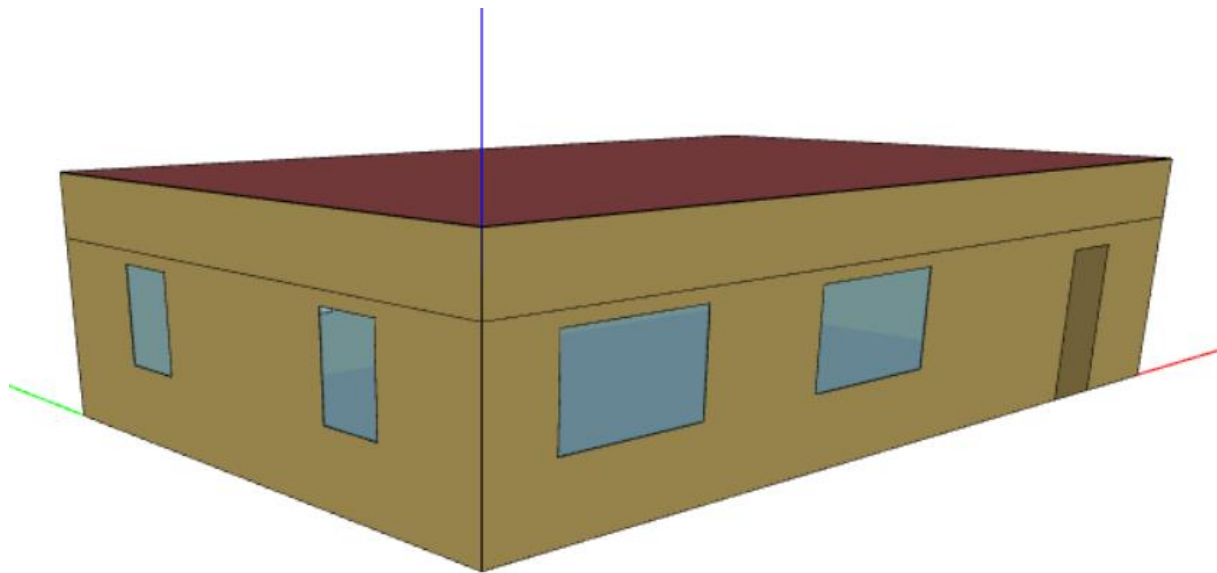
Στο σύστημα διαχείρισης ενέργειας που αναπτύσσεται, σημαντικό ρόλο κατέχει το πρόγραμμα EnergyPlus. Το EnergyPlus αποτελεί βασικό εργαλείο προσομοίωσης για μηχανικούς που μελετούν την ενεργειακή κατανάλωση σε ένα κτήριο, καθώς και όλες τις επιδράσεις που μπορεί να δέχεται [16]. Στη παρούσα εργασία, χρησιμοποιείται με σκοπό τη μοντελοποίηση ενός κτηρίου και την καταγραφή των εσωτερικών του συνθηκών ανά ώρα, όπως η θερμοκρασία στο εσωτερικό του. Διαθέτει, επίσης, τη δυνατότητα προσθήκης συσκευών που μεταβάλλουν την θερμοκρασία του κτηρίου - όπως ο κλιματισμός - και την λήψη πληροφορίας για την κατανάλωση ενέργειας αυτών. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα μέσα από τη προσομοίωση να καταγραφούν και οι εξωτερικές επιδράσεις μέσα από καταγεγραμμένα αρχεία καιρικών συνθηκών. Επομένως, το πρόγραμμα ανταλλάσσει δεδομένα με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας, τα οποία αφορούν το κτήριο και τις εσωτερικές του συνθήκες.

Συχνά, συνδυάζεται με το πρόγραμμα OpenStudio, το οποίο αποτελεί ένα γραφικό και φιλικό προς το χρήστη περιβάλλον, στο οποίο κατασκευάζεται η δομή ενός κτηρίου, έτσι ώστε στη συνέχεια να εισαχθεί στο EnergyPlus, καθώς στο τελευταίο εισάγονται πληροφορίες μέσω αρχείων κειμένου, γεγονός που δυσχεραίνει τους χρήστες.

### 2.3.2 Κατασκευή κτηρίου

Το πρώτο στάδιο, λοιπόν, είναι η κατασκευή ενός κτηρίου στο οποίο ο χρήστης μπορεί να προσθέσει κάθε λεπτομέρεια, όπως κουφώματα, οροφές, δωμάτια και άλλα στοιχεία. Αξίζει να σημειωθεί πως κάθε κατασκευαστικό χαρακτηριστικό έχει δέουσα σημασία, καθώς έχει επίδραση στην εσωτερική θερμοκρασία. Επομένως, αποτελεί βασικό μέλημα η δημιουργία ενός

κτηρίου με ποιοτικά δομικά υλικά, έτσι ώστε να έχει νόημα η αξιοποίηση του συστήματος διαχείρισης ενέργειας που προτείνεται. Σε περιπτώσεις στις οποίες ένα κτήριο έχει αυξημένες απώλειες ενέργειας και εξασθενημένη μόνωση, το σύστημα χρονοπρογραμματισμού συσκευών δεν θα συντελέσει στη σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.



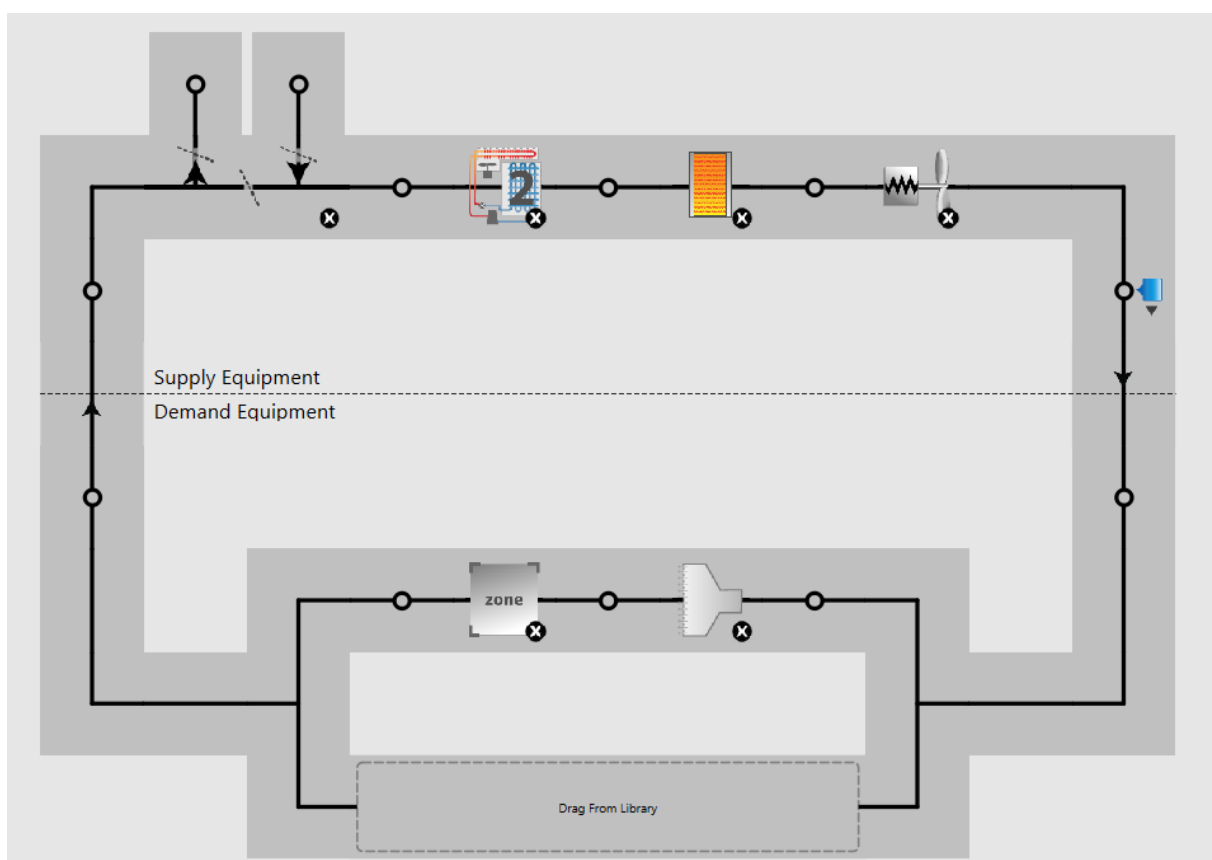
Σχήμα 2.4: Κατασκευή κτηρίου στο OpenStudio.

Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται το κτήριο που αξιοποιείται στη παρούσα μελέτη, το οποίο αποτελεί μια μικρή οικία με πληθώρα παραθύρων, έτσι ώστε να αξιοποιείται το ηλιακό φως, σε περιπτώσεις που είναι επιθυμητό, όπως το χειμώνα. Στη θέση του παρόντος κτηρίου, το σύστημα χρονοπρογραμματισμού μπορεί να δεχθεί οποιοδήποτε άλλο με διαφορετικά χαρακτηριστικά, καθώς έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί με κάθε τύπο.

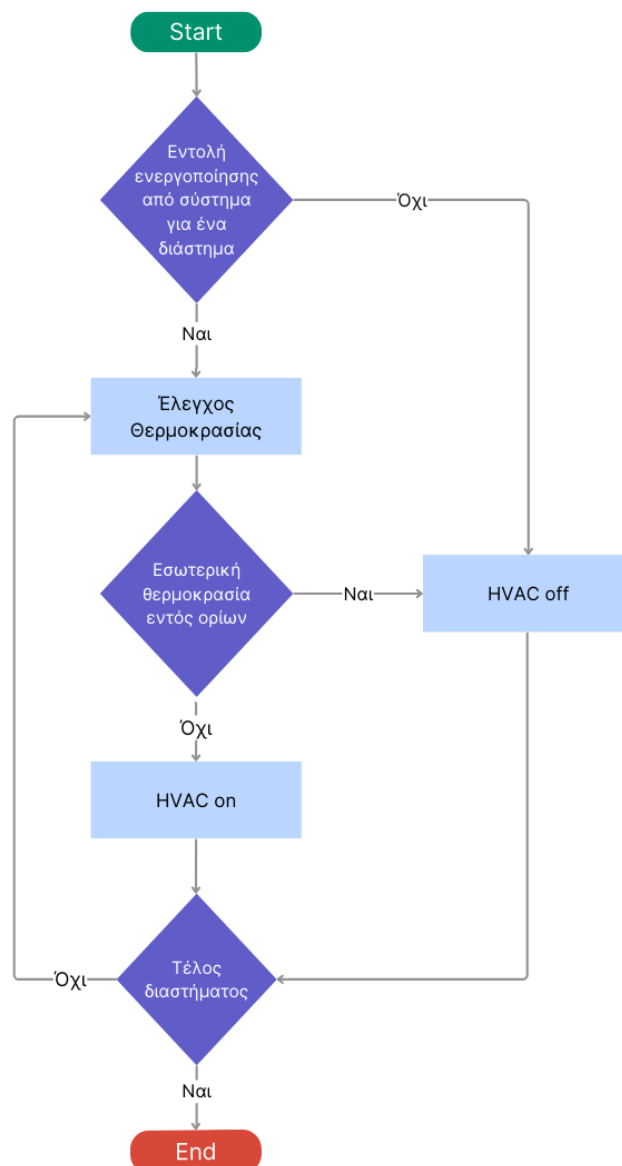
### 2.3.3 Σύστημα κλιματισμού

Σε δεύτερο στάδιο, προστίθενται το ηλεκτρικό σύστημα κλιματισμού (HVAC), όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ορίσει τα όρια των τιμών των θερμοκρασιών που επιθυμεί να επιφέρει ο κλιματισμός, όταν ενεργοποιείται από το σύστημα διαχείρισης ενέργειας. Για τις ψυχρές ημέρες του χειμώνα, ορίζει μία κατώτερη θερμοκρασία - συχνά στους 19-20 °C - και μία ανώτερη θερμοκρασία για τις θερμές ημέρες του καλοκαιριού - συχνά στους 27-28 °C. Κατά την εντολή ενεργοποίησης από το σύστημα διαχείρισης ενέργειας για ένα συγκεκριμένο διάστημα μίας ώρας, ο κλιματισμός ελέγχει αν η εσωτερική θερμοκρασία βρίσκεται στα όρια που του δίνονται. Αν η θερμοκρασία βρίσκεται εκτός ορίων, τότε ο

κλιματισμός ενεργοποιείται, ενώ αν βρίσκεται εντός, ο κλιματισμός θα παραμείνει απενεργοποιημένος. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας πραγματοποιείται σε όλη τη διάρκεια του διαστήματος στο οποίο δίνεται εντολή ενεργοποίησης. Αντίθετα, στην περίπτωση που δεν δίνεται εντολή ενεργοποίησης για ένα διάστημα μίας ώρας, το σύστημα κλιματισμού θα παραμείνει απενεργοποιημένο καθ' όλη τη διάρκεια και μέχρι το τέλος του διαστήματος αυτού και η διαδικασία θα τερματιστεί, ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία. Ο αλγόριθμος που ακολουθεί αυτή η λειτουργία, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.6. Τέλος, το EnergyPlus έχει τη δυνατότητα να αποστέλλει στο σύστημα την ωριαία κατανάλωση ενέργειας του HVAC, η οποία διαφέρει ανά περίπτωση, ανάλογα με τη διαφορά θερμοκρασίας που καλείται να καλύψει στο χώρο. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η διαφορά, τόσο μεγαλύτερη είναι η κατανάλωσή ενέργειας του.



Σχήμα 2.5: Προσθήκη ηλεκτρικού συστήματος κλιματισμού στο OpenStudio.

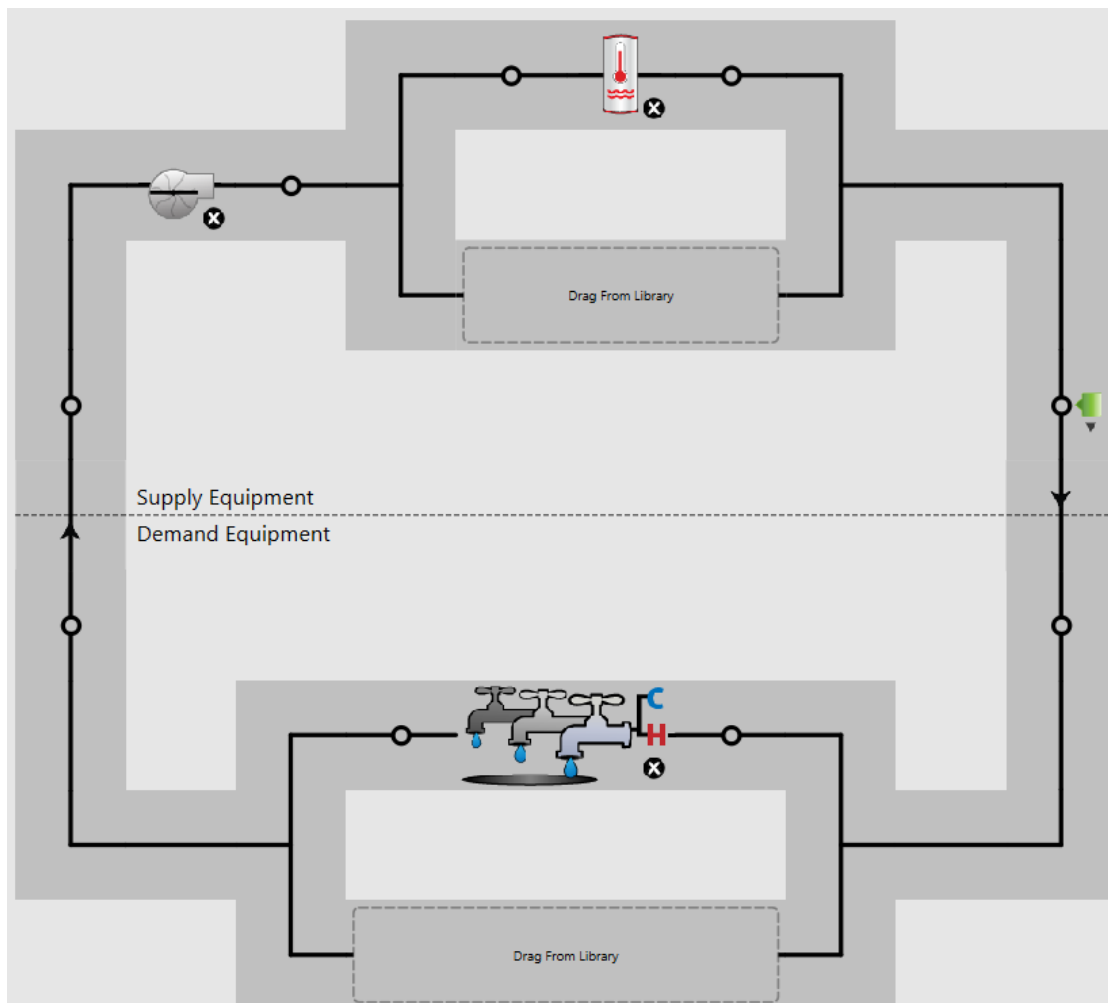


Σχήμα 2.6: Αλγόριθμος λειτουργίας HVAC.

### 2.3.4 Ηλεκτρικός θερμοσίφωνας

Στο τρίτο στάδιο, προστίθεται ο ηλεκτρικός θερμοσίφωνας (Water Heater), όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7. Η παρούσα συσκευή είναι πιο απλοποιημένη σε σχέση με το σύστημα κλιματισμού, καθώς λειτουργεί με την εντολή του συστήματος διαχείρισης ενέργειας, χωρίς περαιτέρω ελέγχους. Ο χρήστης δύναται να ορίσει τη θερμοκρασία του νερού που επιθυμεί, η οποία κυμαίνεται στους 40-45 °C. Το EnergyPlus, όπως προηγουμένως, αποστέλλει πληροφορία στο σύστημα για την κατανάλωση ενέργειας του ηλεκτρικού θερμοσίφωνα, η οποία επίσης είναι μεταβλητή, καθώς εξαρτάται από τη θερμοκρασία του κρύου νερού που εισέρχεται, που επηρεάζεται από τις καιρικές συνθήκες.



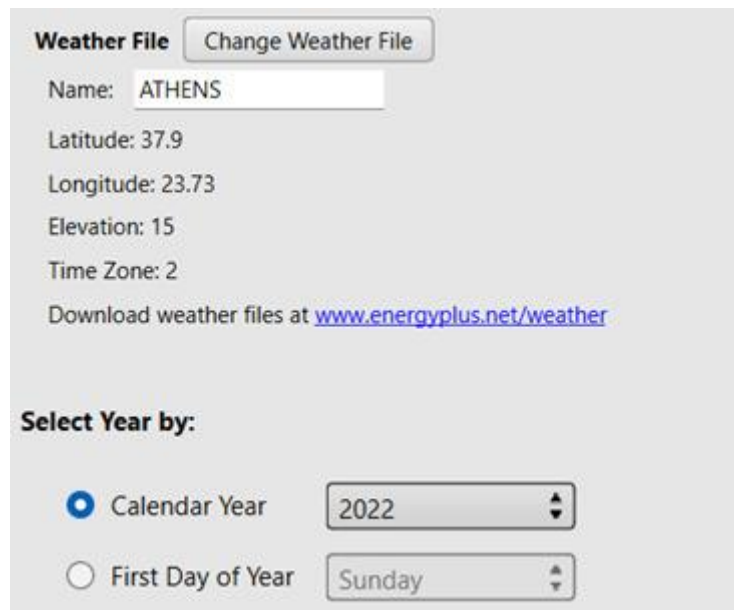


Σχήμα 2.7: Προσθήκη ηλεκτρικού θερμοσίφωνα στο OpenStudio.

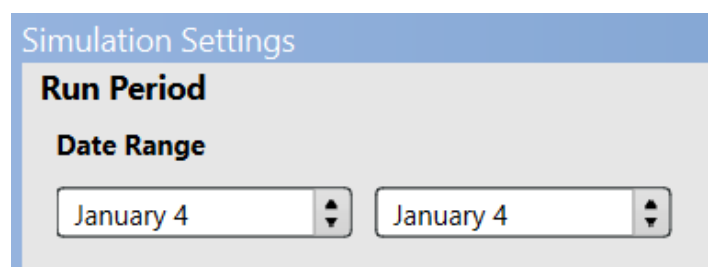
### 2.3.5 Καταγεγραμμένο αρχείο καιρού

Στο τέταρτο στάδιο, εισάγεται αρχείο καιρού, αναφορικά με την τοποθεσία και το έτος, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.8. Το EnergyPlus δέχεται πληροφορία για τις καταγεγραμμένες καιρικές συνθήκες ενός έτους ανά ημέρα και ώρα, που επηρεάζουν την εξωτερική θερμοκρασία αέρα, την υγρασία και τη θερμοκρασία της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι συνθήκες αυτές, επηρεάζουν και τις εσωτερικές συνθήκες του κτηρίου, ανάλογα με τα δομικά του χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Επομένως, επιλέγοντας την προσομοίωση μίας συγκεκριμένης ημέρας του έτους, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.9, το EnergyPlus δίνει τη πληροφορία για τις συνθήκες που επικρατούν ανά ώρα. Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας, έχοντας τις πληροφορίες για τη θερμοκρασία του εσωτερικού του κτηρίου αλλά και τη κατανάλωση ενέργειας των συσκευών, κρίνει και αποφασίζει για τη λειτουργία και τη διάρκεια του συστήματος κλιματισμού, καθώς και τη λειτουργία του ηλεκτρικού θερμοσίφωνα.





Σχήμα 2.8: Εισαγωγή αρχείου καιρού στο OpenStudio.



Σχήμα 2.9: Επιλογή ημέρας προσομοίωσης.

Τα παραπάνω γραφικά δεδομένα μεταφράζονται σε μορφή αρχείου «.txt» και εισάγονται στο πρόγραμμα EnergyPlus, προκειμένου να σχηματίσει την ενεργειακή ταυτότητα του κτηρίου. Εφόσον πραγματοποιηθεί η προσομοίωση για ένα συγκεκριμένο εικοσιτετράωρο, το σύστημα χρονοπρογραμματισμού διαθέτει πλέον το κτήριο στο οποίο θα πραγματοποιήσει δοκιμές. Έπειτα από εναλλακτικές δοκιμές που πραγματοποιεί στη λειτουργία του κλιματισμού και του θερμοσίφωνα, λαμβάνει τα αντίστοιχα αποτελέσματα (όπως είναι η ωριαία θερμοκρασία, η υγρασία και η συνολική κατανάλωση ενέργειας των παραπάνω συσκευών) και τα επεξεργάζεται, έτσι ώστε να κρίνει αργότερα αν είναι τα βέλτιστα, σύμφωνα με τις ρυθμίσεις που έχει λάβει για αυτή τη προσομοίωση.

## 2.4 Έξυπνοι μετρητές

Η χρήση των έξυπνων μετρητών κατανάλωσης ηλεκτρικού ρεύματος αποτελούν μία σημαντική μετάβαση που ξεκινά να εφαρμόζεται σταδιακά. Βασικό τους πλεονέκτημα αποτελεί η ένδειξη της κατανάλωσης ενέργειας σε πραγματικό χρόνο, τόσο στους καταναλωτές, όσο και στις εταιρείες παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, όντας συνδεδεμένοι στο διαδίκτυο και διαθέτοντας συγκεκριμένα πρωτόκολλα επικοινωνίας.

Στην πλευρά των εταιρειών, η δυνατότητα καταγραφής των καταναλώσεων ενέργειας των χρηστών μεμονωμένα, συμβάλλει στον καλύτερο προγραμματισμό της παραγωγής τους, με αποτέλεσμα να είναι περισσότερο αποδοτική και λιγότερο κοστοβόρα. Παράλληλα, οι εταιρείες είναι σε θέση να εφαρμόζουν διαφορετικά τιμολόγια κατά τη διάρκεια της ημέρας, ακόμη και ανά ώρα, έχοντας στη διάθεσή τους πραγματικά στοιχεία για τις ημέρες και ώρες αιχμής, καταργώντας τα μοναδικά δύο αυθαίρετα τιμολόγια του εικοσιτετράωρου, ημερήσιο και νυχτερινό. Οι καταναλωτές παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά ανά εποχή, ανά ημέρα της εβδομάδας αλλά και ανά ώρα.

Στην πλευρά των καταναλωτών, οι έξυπνοι μετρητές είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι, καθώς είναι σε θέση να λαμβάνουν ανά πάσα στιγμή την τρέχουσα τιμή της μίας κιλοβατώρας (kWh), όπως συνηθίζεται να μετράται. Κατ' αυτό το τρόπο, γνωρίζουν τις ώρες που το ηλεκτρικό ρεύμα είναι ακριβότερο ή οικονομικότερο και μπορούν να προγραμματίσουν καλύτερα τις καταναλώσεις τους [17]. Το παρόν σύστημα διαχείρισης ενέργειας που μελετάται σε αυτή την εργασία, αναλαμβάνει αυτή τη δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία, αποδεσμεύοντας τους χρήστες. Παράλληλα, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας αξιοποιεί τον έξυπνο μετρητή και στην περίπτωση της πώλησης του ηλεκτρικού ρεύματος, από πλεονάσματα ενέργειας που μπορεί να προκύπτουν από το φωτοβολταϊκό σύστημα. Η τιμή της πώλησης ενέργειας είναι ανάλογη των αντίστοιχων τιμολογίων αγοράς, ωστόσο συνηθίζεται να είναι μικρότερη, με τις εταιρείες να την κοστολογούν ως ένα ποσοστό αυτών των τιμολογίων. Η αναλογία πώλησης-αγοράς καθορίζεται έπειτα από συμφωνία παραγωγού-καταναλωτή [11]. Στην περίπτωση του παρόντος συστήματος, η ωριαία τιμή πώλησης ενέργειας στις εταιρείες υπολογίζεται ως το 50% της ωριαίας τιμής της αγοράς από αυτές. Τέλος, η χρήση των έξυπνων μετρητών επιδεικνύει στους καταναλωτές τις ενεργοβόρες συσκευές τους, με αποτέλεσμα να φροντίζουν την καλύτερη χρήση τους, ή την αντικατάστασή τους, εάν είναι εφικτό. Άλλωστε, όταν οι κάτοικοι μιας οικίας έχουν ένδειξη για την ωριαία κατανάλωση ενέργειας των συσκευών τους, συχνά είναι πιο προσεκτικοί και δεν προβαίνουν σε αυθαιρεσίες, σε ό,τι αφορά αυτή. Επομένως, ακόμη και εάν μία οικία δεν

υιοθετεί το σύστημα διαχείρισης ενέργειας που προτείνεται, ο έξυπνος μετρητής θα προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα σε αυτή. Εξωτερικά δεν έχει παρά μόνο μικρές διαφορές στην όψη σε σχέση με ένα παραδοσιακό μετρητή ενέργειας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.10.



*Σχήμα 2.10: Απεικόνιση Έξυπνου Μετρητή [18].*

# 3.

## ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

---

### 3.1 Σύστημα διαχείρισης ενέργειας – εισαγωγή

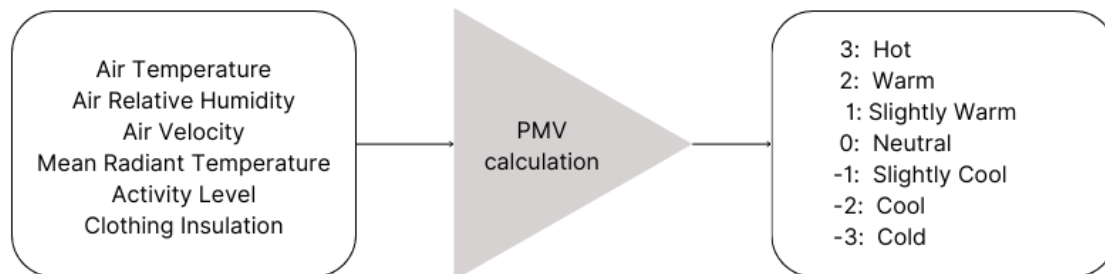
Το σύστημα που προτείνεται στη παρούσα εργασία δομείται εξ ολοκλήρου στο περιβάλλον MATLAB της MathWorks. Διαθέτει τη συνάρτηση βελτιστοποίησης που αποτελεί τον κεντρικό πυρήνα του συστήματος και υπολογίζει το τελικό αποτέλεσμα. Εκτός, όμως, από το κεντρικό αυτό στοιχείο, διαθέτει συναρτήσεις που επικοινωνούν με το χρήστη, προκειμένου να λαμβάνουν τα δεδομένα του. Διαθέτει, επίσης, συναρτήσεις που επικοινωνούν και ανταλλάσσουν δεδομένα με το EnergyPlus, αποκτώντας πρόσβαση στη κατάσταση ενός κτηρίου στο οποίο τοποθετείται.

### 3.2 Συνάρτηση πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης - κριτήρια επιλογής του συστήματος

#### 3.2.1 Predicted Thermal Vote - PMV

Ο Δείκτης Θερμικής Άνεσης - ή αλλιώς Predicted Thermal Vote (PMV) - αποτελεί ένα χρήσιμο μαθηματικό μοντέλο προκειμένου να διαπιστώνεται η θερμική άνεση ενός ανθρώπου, δηλαδή αν κρυώνει, ζεσταίνεται, ή βρίσκεται σε ουδέτερη κατάσταση. Το PMV είναι πολύ χρήσιμο για το παρόν σύστημα διαχείρισης ενέργειας, καθώς λαμβάνει υπόψη την κατάσταση στην οποία

βρίσκεται ο χρήστης, ενεργοποιώντας το σύστημα κλιματισμού με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να στοχεύσει στην θερμική ουδετερότητα του. Ο υπολογισμός του PMV εξαρτάται τόσο από τη θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου στον οποίο βρίσκεται ο άνθρωπος, όσο και από μία σειρά παραγόντων που αφορούν την θερμική κατάστασή του [10].



Σχήμα 3.1: Υπολογισμός PMV.

Όπως περιγράφεται από το Σχήμα 3.1, το PMV εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

- **Θερμοκρασία Αέρα (Air Temperature):**

Ο βασικότερος, ίσως, παράγοντας που μπορεί να ελέγξει το σύστημα με την λειτουργία του κλιματισμού. Σύμφωνα με τους ειδικούς, το εύρος θερμοκρασιών στο οποίο ένας άνθρωπος αισθάνεται άνετα είναι  $20-25^{\circ}\text{C}$ , χωρίς ωστόσο να είναι καθοριστικό, καθώς επικρατούν και άλλοι παράγοντες που αναλύονται παρακάτω [19]. Το σύστημα λαμβάνει δεδομένα μέσω αισθητήρων θερμοκρασίας.

- **Σχετική Υγρασία Αέρα (Relative Air Humidity):**

Το σύστημα δύναται, επίσης, να ελέγξει την υγρασία μέσω του κλιματισμού. Το ιδανικό εύρος τιμών του ποσοστού σχετικής υγρασίας είναι 40-60%. Χαμηλότερα επίπεδα προκαλούν ξηρασία στο χώρο, γεγονός που επιφέρει δυσφορία, ενώ υψηλότερα επίπεδα είναι ανθυγιεινά και δημιουργούν στον άνθρωπο πιο έντονη την αίσθηση της εκάστοτε θερμοκρασίας [19]. Το σύστημα λαμβάνει δεδομένα μέσω αισθητήρων υγρασίας.

- **Ταχύτητα Αέρα (Air Velocity):**

Αποτελεί τον παράγοντα που επηρεάζει ο εξαερισμός ενός κτηρίου, συνήθως από τα παράθυρα. Η ταχύτητα αέρα επηρεάζεται κυρίως από το εξωτερικό περιβάλλον και τα μετεωρολογικά του δεδομένα την εκάστοτε στιγμή. Ιδανική και συνηθέστερη τιμή για την ταχύτητα αέρα στο εσωτερικό ενός κτηρίου είναι τα  $0.1\text{ m/s}$ , τιμή που δέχεται το σύστημα ως στατική [19].

- **Mean Radiant Temperature:**

Αποτελεί τον παράγοντα που αφορά τη θερμοκρασία όλων των επιφανειών που περιβάλλουν τον εσωτερικό χώρο, όπως οι τοίχοι, το έδαφος και τα αντικείμενα στο κτήριο. Σε αντίθεση με τη θερμοκρασία αέρα, επικεντρώνεται στη μετάδοση θερμότητας μέσω ακτινοβολίας από και προς τον άνθρωπο [19].

- **Επίπεδο Δραστηριότητας (Activity Level):**

Η θερμική κατάσταση του ανθρώπου επηρεάζεται άμεσα από τη δραστηριότητά του. Όταν πραγματοποιεί μια έντονη δραστηριότητα, όπως είναι το περπάτημα, το τρέξιμο ή κάποιο άλλο είδος γυμναστικής, τείνει να ζεσταίνεται περισσότερο, σε σχέση με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται ακίνητος. Επομένως, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας λαμβάνει υπόψη αυτό τον παράγοντα, δεχόμενο τιμές χειροκίνητα. Εφόσον τοποθετείται σε οικία, το επίπεδο δραστηριότητας καθορίζεται σε μία χαμηλή τιμή, θεωρώντας ότι οι χρήστες του στέκονται κυρίως ακίνητοι και πραγματοποιούν ένα μικρό περπάτημα μέσα σε αυτή. Ωστόσο, οι ίδιοι μπορούν να το αλλάξουν, αν πρόκειται να πραγματοποιήσουν μία εντονότερη δραστηριότητα. Οι τιμές που δύναται να λάβει παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1 [10].

Πίνακας 3-1: Παραδείγματα επιπέδων δραστηριότητας που καθορίζουν το PMV		
Δραστηριότητα	$W/m^2$	<i>MET</i>
Ύπνος	40	0.7
Καθιστική δραστηριότητα (σε ηρεμία)	60	1.0
Ορθοστασία (σε ηρεμία)	70	1.2
Περπάτημα	100	1.7
Εργασίες σπιτιού	120	2.1

- **Ενδυματολογική Μόνωση (Clothing Insulation):**

Αφορά τον ρουχισμό του ανθρώπου που επηρεάζει άμεσα τη θερμική του αίσθηση. Οι τιμές εξαρτώνται από την ποσότητα και το είδος των ρούχων που φορά. Αποτελεί, ίσως, τον μοναδικό παράγοντα που μπορεί να ελέγξει, εφαρμόζοντας τα ανάλογα ρούχα ανά εποχή. Οι κάτοικοι οφείλουν να φορούν τα κατάλληλα ενδύματα σε κάθε περίπτωση, προκειμένου να αποφεύγεται η υπέρμετρη χρήση του κλιματισμού και κατ' επέκταση η υπερβολική κατανάλωση ενέργειας. Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας δέχεται τις τιμές ενδυματολογικής μόνωσης χειροκίνητα, οι οποίες διαφέρουν ανά προσομοίωση, ανάλογα με την εποχή στην οποία πραγματοποιείται. Στον Πίνακα 3.2, παρουσιάζονται διάφορες περιπτώσεις ενδυμάτων σε εσωτερικό χώρο σε συνδυασμό με τον βαθμό μόνωσής τους [10].

<b>Πίνακας 3-2: Παραδείγματα ενδυματολογικής μόνωσης που καθορίζουν το PMV</b>		
Ρουχισμός	<i>clo</i>	$K * m^2 * W^{-1}$
Κοντά – ελαφριά θερινά ρούχα	0.3	0.016
Μακριά – ελαφριά φθινοπωρινά ρούχα	0.5	0.078
Μακριά – βαριά φθινοπωρινά ρούχα	0.7	0.108
Μακριά – βαριά χειμερινά ρούχα	0.9	0.140
Φθινοπωρινά ρούχα και ελαφρύ κλινოსκέπασμα	1.3	0.2015
Χειμερινά ρούχα και βαρύ κλινοςκέπασμα	1.9	0.2945

Στην περίπτωση του παρόντος συστήματος διαχείρισης ενέργειας, εφόσον οι χρήστες βρίσκονται μέσα στην οικία, το καλοκαίρι η ενδυματολογική μόνωση θεωρείται ίση με  $0.3\ clo$ , ενώ το χειμώνα θεωρείται ίση με  $0.9\ clo$ . Όσον αφορά την άνοιξη και το φθινόπωρο, οι τιμές βρίσκονται ενδιάμεσα, ανάλογα με τα εκάστοτε μετεωρολογικά δεδομένα. Κατά τη διάρκεια του ύπνου, η μόνωση αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό με τη χρήση κλινოსκεπασμάτων.

Ο κατάλληλος συνδυασμός των παραπάνω μεταβλητών παραγόντων υπολογίζεται από το PMV, το οποίο ισούται με [10]:

$$PMV = \left\{ \begin{aligned} & (0.303 * e^{-0.036 * M} + 0.028) * \\ & \left[ (M - W) - 3.05 * 10^{-3} * (5733 - 6.99(M - W) - p_a) \right. \\ & \left. - 0.42[(M - W) - 58.15] - 1.7 * 10^{-5} * M * (5867 - p_a) - 0.0014 * M * (34 - t_a) \right. \\ & \left. - 3.96 * 10^{-8} * f_{cl} * [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} * h_c(t_{cl} - t_a) \right] \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

όπου:

$$h_c = \left\{ \begin{aligned} & 2.38 * |t_{cl} - t_a|^{0.25}, \text{ για } 2.38 * |t_{cl} - t_a|^{0.25} > 12.1 * \sqrt{v_{ar}} \\ & 12.1 * \sqrt{v_{ar}}, \text{ για } 2.38 * |t_{cl} - t_a|^{0.25} < 12.1 * \sqrt{v_{ar}} \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

$$f_{cl} = \left\{ \begin{aligned} & 1 + 1.29 * I_{cl}, \text{ για } I_{cl} \leq 0.078 \text{ m}^2 * \text{K/W} \\ & 12.1 * \sqrt{v_{ar}}, \text{ για } I_{cl} > 0.078 \text{ m}^2 * \text{K/W} \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

$$t_{cl} = \left\{ \begin{aligned} & 35.7 - 0.028 * (M - W) - I_{cl} * \{3.96 * 10^{-8} * f_{cl} * \\ & [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} * h_c * (t_{cl} - t_a)\} \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

και:

$M$  το επίπεδο δραστηριότητας ( $W / m^2$ ),

$W$  το μηχανικό έργο του σώματος ( $W / m^2$ ),

$f_{cl}$  ο συντελεστής επιφάνειας των ενδυμάτων,

$t_a$  η εσωτερική θερμοκρασία αέρα ( $^{\circ}C$ ),

$\bar{t}_r$  mean radiant temperature ( $^{\circ}C$ ),

$h_{cl}$  ο συντελεστής μεταγωγής θερμότητας [ $W / (m^2 * K)$ ],

$t_{cl}$  η θερμοκρασία επιφάνειας των ενδυμάτων ( $^{\circ}C$ ),

$I_{cl}$  η ενδυματολογική μόνωση ( $m^2 * K / W$ ),

$v_{ar}$  η ταχύτητα αέρα ( $m / s$ ).

Σύμφωνα με την Εξίσωση (3.1), το PMV εξαρτάται συνολικά και από άλλους παράγοντες, τους οποίους, όμως, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας θεωρεί στατικούς. Στο εσωτερικό της οικίας,



το μηχανικό έργο θεωρείται μηδενικό [19]. Ο συντελεστής μεταγωγής θερμότητας θεωρείται ίσος με  $1.5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ , εφόσον αφορά ήπια εσωτερική δραστηριότητα [19]. Η θερμοκρασία επιφάνειας των ενδυμάτων θεωρείται ίση με την θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα [19]. Οι υπόλοιποι παράγοντες που αναφέρθηκαν αρχικά είναι μεταβλητοί και λαμβάνονται από τους αισθητήρες του κτηρίου που προσομοιώνονται από τα δεδομένα που παρέχει το EnergyPlus, καθώς και από την χειροκίνητη εισαγωγή των χρηστών – σε ό,τι αφορά την ενδυματολογική τους μόνωση και το επίπεδο δραστηριότητας.

Σκοπός του συστήματος είναι η διατήρηση του PMV μεταξύ των τιμών -0.5 και 0.5, εύρος στο οποίο οι χρήστες βρίσκονται σε σχετικά ουδέτερη θερμική άνεση, δηλαδή το ιδανικότερο σενάριο. Όσο το σύστημα διαχείρισης ενέργειας αποκλίνει από αυτό το εύρος, τόσο αυξάνεται η ποινή του κτηρίου (PMV Penalty), τιμή που η συνάρτηση βελτιστοποίησης στοχεύει να ελαχιστοποιήσει [10].

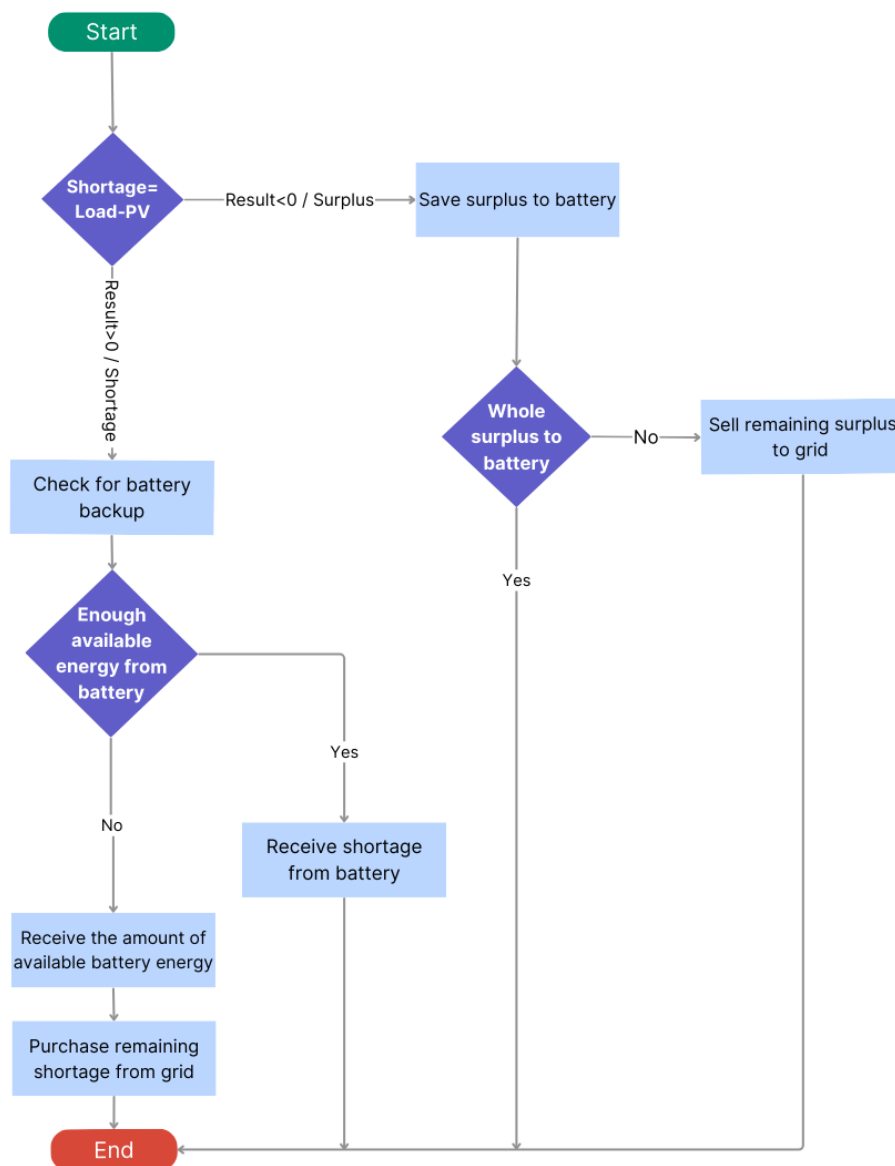
Επομένως, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας δοκιμάζει τη λειτουργία του κλιματισμού μέσα στο εικοσιτετράωρο σε διάφορες χρονικές στιγμές και διάρκειες και λαμβάνει τις αντίστοιχες τιμές PMV των χρηστών. Ανάλογα, λοιπόν, με το συντελεστή βαρύτητας που έχει δοθεί αρχικώς σε αυτή τη λειτουργία, στοχεύει στο σενάριο στο οποίο το PMV βρίσκεται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο επιθυμητό εύρος.

### **3.2.2 Συνολικό κόστος ενέργειας - αλγόριθμος διαχείρισης διαθέσιμων πόρων**

Βασικό μέλημα του συστήματος διαχείρισης ενέργειας, όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή της εργασίας, είναι η μείωση του κόστους της ενέργειας των καταναλωτών και κατ' επέκταση η μείωση χρήσης ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή της. Τα δύο παραπάνω στοιχεία συνδέονται άρρηκτα, καθώς η πολυκριτηριακή συνάρτηση βελτιστοποίησης στοχεύει στο μικρότερο δυνατό κόστος για κάθε σενάριο, με την αξιοποίηση, όσο το δυνατόν περισσότερο, της ενέργειας που παράγεται από το φωτοβολταϊκό σύστημα του κτηρίου, η οποία συνεπάγεται την μείωση της ζήτησης από το ηλεκτρικό δίκτυο. Παράλληλα, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας στοχεύει στη μετακίνηση των οικιακών φορτίων σε ώρες που η αγορά ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο - όταν πραγματοποιείται - είναι οικονομικότερη, το οποίο συμβαίνει σε στιγμές κατά τις οποίες δεν επιβαρύνεται με υπέρμετρη χρήση, επομένως η παραγωγή ενέργειας είναι πιο ομαλή.

Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας που μελετάται στην παρούσα εργασία, εκτός από τον χρονοπρογραμματισμό των συσκευών μιας οικίας μέσα σε ένα εικοσιτετράωρο, αναλαμβάνει να διαχειριστεί την ενέργεια που προέρχεται από το φωτοβολταϊκό σύστημα, τη συστοιχία

μπαταριών και το ηλεκτρικό δίκτυο, διοχετεύοντάς τη αναλόγως στα φορτία του. Επομένως, ακολουθεί ένα συγκεκριμένο αλγόριθμο, που θέτει σε προτεραιότητα τους παραπάνω διαθέσιμους πόρους - εάν υπάρχουν. Ο αλγόριθμος παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2: Περιγραφή του αλγορίθμου διαχείρισης ενέργειας.

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου που ακολουθεί η ενέργεια στο σύστημα. Κύριο μέλημα του συστήματος διαχείρισης ενέργειας είναι η αξιοποίηση όσο το δυνατόν περισσότερο της ηλιακής ενέργειας. Επομένως, το πρώτο ενδεχόμενο που θα εξεταστεί είναι η κάλυψη των ζητούμενων φορτίων από την ενέργεια που παράγει το φωτοβολταϊκό σύστημα εκείνη τη στιγμή. Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας ελέγχει πρωτίστως τη διαφορά της παρεχόμενης ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά από τη ζητούμενη ενέργεια από τις συσκευές.

Εάν επικρατεί έλλειμα, δηλαδή η ενέργεια που καταναλώνουν οι συσκευές στιγμιαία είναι περισσότερη από την παρεχόμενη από τα φωτοβολταϊκά, τότε το έλλειμα αυτό θα αναζητηθεί απευθείας από τη συστοιχία μπαταριών. Εάν δύναται να καλυφθεί εξ ολοκλήρου από αυτή, τότε η διαδικασία τερματίζεται. Εάν όχι, τότε θα αντληθεί η διαθέσιμη ενέργεια από τη συστοιχία μπαταριών και το νέο έλλειμα θα καλυφθεί από το ηλεκτρικό δίκτυο, αγοράζοντας με την ωριαία τιμή του. Εάν επικρατεί πλεόνασμα μεταξύ της παρεχόμενης ενέργειας από το φωτοβολταϊκό σύστημα και της ζητούμενης από τα φορτία, τότε η περισσευούμενη ενέργεια θα οδηγηθεί αρχικά στη συστοιχία μπαταριών. Εάν δύναται να αποθηκευτεί σε αυτή εξ ολοκλήρου - με βάση την χωρητικότητα και την στιγμιαία κατάσταση φόρτισής της - τότε η διαδικασία θα τερματιστεί. Εάν υπάρχει πλεόνασμα, ακόμη και μετά την αποθήκευση ενέργειας στη συστοιχία μπαταριών, τότε αυτό θα δοθεί στο ηλεκτρικό δίκτυο και θα πωληθεί. Το τελευταίο σενάριο, προφανώς, είναι το πιο κερδοφόρο και μειώνει σημαντικά το συνολικό κόστος ενέργειας για τους χρήστες. Έτσι, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας λαμβάνει την πληροφορία για τους διαθέσιμους πόρους ανά ώρα και έπειτα από δοκιμές, εκτελεί τον χρονοπρογραμματισμό των συσκευών, με σκοπό το καλύτερο δυνατό σενάριο σε ένα πλήρες εικοσιτετράωρο με το ανάλογο κόστος του.

Το συνολικό κόστος ενέργειας του εικοσιτετράωρου για τον καταναλωτή υπολογίζεται με βάση τις εξισώσεις που ακολουθούν.

Η διαφορά των ζητούμενων φορτίων από τη προσφερόμενη ενέργεια του φωτοβολταϊκού συστήματος ανά ώρα υπολογίζεται με βάση την εξίσωση (3.5) [11]:

$$Shortage(j) = Load(j) - PV(j) \quad (3.5)$$

όπου:

$Load$  η συνολική κατανάλωση ενέργειας των φορτίων του κτηρίου ( $kWh$ ),

$PV$  η συνολική παραγωγή ενέργειας των φωτοβολταϊκών του κτηρίου ( $kWh$ ) και

$j$  η ώρα της ημέρας ( $hour$ ).

Σύμφωνα με την εξίσωση (3.5), το αποτέλεσμα της διαφοράς μπορεί να οδηγήσει είτε σε πλεόνασμα ενέργειας (αρνητικό πρόσημο), είτε σε έλλειμμα ενέργειας (θετικό πρόσημο).

Όπως αναφέρθηκε και κατά τη διαδικασία του αλγορίθμου, εάν υπάρχει πλεόνασμα θα δοθεί στη συστοιχία μπαταριών (όσο μπορεί να αποθηκεύσει) και το υπόλοιπο, εάν υπάρχει, θα πωληθεί στο ηλεκτρικό δίκτυο. Εάν υπάρχει έλλειμμα, θα ζητηθεί, αρχικά, από τη συστοιχία

μπαταριών, όσο εκείνη μπορεί να προσφέρει. Το υπόλοιπο έλλειμμα, εάν υπάρχει, θα ζητηθεί από το ηλεκτρικό δίκτυο. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται στην εξίσωση (3.6) [11].

$$Grid(j) = Shortage(j) - receivedEnergy(j) + savedEnergy(j) \quad (3.6)$$

όπου:

*Shortage* η διαφορά της ζητούμενης από την προσφερόμενη ενέργεια (*kWh*),

*receivedEnergy* η ενέργεια που ανακτήθηκε από τη συστοιχία μπαταριών (*kWh*),

*savedEnergy* η ενέργεια που δόθηκε στη συστοιχία μπαταριών (*kWh*) και

*j* η ώρα της ημέρας (*hour*).

Όπως περιγράφεται στην εξίσωση (3.6), κάθε ώρα μπορεί να ισχύσει ένα από τα δύο σενάρια, το πλεόνασμα ή το έλλειμμα. Στη περίπτωση του ελλείματος σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή (θετικό πρόσημο), αφαιρείται από αυτό η ενέργεια που ανακτάται από τη συστοιχία μπαταριών (*received energy*), ενώ η ενέργεια που αποθηκεύεται σε αυτή την αντίστοιχη ώρα (*saved energy*) είναι μηδενική. Εάν υπάρξει νέο έλλειμμα, λόγω της αδυναμίας της συστοιχίας μπαταριών να καλύψει το πλήρες ποσό, τότε αυτό καλύπτεται από το ηλεκτρικό δίκτυο. Στην περίπτωση του πλεονάσματος σε μία συγκεκριμένη ώρα (αρνητικό πρόσημο), προστίθεται σε αυτό η ενέργεια που αποθηκεύεται στη συστοιχία μπαταριών (*saved energy*), ενώ η ενέργεια που ανακτάται εκείνη τη χρονική στιγμή είναι μηδενική (*received energy*). Εάν υπάρξει νέο πλεόνασμα, λόγω της αδυναμίας της συστοιχίας μπαταριών να αποθηκεύσει το πλήρες ποσό, τότε αυτό δίνεται στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Το ηλεκτρικό ρεύμα που πωλείται στο ηλεκτρικό δίκτυο από το φωτοβολταϊκό σύστημα ενός κτηρίου, κοστολογείται χαμηλότερα από την αντίστοιχη τιμή αγοράς από αυτό. Το ποσοστό αυτής της διαφοράς προσυμφωνείται μεταξύ παραγωγού και καταναλωτή και το τελικό αποτέλεσμα υπολογίζεται στις παρακάτω εξισώσεις. Στην περίπτωση του ελλείματος (θετικό πρόσημο), πραγματοποιείται αγορά από το δίκτυο τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή με κόστος που υπολογίζεται στην εξίσωση (3.7) [11]:

$$Cost(j) = Grid(j) * Price(j) \quad (3.7)$$

όπου:

*Grid* το έλλειμμα ενέργειας που θα αγοραστεί από το δίκτυο την ώρα *j* (*kWh*),

*Price* η τρέχουσα τιμή αγοράς (€) και

$j$  η ώρα της ημέρας (*hour*).

Στην περίπτωση του πλεονάσματος (αρνητικό πρόσημο), πραγματοποιείται πώληση στο δίκτυο τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή με οικονομικό όφελος που υπολογίζεται ως εξής [11]:

$$Cost(j) = Grid(j) * Price(j) * Percentage \quad (3.8)$$

όπου:

*Grid* το πλεόνασμα που θα πωληθεί στο δίκτυο (*kWh*),

*Price* η τρέχουσα τιμή αγοράς (€),

*Percentage* το προσυμφωνημένο ποσοστό τιμολόγησης πώλησης ενέργειας (%) και

$j$  η ώρα της ημέρας (*hour*).

Τελικά, το κριτήριο του συνολικού κόστους της ημέρας (σε €) θα υπολογιστεί από το άθροισμα του συνόλου του εικοσιτετραώρου, τιμή που η συνάρτηση βελτιστοποίησης στοχεύει να ελαχιστοποιήσει και περιγράφεται στην εξίσωση (3.9) [11]:

$$sumCost = \sum_{j=1}^{24} Cost(j) \quad (3.9)$$

όπου:

*Cost(j)* το κόστος που καταγράφεται την ώρα  $j$  (€) και

$j$  η ώρα της ημέρας (*hour*).

### 3.2.3 Συντελεστής σταθερότητας δικτύου

Ένα συχνό φαινόμενο που παρατηρείται στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι αυτό των ωρών αιχμής (*peak hours*). Οι καταναλωτές συχνά επιλέγουν να χρησιμοποιούν ενεργοβόρες οικιακές συσκευές, όπως είναι η ηλεκτρική κουζίνα και το πλυντήριο, σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Η αυξημένη συνολική ζήτηση σε περιορισμένο χρονικό περιθώριο, αναγκάζει τις εταιρείες παραγωγής ενέργειας να χρησιμοποιούν το σύνολο των πόρων τους στο μέγιστο, με την αξιοποίηση, κυρίως, μηχανών που λειτουργούν με ορυκτά καύσιμα, αυξάνοντας ταυτόχρονα το κόστος παραγωγής. Παράλληλα, το φαινόμενο αυτό μπορεί να οδηγήσει σε καταστάσεις πτώσεων τάσης, ακόμα και σε ολικές διακοπές ρεύματος σε ακραίες περιπτώσεις [17].

Ένα ακόμη κριτήριο της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, λοιπόν, είναι η σταθερότητα και η αξιοπιστία του δικτύου, μέσα από την προσπάθεια της εξάλειψης των ωρών αιχμής. Το σύστημα, ανάλογα με τη βαρύτητα που δίνεται σε αυτή τη λειτουργία, τείνει να ομαλοποιήσει

την κατανομή των φορτίων μέσα σε ένα εικοσιτετράωρο και να μειώσει το φαινόμενο κατά το οποίο μεγάλο μέρος των ενεργοβόρων συσκευών λειτουργούν σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα ταυτόχρονα. Κατ' αυτό το τρόπο, κάθε κτήριο που υιοθετεί αυτή την τακτική συμβάλλει στη συνολική προσπάθεια της ομαλοποίησης του δικτύου.

Το σύστημα δύναται να λάβει πληροφορία για το φαινόμενο αυτό, μέσα από το συντελεστή σταθερότητας του δικτύου που υπολογίζεται στην εξίσωση (3.10) [11]:

$$\sigma_m = \frac{\sum_{j=1}^{24} (Grid(j) - Grid_{average})^2}{24} \quad (3.10)$$

όπου:

$Grid(j)$  η κατανάλωση ενέργειας από το δίκτυο την ώρα  $j$  ( $kWh$ ),

$Grid_{average}$  η μέση κατανάλωση ενέργειας από το δίκτυο σε ένα πλήρες 24ωρο ( $kWh$ ) και

$j$  η ώρα της ημέρας ( $hour$ )

Όπως περιγράφει η εξίσωση (3.10), όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά της κατανάλωσης ενέργειας της εκάστοτε ώρας από το ηλεκτρικό δίκτυο, σε σχέση με το μέσο όρο του εικοσιτετράωρου, δηλαδή όσες περισσότερες είναι οι ώρες αιχμής που προκύπτουν από τη συγκέντρωση των φορτίων σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές, τόσο ο συντελεστής σταθερότητας δικτύου αυξάνεται. Η ομοιόμορφη κατανομή των φορτίων στο εικοσιτετράωρο προκαλεί μείωση του συντελεστή σταθερότητας δικτύου και σε αυτό το οποίο στοχεύει η συνάρτηση βελτιστοποίησης.

Ο συντελεστής σταθερότητας δικτύου μπορεί να συνδεθεί με το κριτήριο της συνάρτησης που στοχεύει στη μείωση του συνολικού κόστους κατανάλωσης ενέργειας (παράγραφος 3.2.2), καθώς και τα δύο κριτήρια επωφελούνται από την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο, ωστόσο δεν μπορούν να θεωρηθούν ταυτόσημα, καθώς εκτελούν διαφορετικές διεργασίες.

### 3.2.4 Συντελεστής χρονικής ικανοποίησης χρήστη – Satisfaction Index

Το παρόν σύστημα στοχεύει στην εξισορρόπηση της βελτιστοποίησης της χρήσης ενέργειας με τις ανέσεις του χρήστη. Αποτελεί μείζον ζήτημα να είναι φιλικό προς εκείνον, να μην εναντιώνεται σε μεγάλο βαθμό στις προτιμήσεις του και να λειτουργεί με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να τον οδηγήσει σε μία σταδιακή προσαρμογή σε έναν νέο τρόπο καθημερινότητας, σε ό,τι αφορά την κατανάλωση ενέργειας στην οικία του. Με γνώμονα τα παραπάνω, στη συνάρτηση βελτιστοποίησης εισάγεται ένα επιπλέον κριτήριο που αφορά την απόκλιση της χρονικής

λειτουργίας των συσκευών σε σχέση με την αρχική του προτίμηση. Ο χρήστης εισάγει για κάθε συσκευή το επιθυμητό χρονικό περιθώριο ενεργοποίησης της από το σύστημα, καθορίζοντας μια αρχική και μία τελική τιμή. Όσο πλησιέστερα βρίσκεται η ώρα ενεργοποίησης από το σύστημα στην αρχική του τιμή, τόσο η ικανοποίησή του αυξάνεται [11].

Για παράδειγμα, για την προγραμματιζόμενη συσκευή «πλυντήριο» ο χρήστης εισάγει το επιθυμητό χρονικό περιθώριο λειτουργίας με αρχική τιμή στις «17:00» και τελική τιμή στις «20:00», δηλαδή κατά τις απογευματινές ώρες. Το σύστημα θα δοκιμάσει και τελικά θα επιλέξει τη βέλτιστη ώρα ενεργοποίησης της συγκεκριμένης συσκευής αυστηρά μέσα στο συγκεκριμένο χρονικό περιθώριο. Όσο πλησιέστερα στις 17:00 επιλέξει να ενεργοποιήσει τη συσκευή, τόσο περισσότερο θα ικανοποιήσει την επιθυμία του. Όσο αποκλίνει από αυτή, με μέγιστη απόκλιση την επιλογή στις 20:00, τόσο η ικανοποίησή του μειώνεται.

Ο αντίστοιχος συντελεστής Satisfaction Index (Sat) υπολογίζεται στην εξίσωση (3.11) [11]:

$$Sat = \left\{ \begin{array}{ll} \sum_{i=1}^N \frac{b(i)-t(i)}{b(i)-a(i)}, & t(i) \in [a(i), b(i)] \text{ \& } a(i) \neq b(i) \\ 1, & t(i) = a(i) = b(i) \\ 0, & else \end{array} \right\} \quad (3.11)$$

όπου:

$a$  η αρχική επιθυμητή ώρα ενεργοποίησης του χρήστη,

$b$  η τελική επιθυμητή ώρα ενεργοποίησης του χρήστη,

$t$  η ώρα ενεργοποίησης της συσκευής και

$i$  ο αριθμός συσκευής του συστήματος διαχείρισης ενέργειας

Σύμφωνα με την εξίσωση (3.11), εάν εκπληρώνεται πλήρως η επιθυμία του χρήστη με την ενεργοποίηση της κάθε συσκευής στην αρχική επιθυμητή του τιμή, το αποτέλεσμα ισούται με 1. Όσο αποκλίνει από την τιμή αυτή, το αποτέλεσμα κινείται προς το 0. Επομένως σε ένα ιδανικό σενάριο στο οποίο όλες οι συσκευές ενεργοποιούνται στην αρχική επιθυμητή τιμή του χρήστη, τότε το Sat ισούται με τον συνολικό αριθμό των συσκευών του συστήματος διαχείρισης ενέργειας, καθώς η τιμή του για κάθε συσκευή είναι ίση με 1. Σκοπός της συνάρτησης βελτιστοποίησης είναι η μεγιστοποίηση του παραπάνω αθροίσματος.

### 3.2.5 Συνολική συνάρτηση βελτιστοποίησης

Οι παραπάνω παράγοντες καλούνται να εισαχθούν στη συνολική πολυκριτηριακή συνάρτηση βελτιστοποίησης, η οποία αναλαμβάνει να τους εξισορροπήσει, ανάλογα με τη βαρύτητα που δίνεται στον καθένα. Η συνάρτηση περιγράφεται στην εξίσωση (3.12) [11]:

$$Objective = \gamma_1 * \frac{Sat}{Sat_{max}} - \gamma_2 * \frac{PMVpenalty}{PMVpenalty_{max}} - \gamma_3 * \frac{\sigma_m}{\sigma_{m,max}} - \gamma_4 * \frac{sumCost}{sumCost_{max}} \quad (3.12)$$

όπου:

$Sat$  ο συντελεστής χρονικής ικανοποίησης χρήστη,

$Sat_{max}$  η μέγιστη δυνατή τιμή του συντελεστή χρονικής ικανοποίησης χρήστη,

$PMVpenalty$  η ποινή απόκλισης από το επιθυμητό εύρος τιμών του PMV,

$PMVpenalty_{max}$  η μέγιστη δυνατή ποινή απόκλισης από το επιθυμητό εύρος τιμών του PMV,

$\sigma_m$  ο συντελεστής σταθερότητας δικτύου,

$\sigma_{m,max}$  η μέγιστη δυνατή τιμή του συντελεστή σταθερότητας δικτύου,

$sumCost$  το συνολικό ημερήσιο κόστος κατανάλωσης ενέργειας,

$sumCost_{max}$  το μέγιστο δυνατό ημερήσιο κόστος κατανάλωσης ενέργειας και

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$  οι συντελεστές βαρύτητας του εκάστοτε κριτηρίου.

Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας αναζητά τη βέλτιστη λύση με την εύρεση της μέγιστης τιμής της παραπάνω συνάρτησης. Σκοπός της είναι η μεγιστοποίηση του  $Sat$  (με θετικό πρόσημο) και η ελαχιστοποίηση των  $PMVpenalty, \sigma_m$  και  $sumCost$  (με αρνητικό πρόσημο), έτσι ώστε να αποκτήσει τη μέγιστη δυνατή τιμή, εκτελώντας το άθροισμά τους.

Οι συντελεστές  $\gamma$  δίνουν τη βαρύτητα που εισάγει ο χρήστης για το κάθε κριτήριο. Λαμβάνουν τιμές μεταξύ 0 και 1, ενώ το άθροισμά τους ισούται με 1 σε κάθε περίπτωση. Για παράδειγμα, εάν ο χρήστης επιθυμεί να δώσει μεγαλύτερη βαρύτητα στη θερμική του άνεση ( $PMVpenalty$ ), με τα υπόλοιπα κριτήρια να υστερούν, επιλέγει τον συνδυασμό:

$$\gamma_1 = 0.1, \gamma_2 = 0.7, \gamma_3 = 0.1, \gamma_4 = 0.1$$



Εάν ο χρήστης επιθυμεί να δώσει την απόλυτη προτεραιότητα σε κάποιο κριτήριο, όπως για παράδειγμα το συνολικό κόστος κατανάλωσης ενέργειας  $sumCost$ , με το σύστημα να αγνοεί τα υπόλοιπα, τότε επιλέγει τον συνδυασμό:

$$\gamma_1 = 0, \gamma_2 = 0, \gamma_3 = 0, \gamma_4 = 1$$

Εάν ο χρήστης επιθυμεί μία ισορροπία μεταξύ των κριτηρίων, επιλέγει τον συνδυασμό:

$$\gamma_1 = 0.25, \gamma_2 = 0.25, \gamma_3 = 0.25, \gamma_4 = 0.25$$

Γενικά, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει οποιοδήποτε συνδυασμό επιθυμεί, ανάλογα με τις προτεραιότητές του.

Οι μέγιστες τιμές  $Sat_{max}$ ,  $PMVpenalty_{max}$ ,  $\sigma_{m,max}$  και  $sumCost_{max}$  τοποθετούνται στο εκάστοτε κλάσμα ως παρονομαστές, προκειμένου να πραγματοποιηθεί κανονικοποίηση αυτών των κριτηρίων, δηλαδή να αποκτήσουν τιμή μεταξύ 0 και 1, έτσι ώστε να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους. Η παραπάνω διαδικασία είναι σημαντική, καθώς τα κριτήρια αρχικά έχουν διαφορετικές κλίμακες και εύρη τιμών, ενώ η κανονικοποίηση ορίζει ένα κοινό εύρος, προκειμένου η βελτιστοποίηση να αναζητήσει βέλτιστες λύσεις για όλα τα κριτήρια. Οι μέγιστες τιμές των κριτηρίων καθορίζονται ως το μέγιστο ακραίο σενάριο που μπορεί να λάβει το καθένα. Αναλυτικά:

- Το  $Sat_{max}$  καθορίζεται ως το σενάριο στο οποίο ικανοποιούνται πλήρως οι απαιτήσεις του χρήστη για όλες τις συσκευές.
- Το  $PMVpenalty_{max}$  καθορίζεται ως το σενάριο κατά το οποίο ο χρήστης αποκτά τη χειρότερη συνολική θερμική άνεση, όπως μπορεί να συμβεί σε ένα σενάριο, σύμφωνα με το οποίο ο κλιματισμός είναι απενεργοποιημένος κατά τη διάρκεια μίας θερμής μέρας του καλοκαιριού.
- Το  $\sigma_{m,max}$  λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του, εάν το σύστημα διαχείρισης ενέργειας επιλέξει να ενεργοποιήσει το σύνολο των συσκευών σε ένα αυστηρά περιορισμένο χρονικό περιθώριο μέσα σε ένα εικοσιτετράωρο.
- Το  $sumCost_{max}$  λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του εάν το κτήριο τροφοδοτηθεί αποκλειστικά από το ηλεκτρικό δίκτυο, με την απουσία ενέργειας από το φωτοβολταϊκό σύστημα και τη συστοιχία μπαταριών, σε χρονικές στιγμές που η τιμή αγοράς είναι η υψηλότερη δυνατή.

Οι παραπάνω μέγιστες τιμές διαφέρουν ανά περίπτωση, ανάλογα με το σύνολο των συσκευών που θα εισάγει ο χρήστης, τις απαιτήσεις του, την τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος και τα μετεωρολογικά δεδομένα μιας ημέρας του έτους. Επομένως, για κάθε περίπτωση σεναρίου, το σύστημα αναζητά τις μέγιστες δυνατές τιμές που θα μπορούσαν να προκύψουν, τις οποίες πιθανόν δεν θα λάβει ποτέ, καθώς είναι οι χειρότερες δυνατές (ή η καλύτερη δυνατή στη περίπτωση του συντελεστή χρονικής ικανοποίησης χρήστη) με μικρό ποσοστό πιθανότητας.

Στο παρόν σύστημα διαχείρισης ενέργειας, η πιθανότητα του κάθε κριτηρίου να λάβει τη μέγιστη τιμή του διαφέρει σε σχέση με τις υπόλοιπες. Για παράδειγμα, η πιθανότητα του συντελεστή ικανοποίησης να λάβει τη μέγιστη τιμή του, δηλαδή το σενάριο ενεργοποίησης του συνόλου των συσκευών στην αρχική τιμή του χρήστη, είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τη πιθανότητα του σεναρίου, κατά το οποίο το σύστημα τροφοδοτείται αποκλειστικά από το ηλεκτρικό δίκτυο. Ως αποτέλεσμα, το εκάστοτε κλάσμα συγκλίνει είτε στην τιμή 0, είτε στην τιμή 1, είτε σε ενδιάμεσες τιμές, ανάλογα με την πιθανότητα του κάθε μεγίστου σεναρίου. Συνεπώς, ο συνδυασμός των ίσων συντελεστών των κριτηρίων, δεν επιφέρει ένα εξισορροπημένο σενάριο, αλλά αντιθέτως επιφέρει αποτελέσματα κατά τα οποία ένα κριτήριο έχει μεγαλύτερη βαρύτητα σε σχέση με τα υπόλοιπα. Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου, πραγματοποιούνται και καταγράφονται δοκιμές στους συντελεστές των κριτηρίων για το εκάστοτε σενάριο, προκειμένου να βρεθούν οι συνδυασμοί που είτε θα επιφέρουν ισορροπία μεταξύ τους, είτε θα προσδίδουν μεγαλύτερη βαρύτητα σε κάποιο κριτήριο, ανάλογα με τις προτιμήσεις του χρήστη. Οι μεταβλητές απόφασης (decision variables) της συνάρτησης βελτιστοποίησης αφορούν τις ώρες ενεργοποίησης της κάθε συσκευής που εισάγεται στο σύστημα διαχείρισης ενέργειας, αλλά και τη χρονική διάρκεια του κλιματισμού, που επηρεάζει τις εσωτερικές συνθήκες του κτηρίου. Η συνάρτηση βελτιστοποίησης παράγει για κάθε συσκευή μία χρονική στιγμή ενεργοποίησης (ώρα της ημέρας), η οποία βρίσκεται για τη κάθε μία σε ένα χρονικό περιθώριο που εισάγεται από το χρήστη. Το χρονικό περιθώριο ενεργοποίησης της κάθε συσκευής αποτελεί για τη συνάρτηση αυστηρό περιορισμό για τη βελτιστοποίηση. Επομένως, οφείλει να παράγει τιμές που βρίσκονται μέσα στο κάθε ένα χρονικό περιθώριο.

### 3.3 Μεγιστοποίηση της συνάρτησης βελτιστοποίησης

Το σύνολο του συστήματος διαχείρισης ενέργειας αναπτύσσεται στο περιβάλλον της MATLAB, η οποία είναι σε θέση να ανταλλάσσει δεδομένα με το υποβοηθητικό πρόγραμμα EnergyPlus. Σκοπός της, είναι η μεγιστοποίηση της συνάρτησης βελτιστοποίησης που περιγράφεται παραπάνω. Η MATLAB, λοιπόν, αναλαμβάνει να εξετάσει τα διάφορα ενδεχόμενα και τελικά

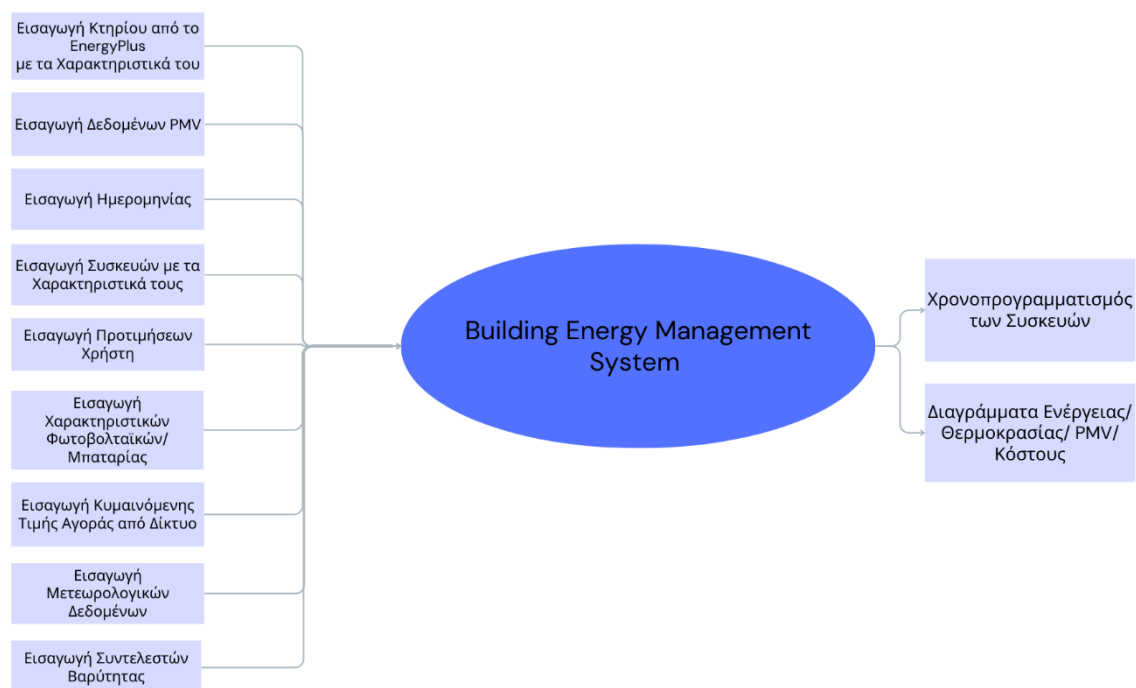
να καταλήξει στη βέλτιστη λύση μέσω της συνάρτησης Particle Swarm Optimization (PSO). Η PSO είναι ικανή να εντοπίσει τη μέγιστη ή την ελάχιστη τιμή μίας συνάρτησης βελτιστοποίησης, εξετάζοντας διάφορες τιμές για τις μεταβλητές της (decision variables), έως ότου βρεθεί η βέλτιστη λύση με τον κατάλληλο συνδυασμό των μεταβλητών αυτών. Η PSO, προκειμένου να πραγματοποιήσει τη παραπάνω λειτουργία, ακολουθεί έναν αλγόριθμο που περιλαμβάνει σωματίδια (particles), τα οποία κινούνται στο σύνολο του επιτρεπόμενου εύρους τιμών που της δίνεται. Σε κάθε βήμα, ο αλγόριθμος αξιολογεί τη συνάρτηση σε κάθε σωματίδιο και επαναπροσδιορίζει τη κατεύθυνση του, έτσι ώστε να κινούνται πιο στοχευμένα και με μεγαλύτερη απόδοση, μέχρι την αναζήτηση της λύσης. Η ταχύτητα εύρεσης του αλγορίθμου και η αποτελεσματικότητά του εξαρτώνται από τον αριθμό των βημάτων και των σωματιδίων που ορίζονται [20].

Στο παρόν σύστημα, η PSO αναλαμβάνει να εξετάσει τον κατάλληλο συνδυασμό των μεταβλητών της συνάρτησης βελτιστοποίησης (objective function), προκειμένου να μεγιστοποιηθεί. Οι μεταβλητές απόφασης (decision variables) της συνάρτησης βελτιστοποίησης είναι τα «t», ένας πίνακας δηλαδή με τιμές που ορίζουν την έναρξη λειτουργίας της κάθε συσκευής που έχει εισάγει ο χρήστης στο σύστημα διαχείρισης ενέργειας, μέσα σε ένα εικοσιτετράωρο. Παράλληλα, διαθέτει μία επιπλέον μεταβλητή απόφασης που αφορά τη διάρκεια λειτουργίας του κλιματισμού, η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη, σε αντίθεση με το σύνολο των υπόλοιπων συσκευών του κτηρίου, που η διάρκεια λειτουργίας τους είναι σταθερή και προκαθορισμένη. Συνεπώς, η PSO καλείται να αναζητήσει τιμές για αριθμό μεταβλητών ίσο με τον αριθμό των συσκευών του κτηρίου, συν μία τιμή επιπλέον για τη χρονική διάρκεια του κλιματισμού, συνθέτοντας ένα κατάλληλο χρονοπρογραμματισμό που ικανοποιεί τα κριτήρια που του δίνονται. Το μεγάλο πλεονέκτημα της PSO για το παρόν σύστημα είναι η δυνατότητα ορισμού περιορισμών για τις τιμές «t» που θα αναζητηθούν. Υπό αυτή τη συνθήκη, ο χρήστης είναι σε θέση να ορίσει εξ αρχής το χρονικό περιθώριο ενεργοποίησης που επιθυμεί για κάθε συσκευή. Ωστόσο, όσο πιο αυστηροί είναι οι περιορισμοί που θέτει ο χρήστης στο σύστημα, τόσο μικρότερη είναι η πιθανότητα να ευρεθεί ένας αποδοτικός χρονοπρογραμματισμός για το κτήριο.

### 3.4 Διαδικασία προσομοίωσης του συστήματος διαχείρισης ενέργειας

Έχοντας συγκεντρώσει τις επιμέρους διαδικασίες για τη λειτουργία του συστήματος διαχείρισης ενέργειας, παρακάτω περιγράφεται λεπτομερώς η διαδικασία που ακολουθείται για την εισροή και εκροή δεδομένων σε αυτό.

Στο διάγραμμα του Σχήματος 3.3 παρουσιάζεται το σύνολο των δεδομένων που απαιτείται από το σύστημα, προκειμένου να παράγει αποτελέσματα.

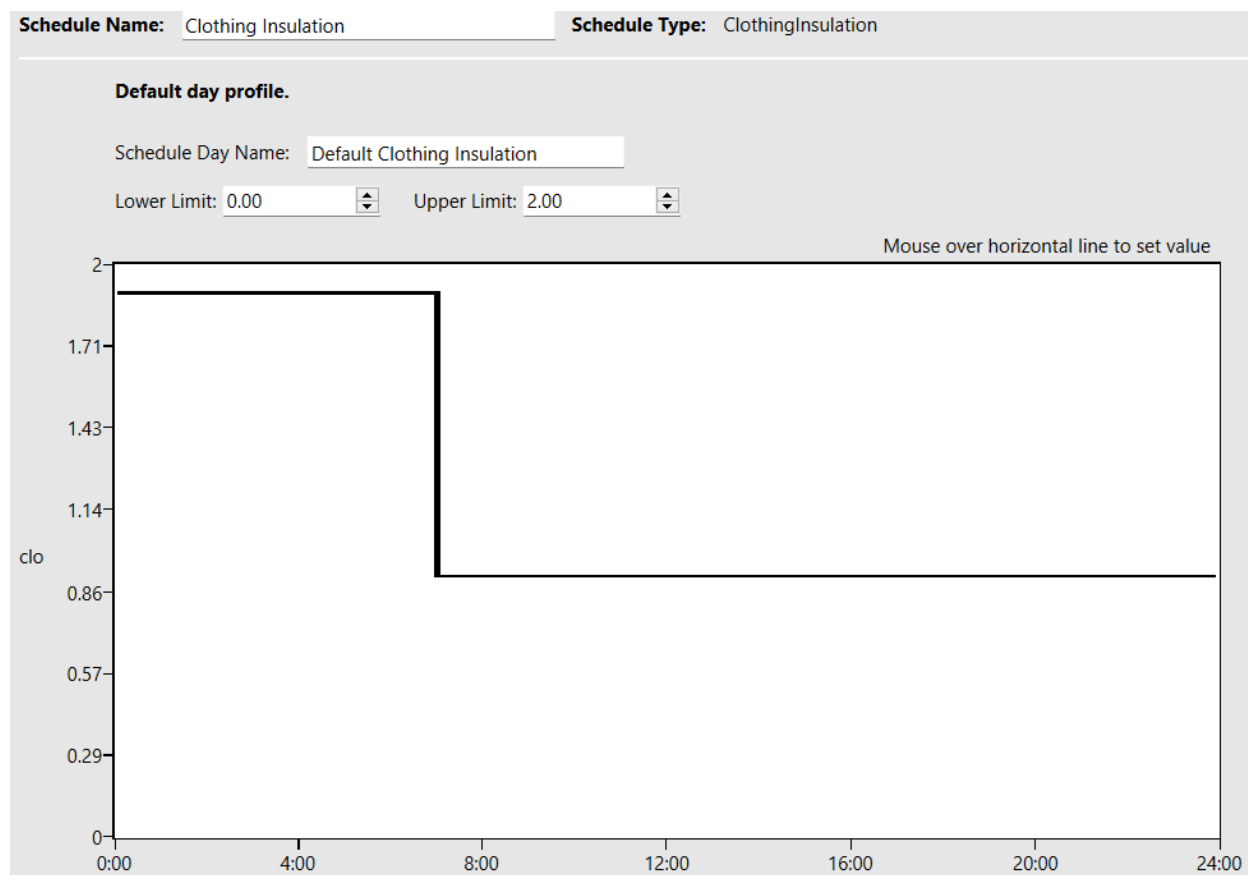


Σχήμα 3.3: Δεδομένα εισόδου και εξόδου του συστήματος.

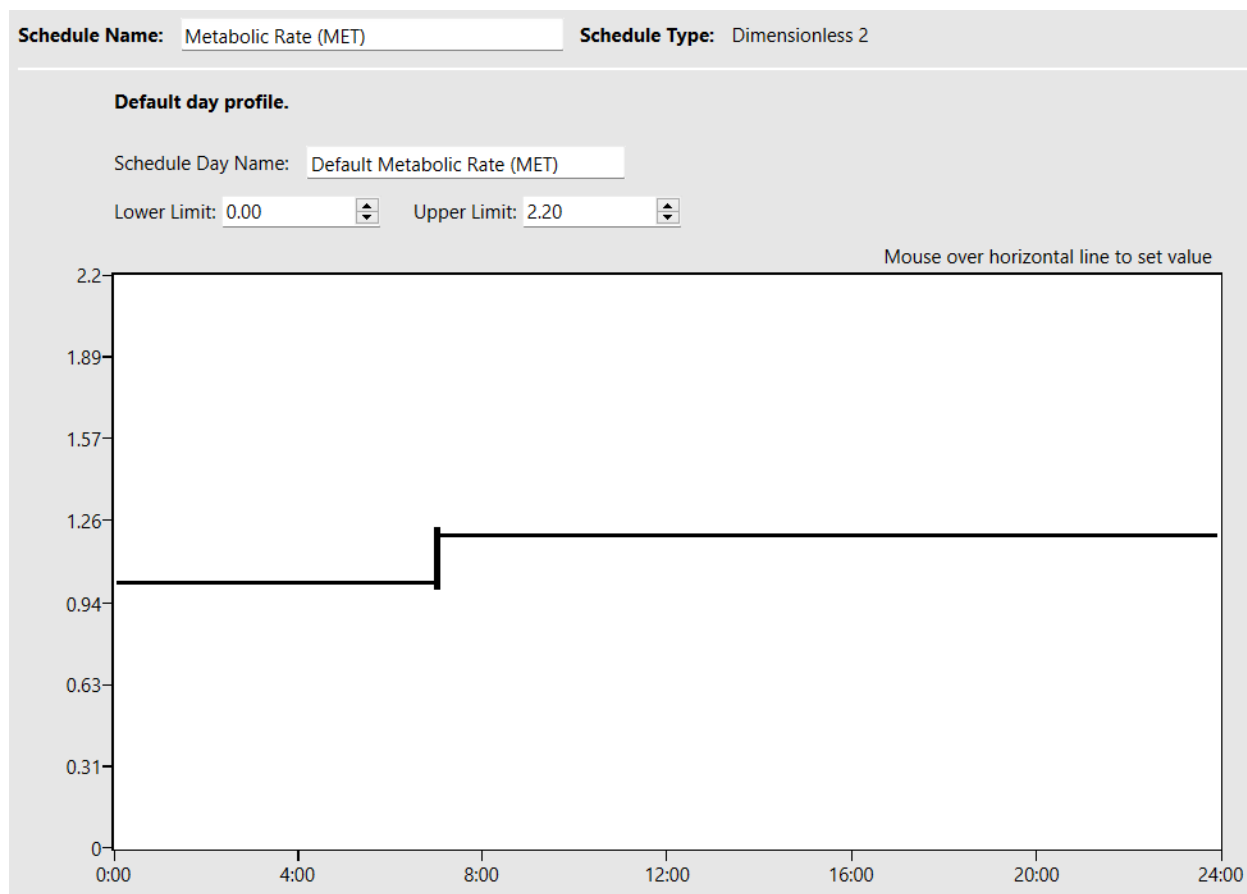
Για την εισαγωγή των παραπάνω δεδομένων αξιοποιείται τόσο το πρόγραμμα EnergyPlus, όσο και το γραφικό περιβάλλον που προσφέρει η MATLAB. Αρχικά, στο σύστημα εισάγεται το μοντέλο ενός κτηρίου, με τα δομικά και ενεργειακά χαρακτηριστικά του, τα οποία κατασκευάζονται στο γραφικό περιβάλλον του OpenStudio, το βοηθητικό πρόγραμμα του EnergyPlus. Παράλληλα, εισάγεται η ημερομηνία προσομοίωσης με τα μετεωρολογικά της δεδομένα. Το OpenStudio μεταφράζει τα γραφικά στοιχεία που εισάγονται, έτσι ώστε να εισαχθούν στο περιβάλλον του EnergyPlus στη μορφή αρχείου «.txt». Η παραπάνω διαδικασία περιγράφεται στο Κεφάλαιο 2.3.

Η εισαγωγή των δεδομένων του PMV, όπως είναι η ενδυματολογική μόνωση και το επίπεδο δραστηριότητας, που εισάγονται χειροκίνητα, πραγματοποιούνται επίσης στο περιβάλλον του

OpenStudio, προκειμένου να ομαδοποιηθούν με τα υπόλοιπα δεδομένα που απαιτούνται για τον υπολογισμό του PMV, τα οποία προέρχονται από την προσομοίωση στο EnergyPlus, όπως για παράδειγμα η εσωτερική θερμοκρασία. Στο Σχήμα 3.4 απεικονίζεται το διάγραμμα της τιμής για την ενδυματολογική μόνωση κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου, που βρίσκεται μεταξύ 0.9 και 1.9 clo για ένα σενάριο, η οποία μπορεί να μεταβάλλεται ανά ώρα. Η ίδια διαδικασία απεικονίζεται και στο Σχήμα 3.5, η οποία αφορά το επίπεδο δραστηριότητας.

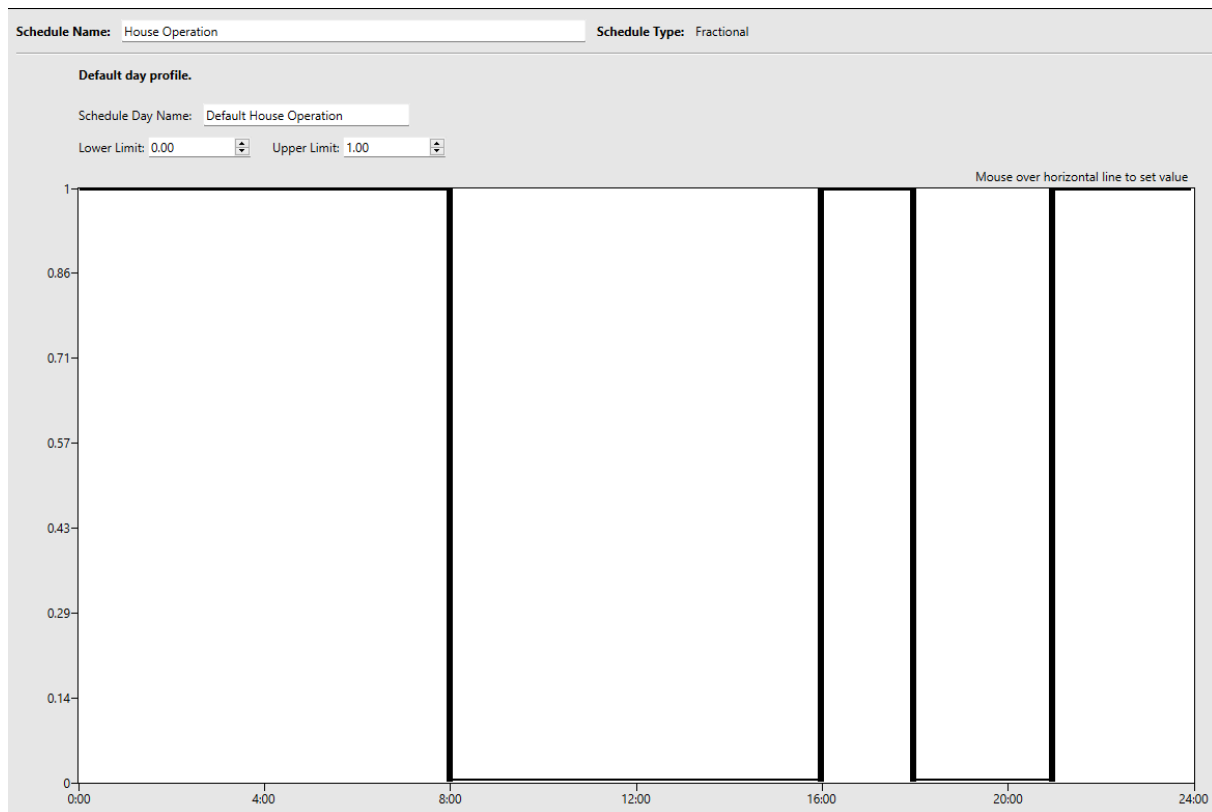


Σχήμα 3.4: Απεικόνιση τιμής ενδυματολογικής μόνωσης.



Σχήμα 3.5: Απεικόνιση τιμής επιπέδου δραστηριότητας.

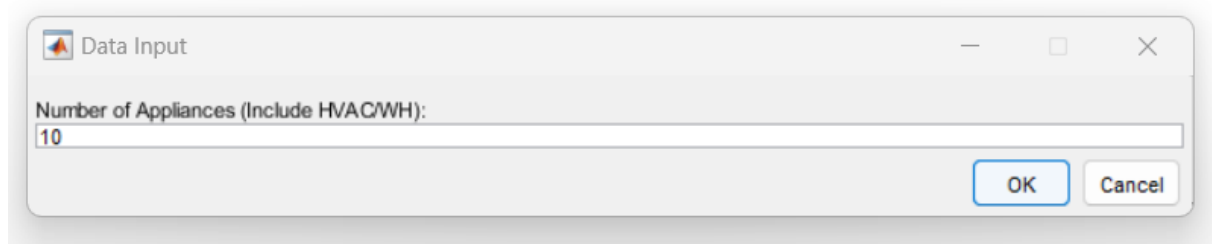
Είναι σαφές ότι ο υπολογισμός του PMV και η στόχευση διατήρησής του σε ανεκτά επίπεδα έχουν νόημα, μόνο όταν οι κάτοικοι του κτηρίου βρίσκονται μέσα σε αυτό. Συνεπώς, στο σύστημα εισάγεται και η πληροφορία που αφορά την παρουσία των κατοίκων στο κτήριο μέσα σε ένα εικοσιτετράωρο. Τις ώρες απουσίας τους, το PMV δεν λαμβάνεται υπόψη και το σύστημα αφαιρεί αυτό το κριτήριο από τη συνάρτηση βελτιστοποίησης. Στο Σχήμα 3.6 απεικονίζεται ένα σενάριο κατά το οποίο οι κάτοικοι απουσιάζουν μεταξύ 8:00-16:00 και 18:00-21:00.



Σχήμα 3.6: Απεικόνιση παρουσίας κατοίκων.

Τέλος, στο OpenStudio δύναται να εισαχθούν τιμές που αφορούν τη θερμοκρασία λειτουργίας του κλιματισμού, τη θερμοκρασία λειτουργίας του ηλεκτρικού θερμοσίφωνα και την κατανάλωση νερού, τιμές που εισάγονται αρχικά, θεωρούνται στατικές ανά προσομοίωση και αφορούν το σύνολο των ενεργειακών χαρακτηριστικών του κτηρίου.

Εφόσον πραγματοποιείται η παραπάνω διαδικασία, η MATLAB διαθέτει πλέον το κτήριο της προσομοίωσης με τα δομικά και ενεργειακά χαρακτηριστικά του, καθώς και την παρουσία των κατοίκων μέσα σε αυτό, τα οποία θεωρούνται είσοδοι για το σύστημα, όπως περιγράφεται στο διάγραμμα του Σχήματος 3.3. Το σύνολο των υπόλοιπων εισόδων, εισάγεται γραφικά στο περιβάλλον της MATLAB με τη μορφή pop-up παραθύρων, όπως παρουσιάζεται παρακάτω.



Σχήμα 3.7: Εισαγωγή αριθμού συσκευών.

Στο Σχήμα 3.7 το σύστημα ζητά από το χρήστη να εισάγει τον αριθμό των συσκευών που θα εισαχθούν στο σύστημα (προγραμματιζόμενων ή μη), συμπεριλαμβανομένων του κλιματισμού και του ηλεκτρικού θερμοσίφωνα.

The 'Data Input' dialog box contains the following fields and values:

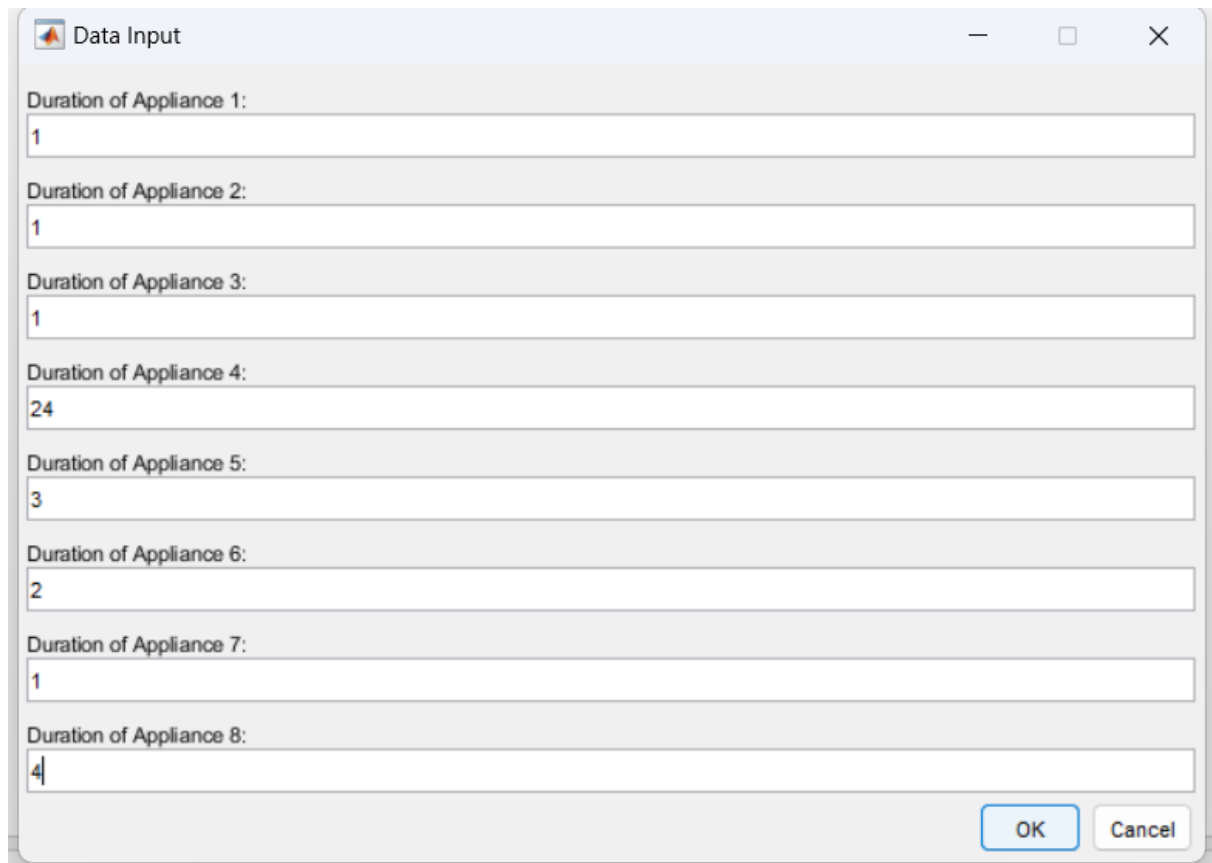
Appliance	Lower Bound Time Activation	Upper Bound Time Activation
Appliance 1	7	23
Appliance 2	8	23
Appliance 3	19	23
Appliance 4	0	0
Appliance 5	21	21
Appliance 6	19	19
Appliance 7	14	14
Appliance 8	20	20
Water Heater	19	21
HVAC	18	21

Buttons: OK, Cancel

Σχήμα 3.8: Εισαγωγή εύρους χρονικών τιμών των συσκευών.

Στο Σχήμα 3.8 το σύστημα ζητά από το χρήστη να εισάγει το εύρος χρονικών τιμών ενεργοποίησης της κάθε συσκευής, σύμφωνα με τις προτιμήσεις του. Για τις μη-προγραμματιζόμενες συσκευές (όπως είναι πχ. το ψυγείο ή η τηλεόραση) ο χρήστης εισάγει ίδια αρχική και τελική χρονική τιμή, έτσι ώστε το σύστημα να ενεργοποιήσει τη συγκεκριμένη συσκευή αποκλειστικά στο χρόνο που του δίνεται. Ο αριθμός των τιμών στα pop-up παράθυρα που ακολουθούν εξαρτάται από τον αριθμό συσκευών που εισάγει ο χρήστης στο πρώτο βήμα, όπως περιγράφεται στο Σχήμα 3.9.



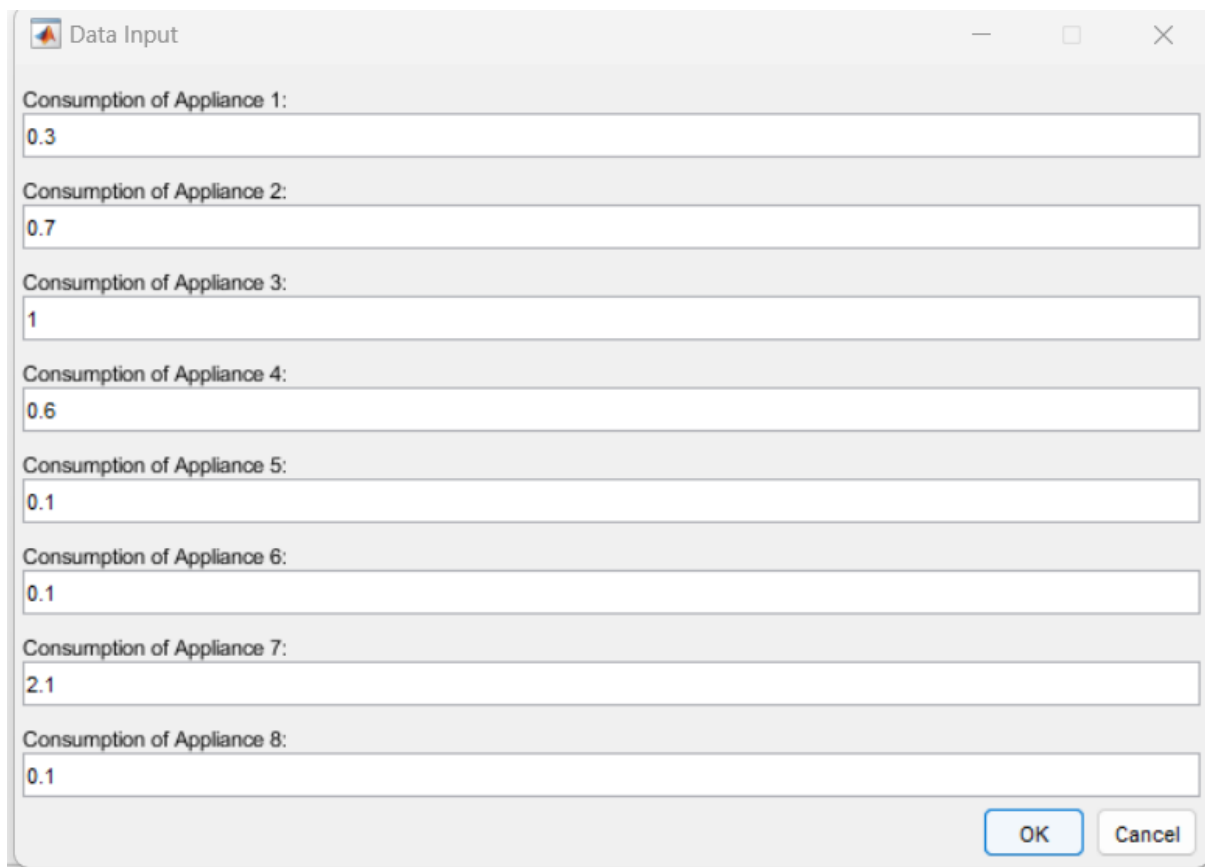


Appliance	Duration
Appliance 1	1
Appliance 2	1
Appliance 3	1
Appliance 4	24
Appliance 5	3
Appliance 6	2
Appliance 7	1
Appliance 8	4

Σχήμα 3.9: Εισαγωγή στατικών χρονικών διαρκειών των συσκευών.

Στο Σχήμα 3.9, το σύστημα ζητά από το χρήστη να εισάγει τις προκαθορισμένες χρονικές διάρκειες των συσκευών που είναι στατικές. Για παράδειγμα, το πρόγραμμα του πλυντηρίου διαρκεί μία ώρα και το ψυγείο λειτουργεί 24 ώρες. Οι χρονικές διάρκειες λειτουργίας του κλιματισμού και του ηλεκτρικού θερμοσίφωνα δεν εισάγονται στο pop-up παράθυρο του Σχήματος 3.9 καθώς είναι μεταβλητές. Συγκεκριμένα, η χρονική διάρκεια του κλιματισμού αποτελεί decision variable της συνάρτησης βελτιστοποίησης. Ωστόσο, η χρονική διάρκεια λειτουργίας του ηλεκτρικού θερμοσίφωνα δεν αποτελεί decision variable για τη συνάρτηση βελτιστοποίησης αλλά καθορίζεται από εκείνον και εξαρτάται από το χρόνο που απαιτείται για την απόκτηση της κατάλληλης θερμοκρασίας, ο οποίος αλλάζει ανά εποχή.

Αντίστοιχη διαδικασία πραγματοποιείται για την εισαγωγή της ισχύος της κάθε συσκευής, δηλαδή την κατανάλωσή της ανά ώρα, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.10. Για τις τυπικές συσκευές του κτηρίου, η κατανάλωση ενέργειας ανά ώρα είναι σταθερή. Το σύστημα κλιματισμού, όμως, αλλά και ο ηλεκτρικός θερμοσίφοντας έχουν μεταβλητή κατανάλωση ενέργειας ανά ώρα, η οποία εξαρτάται από τις συνθήκες. Η πληροφορία αυτή λαμβάνεται από το EnergyPlus.

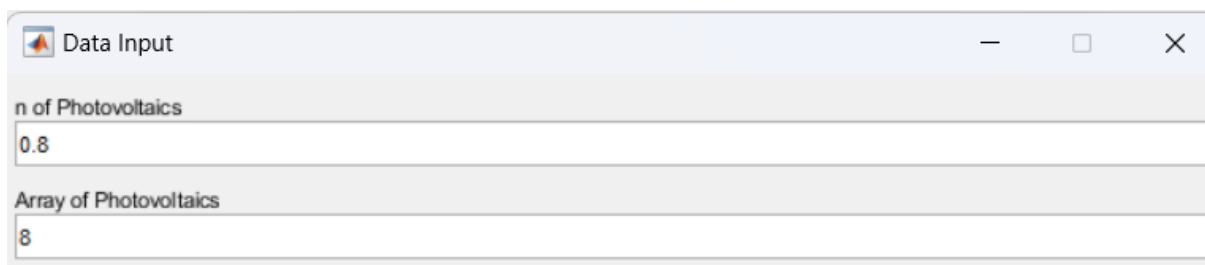


The 'Data Input' dialog box contains eight input fields for appliance consumption, each with a label and a text box. The values entered are: 0.3 for Appliance 1, 0.7 for Appliance 2, 1 for Appliance 3, 0.6 for Appliance 4, 0.1 for Appliance 5, 0.1 for Appliance 6, 2.1 for Appliance 7, and 0.1 for Appliance 8. At the bottom right are 'OK' and 'Cancel' buttons.

Appliance	Consumption
Appliance 1	0.3
Appliance 2	0.7
Appliance 3	1
Appliance 4	0.6
Appliance 5	0.1
Appliance 6	0.1
Appliance 7	2.1
Appliance 8	0.1

Σχήμα 3.10: Εισαγωγή στατικής κατανάλωσης ενέργειας ανά ώρα.

Στο pop-up παράθυρο του Σχήματος 3.11 εισάγεται η απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος, καθώς και το μέγεθός του. Οι τιμές αυτές είναι προκαθορισμένες και ενδέχεται να αλλάζουν ανάλογα με το κτήριο.

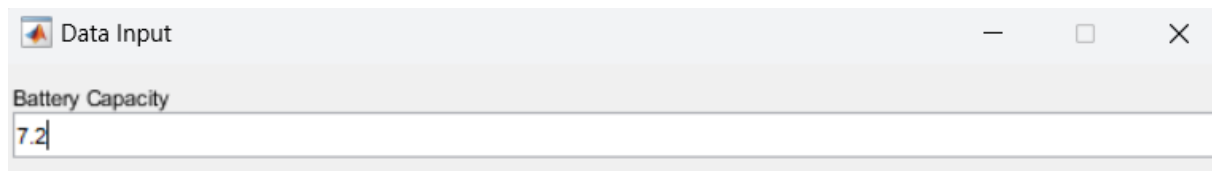


The 'Data Input' dialog box contains two input fields. The first is labeled 'n of Photovoltaics' with a value of 0.8. The second is labeled 'Array of Photovoltaics' with a value of 8. At the bottom right are 'OK' and 'Cancel' buttons.

Parameter	Value
n of Photovoltaics	0.8
Array of Photovoltaics	8

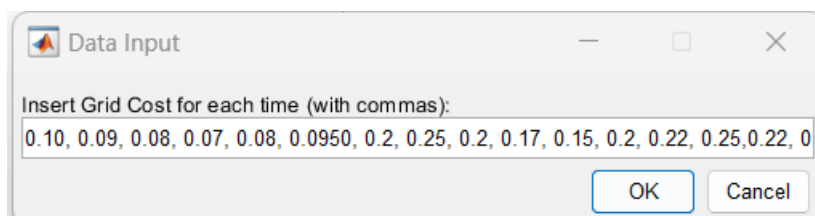
Σχήμα 3.11: Εισαγωγή χαρακτηριστικών φωτοβολταϊκού συστήματος.

Στο pop-up παράθυρο του Σχήματος 3.12, εισάγεται η χωρητικότητα της συστοιχίας μπαταριών σε kWh. Η τιμή είναι παρομοίως προκαθορισμένη, ωστόσο αλλάζει ανά είδος μπαταρίας που επιλέγεται



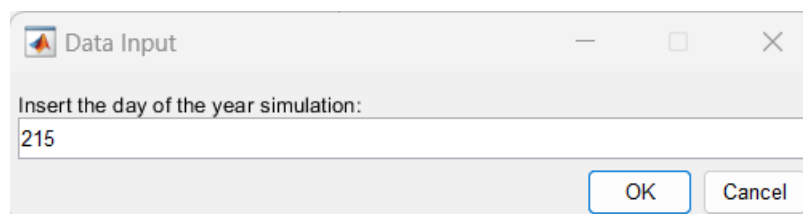
Σχήμα 3.12: Εισαγωγή χαρακτηριστικής χωρητικότητας μπαταρίας.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.13, ο χρήστης εισάγει το εικοσιτετράωρο τιμολόγιο αγοραπωλησίας ηλεκτρικού ρεύματος, όπως λαμβάνεται από τον έξυπνο μετρητή που διαθέτει σύνδεση στο διαδίκτυο. Η κοστολόγηση κατανάλωσης μίας κιλοβατώρας διαφέρει ανά ώρα, γεγονός που λαμβάνει υπόψη σε μεγάλο βαθμό το σύστημα, εφόσον χρονοπρογραμματίζει τις συσκευές σε ώρες που το ηλεκτρικό ρεύμα είναι οικονομικότερο, όταν δίνεται βαρύτητα στο κριτήριο κόστους ενέργειας.



Σχήμα 3.13: Εισαγωγή κυμαινόμενης τιμής αγοραπωλησίας σε ένα 24-ωρο.

Στο Σχήμα 3.14, το σύστημα ζητά από το χρήστη να προσδιορίσει την ημερομηνία που αφορά τη προσομοίωση. Στη παρούσα φάση, η MATLAB λαμβάνει από το ετήσιο αρχείο καιρού τις πληροφορίες για την ηλιακή ακτινοβολία και θερμοκρασία για κάθε ώρα της συγκεκριμένης ημέρας, προκειμένου να υπολογιστεί η παραγωγή του φωτοβολταϊκού συστήματος. Η ημερομηνία προσομοίωσης εισάγεται, επίσης, στο περιβάλλον του OpenStudio, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 2.3.5, έτσι ώστε να προσδιοριστεί το εσωτερικό περιβάλλον του κτηρίου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ανακτώνται τα δεδομένα της 3<sup>ης</sup> Αυγούστου (215<sup>η</sup> ημέρα του έτους).



Σχήμα 3.14: Εισαγωγή ημερομηνίας προσομοίωσης.

Τέλος, στη παρούσα εργασία πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων που προκύπτουν έπειτα από την παρέμβαση του συστήματος διαχείρισης ενέργειας και των αποτελεσμάτων που προκύπτουν υπό την απουσία του, σύμφωνα με τις πρωτοβουλίες των

χρηστών. Συνεπώς, το σύστημα ζητά από το χρήστη να εισάγει τη δική του επιλογή για τη χρονική διάρκεια του κλιματισμού και του ηλεκτρικού θερμοσίφωνα, αναλογικά με τις συνθήκες, όπως φαίνεται στα Σχήματα 3.15 και 3.16. Όσον αφορά τις ώρες ενεργοποίησης των συσκευών, το σύστημα θεωρεί ότι ο χρήστης επιλέγει τις αρχικές τιμές που έχει εισάγει κατά την είσοδο στο σύστημα, καθώς αποτελούν την κυριότερη προτίμησή του. Στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάζεται η σύγκριση των δύο αυτών καταστάσεων.



Σχήμα 3.15: Προσθήκη προσωπικής προτίμησης για τη χρονική διάρκεια του κλιματισμού.

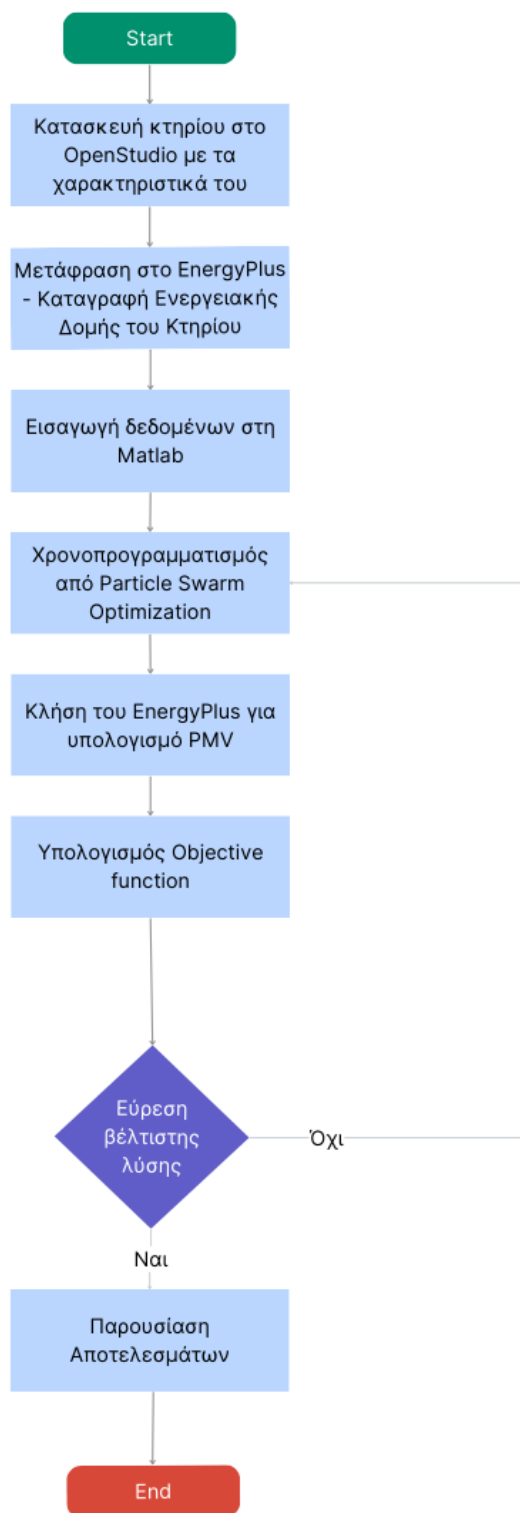


Σχήμα 3.16: Προσθήκη προσωπικής προτίμησης για τη χρονική διάρκεια του θερμοσίφωνα.

Αμέσως μετά την προσθήκη των παραπάνω δεδομένων, το σύστημα ξεκινά να παράγει τιμές «t» και «HVAC duration», καταγράφοντας τα αποτελέσματα του εκάστοτε βήματος. Μέσω της PSO, έπειτα από διαδοχικά βήματα, το σύστημα καταλήγει στη βέλτιστη λύση για το παρόν σενάριο που του δίνεται. Τα αποτελέσματα αυτών παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4.

Ο περιορισμός της βελτιστοποίησης είναι η διατήρηση των μεταβλητών απόφασης που παράγονται στα χρονικά περιθώρια που θέτει ο χρήστης για κάθε συσκευή. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται μέσω της PSO, η οποία δύναται να παράγει μεταβλητές απόφασης σε συγκεκριμένα όρια που δέχεται ως είσοδο. Ωστόσο, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας περιλαμβάνει έναν επιπλέον έλεγχο για τη παραπάνω λειτουργία, καθώς εξετάζει σε κάθε βήμα εάν οι μεταβλητές απόφασης βρίσκονται εκτός ορίων ή αν η λειτουργία μιας συσκευής ξεπερνά τα όρια του εικοσιτετραώρου που προσομοιώνεται. Σε αυτή τη περίπτωση, το σύστημα απορρίπτει απευθείας τον αντίστοιχο προγραμματισμό, εφόσον δεν ικανοποιούνται οι περιορισμοί του προβλήματος βελτιστοποίησης.

Στο διάγραμμα του Σχήματος 3.17, λοιπόν, παρουσιάζεται η ακολουθία για την προσομοίωση ενός σεναρίου.



Σχήμα 3.17: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήματος 3.17, για την προσομοίωση ενός σεναρίου το σύστημα απαιτεί ένα κτήριο, για το οποίο θα γνωρίζει τις εσωτερικές του συνθήκες και πώς αυτές δύναται να μεταβληθούν, με βάση τα εκάστοτε μετεωρολογικά δεδομένα. Η διαδικασία αυτή

πραγματοποιείται στο OpenStudio, στο οποίο κατασκευάζεται γραφικά ένα κτήριο, προστίθενται τα συστήματα θέρμανσής του και καταγράφονται τα δεδομένα του. Έπειτα, το γραφικό περιβάλλον του OpenStudio μεταφράζεται στο περιβάλλον του EnergyPlus, το οποίο διαθέτοντας τα εκάστοτε δεδομένα καιρού, καταγράφει τη πλήρη ενεργειακή δομή του κτηρίου. Στη συνέχεια το σύστημα ζητά το σύνολο των δεδομένων που απαιτούνται, τα οποία αφορούν τα δεδομένα PMV, τα χαρακτηριστικά των συσκευών του, τις προτιμήσεις του χρήστη, τα μετεωρολογικά δεδομένα, καθώς και πληροφορίες που αφορούν το φωτοβολταϊκό σύστημα, τη συστοιχία μπαταριών και το ηλεκτρικό δίκτυο διανομής. Εφόσον εισάγονται τα δεδομένα, η PSO πραγματοποιεί δοκιμές για τον χρονοπρογραμματισμό των συσκευών, σύμφωνα με τους συντελεστές βαρύτητας που ορίζονται από τον χρήστη. Κατά τη διάρκεια κάθε βήματος, η MATLAB καλεί το EnergyPlus στέλνοντας δεδομένα για την παρούσα χρονική ενεργοποίηση του συστήματος κλιματισμού και θερμοσίφωνα και λαμβάνει τα αποτελέσματα αυτών, όπως είναι η εσωτερική θερμοκρασία και η κατανάλωση ενέργειας. Έπειτα από την λήψη των αποτελεσμάτων, υπολογίζει την συνάρτηση βελτιστοποίησης, με τη χρήση του συνόλου των δεδομένων που συγκεντρώνει, και κρίνει αν το παρόν σενάριο είναι το βέλτιστο. Στην περίπτωση που το σενάριο χρονοπρογραμματισμού δεν είναι το βέλτιστο, επαναλαμβάνει τη διαδικασία, ορίζοντας ένα νέο σενάριο και καταγράφοντας νέα δεδομένα για τη συνάρτηση βελτιστοποίησης. Τέλος, εφόσον πραγματοποιούνται εναλλακτικά σενάρια χρονοπρογραμματισμού, καταλήγει στο βέλτιστο, με βάση τη βαρύτητα που δίνεται στο εκάστοτε κριτήριο και παρουσιάζει στο χρήστη τα αποτελέσματα. Η παραπάνω διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί εισάγοντας νέα δεδομένα.

# 4.

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

---

### 4.1 Δεδομένα βελτιστοποίησης

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της χρήσης του συστήματος διαχείρισης ενέργειας για πληθώρα περιπτώσεων, οι οποίες μπορούν να προκύψουν σε ένα οικιακό κτήριο. Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιούνται αφορούν τόσο τους θερινούς μήνες, κατά τους οποίους η παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι αυξημένη, όσο και τους χειμερινούς κατά τους οποίους η παραγωγή είναι μειωμένη. Σε αυτό το πλαίσιο, παρουσιάζεται η λειτουργία του κλιματισμού, η οποία είναι διαρκής σε αυτούς τους μήνες, λόγω των θερμοκρασιών που επικρατούν. Επίσης, παρουσιάζονται προσομοιώσεις την άνοιξη και το φθινόπωρο, που η παραγωγή βρίσκεται σε ενδιάμεσες τιμές και οι θερμοκρασίες είναι σε φυσιολογικά επίπεδα. Παράλληλα, για κάθε εποχή παρουσιάζονται περιπτώσεις στις οποίες ο χρήστης επιλέγει να δώσει απόλυτη βαρύτητα σε κάποιο κριτήριο της συνάρτησης βελτιστοποίησης, ή επιλέγει ένα εξισορροπημένο σενάριο. Για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων, επιλέγονται συσκευές που διαθέτει μία κοινή μικρής έκτασης οικία, θεωρώντας ότι είναι σύγχρονες με υψηλή ενεργειακή κλάση, που εξασφαλίζουν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και βέλτιστη απόδοση. Επιπλέον, το κτήριο θεωρείται ότι διαθέτει επιφάνεια φωτοβολταϊκού συστήματος που μπορεί να υποστηρίξει μία οικία στην στέγη της, με την ανάλογη χωρητικότητα της συστοιχίας μπαταριών. Επομένως, διαθέτει τα παρακάτω χαρακτηριστικά, τα οποία θεωρείται ότι παραμένουν σταθερά για κάθε σενάριο προσομοίωσης:

- Ισόγεια μονοκατοικία  $100\text{ m}^2$  με παράθυρα σε κάθε προσανατολισμό που επιτρέπουν τη διέλευση του φωτός και κατασκευή που εξασφαλίζει καλή θερμομόνωση.
- Φωτοβολταϊκά συστήματα συνολικής επιφάνειας  $A = 8\text{ m}^2$  και απόδοσης  $\eta = 0.8$ .
- Συστοιχία μπαταριών συνολικής χωρητικότητας  $\text{Capacity} = 7.2\text{ kWh}$  με  $\text{maxSOC} = 100\%$  και  $\text{minSOC} = 20\%$ .

- 10 οικιακές συσκευές (προγραμματιζόμενες και μη) συμπεριλαμβανομένων του κλιματισμού, του ηλεκτρικού θερμοσίφωνα και του φωτισμού. Για το παρόν σύστημα επιλέγονται οι πιο ενεργοβόρες συσκευές που υπάρχουν σε ένα κτήριο, παραλείποντας συσκευές μικρής κατανάλωσης ισχύος, όπως πχ, το router και τα κινητά τηλέφωνα.
- Κυμαινόμενη τιμή αγοραπωλησίας ενέργειας του ηλεκτρικού δικτύου που μεταβάλλεται ανά ώρα. Η τιμή της μίας κιλοβατώρας κυμαίνεται από 0.08 μέχρι 0.22 € ανά κιλοβατώρα, ανάλογα με τις ώρες αιχμής.
- Τοποθεσία κτηρίου στην πρωτεύουσα της Ελλάδας, σε περιοχή με μηδενικό υψόμετρο.

**Πίνακας 4.1: Κυμαινόμενο τιμολόγιο ηλεκτρικού δικτύου.**

Ωρα	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
€/kWh	0.1	0.09	0.08	0.07	0.08	0.095	0.2	0.25	0.2	0.17	0.15	0.2
Ωρα	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
€/kWh	0.22	0.25	0.22	0.18	0.17	0.16	0.15	0.18	0.22	0.2	0.16	0.14

Με βάση τον Πίνακα 4.1, τις πρώτες πρωινές ώρες η τιμολόγηση είναι αρκετά χαμηλή, ενώ κατά τις ώρες αιχμής 7:00-9:00, 12:00-15:00 και 21:00-23:00 αυξάνεται σημαντικά. Τα υπόλοιπα χρονικά διαστήματα κοστολογούνται με ενδιάμεσες τιμές.

## 4.2 Θερμοί μήνες

Επιλέγεται ενδεικτικά η 4<sup>η</sup> Αυγούστου, κατά την οποία η παραγωγή ενέργειας από το φωτοβολταϊκό σύστημα είναι αυξημένη. Όπως παρουσιάζεται παρακάτω, η παραγωγή των φωτοβολταϊκών το καλοκαίρι είναι ιδιαίτερα υψηλή, φτάνοντας τις 4.26 kWh μέσα σε μία μόνο ώρα. Επικρατεί ευελιξία στις προγραμματιζόμενες συσκευές, οι οποίες θεωρείται ότι έχουν προετοιμαστεί για την λειτουργία τους. Ο χρήστης επιτρέπει στο σύστημα τη ενεργοποίηση του πλυντηρίου ρούχων από το πρωί που το προετοιμάζει, μέχρι αργά το βράδυ που επιθυμεί τη λήξη του. Για την αυτόματη ηλεκτρική σκούπα, που λειτουργεί με μπαταρία, επιτρέπει τη φόρτισή της έως το απόγευμα, έτσι ώστε να μπορεί να λειτουργήσει μέχρι το βράδυ. Για το πλυντήριο πιάτων, ο χρήστης προετοιμάζει τη λειτουργία του από το μεσημέρι και επιθυμεί τη λήξη του έως αργά το βράδυ. Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας δεν επιλέγει την ενεργοποίηση



των μη-προγραμματιζόμενων συσκευών, καθώς αυτή καθορίζεται από το χρήστη. Συνεπώς, η ώρα ενεργοποίησης είναι συγκεκριμένη και εισάγεται στο σύστημα με ίδια αρχική και τελική τιμή, έτσι ώστε να καταγράψει μόνο τη κατανάλωσή τους. Σε ό,τι αφορά το φωτισμό, θεωρείται ότι ο χρήστης ενεργοποιεί το σύνολο των φωτιστικών σωμάτων έπειτα από τη δύση του ηλίου, αργά το βράδυ. Κατά τους θερινούς μήνες ο ηλεκτρικός θερμοσίφωνας δεν χρησιμοποιείται, καθώς ο ηλιακός θερμοσίφωνας παράγει εξ ολοκλήρου το ζεστό νερό που χρειάζεται ο χρήστης. Τέλος, η ώρα ενεργοποίησης του κλιματισμού ορίζεται αυστηρά μέχρι τις μεσημεριανές ώρες, κατά τις οποίες η θερμοκρασία είναι η υψηλότερη της ημέρας και ο χρήστης επιστρέφει στην οικία του. Η αρχική κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας μπαταριών ορίζεται στο 40%. Στην πληθώρα των σεναρίων για τους θερινούς μήνες, η συστοιχία μπαταριών καταλήγει στο τέλος της ημέρας να βρίσκεται σε αυτό το ποσοστό. Επομένως, ο κύκλος της μέσα σε ένα εικοσιτετράωρο επαναλαμβάνεται για όλες τις ημέρες του καλοκαιριού. Το κόστος που υπολογίζει το σύστημα διαχείρισης ενέργειας αποτελεί καθαρό κόστος και περιγράφεται από τη διαφορά των εσόδων από τα έξοδα κατά την αγοραπωλησία ηλεκτρικής ενέργειας. Εάν τα έξοδα είναι περισσότερα από τα έσοδα, το κόστος είναι θετικό, ενώ αν τα έσοδα είναι περισσότερα, το κόστος είναι αρνητικό.

Date/Time	Dry Bulb Temperature [C]
08/04 @ 00:00:00	28.9
08/04 @ 01:00:00	28.4
08/04 @ 02:00:00	28.3
08/04 @ 03:00:00	28.1
08/04 @ 04:00:00	28
08/04 @ 05:00:00	28.9
08/04 @ 06:00:00	29.7
08/04 @ 07:00:00	30.6
08/04 @ 08:00:00	32.1
08/04 @ 09:00:00	33.5
08/04 @ 10:00:00	35
08/04 @ 11:00:00	35.5
08/04 @ 12:00:00	35.9
08/04 @ 13:00:00	36.4
08/04 @ 14:00:00	36.1
08/04 @ 15:00:00	35.9
08/04 @ 16:00:00	35.6
08/04 @ 17:00:00	34.5
08/04 @ 18:00:00	33.3
08/04 @ 19:00:00	32.2
08/04 @ 20:00:00	31.5
08/04 @ 21:00:00	30.9
08/04 @ 22:00:00	30.2
08/04 @ 23:00:00	29.6

Σχήμα 4.1: Εξωτερικές καταγεγραμμένες θερμοκρασίες για την ημέρα προσομοίωσης.

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες που επικρατούν στο εξωτερικό του κτηρίου στις 4 Αυγούστου. Οι θερμοκρασίες φτάνουν έως τους 36 °C. Το σύστημα, λοιπόν, θα κληθεί να αντιμετωπίσει τις υψηλές αυτές θερμοκρασίες που επηρεάζουν και το εσωτερικό του κτηρίου. Η λειτουργία του κλιματισμού πραγματοποιείται με σύγχρονα πρότυπα, κατά τα οποία ο θερμοστάτης ρυθμίζεται με σταθερές τιμές με ελάχιστη θερμοκρασία τους 19.5 °C και μέγιστη τους 28.5 °C και λειτουργεί συνεχόμενα με χαμηλές στροφές. Ο συνδυασμός αυτός προσφέρει μεγαλύτερη απόδοση και οικονομία, σε αντίθεση με μια υψηλή θερμοκρασιακή διαφορά θερμοστάτη με συνεχείς ενεργοποιήσεις και απενεργοποιήσεις. Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται οι συσκευές που εισάγονται στο σύστημα. Ο αστερίσκος υποδηλώνει ότι είναι μη-προγραμματιζόμενες.

<b>Πίνακας 4.2: Κατάλογος των οικιακών συσκευών – θερινή λειτουργία.</b>			
Συσκευή	Προτιμώμενη ώρα ενεργοποίησης	Κατανάλωση/ώρα (kWh)	Διάρκεια λειτουργίας (h)
Πλυντήριο ρούχων	7:00-23:00	1	1
Αυτόματη ηλεκτρική σκούπα (Φόρτιση)	0:00-19:00	0.1	3
Πλυντήριο πιάτων	16:00-23:00	1	1
Ψυγείο*	0:00-0:00	0.06	24
Τηλεόραση*	21:00-21:00	0.1	3
Υπολογιστής*	19:00-19:00	0.1	2
Ηλεκτρική κουζίνα*	14:00-14:00	2.1	1
Φωτισμός*	21:00-21:00	0.4	3
Ηλεκτρικός θερμοσίφωνας	-	Μη-σταθερή	0
Κλιματισμός	13:00-16:00	Μη-σταθερή	Μη-σταθερή

#### 4.2.1 Σενάριο 1: Βαρύτητα εξ ολοκλήρου στη διατήρηση του PMV μεταξύ των επιτρεπτών ορίων

Στο Σενάριο 1 που πραγματοποιείται κατά τους θερινούς μήνες, δίνεται στο σύστημα η απόλυτη προτεραιότητα στο κριτήριο PMV penalty, δηλαδή δίνεται η εντολή να διατηρήσει το PMV του χρήστη στα επιτρεπτά όρια με κάθε κόστος, για όσο βρίσκεται μέσα στο κτήριο.

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται για ένα εικοσιτετράωρο, στο διάστημα 0:00 έως 24:00 μίας ημέρας. Στα αποτελέσματα που ακολουθούν, λαμβάνονται δείγματα στο τέλος κάθε ώρας, δηλαδή τιμές από 1 έως 24. Για το Σενάριο 1 επιλέγεται αρχική κατάσταση συστοιχίας μπαταριών ίση με 20%, καθώς η συνεχής λειτουργία του κλιματισμού οδηγεί στο τέλος του

εικοσιτετραώρου σε αποφόρτιση μέχρι το ελάχιστο επιτρεπτό όριο. Συνεπώς, προσομοιώνεται η συμπεριφορά της συστοιχίας μπαταριών σε συνεχήμενα εικοσιτετράωρα.

<b>Πίνακας 4.3: Παράμετροι εισόδου για το σενάριο 1.</b>			
Βαρύτητα συντελεστή χρονικής ικανοποίησης	Βαρύτητα ποινής PMV	Βαρύτητα συντελεστή σταθερότητας δικτύου	Βαρύτητα κόστους ενέργειας
0	1	0	0
Ενδυματολογική μόνωση	Επίπεδο δραστηριότητας	Λειτουργία κτηρίου	Λειτουργία φωτισμού
0.3	1 (0:00-7:00) 1.2 (7:00-24:00)	0:00-9:00 & 15:00-24:00	21:00-24:00
Ανώτατο επίπεδο θερμοκρασίας HVAC	Κατώτατο επίπεδο θερμοκρασίας HVAC	Θερμοκρασία εισερχόμενου κρύου νερού	Θερμοκρασία θερμοσίφωνα
28.5 °C	19.5 °C	20 °C	40 °C

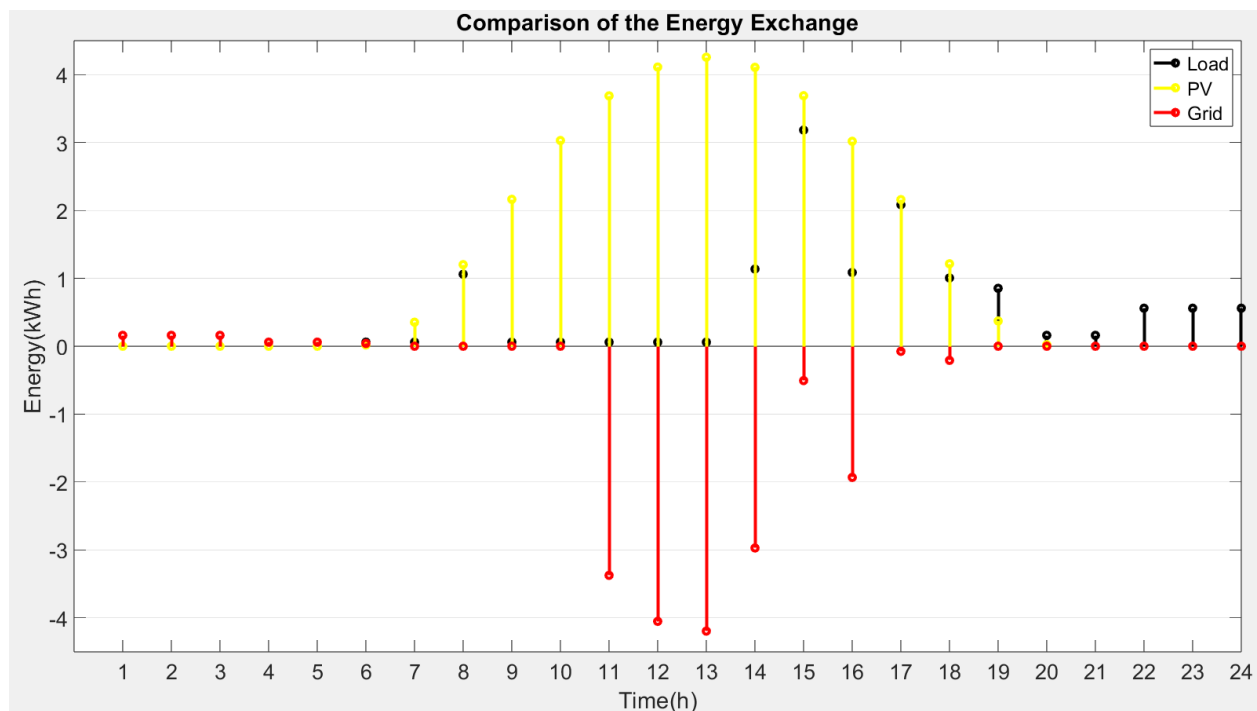
Εάν ο χρήστης επιλέξει τις ώρες ενεργοποίησης των συσκευών του σύμφωνα με τη δική του κρίση, προκύπτουν τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.4 και του Πίνακα 4.5.

<b>Πίνακας 4.4: Χρονοπρογραμματισμός συσκευών σεναρίου 1 – χωρίς σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.</b>				
Συσκευή	Πλυντήριο ρούχων	Ηλ. σκούπα	Πλυντήριο πιάτων	Ψυγείο
Ώρα ενεργοποίησης	7:00	0:00	16:00	0:00
Συσκευή	TV	PC	Ηλ. κουζίνα	Φωτισμός
Ώρα ενεργοποίησης	21:00	19:00	14:00	21:00
Συσκευή	Κλιματισμός		Θερμοσίφωνα	
Ώρα ενεργοποίησης	13:00 (Διάρκεια 6 ώρες)		20:00 (Διάρκεια 0 ώρες)	

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.4 ο χρήστης ενεργοποιεί τις συσκευές αυθαίρετα, με βάση τις ώρες των αρχικών τιμών ενεργοποίησης που έχει ορίσει. Αυθαίρετη είναι και η διάρκεια του κλιματισμού, την οποία έχει ορίσει στις 6 ώρες, θεωρώντας ότι με τη παρούσα διάρκεια θα έχει θερμική άνεση.

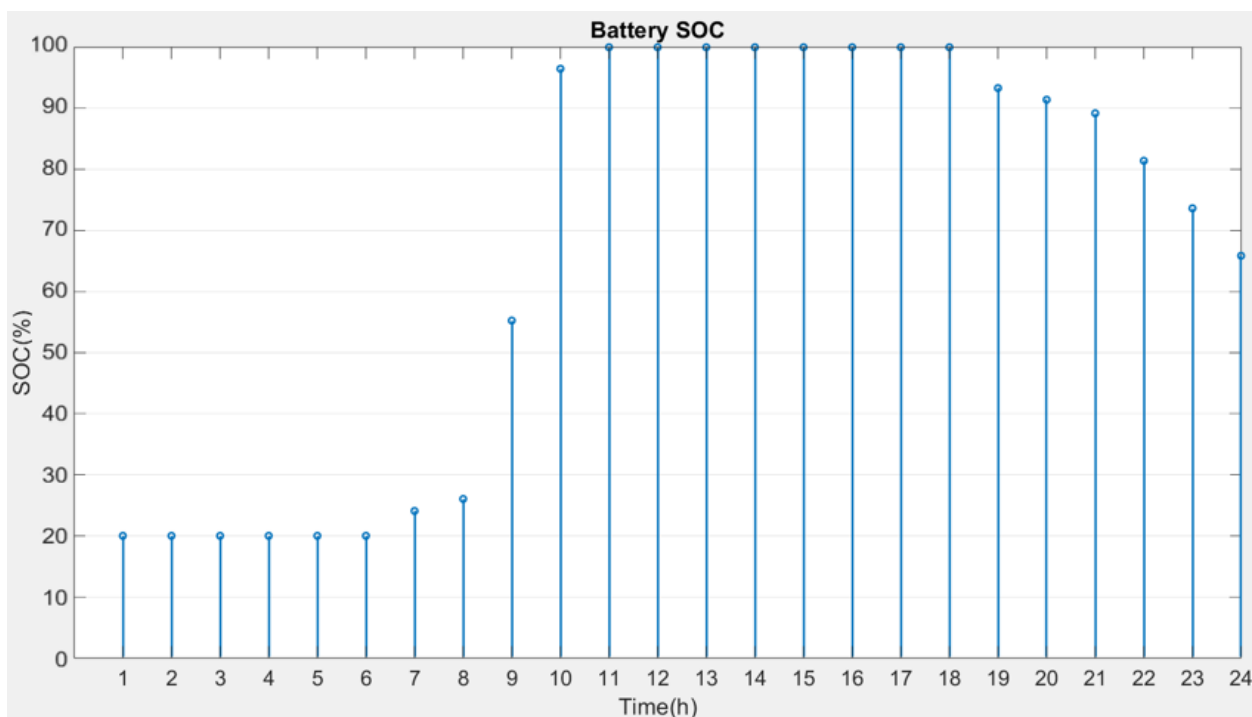
<b>Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα κριτηρίων σεναρίου 1 – χωρίς σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.</b>					
Συντελεστής χρονικής ικανοποίησης	Συντελεστής σταθερότητας δικτύου	Ποινή PMV	Κόστος χωρίς PV (€)	Κόστος χωρίς μπαταρία (€)	Κόστος με PV/μπαταρία (€)
10	0.02	0.18	2.56	-1.60	-1.81

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα του Πίνακα 4.5, χωρίς τη χρήση του συστήματος διαχείρισης ενέργειας ο χρήστης επιλέγει την έναρξη των συσκευών σύμφωνα με την προτίμησή του και ενεργοποιεί τον κλιματισμό για 6 ώρες, επιθυμώντας να δώσει βαρύτητα εξ ολοκλήρου στη θερμική του άνεση. Ωστόσο, οι αυξημένες θερμοκρασίες της εποχής, που επηρεάζουν το εσωτερικό του κτηρίου, επιφέρουν πρόβλημα στη θερμική του άνεση και το συγκεκριμένο πρόγραμμα λειτουργίας του κλιματισμού δεν επαρκεί για την τήρηση του αποδεκτού εύρους, προκαλώντας ποινή στο PMV ίση με 0.18. Η παραπάνω συνέπεια προκύπτει λόγω της απενεργοποίησης του κλιματισμού στις 19:00, σε μέρα και ώρα που επικρατεί καύσωνας. Λόγω της έντονα αυξημένης παραγωγής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά, ο χρήστης κερδίζει χρήματα στο λογαριασμό του το συγκεκριμένο εικοσιτετράωρο, ύψους 1.81 €. Εάν απουσίαζε η συστοιχία μπαταριών, θα είχε κέρδος 1.60 €, ενώ υπό την πλήρη απουσία των φωτοβολταϊκών θα χρεωνόταν για εκείνο το εικοσιτετράωρο 2.56 €. Αυτό σημαίνει ότι με την παρουσία των φωτοβολταϊκών, το κόστος μειώνεται κατά 162.5 % και με την παρουσία και της συστοιχίας μπαταριών μειώνεται κατά 170.7 %. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως χωρίς την ύπαρξη του συστήματος διαχείρισης ενέργειας, ο συντελεστής χρονικής ικανοποίησης χρήστη είναι ο μέγιστος, καθώς ο ίδιος καθορίζει τον χρονοπρογραμματισμό σύμφωνα με τις προτιμήσεις του, ενώ ο συντελεστής σταθερότητας δικτύου είναι μηδενικός, καθώς δεν πραγματοποιείται αγορά ενέργειας.

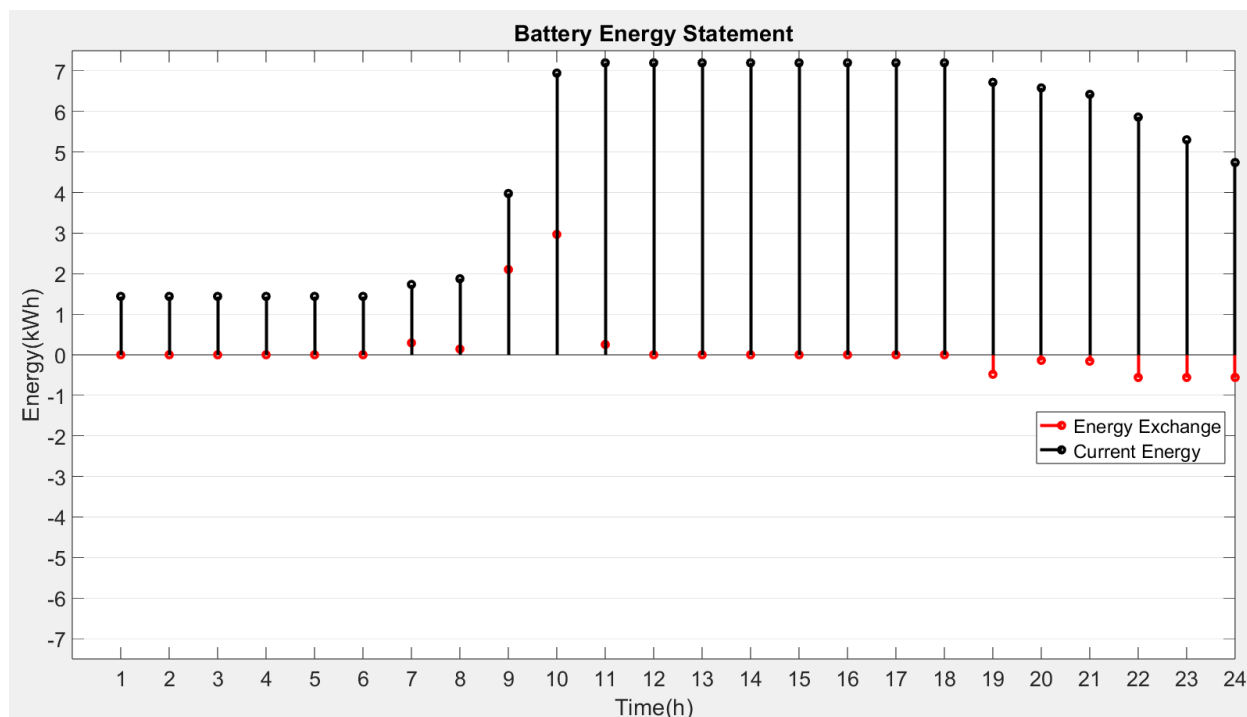


Σχήμα 4.2: Διάγραμμα ενέργειας κτηρίου σεναρίου 1 - χωρίς τη χρήση του συστήματος.

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.2, η παραγωγή των φωτοβολταϊκών ξεπερνά τις 4 kWh σε ώρα που η ηλιοφάνεια είναι έντονη. Τα φορτία από το μεσημέρι και έπειτα είναι υψηλά, ωστόσο δεν ξεπερνούν την παραγωγή. Κατά τις πρώτες πρωινές ώρες που η συστοιχία μπαταριών είναι εκφορτισμένη, πραγματοποιείται αγορά από το ηλεκτρικό δίκτυο, ωστόσο το υπόλοιπο χρονικό διάστημα το κτήριο είναι αυτόνομο και μάλιστα παρέχει μεγάλα ποσά ενέργειας στο δίκτυο κατά τις μεσημεριανές ώρες.



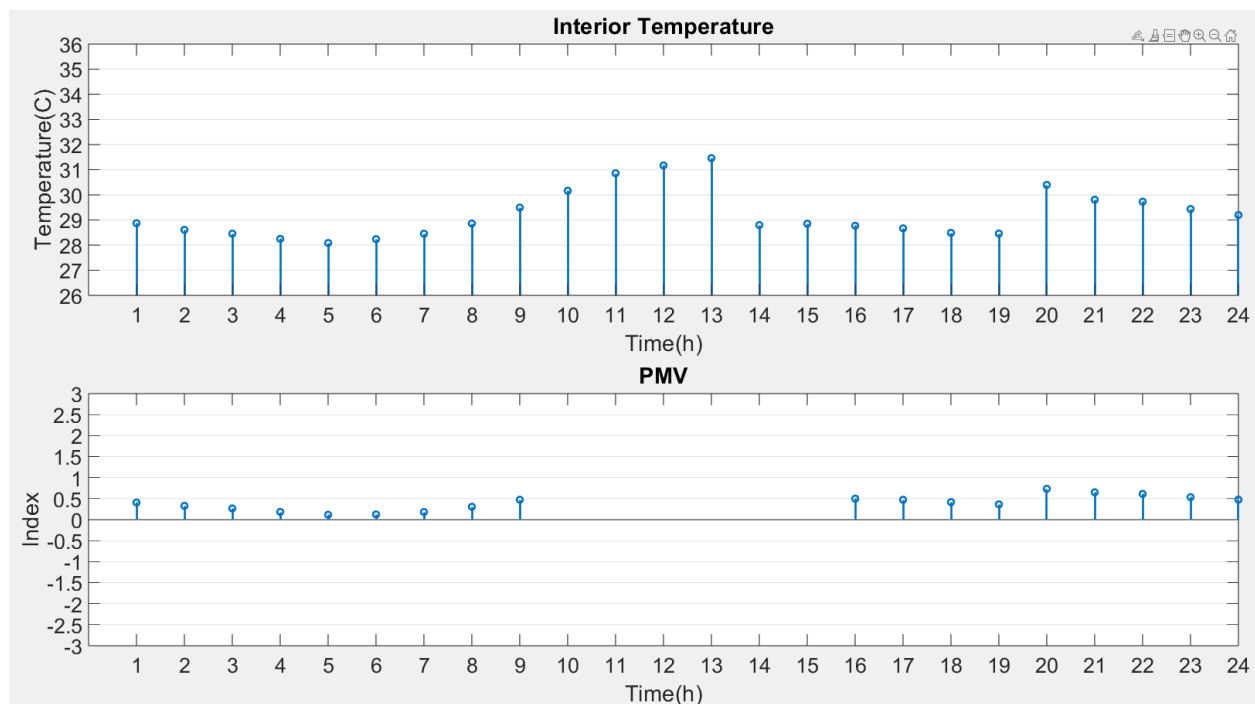
Σχήμα 4.3: Διάγραμμα SOC συστοιχίας μπαταριών σεναρίου 1 - χωρίς τη χρήση του συστήματος.



Σχήμα 4.4: Διάγραμμα ενέργειας συστοιχίας μπαταριών σεναρίου 1 - χωρίς τη χρήση του συστήματος.

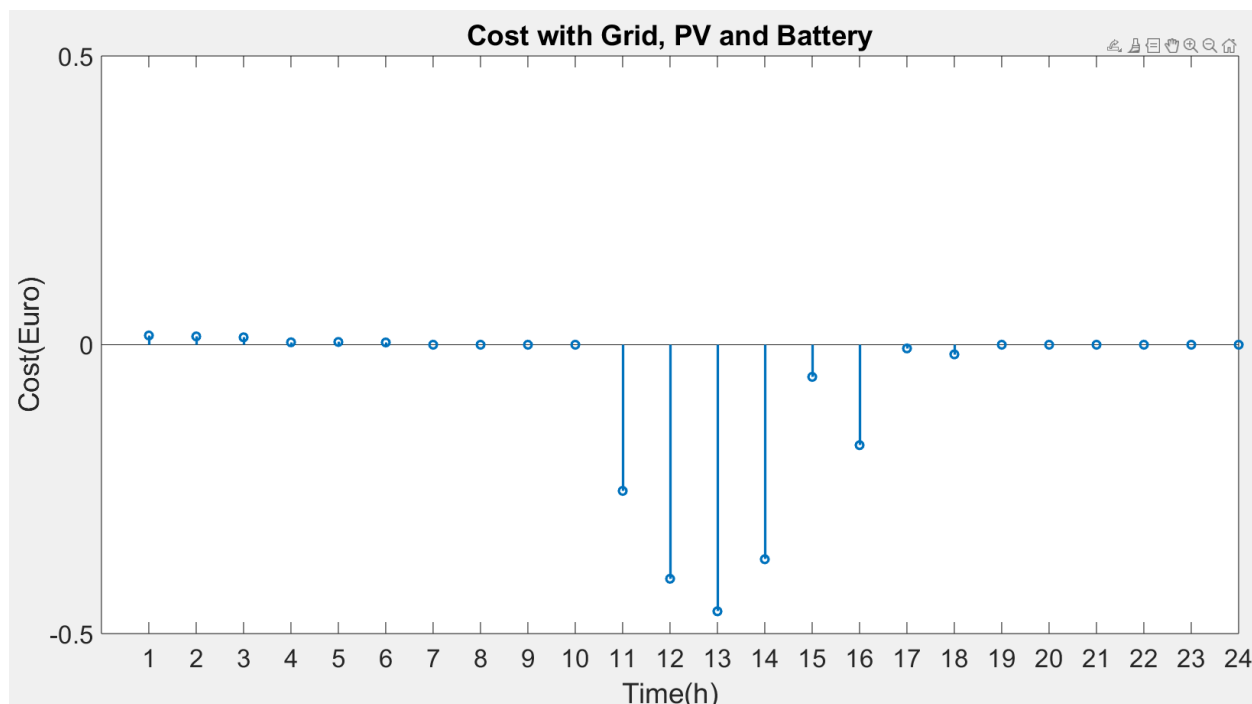
Στα Σχήματα 4.3 και 4.4 παρουσιάζεται η κατάσταση της συστοιχίας μπαταριών στο σύνολο του εικοσιτετραώρου, η οποία βρίσκεται στο ελάχιστο της κατάστασης φόρτισής της τις πρώτες πρωινές ώρες, ενώ στα πρώτα διαστήματα ηλιοφάνειας φορτίζεται με γρήγορο ρυθμό και διατηρεί υψηλά επίπεδα μέχρι και το τέλος.





Σχήμα 4.5: Διάγραμμα θερμοκρασίας και PMV σεναρίου 1 – χωρίς τη χρήση του συστήματος.

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.5, η θερμοκρασία βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα και φτάνει έως τους 32 °C στο εσωτερικό του κτηρίου. Η ενεργοποίηση του κλιματισμού επαναφέρει άμεσα τη θερμοκρασία σε λογικά επίπεδα, ωστόσο έπειτα από την απενεργοποίησή του αυξάνεται αμέσως, γεγονός που αυξάνει το PMV σε τιμές πάνω από 0.5. Λόγω της απουσίας των κατοίκων του κτηρίου κατά τις ώρες 9:00-15:00, δεν καταγράφονται τιμές για το PMV σε εκείνο το χρονικό διάστημα.



Σχήμα 4.6: Διάγραμμα ωριαίου κόστους κτηρίου σεναρίου 1 – χωρίς τη χρήση του συστήματος.

Με βάση το Σχήμα 4.6, το κτήριο αγοράζει ελάχιστα ποσά ενέργειας τις πρώτες πρωινές ώρες, ωστόσο η πώληση το μεσημέρι επιφέρει κέρδος μέχρι και 0.5 € σε μία ώρα.

Με τη χρήση του συστήματος διαχείρισης ενέργειας και την εντολή της απόλυτης προτεραιότητας στη διατήρηση του PMV εντός ορίων, προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

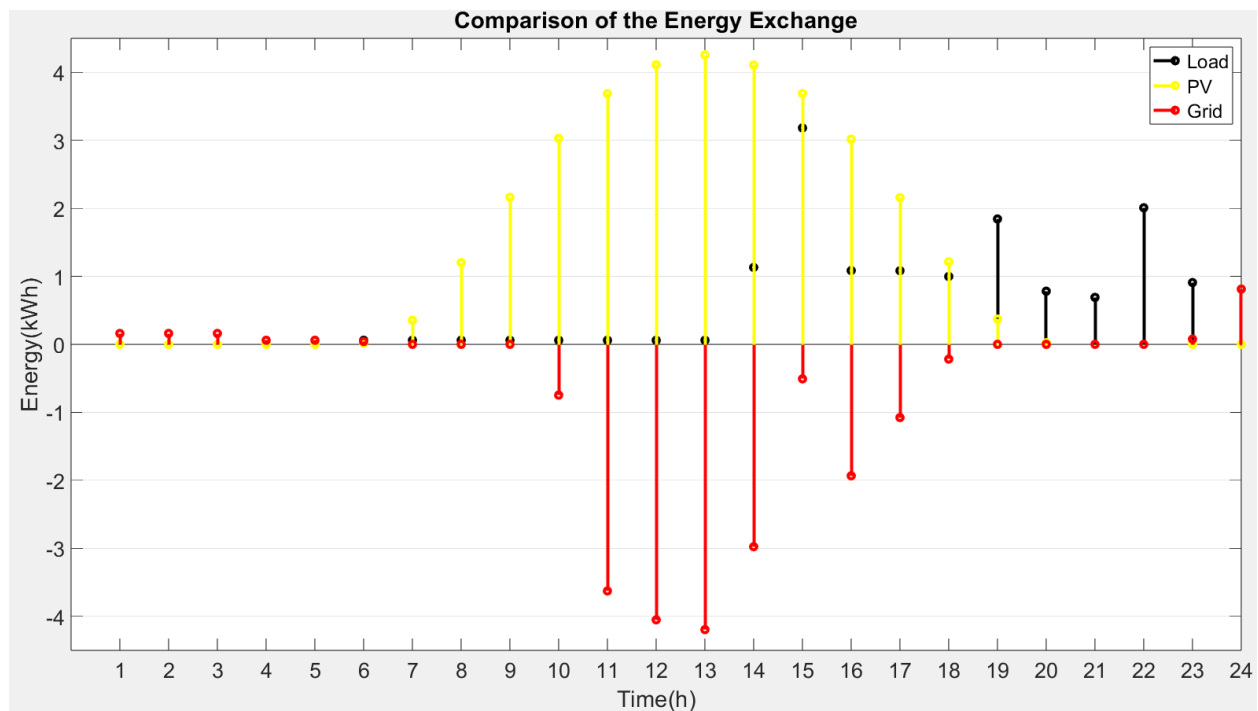
**Πίνακας 4.6: Χρονοπρογραμματισμός συσκευών σεναρίου 1 – με σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.**

Συσκευή	Πλυντήριο ρούχων	Ηλ. σκούπα	Πλυντήριο πιάτων	Ψυγείο
Ωρα ενεργοποίησης	18:00	0:00	21:00	0:00
Συσκευή	TV	PC	Ηλ. Κουζίνα	Φωτισμός
Ωρα ενεργοποίησης	21:00	19:00	14:00	21:00
Συσκευή	Κλιματισμός		Θερμοσίφωνα	
Ωρα ενεργοποίησης	13:00 (Διάρκεια 11 ώρες)		20:00 (Διάρκεια 0 ώρες)	

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.6, το σύστημα ενεργοποιεί τις συσκευές εντός των ορίων που θέτει ο χρήστης, ωστόσο κινείται με τέτοιο τρόπο που δεν επηρεάζουν την συνάρτηση βελτιστοποίησης σε αυτό το σενάριο, εκτός από τον κλιματισμό. Ο ηλεκτρικός θερμοσίφωνα εμφανίζει ώρα ενεργοποίησης, ωστόσο η διάρκειά του είναι μηδενική, καθώς οι απαιτήσεις του χρήστη σε ζεστό νερό καλύπτονται εξ ολοκλήρου από τον ηλιακό θερμοσίφωνα. Ο κλιματισμός λειτουργεί από τις 13:00, στο αρχικό του όριο ενεργοποίησης και διαρκεί για 11 ώρες, έως τη λήξη του στις 24:00 στο τελικό όριο ενεργοποίησης. Όπως είναι αναμενόμενο, μοναδικό μέλημα του συστήματος διαχείρισης ενέργειας είναι να διατηρηθεί το επιτρεπτό όριο του PMV στο χρήστη. Συνεπώς, λόγω της υπερβολικά αυξημένης θερμοκρασίας που επικρατεί, το σύστημα ενεργοποιεί τον κλιματισμό και τον διατηρεί σε όλο το εύρος των ωρών που του δίνεται, καθώς η απενεργοποίησή του θα παραβίαζε τη θερμική άνεση του χρήστη. Επομένως, εφόσον το αρχικό όριο είναι στις 13:00, το σύστημα επιλέγει να ενεργοποιήσει τον κλιματισμό εκείνη την ώρα, προκειμένου να έχει τον απαραίτητο χρόνο να προετοιμάσει το χώρο για το χρήστη, κατά την προσέλευσή του στις 15:00.

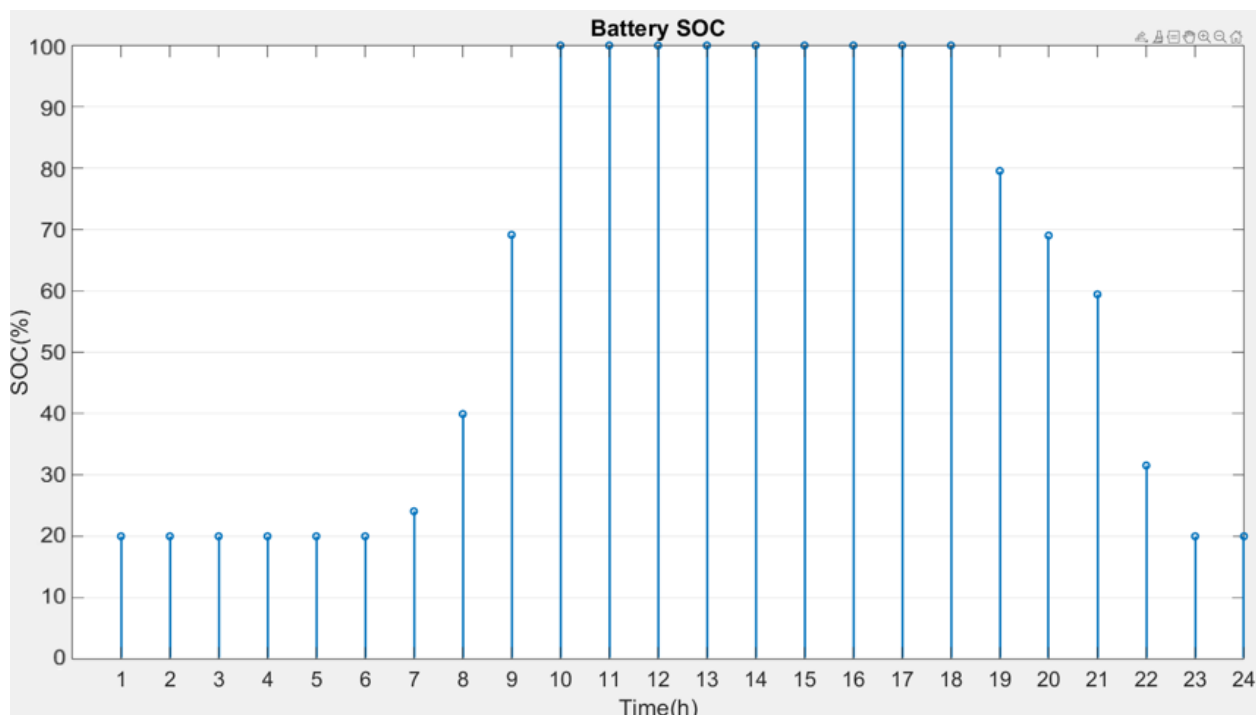
<b>Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα κριτηρίων σεναρίου 1 – με σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.</b>					
Συντελεστής χρονικής ικανοποίησης	Συντελεστής σταθερότητας δικτύου	Ποινή PMV	Κόστος χωρίς PV (€)	Κόστος χωρίς μπαταρία (€)	Κόστος με PV/μπαταρία (€)
8.60	0.02	0	2.89	-1.06	-1.33

Με βάση τον Πίνακα 4.7, ο συντελεστής χρονικής ικανοποίησης παρουσιάζει χαμηλή τιμή, η οποία είναι ίση με 8.60. Ο συντελεστής σταθερότητας δικτύου είναι ίσος με 0.02, λόγω της αγοράς μικρού ποσού ενέργειας τις πρώτες πρωινές ώρες. Η συνεχής λειτουργία του κλιματισμού από το μεσημέρι και έπειτα, επιφέρει μηδενική ποινή στο PMV (βρίσκεται εντός επιτρεπτών ορίων) και το κτήριο εμφανίζει κέρδος το παρόν εικοσιτετράωρο, με τιμή ίση με 1.33 €. Υπό την απουσία της συστοιχίας μπαταριών, το κέρδος είναι ίσο με 1.06 €, ενώ υπό την απουσία φωτοβολταϊκών, το κόστος είναι ίσο με 2.89 €. Σε αυτή τη περίπτωση, το κόστος με την παρουσία φωτοβολταϊκών μειώνεται κατά 136.6 % και με την παρουσία και της συστοιχίας μπαταριών μειώνεται κατά 146 %. Το σύστημα και στις τρεις περιπτώσεις, εμφανίζει μεγαλύτερο κόστος σε σχέση με την επιλογή του χρήστη, καθώς διατηρεί τον κλιματισμό ενεργοποιημένο με παραπάνω διάρκεια. Επομένως, το συγκεκριμένο σενάριο είναι αρκετά κοστοβόρο και παρόλο που ο χρήστης έχει κέρδος στο λογαριασμό του το συγκεκριμένο εικοσιτετράωρο λόγω της αυξημένης παραγωγής, εάν ο κλιματισμός διαρκούσε λιγότερο, το κέρδος του θα ήταν μεγαλύτερο. Ωστόσο, ο στόχος του είναι να ελαχιστοποιήσει τη ποινή PMV, τον οποίο καταφέρνει να επιτύχει. Συγκεκριμένα, ο συντελεστής χρονικής ικανοποίησης παρουσιάζει μείωση κατά 14 % σε σχέση με την αντίστοιχη περίπτωση χωρίς σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση. Η μείωση αυτή είναι λογική, εφόσον η βαρύτητα δίνεται μόνο στο PMV. Ο συντελεστής σταθερότητας δικτύου παραμένει ίσος με 0.02 με 0 % μεταβολή, ενώ η ποινή λόγω της υπέρβασης των ορίων του PMV μειώνεται κατά 100 %, το οποίο σηματοδοτεί επίτευξη του στόχου. Ωστόσο, για να πραγματοποιηθεί η συγκεκριμένη μείωση, το κόστος αυξάνεται κατά 26.5 %, λόγω της αυξημένης χρήσης του κλιματισμού που επιβάλλει το σύστημα διαχείρισης ενέργειας, σε σχέση με την αντίστοιχη επιλογή του χρήστη.

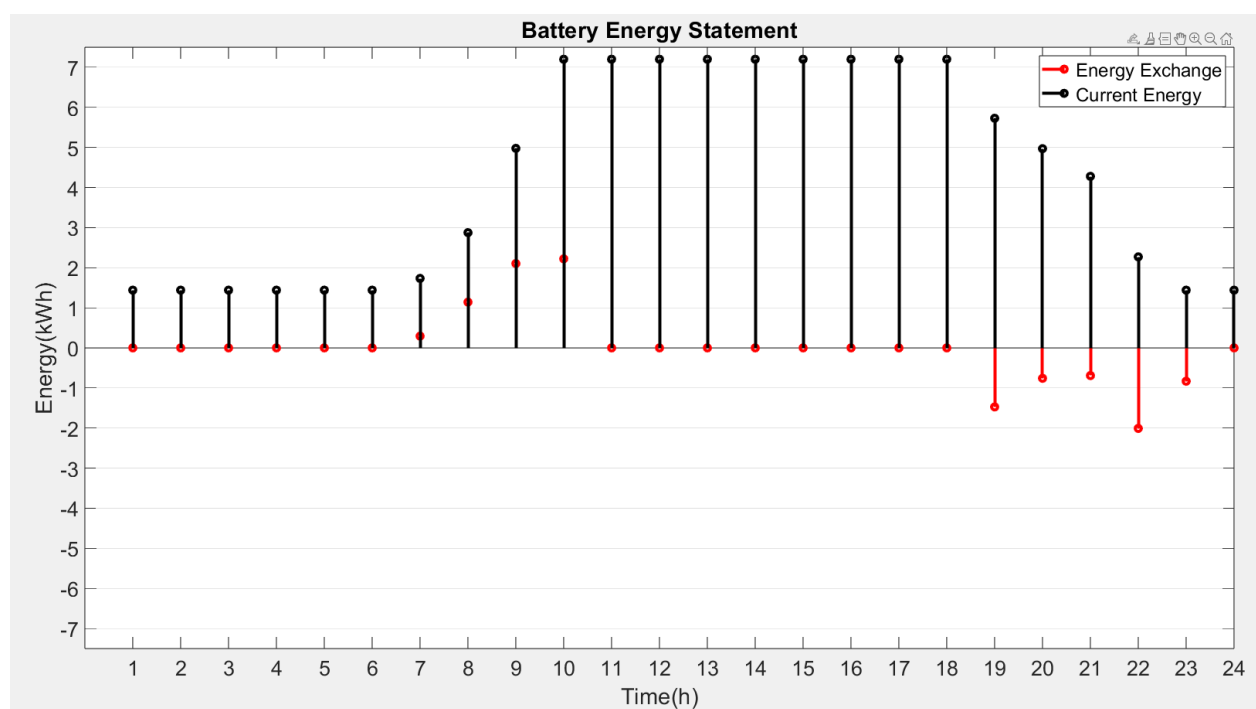


Σχήμα 4.7: Διάγραμμα ενέργειας κτηρίου σεναρίου 1 – με χρήση του συστήματος.

Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.7, τα φορτία από το μεσημέρι και έπειτα είναι υψηλά. Η κατανάλωση ενέργειας του κλιματισμού το μεσημέρι είναι ιδιαίτερα αυξημένη, καθώς καλείται να καλύψει μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά. Ωστόσο, το πλεόνασμα παραμένει ιδιαίτερα υψηλό, ακόμη και υπό το ακραίο σενάριο στο οποίο ο κλιματισμός λειτουργεί συνεχώς, καθώς η παραγωγή των φωτοβολταϊκών φτάνει ωριαία ως τις  $4.26 \text{ kWh}$ . Έτσι, ακόμη και όταν τα φορτία αυξάνονται, δεν ξεπερνούν τη παραγωγή. Τα ελάχιστα φορτία τις πρώτες πρωινές ώρες καλύπτονται από το δίκτυο, ενώ το απόγευμα καλύπτονται από τη συστοιχία μπαταριών. Παρ' όλα αυτά, η διαρκής λειτουργία του κλιματισμού εκφορτίζει τη συστοιχία μπαταριών και το σύστημα αναγκάζεται να αγοράσει υψηλό ποσό ενέργειας την τελευταία ώρα.



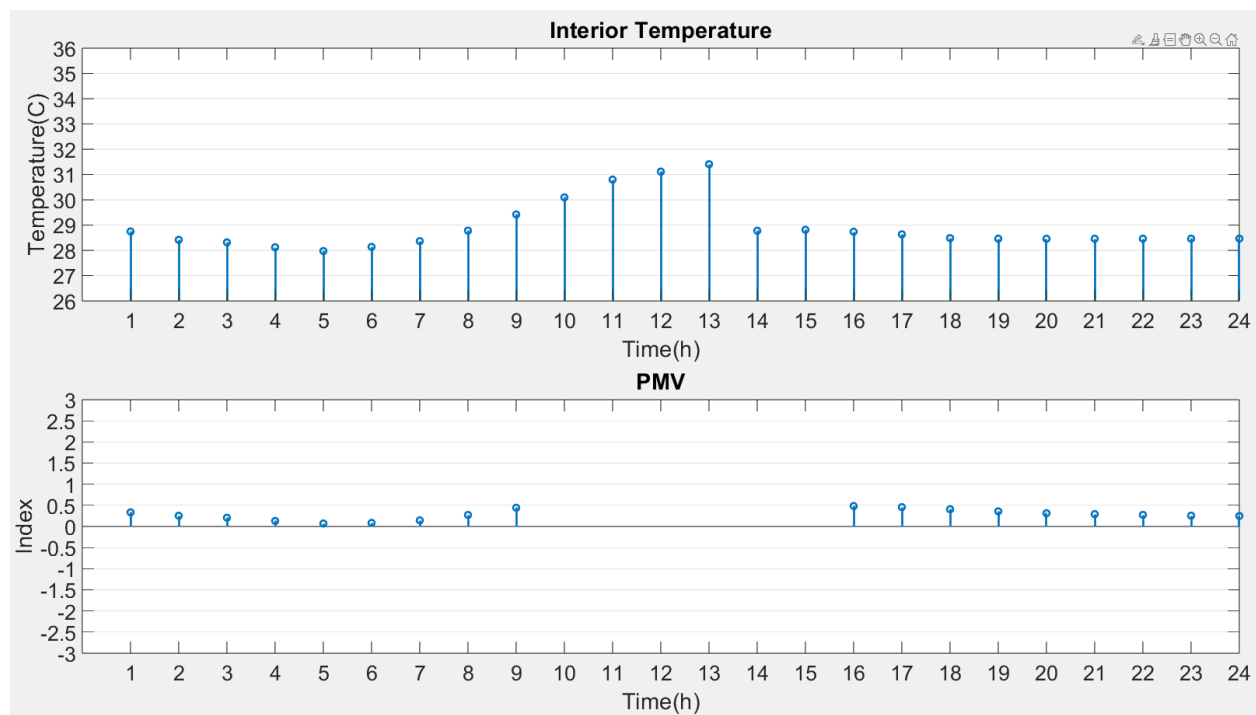
Σχήμα 4.8: Διάγραμμα SOC συστοιχίας μπαταριών σεναρίου 1 – με χρήση του συστήματος.



Σχήμα 4-9: Διάγραμμα ενέργειας συστοιχίας μπαταριών Σεναρίου 1 – με χρήση του συστήματος.

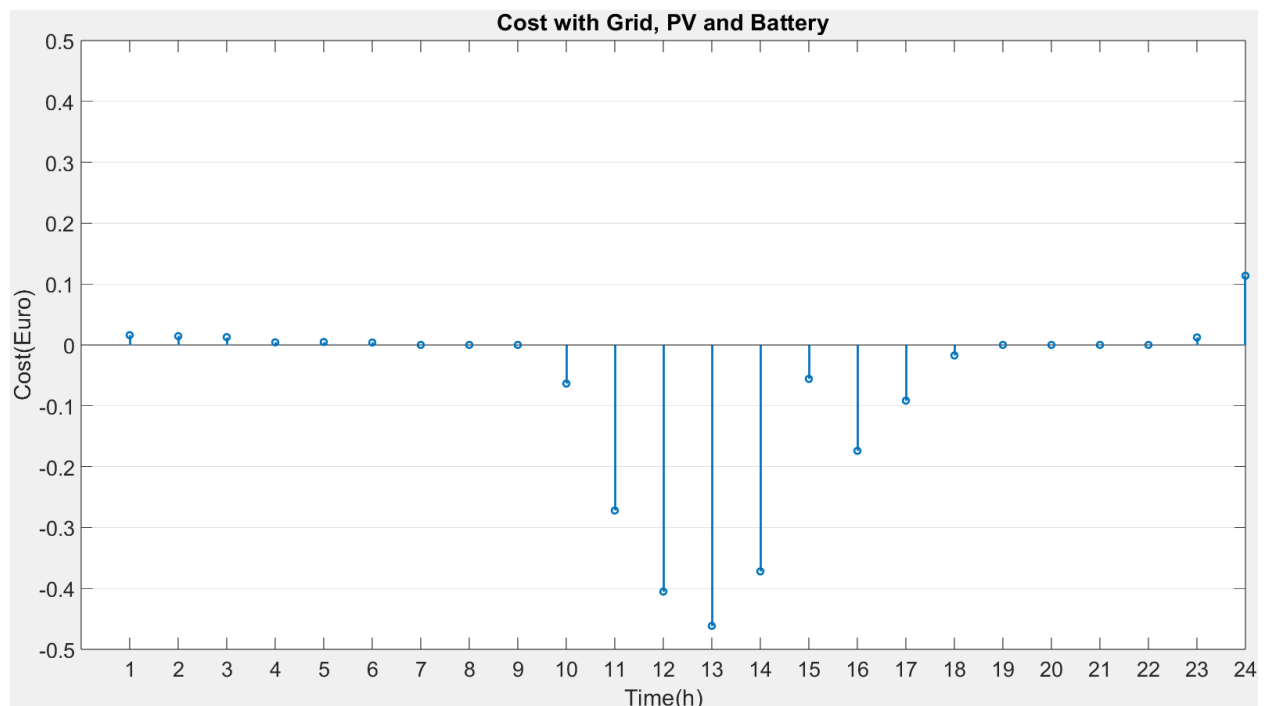
Στα Σχήματα 4.8 και 4.9 παρουσιάζεται η κατάσταση της συστοιχίας μπαταριών, η οποία είναι εκφορτισμένη κατά τις πρώτες πρωινές ώρες. Έπειτα, με την εμφάνιση της ηλιοφάνειας, εμφανίζεται πλεόνασμα ενέργειας, γεγονός που την κρατά φορτισμένη στο μέγιστο για μεγάλη διάρκεια. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά είναι τόσο αυξημένη, που

τροφοδοτεί επαρκώς τα φορτία του κτηρίου, κρατά τη συστοιχία μπαταριών στο μέγιστο της φόρτισής της και πωλείται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Τέλος, καθώς η ηλιοφάνεια μειώνεται προς το βράδυ και παρατηρείται απότομη πτώση της διαθέσιμης ενέργειας της συστοιχίας μπαταριών εφόσον υπάρχουν αρκετά φορτία, μέχρι που φτάνει το ελάχιστο της στις 23:00 πριν τη λήξη του εικοσιτετραώρου.



Σχήμα 4.10: Διάγραμμα θερμοκρασίας και PMV σεναρίου 1 – με χρήση του συστήματος.

Στο Σχήμα 4.10 φαίνεται πως παρά το γεγονός ότι ο χρήστης θέτει αρχικό όριο της ενεργοποίησης κλιματισμού από το μεσημέρι και έπειτα, οι θερμοκρασίες που επικρατούν κατά τις πρώτες πρωινές ώρες σε συνδυασμό με το μειωμένο επίπεδο δραστηριότητας λόγω του ύπνου, δεν παραβιάζουν τη θερμική του άνεση, επομένως δεν προκύπτει πρόβλημα από το γεγονός ότι είναι απενεργοποιημένος. Η θερμοκρασία παραμένει σταθερή από το απόγευμα και μετά στους 28.5 °C που έχει ρυθμιστεί ο θερμοστάτης. Το PMV στο σύνολο του εικοσιτετραώρου βρίσκεται εντός ορίων.



Σχήμα 4.10: Διάγραμμα ωριαίου κόστους κτηρίου σεναρίου 1 – με χρήση του συστήματος.

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.10, το Σενάριο 1 επιφέρει αγορά από το δίκτυο τις πρώτες πρωινές ώρες, οι οποίες δεν ξεπερνούν τα 0.1 €. Ωστόσο, η εκφόρτιση της συστοιχίας μπαταριών την τελευταία ώρα της προσομοίωσης αναγκάζουν το σύστημα να προμηθευτεί ενέργεια, με κόστος λίγο παραπάνω από 0.1 €. Παρά τον μεγάλο όγκο του φορτίου, η χαμηλή τιμολόγηση της συγκεκριμένης ώρας δεν προκαλεί μεγάλη διαφορά στο λογαριασμό.

#### 4.2.2 Σενάριο 2: Βαρύτητα εξ ολοκλήρου στην ελαχιστοποίηση του κόστους του χρήστη

Στο σενάριο 2 που πραγματοποιείται κατά τους θερινούς μήνες, δίνεται στο σύστημα η απόλυτη προτεραιότητα στην ελαχιστοποίηση του κόστους, δηλαδή το σύστημα ενεργοποιεί τις συσκευές σε χρονικές στιγμές, τέτοιες ώστε να επιφέρουν το χαμηλότερο δυνατό κόστος, αγνοώντας τα υπόλοιπα κριτήρια. Στην παρούσα περίπτωση, η αρχική κατάσταση της συστοιχίας μπαταριών επαναφέρεται στο 40%, όπως ορίζεται και στα υπόλοιπα σενάρια των θερινών μηνών.



**Πίνακας 4.8: Παράμετροι εισόδου για το σενάριο 2.**

Βαρύτητα συντελεστή χρονικής ικανοποίησης	Βαρύτητα ποινής PMV	Βαρύτητα συντελεστή σταθερότητας δικτύου	Βαρύτητα κόστους ενέργειας
0	0	0	<b>1</b>
Ενδυματολογική μόνωση	Επίπεδο δραστηριότητας	Λειτουργία κτηρίου	Λειτουργία φωτισμού
0.3	1 (0:00-7:00) 1.2 (7:00-24:00)	0:00-9:00 & 15:00-24:00	21:00-24:00
Ανώτατο επίπεδο θερμοκρασίας HVAC	Κατώτατο επίπεδο θερμοκρασίας HVAC	Θερμοκρασία εισερχόμενου κρύου νερού	Θερμοκρασία θερμοσίφωνα
28.5 °C	19.5 °C	20 °C	40 °C

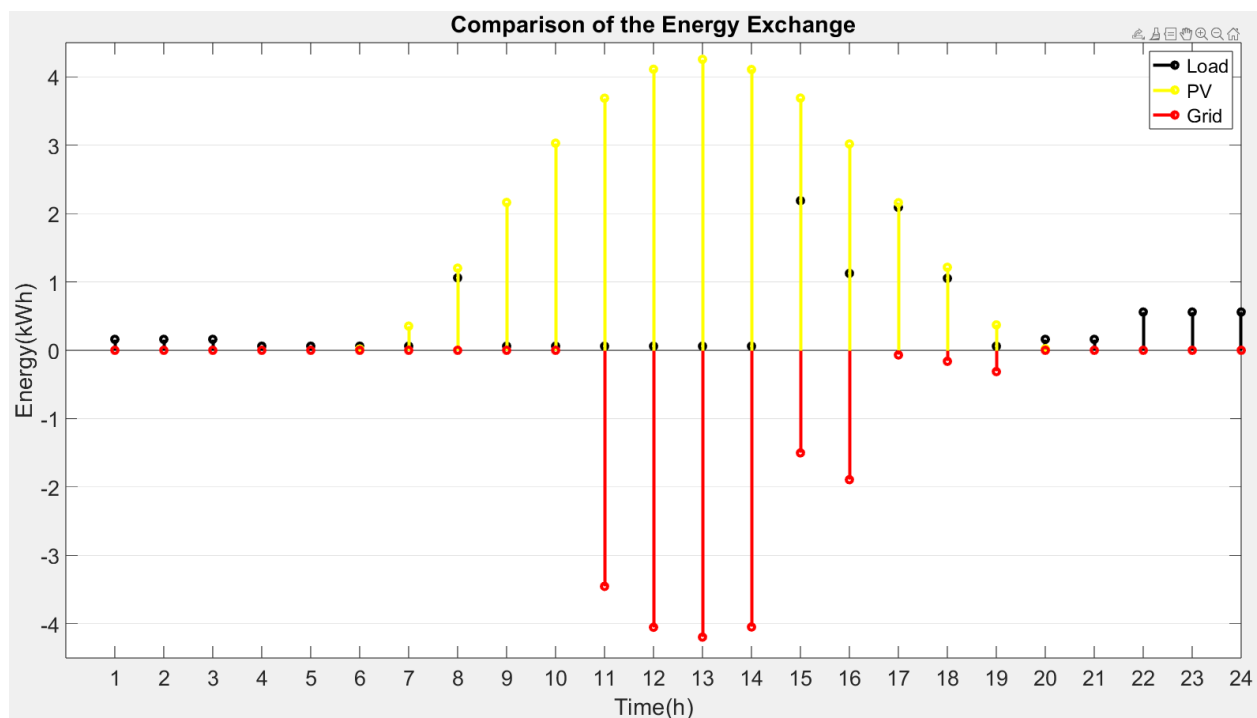
Για το συγκεκριμένο σενάριο, το περιθώριο επιθυμητής ενεργοποίησης του κλιματισμού ορίζεται ως 15:00-15:00, θεωρώντας ότι ο χρήστης τον ενεργοποιεί κατά την προσέλευσή του στο κτήριο για να επιτύχει μεγαλύτερη οικονομία. Σε αυτή τη περίπτωση, η αρχική και η τελική τιμή της επιθυμητής ώρας ενεργοποίησης ταυτίζονται καθώς ο χρήστης επιθυμεί ενεργοποίηση του κλιματισμού αποκλειστικά εκείνη την ώρα. Σε ό,τι αφορά το σύστημα διαχείρισης ενέργειας, όπως παρουσιάζεται παρακάτω, δεν επηρεάζεται από τη συγκεκριμένη επιλογή, καθώς αναμένεται να μην ενεργοποιήσει τον κλιματισμό. Εάν ο χρήστης επιλέξει σύμφωνα με τη δική του κρίση τις ώρες ενεργοποίησης των συσκευών, προκύπτουν τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.9 και του Πίνακα 4.10.

<b>Πίνακας 4.9: Χρονοπρογραμματισμός συσκευών σεναρίου 2 – χωρίς σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.</b>				
Συσκευή	Πλυντήριο ρούχων	Ηλ. σκούπα	Πλυντήριο πιάτων	Ψυγείο
Ωρα ενεργοποίησης	7:00	0:00	16:00	0:00
Συσκευή	TV	PC	Ηλ. Κουζίνα	Φωτισμός
Ωρα ενεργοποίησης	21:00	19:00	14:00	21:00
Συσκευή	Κλιματισμός		Θερμοσίφωνας	
Ωρα ενεργοποίησης	15:00 (Διάρκεια 2 ώρες)		20:00 (Διάρκεια 0 ώρες)	

Στον Πίνακα 4.9 παρουσιάζονται οι ώρες ενεργοποίησης των συσκευών για το σενάριο 2 χωρίς σύστημα και είναι ίσες - παρομοίως και σε αυτή τη περίπτωση - με τις αρχικές τιμές προτίμησης του χρήστη. Έχοντας ως μέλημά του ένα χαμηλό κόστος, επιλέγει τη διάρκεια του κλιματισμού να είναι ίση με 3 ώρες.

<b>Πίνακας 4.10: Αποτελέσματα κριτηρίων σεναρίου 2 – χωρίς σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.</b>					
Συντελεστής χρονικής ικανοποίησης	Συντελεστής σταθερότητας δικτύου	Ποινή PMV	Κόστος χωρίς PV (€)	Κόστος χωρίς μπαταρία (€)	Κόστος με PV/μπαταρία (€)
10	0	1.05	1.78	-2.03	-2.16

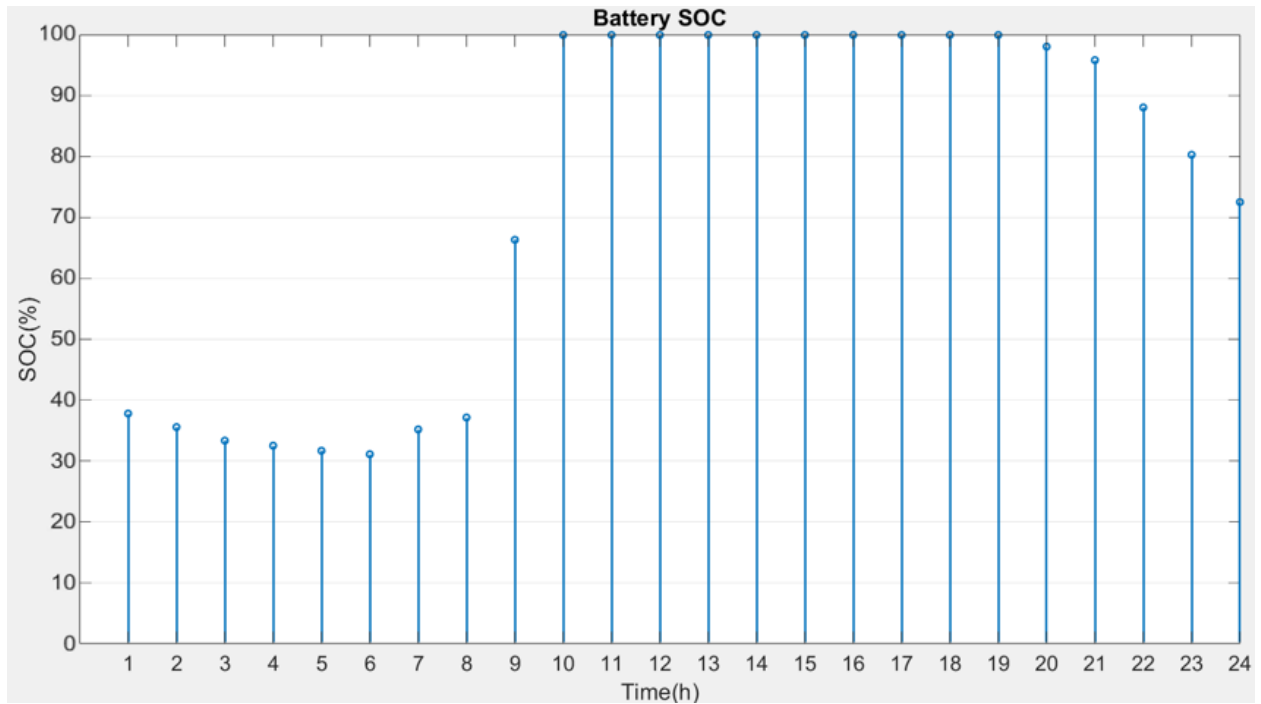
Όπως σε κάθε σενάριο που ο χρήστης αποφασίζει τις ώρες ενεργοποίησης των συσκευών, ο συντελεστής χρονικής ικανοποίησης είναι ο μέγιστος. Ο συντελεστής σταθερότητας δικτύου είναι μηδενικός, λόγω της μηδενικής αγοράς από το δίκτυο, ενώ η ποιότητά του PMV είναι έντονα αυξημένη λόγω της υπέρβασης των ορίων του, καθώς σε στιγμές που οι θερμοκρασίες είναι υψηλές, ο κλιματισμός παραμένει ανενεργός. Το σύστημα εμφανίζει κέρδος ίσο με 2.16 €. Υπό την απουσία συστοιχίας μπαταριών, το κέρδος είναι ίσο με 2.03 €, ενώ υπό την απουσία φωτοβολταϊκών το κόστος είναι ίσο με 1.78 €. Συγκεκριμένα, με τη παρουσία των φωτοβολταϊκών, το κόστος μειώνεται κατά 214 % και με την παρουσία και της συστοιχίας μπαταριών μειώνεται κατά 221 %. Και στις τρεις περιπτώσεις, οι τιμές του κόστους είναι χαμηλότερες σε σχέση με το σενάριο 1, ακόμη και με την απουσία συστήματος διαχείρισης ενέργειας, όπως είναι αναμενόμενο. Τέλος, παρατηρείται μικρή διαφορά του κόστους με την παρουσία και την απουσία της συστοιχίας μπαταριών, καθώς αξιοποιείται σε μικρό βαθμό λόγω των χαμηλών φορτίων που επικρατούν.



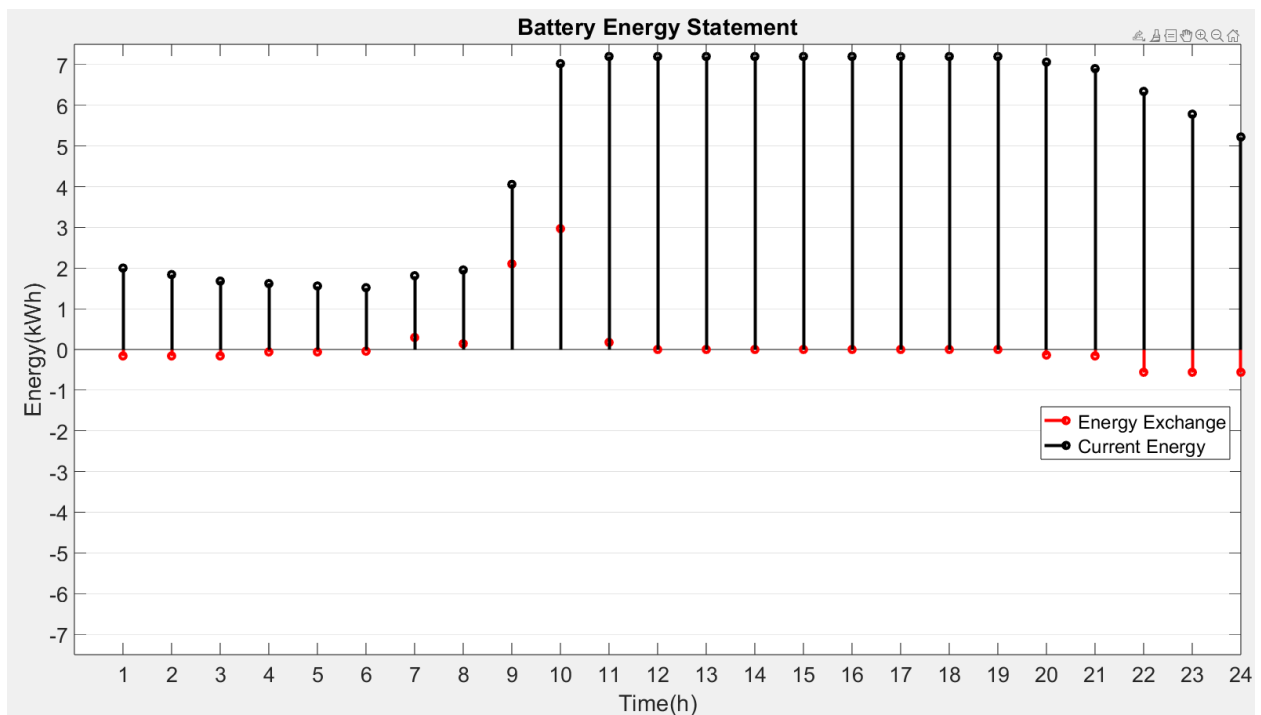
Σχήμα 4.11: Διάγραμμα ενέργειας κτηρίου σεναρίου 2 - χωρίς τη χρήση του συστήματος.

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.11, τις πρώτες πρωινές ώρες τα φορτία είναι χαμηλά και καλύπτονται εξ ολοκλήρου από το απόθεμα της συστοιχίας μπαταριών. Όσο η παραγωγή ενέργειας αυξάνεται, το πλεόνασμα που προκύπτει αρχικά δίνεται στη συστοιχία μπαταριών. Έπειτα, όταν η συστοιχία μπαταριών είναι πλήρως φορτισμένη, το πλεόνασμα δίνεται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Γίνεται αντιληπτό ότι κατά τις μεσημεριανές ώρες υπάρχει αύξηση φορτίου, καθώς ο χρήστης

έχει ενεργοποιήσει μεγάλο μέρος των συσκευών εκείνο το διάστημα, ανάμεσά τους και ο κλιματισμός.

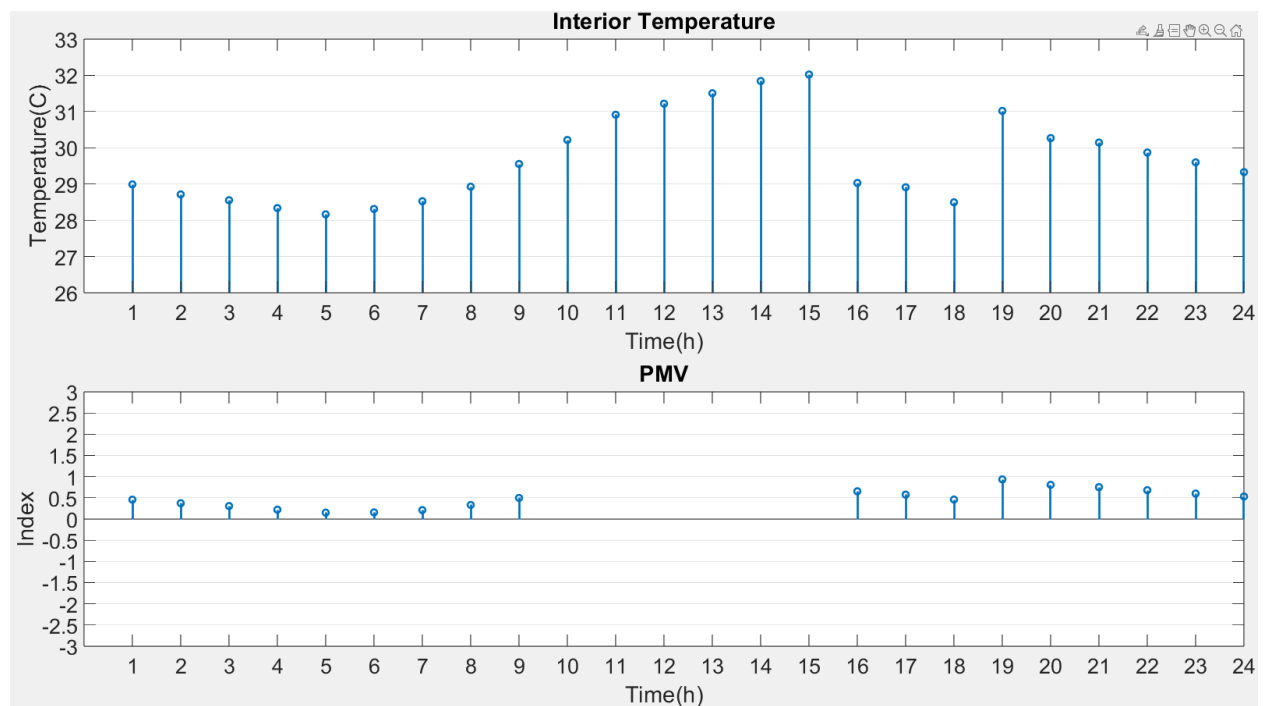


Σχήμα 4.12: Διάγραμμα SOC συστοιχίας μπαταριών σεναρίου 2 – χωρίς τη χρήση του συστήματος.



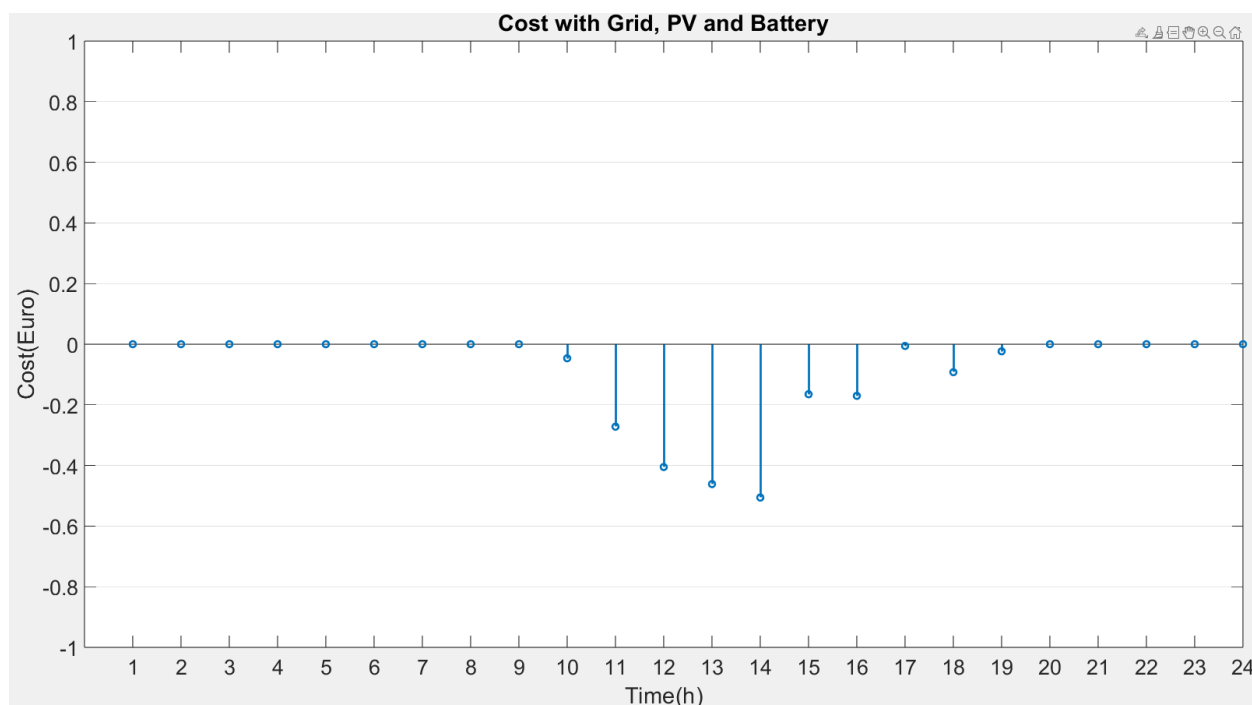
Σχήμα 4.13: Διάγραμμα ενέργειας συστοιχίας μπαταριών σεναρίου 2 – χωρίς τη χρήση του συστήματος.

Στα Σχήματα 4.12 και 4.13, φαίνεται πως αρχικά η συστοιχία μπαταριών εκφορτίζεται με αργό ρυθμό, ωστόσο με τα πρώτα πλεονάσματα φορτίζεται απευθείας και διατηρεί το μέγιστο επίπεδο φόρτισης μέχρι και τις 19:00, καθώς μέχρι τότε τα φορτία καλύπτονται απευθείας από τα φωτοβολταϊκά. Λόγω των χαμηλών φορτίων, έπειτα από τη δύση του ηλίου η κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας μπαταριών μειώνεται με αργό ρυθμό και τελικά καταλήγει στο τέλος της ημέρας με υψηλό ποσοστό.



Σχήμα 4.14: Διάγραμμα θερμοκρασίας και PMV σεναρίου 2 – χωρίς τη χρήση του συστήματος.

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.14, η θερμοκρασία φτάνει σε πολύ υψηλά επίπεδα το μεσημέρι. Ο χρήστης ενεργοποιεί τον κλιματισμό για 3 ώρες, όσο βρίσκεται στο χώρο, ωστόσο το σύστημα καθυστερεί να ανακτήσει την επιθυμητή θερμοκρασία. Το σύνολο της συγκεκριμένης απόφασης επιφέρει αυξημένη ποινή στο PMV, καθώς ξεπερνά τα επιτρεπτά όρια για μεγάλα χρονικά διαστήματα.



Σχήμα 4.15: Διάγραμμα ωριαίου κόστους κτηρίου σεναρίου 2 – χωρίς χρήση του συστήματος.

Το διάγραμμα του Σχήματος 4.15 παρουσιάζει τα κερδοφόρα αποτελέσματα του σεναρίου 2, καθώς το σύνολο του κόστους είναι μικρότερο ή ίσο του μηδενός, το οποίο σημαίνει πως το κέρδος είναι αυξημένο, σε επίπεδα που φτάνει τα 0.5 € σε μία ώρα.

Με τη χρήση του συστήματος διαχείρισης ενέργειας προκύπτουν τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.11.

<b>Πίνακας 4.11: Χρονοπρογραμματισμός συσκευών σεναρίου 2 – με σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.</b>				
Συσκευή	Πλυντήριο ρούχων	Ηλ. σκούπα	Πλυντήριο πιάτων	Ψυγείο
Ώρα ενεργοποίησης	20:00	19:00	22:00	0:00
Συσκευή	TV	PC	Ηλ. Κουζίνα	Φωτισμός
Ώρα ενεργοποίησης	21:00	19:00	14:00	21:00
Συσκευή	Κλιματισμός		Θερμοσίφονας	
Ώρα ενεργοποίησης	15:00 (Διάρκεια 0 ώρες)		20:00 (Διάρκεια 0 ώρες)	

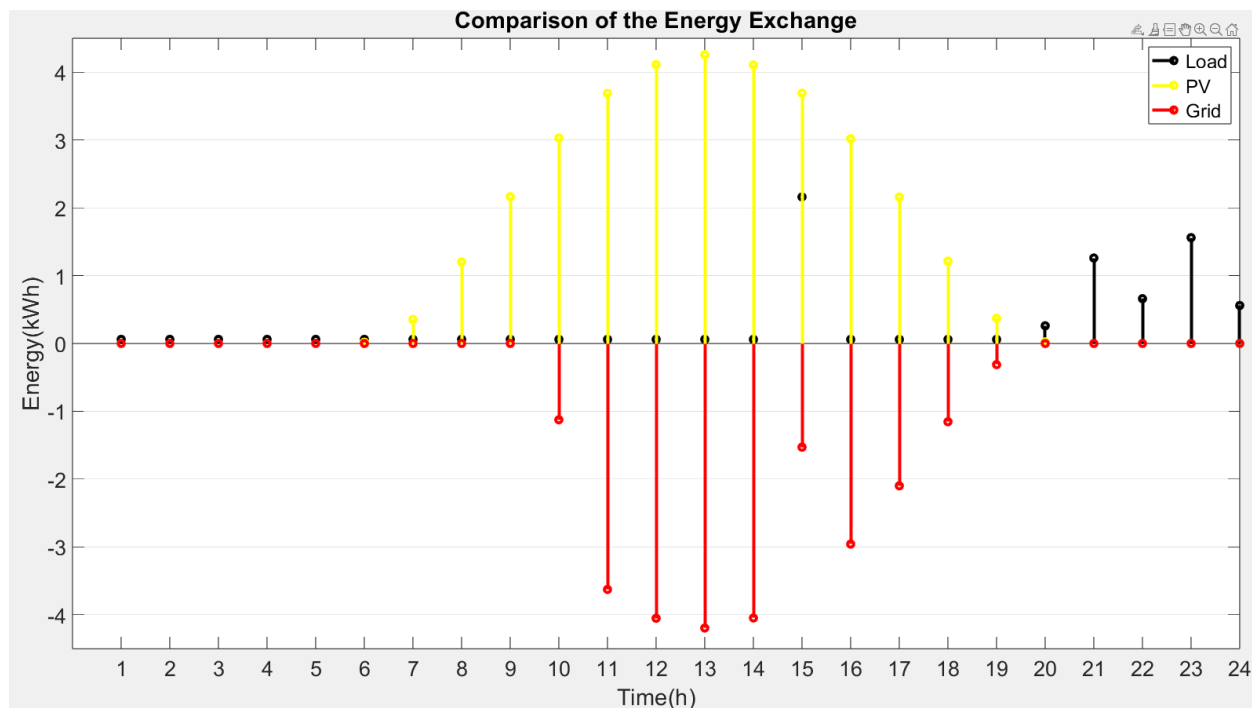
Το σύστημα στο συγκεκριμένο σενάριο, σύμφωνα με τον Πίνακα 4.11, προγραμματίζει τις συσκευές με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να ελαχιστοποιήσει το κόστος. Συγκεκριμένα, γίνεται αντιληπτό ότι οι προγραμματιζόμενες συσκευές ενεργοποιούνται κατά τις βραδινές ώρες. Παρόλο που θα ήταν αναμενόμενο να λειτουργούν το μεσημέρι, κατά τη διάρκεια του οποίου η παραγωγή φωτοβολταϊκών είναι η μέγιστη, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας δεν επιλέγει να τις ενεργοποιήσει εκείνη τη χρονική περίοδο. Η πώληση του πλεονάσματος ενέργειας τις μεσημεριανές ώρες είναι ιδιαίτερα κερδοφόρα, εφόσον η τιμολόγηση είναι αυξημένη. Επομένως το σύστημα διαχείρισης ενέργειας, προκειμένου να μεγιστοποιήσει το κέρδος του, προτιμά να ενεργοποιήσει τις συσκευές το βράδυ, εφόσον διαθέτει μεγάλα αποθέματα από τις μπαταρίες. Σε κάθε περίπτωση, η αγορά από το δίκτυο είναι μηδενική. Η παραπάνω λειτουργία του συστήματος διαχείρισης ενέργειας συμβαίνει εφόσον διαθέτει μεγάλη παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά, οπότε μπορεί να χειριστεί τον χρονοπρογραμματισμό με μεγάλη ευελιξία. Στις ώρες που δεν υπάρχει παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά και ούτε αγορά από το ηλεκτρικό δίκτυο, η τιμολόγηση δεν επηρεάζει το σύστημα διαχείρισης ενέργειας, εφόσον τροφοδοτείται από την μπαταρία. Τέλος, όπως είναι αναμενόμενο, εφόσον μοναδικό του μέλημα είναι το κόστος, δεν ενεργοποιεί τον κλιματισμό, αγνοώντας τη θερμική άνεση του χρήστη.

**Πίνακας 4.12: Αποτελέσματα κριτηρίων σεναρίου 2 – με σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.**

Συντελεστής χρονικής ικανοποίησης	Συντελεστής σταθερότητας δικτύου	Ποινή PMV	Κόστος χωρίς PV (€)	Κόστος χωρίς μπαταρία (€)	Κόστος με PV/μπαταρία (€)
6.83	0	1.64	1.43	-2	-2.53

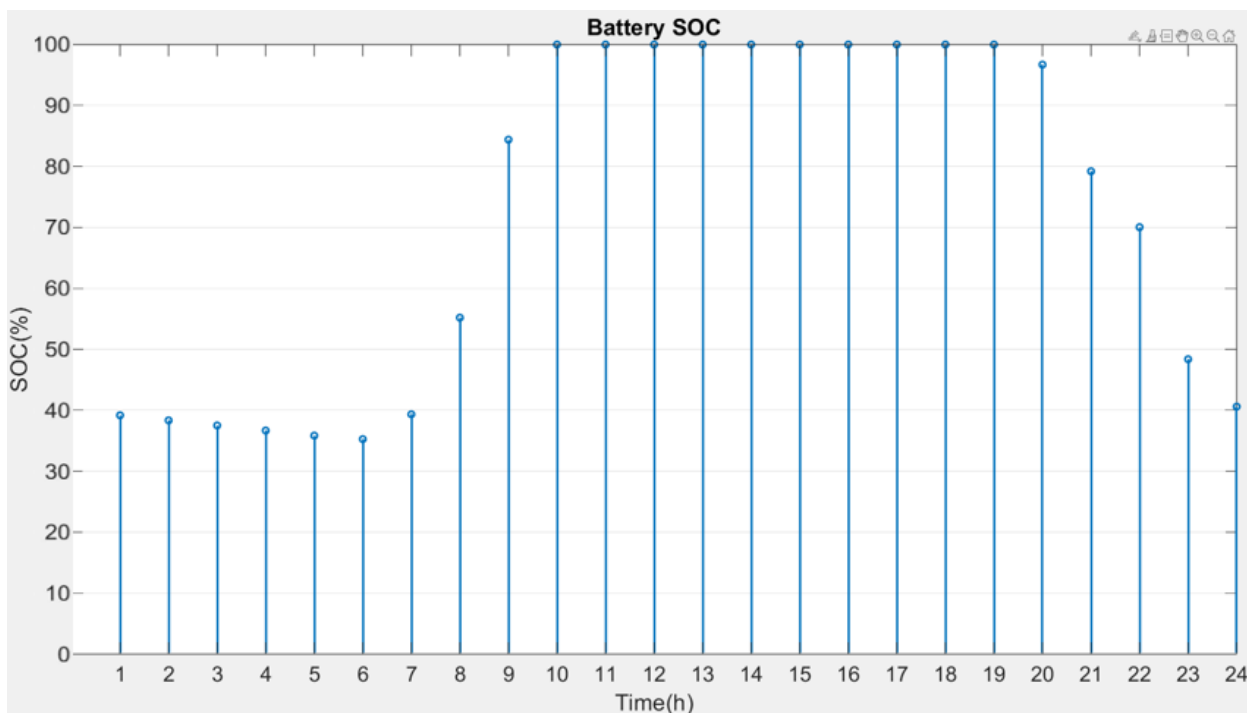
Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.12, ο συντελεστής χρονικής ικανοποίησης λαμβάνει ιδιαίτερα χαμηλή τιμή. Ο συντελεστής σταθερότητας δικτύου, όπως στα περισσότερα σενάρια στους θερινούς μήνες, είναι μηδενικός, λόγω της αντίστοιχης μηδενικής αγοράς ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο. Ο κλιματισμός είναι απενεργοποιημένος, επομένως το PMV παρουσιάζει ποινή ίση με 1.64 λόγω της υπέρβασης των ορίων του. Το κέρδος, όμως, είναι το υψηλότερο που καταγράφεται στη παρούσα εργασία και είναι ίσο με 2.53 €, καθώς η παραγωγή ενέργειας είναι μεγάλη και το φορτίο το ελάχιστο δυνατό. Αντίστοιχα υψηλό είναι και το κέρδος με την απουσία της συστοιχίας μπαταριών που είναι ίσο με 2 €, ενώ υπό την πλήρη απουσία φωτοβολταϊκών το κόστος είναι ίσο με 1.43 €. Δηλαδή, το κόστος με φωτοβολταϊκό σύστημα μειώνεται κατά 240 %, ενώ με την ταυτόχρονη παρουσία της συστοιχίας μπαταριών μειώνεται κατά 277 %. Οι τρεις παραπάνω τιμές είναι σαφώς μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές που παρουσιάστηκαν χωρίς τη χρήση του συστήματος διαχείρισης ενέργειας. Ωστόσο, η ποινή του PMV είναι μεγαλύτερη, καθώς σε αυτή τη περίπτωση ο κλιματισμός είναι απενεργοποιημένος καθ' όλη τη διάρκεια. Συγκεκριμένα, το κόστος με PV και μπαταρία με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας μειώνεται κατά 17.75 %, ο συντελεστής παραμένει μηδενικός, ο συντελεστής χρονικής ικανοποίησης μειώνεται κατά 31.7%, ενώ η ποινή λόγω της υπέρβασης των ορίων του PMV αυξάνεται κατά 58.1 %. Συνεπώς, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας καταφέρνει να μειώσει ακόμη περισσότερο το κόστος σε σχέση με την αντίστοιχη προσπάθεια του χρήστη, ωστόσο το PMV παρουσιάζει μεγαλύτερη ποινή και ο συντελεστής χρονικής ικανοποίησης είναι εμφανώς μειωμένος. Όπως αναλύεται στο Κεφάλαιο 3, η μέγιστη οικονομία δεν είναι στόχος, εφόσον ο χρήστης βρίσκεται στη χειρίστη θερμική του κατάσταση, ωστόσο το σύστημα παρουσιάζει τα επιθυμητά αποτελέσματα για τη βαρύτητα που του δίνεται.



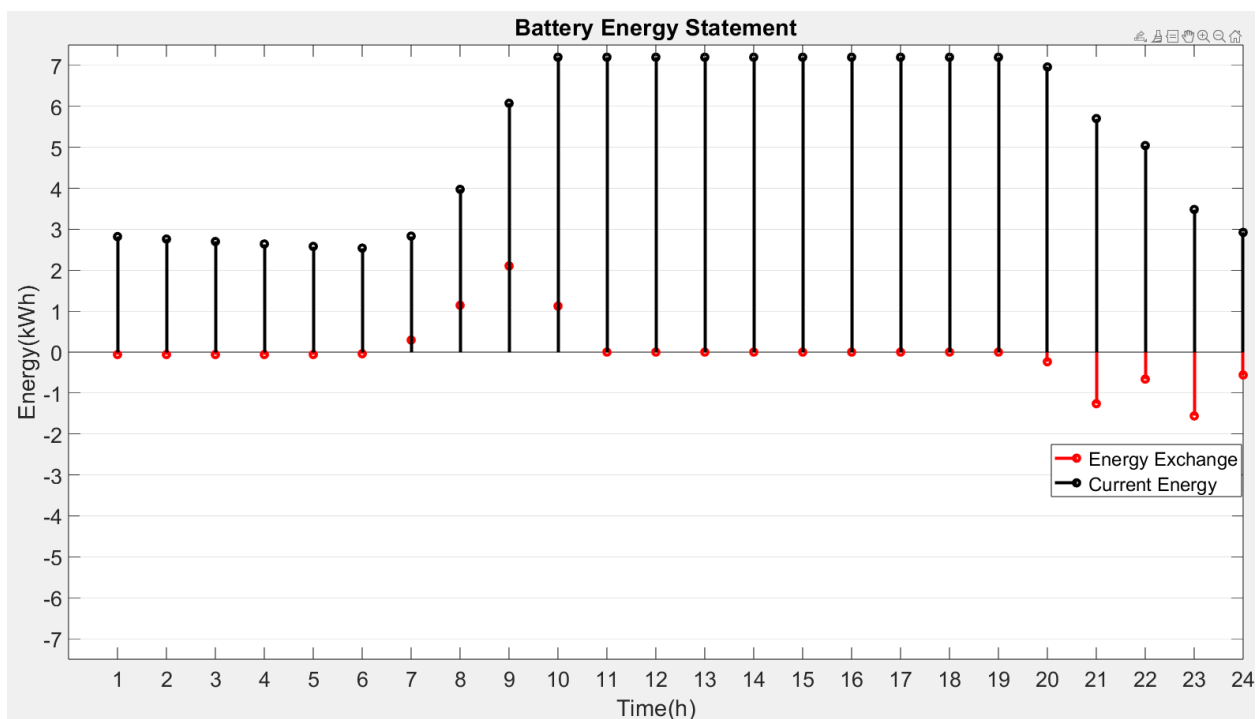


Σχήμα 4.16: Διάγραμμα ενέργειας κτηρίου σεναρίου 2 - με χρήση του συστήματος.

Σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήματος 4.16, τα φορτία μέχρι το μεσημέρι είναι χαμηλά, εκτός από το διάστημα 14:00-15:00, κατά το οποίο λειτουργεί η ηλεκτρική κουζίνα. Το βράδυ, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα φορτία αυξάνονται, όμως καλύπτονται από τη συστοιχία μπαταριών. Τα ποσά ενέργειας που δίνονται στο ηλεκτρικό δίκτυο είναι σχεδόν συμμετρικά με τη παραγωγή, όπως στοχεύει το σύστημα διαχείρισης ενέργειας με την απόλυτη βαρύτητα στην ελαχιστοποίηση του κόστους.



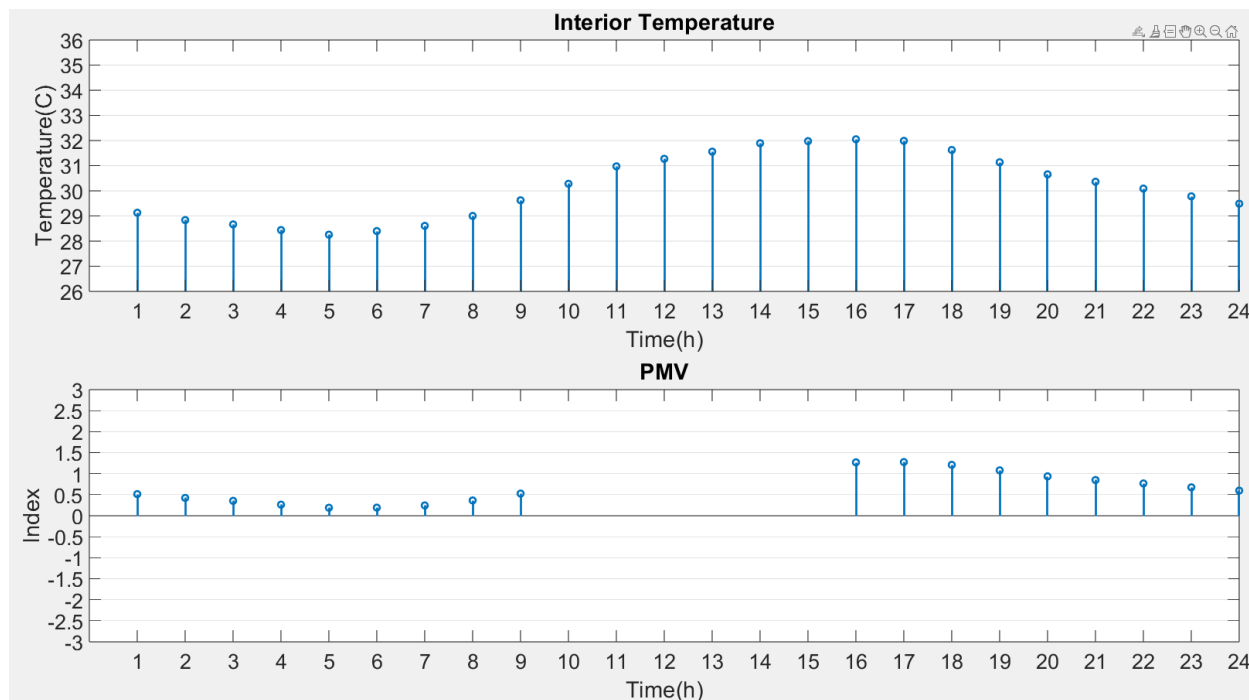
Σχήμα 4.17: Διάγραμμα SOC μπαταρίας σεναρίου 2 – με χρήση του συστήματος.



Σχήμα 4.18: Αποτελέσματα κριτηρίων σεναρίου 2 - με χρήση του συστήματος.

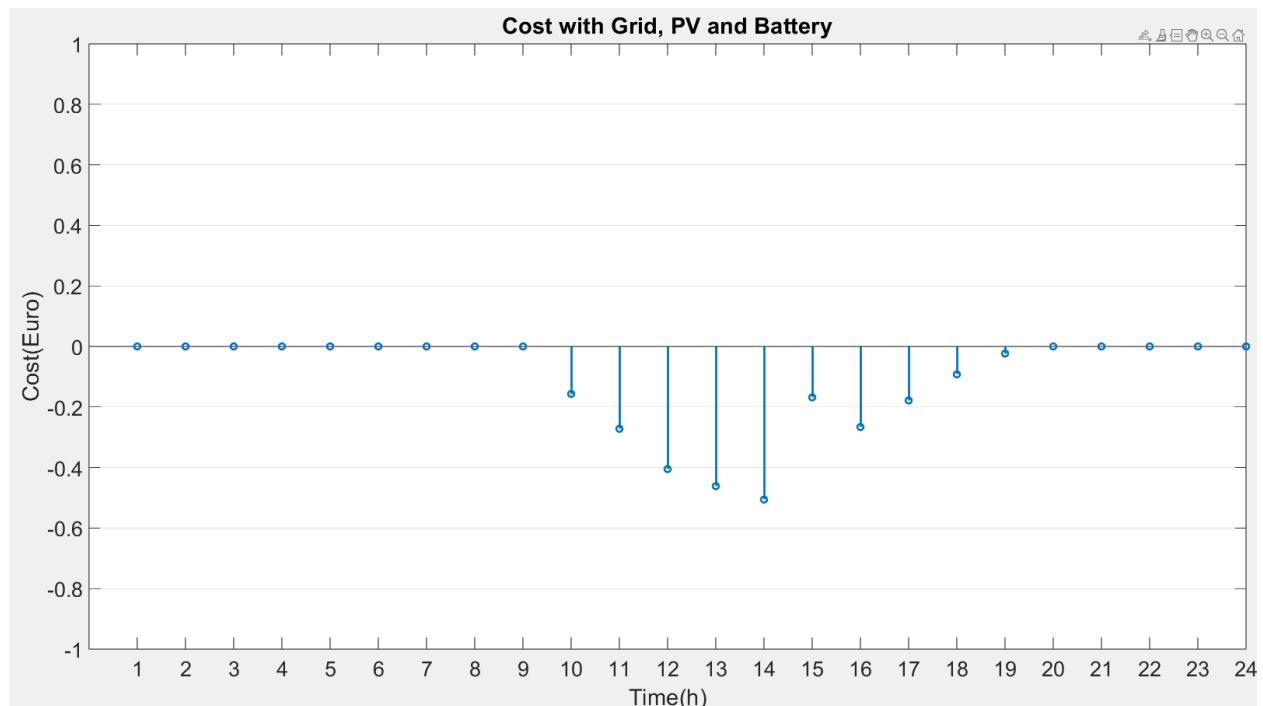
Σύμφωνα με τα Σχήματα 4.17 και 4.18, κατά τις πρωινές ώρες, η συστοιχία μπαταριών φορτίζεται και βρίσκεται στη συνέχεια στη μέγιστη κατάσταση φόρτισής της, από τις 9:00 έως τις 20:00. Η συστοιχία μπαταριών προσφέρει μία μικρή ενέργεια τις πρώτες πρωινές ώρες για να καλύψει το έλλειμμα, ενώ το βράδυ καλείται να καλύψει το σύνολο των φορτίων. Παρά το

γεγονός αυτό, η μπαταρία δεν αποφορτίζεται πλήρως, ακόμη και στο τέλος της ημέρας, φτάνοντας στο 40%.



Σχήμα 4.19: Διάγραμμα θερμοκρασίας και PMV σεναρίου 2 – με χρήση του συστήματος.

Στο Σχήμα 4.19 παρατηρείται ότι λόγω της μη ενεργοποίησης του κλιματισμού, οι θερμοκρασίες στο εσωτερικό του κτηρίου φτάνουν μέχρι και τους 32 °C, με τις αντίστοιχες τιμές του PMV να φτάνουν στο 1.28, κατά το οποίο ο χρήστης αισθάνεται έντονη ζέστη. Έπειτα, το PMV μειώνεται, ωστόσο παραμένει εκτός ορίων ακόμη και στις 24:00.



Σχήμα 4.19: Διάγραμμα ωριαίου κόστους κτηρίου σεναρίου 2 –με χρήση του συστήματος.

Όπως είναι αναμενόμενο, στο Σχήμα 4.19 απεικονίζονται τα υψηλά κέρδη του κτηρίου, τα οποία μάλιστα διαρκούν μέχρι και τις 18:00, ενώ κατά τη διάρκεια του μεσημεριού ξεπερνούν ακόμη και τα 0.5 €.

### 4.2.3 Σενάριο 3: Βαρύτητα εξ ολοκλήρου στο συντελεστή σταθερότητας δικτύου

Η συνάρτηση βελτιστοποίησης δεν αντιμετωπίζει μεγάλη πρόκληση στο συγκεκριμένο σενάριο κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, καθώς η αγορά από το ηλεκτρικό δίκτυο στην πλειονότητα των περιπτώσεων είναι μηδενική. Τη συγκεκριμένη ημέρα του καλοκαιριού στην οποία πραγματοποιείται η προσομοίωση, η ηλιοφάνεια είναι έντονα αυξημένη, όπως επίσης και η παραγωγή ενέργειας. Σε συνδυασμό με τα οικιακά φορτία που δεν την ξεπερνούν, κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου δεν αντλείται ενέργεια από το δίκτυο, επομένως ο συντελεστής σταθερότητας δικτύου παραμένει ο βέλτιστος δυνατός, για πληθώρα περιπτώσεων χρονοπρογραμματισμού. Επομένως, όπως παρουσιάζεται παρακάτω, το σενάριο αυτό δεν είναι ωφέλιμο για το καλοκαίρι, εφόσον το σύστημα διαχείρισης ενέργειας θα επιλέξει έναν από τους πολλούς χρονοπρογραμματισμούς που επιφέρουν τον βέλτιστο συντελεστή σταθερότητας δικτύου, χωρίς να ελέγχει κάποιο άλλο κριτήριο. Συνεπώς, εάν ο χρήστης ήθελε να δώσει βαρύτητα στο κριτήριο της σταθερότητας δικτύου, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας θα πρότεινε κάποιο από τα παραπάνω σενάρια, προκειμένου να συνδυάσει ταυτόχρονα δύο οφέλη.

Για παράδειγμα, στο σενάριο 1 το PMV βρίσκεται εντός ορίων με μηδενική ποινή και ταυτόχρονα ο συντελεστής σταθερότητας δικτύου είναι μηδενικός. Παρόμοια, στο σενάριο 2 το κόστος είναι το ελάχιστο δυνατό και ο συντελεστής σταθερότητας δικτύου είναι επίσης μηδενικός. Η απόλυτη προτεραιότητα στο κριτήριο σταθερότητας δικτύου από το σύστημα έχει τα παρακάτω αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.14 με τις εισόδους του Πίνακα 4.13.

<b>Πίνακας 4.13: Παράμετροι εισόδου για το σενάριο 3.</b>			
Βαρύτητα συντελεστή χρονικής ικανοποίησης	Βαρύτητα ποινής PMV	Βαρύτητα συντελεστή σταθερότητας δικτύου	Βαρύτητα κόστους ενέργειας
0	0	1	0
Ενδυματολογική μόνωση	Επίπεδο δραστηριότητας	Λειτουργία κτηρίου	Λειτουργία φωτισμού
0.3	1 (0:00-7:00) 1.2 (7:00-24:00)	0:00-9:00 & 15:00-24:00	21:00-24:00
Ανώτατο επίπεδο θερμοκρασίας HVAC	Κατώτατο επίπεδο θερμοκρασίας HVAC	Θερμοκρασία εισερχόμενου κρύου νερού	Θερμοκρασία θερμοσίφωνα
28.5 °C	19.5 °C	20 °C	40 °C

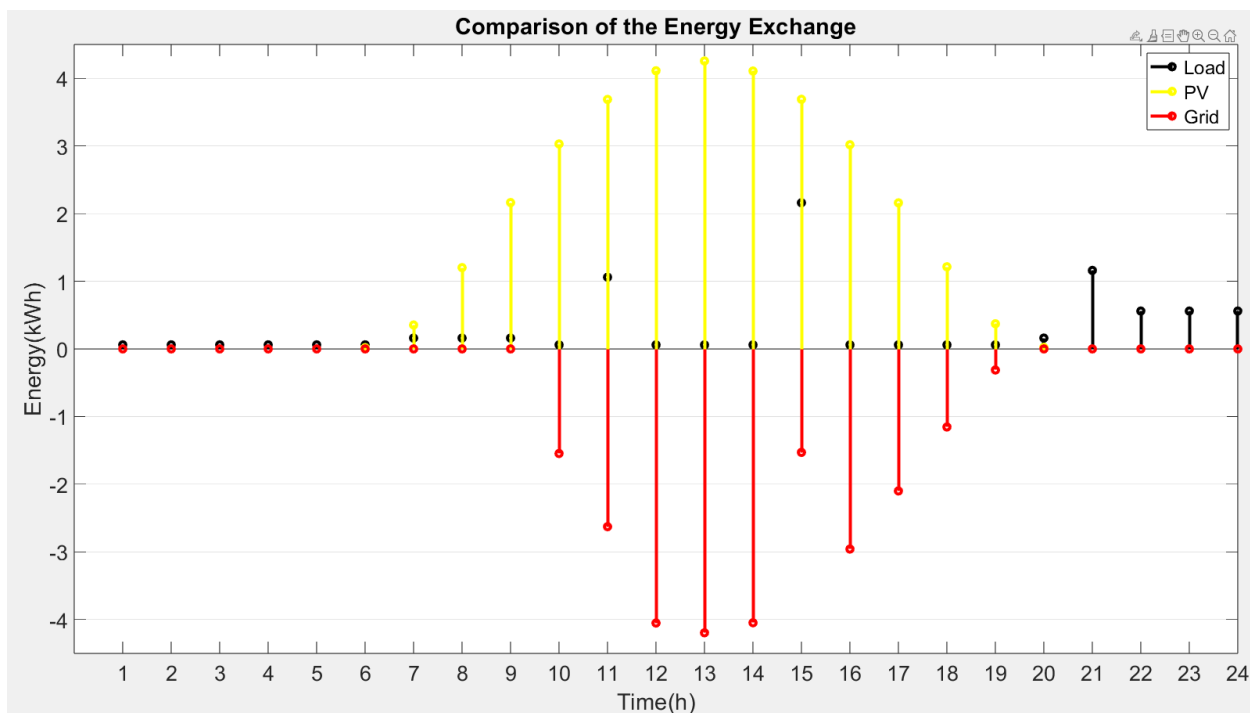
<b>Πίνακας 4.14: Χρονοπρογραμματισμός συσκευών σεναρίου 3 – με σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.</b>				
Συσκευή	Πλυντήριο ρούχων	Ηλ. σκούπα	Πλυντήριο πιάτων	Ψυγείο
Ωρα ενεργοποίησης	23:00	6:00	21:00	0:00
Συσκευή	TV	PC	Ηλ. κουζίνα	Φωτισμός
Ωρα ενεργοποίησης	21:00	19:00	14:00	21:00
Συσκευή	Κλιματισμός		Θερμοσίφωνα	
Ωρα ενεργοποίησης	16:00 (Διάρκεια 0 ώρες)		20:00 (Διάρκεια 0 ώρες)	

Στον Πίνακα 4.14 παρατηρείται ότι το σύστημα διαχείρισης ενέργειας ενεργοποιεί τις προγραμματιζόμενες συσκευές σε διάφορα χρονικά διαστήματα, αποφεύγοντας να ενεργοποιήσει τα φορτία ταυτόχρονα. Επίσης, επιλέγει να μην ενεργοποιήσει τον κλιματισμό για να αποφύγει την αγορά ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο. Ο συγκεκριμένος χρονοπρογραμματισμός είναι ένας από τους πολλούς που θα οδηγούσαν σε ίδιο αποτέλεσμα, δηλαδή σε μηδενικό συντελεστή σταθερότητας δικτύου. Ωστόσο η συνάρτηση βελτιστοποίησης μέσω της Particle Swarm Optimization επιλέγει τον πιο προφανή, σύμφωνα με τον οποίο το σύστημα κλιματισμού είναι απενεργοποιημένο, γεγονός που εξασφαλίζει χαμηλή συνολική κατανάλωση ενέργειας μέσα στο εικοσιτετράωρο, άρα και μηδενική αγορά από το ηλεκτρικό δίκτυο, εφόσον η παραγωγή ενέργειας είναι αυξημένη.

**Πίνακας 4.15: Αποτελέσματα κριτηρίων σεναρίου 3 – με Σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.**

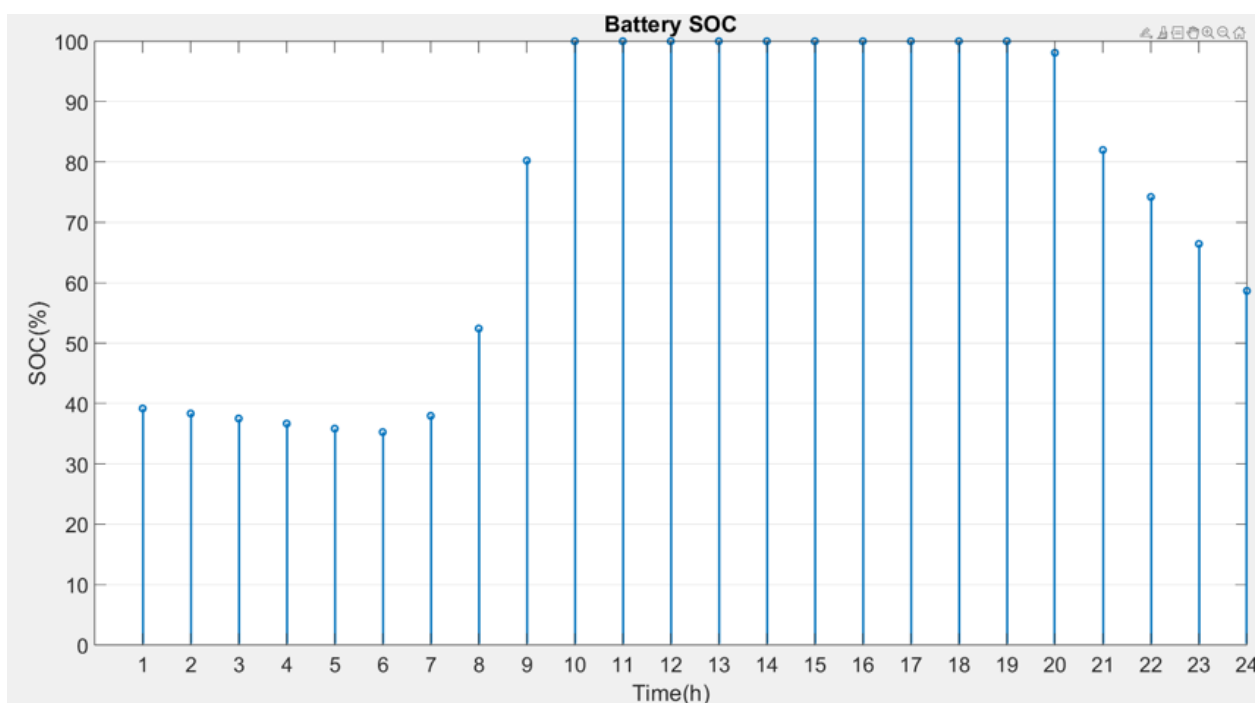
Συντελεστής χρονικής ικανοποίησης	Συντελεστής σταθερότητας δικτύου	Ποινή PMV	Κόστος χωρίς PV (€)	Κόστος χωρίς μπαταρία (€)	Κόστος με PV/μπαταρία (€)
8.93	0	1.64	1.42	-2.07	-2.43

Με βάση τον Πίνακα 4.15, όπως είναι αναμενόμενο, το σύστημα επιλέγει έναν χρονοπρογραμματισμό από τους πολλούς που επιφέρουν το βέλτιστο συντελεστή σταθερότητας δικτύου, όπως στα σενάρια 1 και 2. Ωστόσο, το κέρδος στο παρόν σενάριο είναι μικρότερο από το σενάριο 2 και η ποινή του PMV είναι μεγαλύτερη από το σενάριο 1. Επομένως, εάν ο χρήστης επιθυμεί να ελαχιστοποιήσει τον συντελεστή σταθερότητας δικτύου, είναι προτιμότερο να επιλέξει ένα από τα δύο πρώτα σενάρια, έτσι ώστε να συνδυάσει και ένα ακόμη όφελος. Το κέρδος σε αυτό το σενάριο είναι ίσο με 2.43 €. Υπό την απουσία μπαταρίας, το κέρδος είναι ίσο με 2.07 €, ενώ με την απουσία του συνόλου του φωτοβολταϊκού συστήματος, το κόστος είναι ίσο με 1.42 €. Συνεπώς, με την παρουσία φωτοβολταϊκών χωρίς συστοιχία μπαταριών το κόστος μειώνεται κατά 246 %, ενώ με την παρουσία και της συστοιχίας μπαταριών το κόστος μειώνεται κατά 271 %.



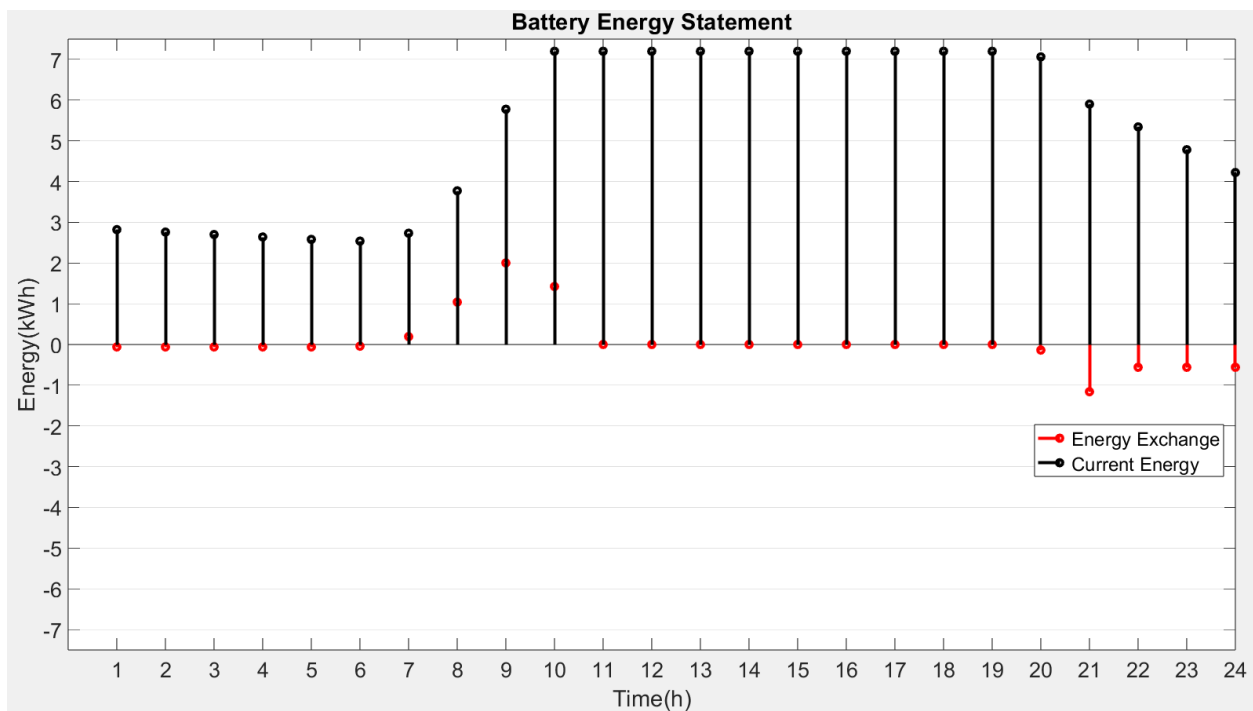
Σχήμα 4.20: Διάγραμμα ενέργειας κτηρίου σεναρίου 3 - Με χρήση του συστήματος.

Όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα του Σχήματος 4.20, τα φορτία είναι ομοιόμορφα κατανομημένα στο εικοσιτετράωρο, ωστόσο, σε αντίθεση με το σενάριο 2, παρατηρείται ότι υπάρχουν περισσότερα φορτία το πρωί, γεγονός που μειώνει το κέρδος.



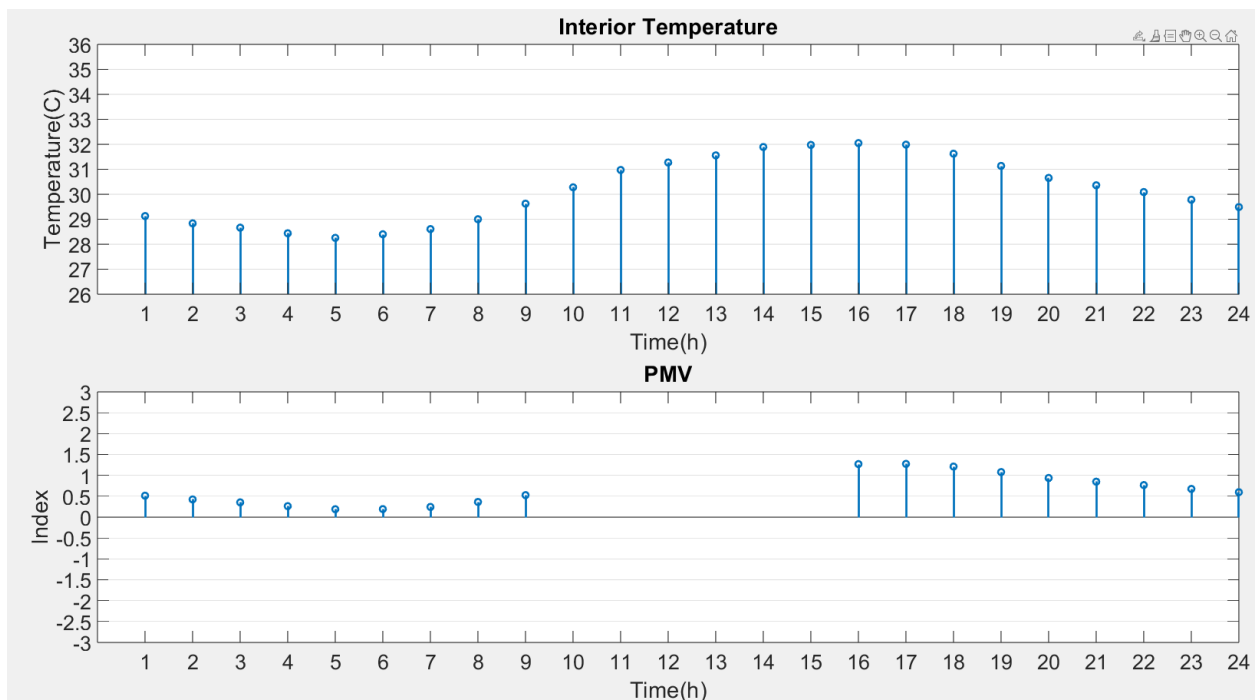
Σχήμα 4.21: Διάγραμμα SOC μπαταρίας σεναρίου 3 – Με χρήση του συστήματος.





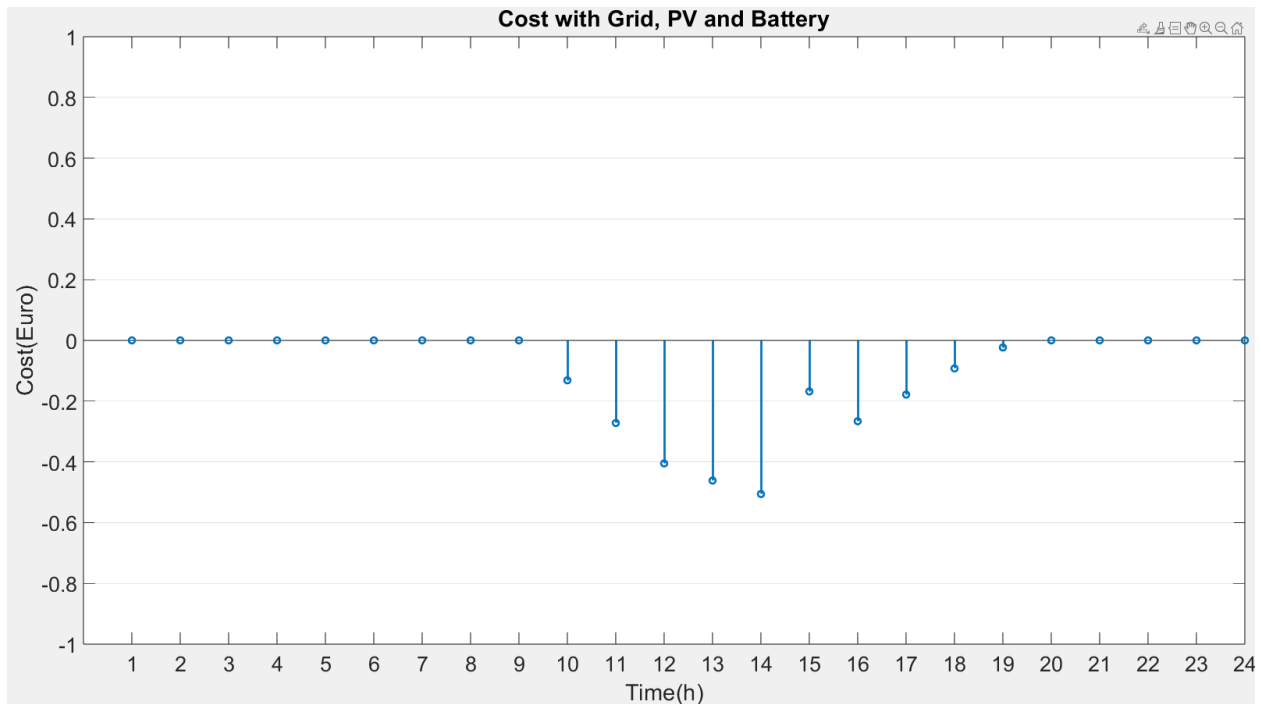
Σχήμα 4.22: Διάγραμμα ενέργειας μπαταρίας σεναρίου 3 – με χρήση του συστήματος.

Στα Σχήματα 4.21 και 4.22 φαίνεται πως η συστοιχία μπαταριών ακολουθεί παρόμοιο μοτίβο με το αντίστοιχο του σεναρίου 2, καθώς είναι πλήρως φορτισμένη για μεγάλο χρονικό διάστημα και καταλήγει στο τέλος της ημέρας σε υψηλό ποσοστό φόρτισης. Ο λόγος που οδηγεί σε αυτό το αποτέλεσμα είναι η μη λειτουργία του κλιματισμού καθ' όλη τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου.



Σχήμα 4.23: Διάγραμμα θερμοκρασίας και PMV σεναρίου 3 – με χρήση του συστήματος.

Το διάγραμμα του σεναρίου 3 είναι ταυτόσημο με το αντίστοιχο του σεναρίου 2. Ο κλιματισμός είναι απενεργοποιημένος, με τις θερμοκρασίες να είναι υψηλές. Επομένως η ποινή του PMV είναι αυξημένη, καθώς και σε αυτή τη περίπτωση φτάνει ως το 1.28 το μεσημέρι.



Σχήμα 4.24: Διάγραμμα ωριαίου κόστους κτηρίου σεναρίου 3 –με χρήση του συστήματος.

Το Σχήμα 4.24 παρουσιάζει επίσης ένα παρόμοιο διάγραμμα, όπως το αντίστοιχο του σεναρίου 2, ωστόσο ο παρών χρονοπρογραμματισμός επιφέρει ελαφρώς μικρότερο κέρδος.

#### 4.2.4 Σενάριο 4: Βαρύτητα εξ ολοκλήρου στο συντελεστή χρονικής ικανοποίησης χρήστη

Το παρόν σενάριο ταυτίζει την επιλογή του χρήστη με αυτή του συστήματος διαχείρισης ενέργειας. Στις περιπτώσεις που ο χρήστης δεν χρησιμοποιεί το σύστημα, θεωρείται ότι επιλέγει την ενεργοποίηση των συσκευών στις χρονικές στιγμές τις οποίες δίνει ως αρχική τιμή στο επιθυμητό περιθώριο. Επίσης, επιλέγει τη διάρκεια του κλιματισμού αυθαίρετα, με βάση την εκάστοτε βαρύτητα που επιθυμεί να δώσει σε κάθε κριτήριο. Στην παρούσα περίπτωση, λοιπόν, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας μεγιστοποιεί τον συντελεστή χρονικής ικανοποίησης ακολουθώντας την ίδια λογική. Ενεργοποιεί, δηλαδή, τις συσκευές στην αρχική τιμή του εύρους που του δίνεται. Ωστόσο, η επιλογή της διάρκειας του κλιματισμού, δεν επηρεάζει τον συντελεστή χρονικής ικανοποίησης.

**Πίνακας 4.16: Παράμετροι εισόδου για το σενάριο 4.**

Βαρύτητα συντελεστή χρονικής ικανοποίησης	Βαρύτητα ποινής PMV	Βαρύτητα συντελεστή σταθερότητας δικτύου	Βαρύτητα κόστους ενέργειας
1	0	0	0
Ενδυματολογική μόνωση	Επίπεδο δραστηριότητας	Λειτουργία κτηρίου	Λειτουργία φωτισμού
0.3	1 (0:00-7:00) 1.2 (7:00-24:00)	0:00-9:00 & 15:00-24:00	21:00-24:00
Ανώτατο επίπεδο θερμοκρασίας HVAC	Κατώτατο επίπεδο θερμοκρασίας HVAC	Θερμοκρασία εισερχόμενου κρύου νερού	Θερμοκρασία θερμοσίφωνα
28.5 °C	19.5 °C	20 °C	40 °C

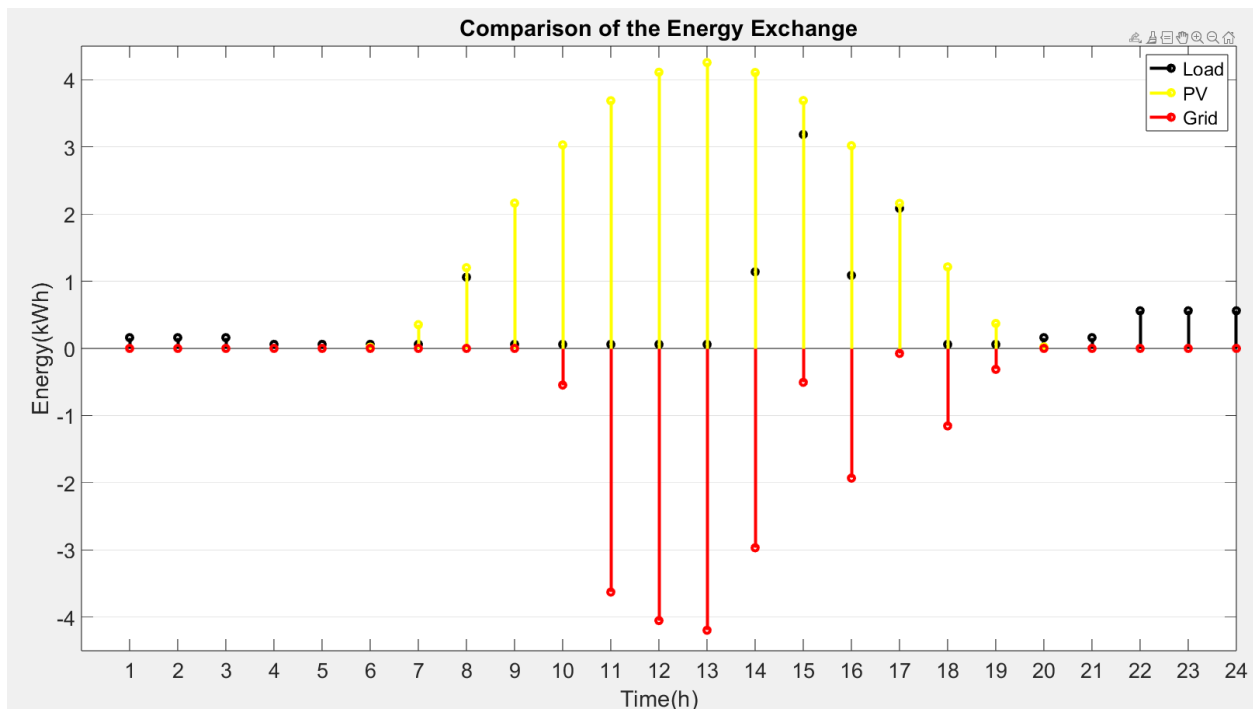
**Πίνακας 4.17: Χρονοπρογραμματισμός συσκευών σεναρίου 3 – με σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.**

Συσκευή	Πλυντήριο ρούχων	Ηλ. σκούπα	Πλυντήριο πιάτων	Ψυγείο
Ωρα ενεργοποίησης	7:00	0:00	16:00	0:00
Συσκευή	TV	PC	Ηλ. κουζίνα	Φωτισμός
Ωρα ενεργοποίησης	21:00	19:00	14:00	21:00
Συσκευή	Κλιματισμός		Θερμοσίφωνα	
Ωρα ενεργοποίησης	13:00 (Διάρκεια 4 ώρες)		20:00 (Διάρκεια 0 ώρες)	

Στον Πίνακα 4.17 απεικονίζονται οι αναμενόμενες ώρες ενεργοποίησης των συσκευών που ταυτίζονται με τις επιθυμίες του χρήστη. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης επιλέγει 4 ώρες για τη λειτουργία του κλιματισμού και η διάρκεια του δεν επηρεάζει τον συντελεστή χρονικής ικανοποίησης. Επομένως, για οποιαδήποτε διάρκεια, το αποτέλεσμα της συνάρτησης βελτιστοποίησης είναι ίδιο.

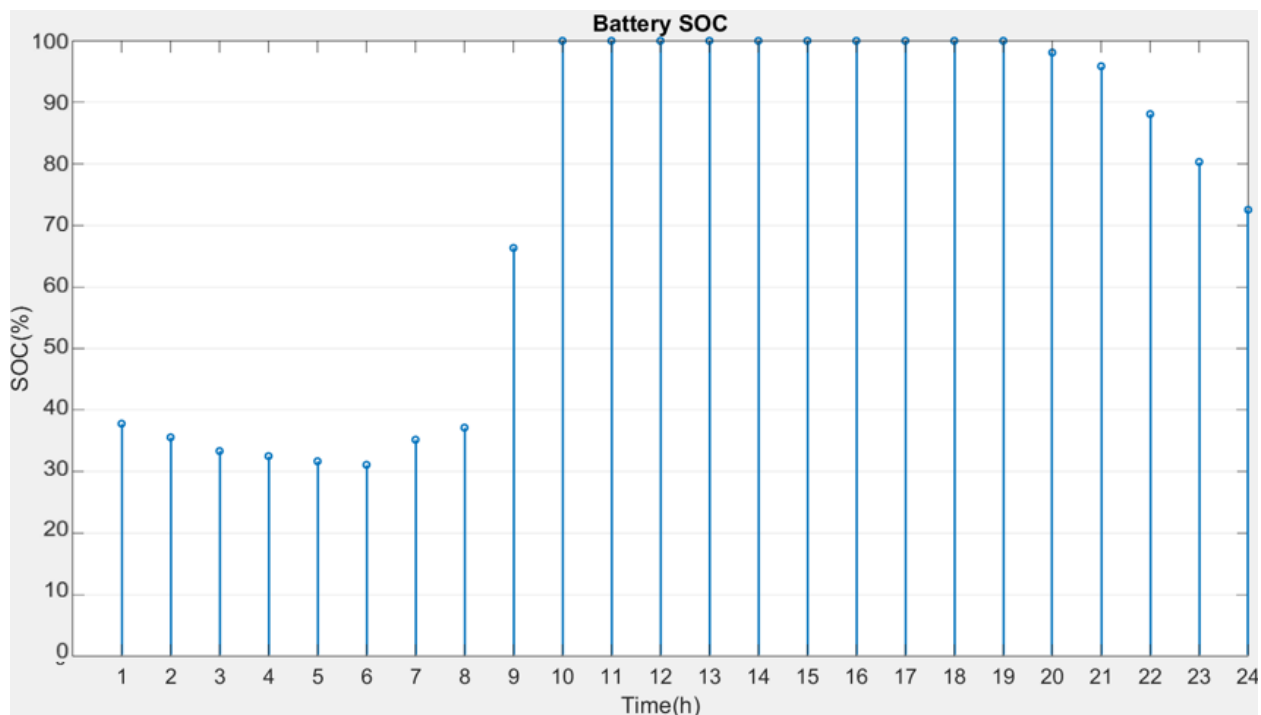
<b>Πίνακας 4.18: Αποτελέσματα κριτηρίων σεναρίου 4 – με σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.</b>					
Συντελεστής χρονικής ικανοποίησης	Συντελεστής σταθερότητας δικτύου	Ποινή PMV	Κόστος χωρίς PV (€)	Κόστος χωρίς μπαταρία (€)	Κόστος με PV/μπαταρία (€)
10	0	0.61	2.29	-1.77	-1.91

Όπως σε κάθε σενάριο στο οποίο αποφασίζει ο χρήστης για την ενεργοποίηση των συσκευών, έτσι και στο παρόν ο συντελεστής χρονικής ικανοποίησης είναι ο μέγιστος και είναι ίσος με 10, εφόσον εισάγονται 10 συσκευές. Ο συντελεστής σταθερότητας δικτύου είναι μηδενικός, όπως σε κάθε σενάριο στους θερινούς μήνες, ενώ η ποιότητά του PMV είναι ίση με 0.61, λόγω της επιλογής του συστήματος διαχείρισης ενέργειας για τη διάρκεια του κλιματισμού. Η τιμή αυτή για το παρόν σενάριο δύναται να αυξηθεί ή να μειωθεί, χωρίς να επηρεάζει τον συντελεστή. Το κέρδος στη παρούσα περίπτωση είναι ίσο με 1.91 €. Αν απουσίαζε η συστοιχία μπαταριών θα ήταν ίσο με 1.77 €, ενώ με την πλήρη απουσία φωτοβολταϊκών το κόστος θα ήταν ίσο με 2.29 €. Επομένως η τοποθέτηση φωτοβολταϊκού συστήματος χωρίς συστοιχία μπαταριών επιφέρει μείωση κόστους κατά 177 %, ενώ με την ταυτόχρονη παρουσία της συστοιχίας μπαταριών το κόστος μειώνεται κατά 183 %

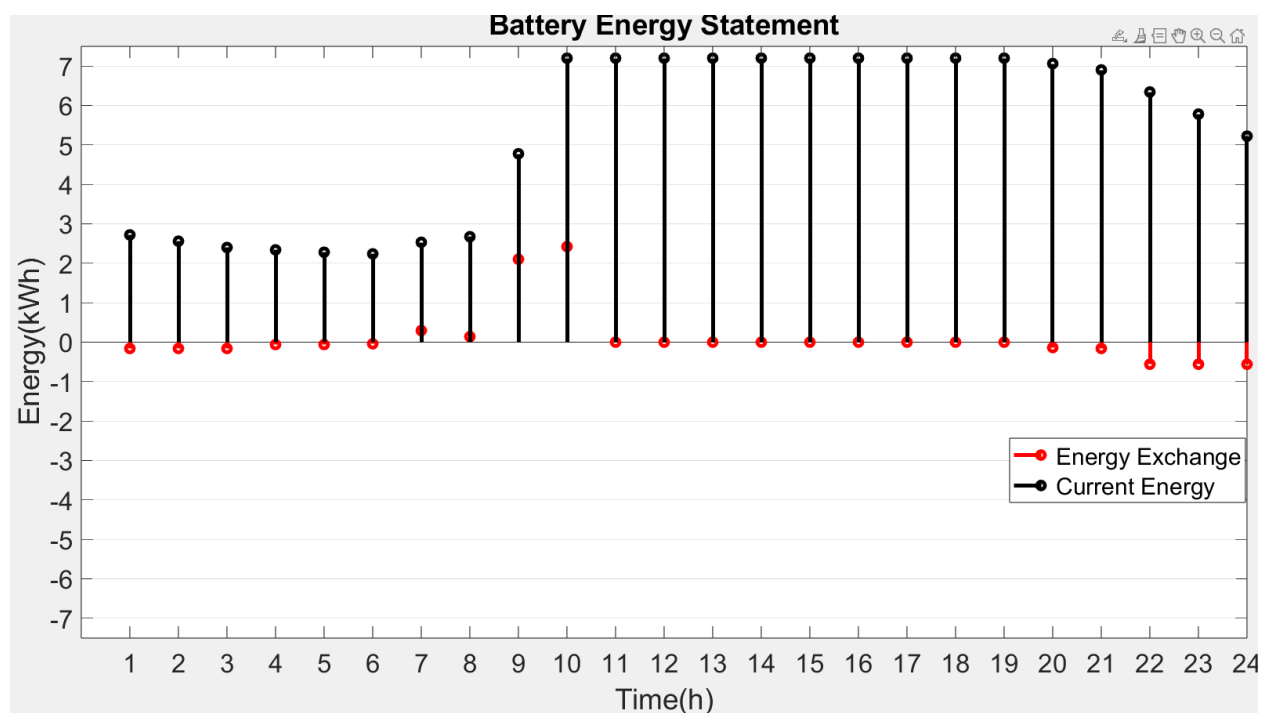


Σχήμα 4.25: Διάγραμμα ενέργειας κτηρίου σεναρίου 4 - Με χρήση του συστήματος.

Στο Σχήμα 4.25 παρατηρείται συσσώρευση των φορτίων κατά τη διάρκεια του μεσημεριού, όπως παρατηρείται σε πολλούς χρήστες, καθώς χρησιμοποιούν τις συσκευές τους ταυτόχρονα όταν επιστρέφουν από την εργασία τους. Η παραγωγή ενέργειας είναι σε θέση να καλύπτει τα φορτία, ωστόσο το ποσό ενέργειας που δίνεται στο ηλεκτρικό δίκτυο είναι σαφώς μικρότερο σε σχέση με σενάρια που στοχεύουν στην εξοικονόμηση κόστους.

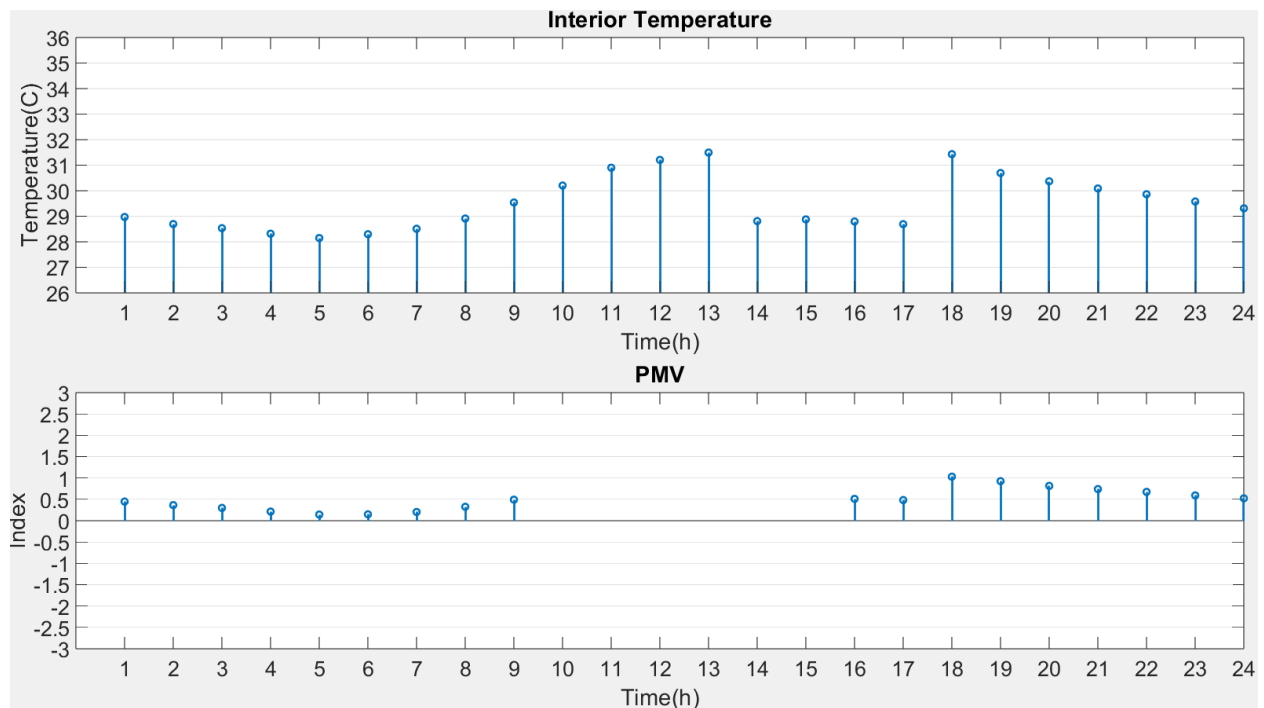


Σχήμα 4.26: Διάγραμμα SOC σεναρίου 4 – Με χρήση του συστήματος.



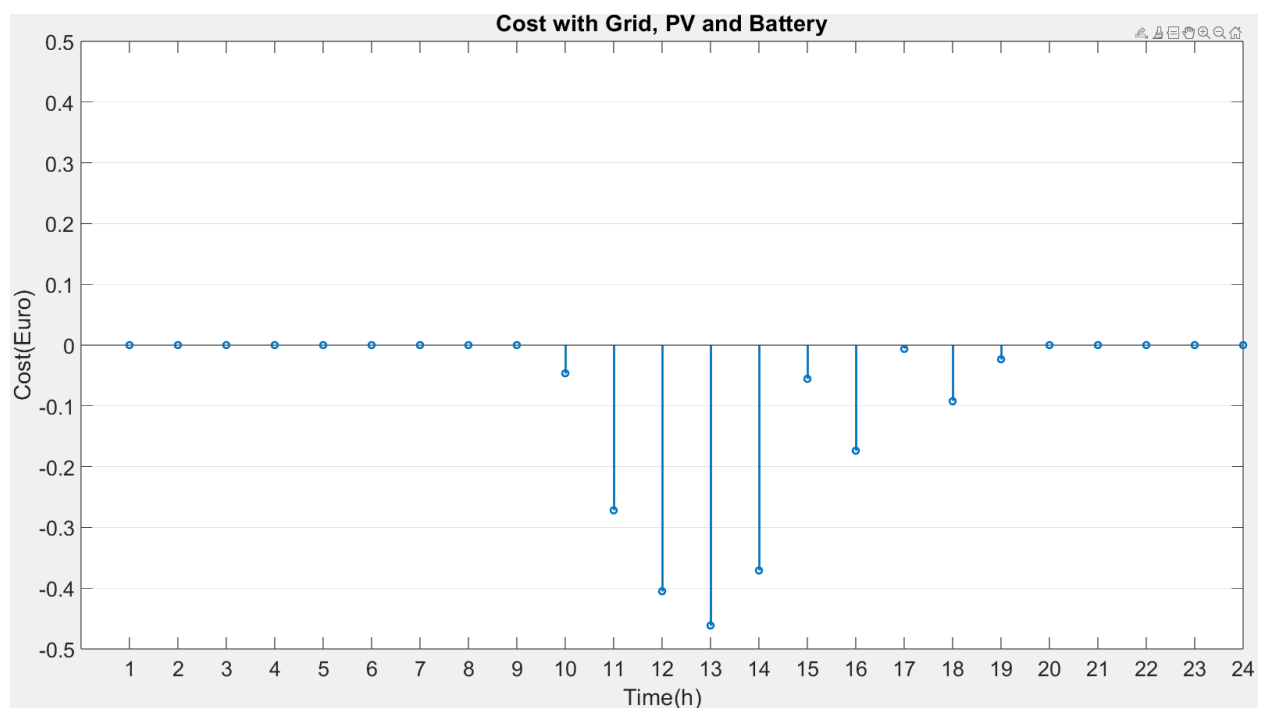
Σχήμα 4.27: Διάγραμμα ενέργειας μπαταρίας σεναρίου 4 – με χρήση του συστήματος.

Στα Σχήματα 4.26 και 4.27 φαίνεται πως η απόλυτη βαρύτητα στη χρονική ικανοποίηση δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη συστοιχία μπαταριών. Παρόμοια και σε αυτή τη περίπτωση, παρατηρείται αργή εκφόρτιση τις πρώτες πρωινές ώρες, αργότερα με την εμφάνιση της ηλιοφάνειας φορτίζεται με γρήγορο ρυθμό και τελικά καταλήγει σε ποσοστό πάνω από 70%.



Σχήμα 4.28: Διάγραμμα θερμοκρασίας και PMV σεναρίου 4 – Με χρήση του συστήματος.

Όπως σε κάθε διάγραμμα θερμοκρασίας τους θερινούς μήνες, έτσι και το παρόν του Σχήματος 4.28 παρουσιάζει τις υψηλές θερμοκρασίες της εποχής. Η λειτουργία του κλιματισμού το μεσημέρι φέρνει το PMV σε επιτρεπτά όρια, ωστόσο το σύστημα σε αυτή τη περίπτωση κρατά τον κλιματισμό ενεργοποιημένο για δύο ώρες που ο χρήστης απουσιάζει. Στη συνέχεια, η απενεργοποίησή του επιφέρει ραγδαία αύξηση του PMV.



Σχήμα 4.29: Διάγραμμα ωριαίου κόστους κτηρίου σεναρίου 4 – με χρήση του συστήματος.

Το Σχήμα 4.29 παρουσιάζει το κέρδος που επιφέρει το σύστημα διαχείρισης ενέργειας, ωστόσο στο παρόν σενάριο δεν ξεπερνά τα 0.5 € σε μία ώρα.

#### 4.2.5 Σενάριο 5: Εξισορροπημένη βαρύτητα των συντελεστών

Σε αντίθεση με τα παραπάνω σενάρια, το παρόν καλείται να δώσει βαρύτητα και στα τέσσερα κριτήρια ταυτόχρονα. Μάλιστα, τα τέσσερα κριτήρια έχουν ίση βαρύτητα, προκειμένου να επιλεγεί ένας χρονοπρογραμματισμός που θα επιφέρει μια ισορροπία.

Πίνακας 4.19: Παράμετροι εισόδου για το σενάριο 5.			
Βαρύτητα συντελεστή χρονικής ικανοποίησης	Βαρύτητα ποινής PMV	Βαρύτητα συντελεστή σταθερότητας δικτύου	Βαρύτητα κόστους ενέργειας
0.25	0.25	0.25	0.25
Ενδυματολογική μόνωση	Επίπεδο δραστηριότητας	Λειτουργία κτηρίου	Λειτουργία φωτισμού
0.3	1 (0:00-7:00) 1.2 (7:00-24:00)	0:00-9:00 & 15:00-24:00	21:00-24:00
Ανώτατο επίπεδο θερμοκρασίας HVAC	Κατώτατο επίπεδο θερμοκρασίας HVAC	Θερμοκρασία εισερχόμενου κρύου νερού	Θερμοκρασία θερμοσίφωνα
28.5 °C	19.5 °C	20 °C	40 °C



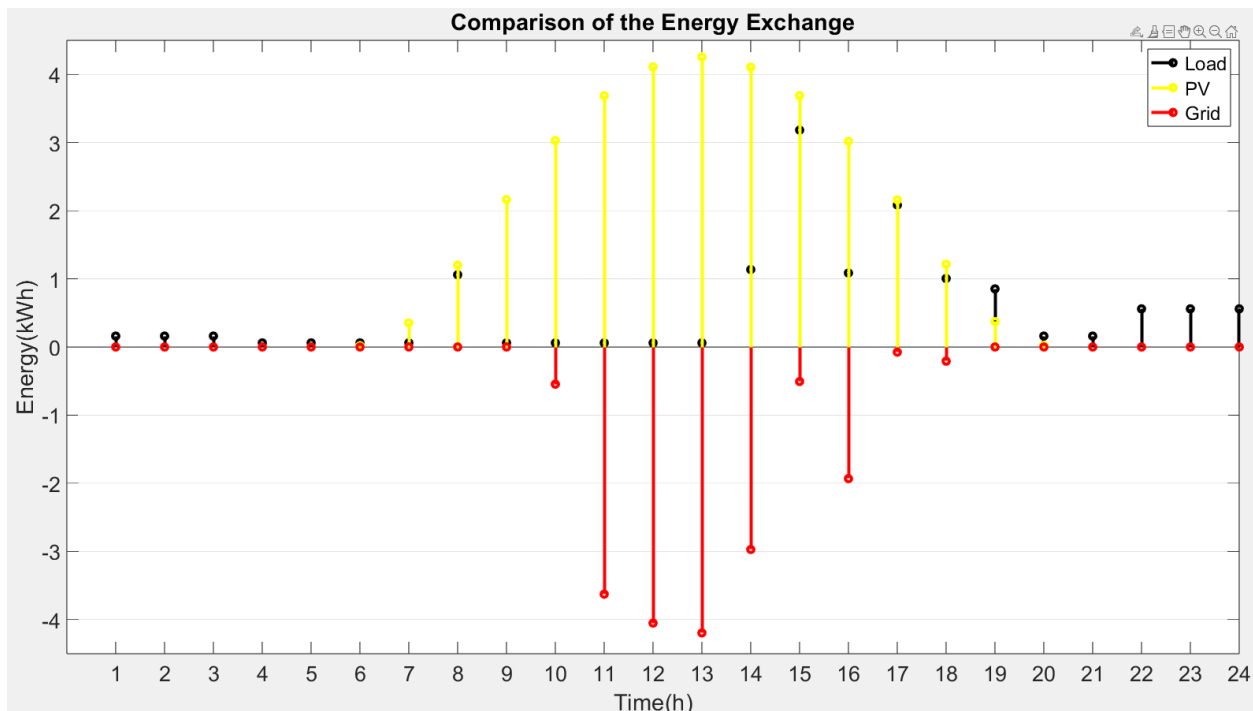
<b>Πίνακας 4.20: Χρονοπρογραμματισμός συσκευών σεναρίου 5 – χωρίς σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.</b>				
Συσκευή	Πλυντήριο ρούχων	Ηλ. σκούπα	Πλυντήριο πιάτων	Ψυγείο
Ωρα ενεργοποίησης	7:00	0:00	16:00	0:00
Συσκευή	TV	PC	Ηλ. κουζίνα	Φωτισμός
Ωρα ενεργοποίησης	21:00	19:00	14:00	21:00
Συσκευή	Κλιματισμός		Θερμοσίφωνας	
Ωρα ενεργοποίησης	14:00 (Διάρκεια 5 ώρες)		20:00 (Διάρκεια 0 ώρες)	

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.20, όπως στις παραπάνω περιπτώσεις, ο χρήστης ενεργοποιεί τις συσκευές σύμφωνα με τις αρχικές τιμές των επιθυμητών του ορίων και εφόσον μέλημά του είναι ένα εξισορροπημένο σενάριο, ενεργοποιεί τον κλιματισμό στις 14:00, έτσι ώστε να προετοιμάσει τον χώρο μέχρι την προσέλευσή του στις 15:00 και η διάρκεια που επιλέγει είναι 5 ώρες.

<b>Πίνακας 4.21: Αποτελέσματα κριτηρίων σεναρίου 5 – χωρίς σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.</b>					
Συντελεστής χρονικής ικανοποίησης	Συντελεστής σταθερότητας δικτύου	Ποινή PMV	Κόστος χωρίς PV (€)	Κόστος χωρίς μπαταρία (€)	Κόστος με PV/μπαταρία (€)
10	0	0.18	2.56	-1.60	-1.81

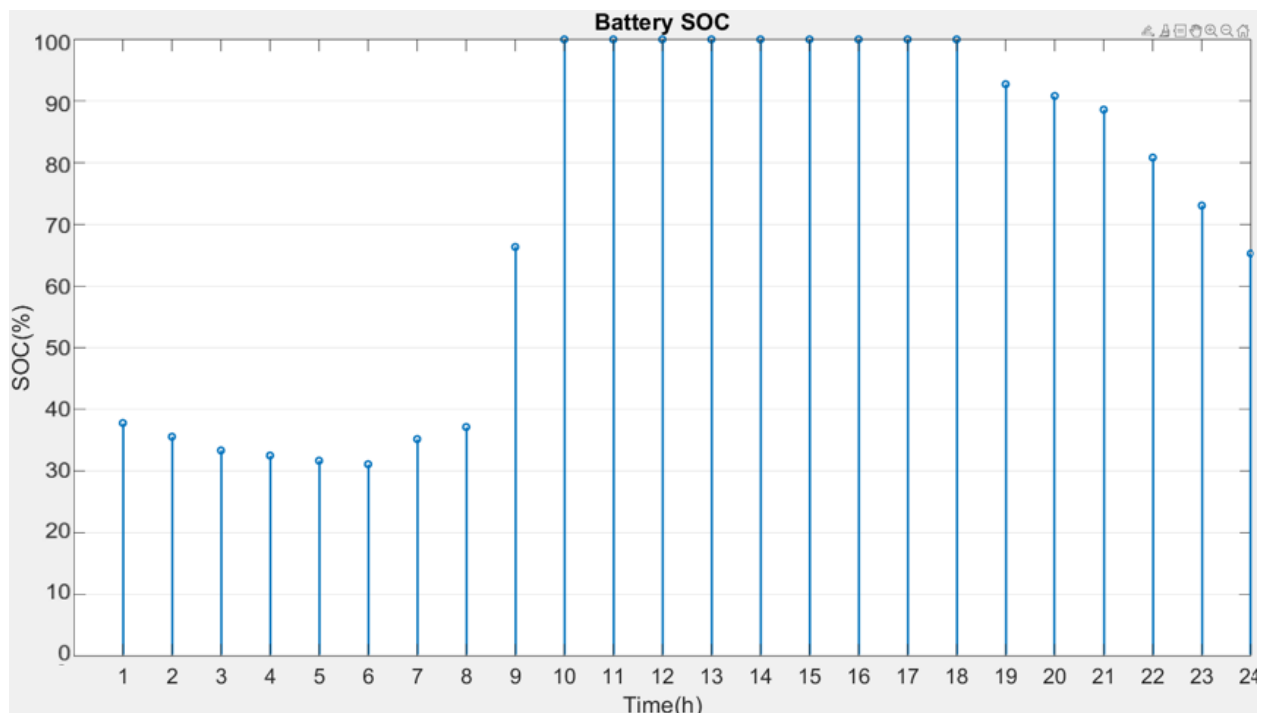
Η επιλογή του χρήστη σύμφωνα με τον Πίνακα 4.21, όπως είναι φυσικό, επιφέρει το μέγιστο συντελεστή χρονικής ικανοποίησης και τον ελάχιστο συντελεστή σταθερότητας δικτύου, λόγω

της εποχής. Ωστόσο η ποινή του PMV είναι ίση με 0.18 και το συνολικό του κέρδος ίσο με 1.81 €. Συγκεκριμένα, με την παρουσία φωτοβολταϊκού συστήματος χωρίς συστοιχία μπαταριών παρουσιάζεται κέρδος ίσο με 1.60 €, που επιφέρει μείωση κόστους κατά 162.5 %, ενώ με την παρουσία και της συστοιχίας μπαταριών, το κέρδος είναι ίσο με 1.81 ευρώ με μείωση κόστους κατά 170.7 %.

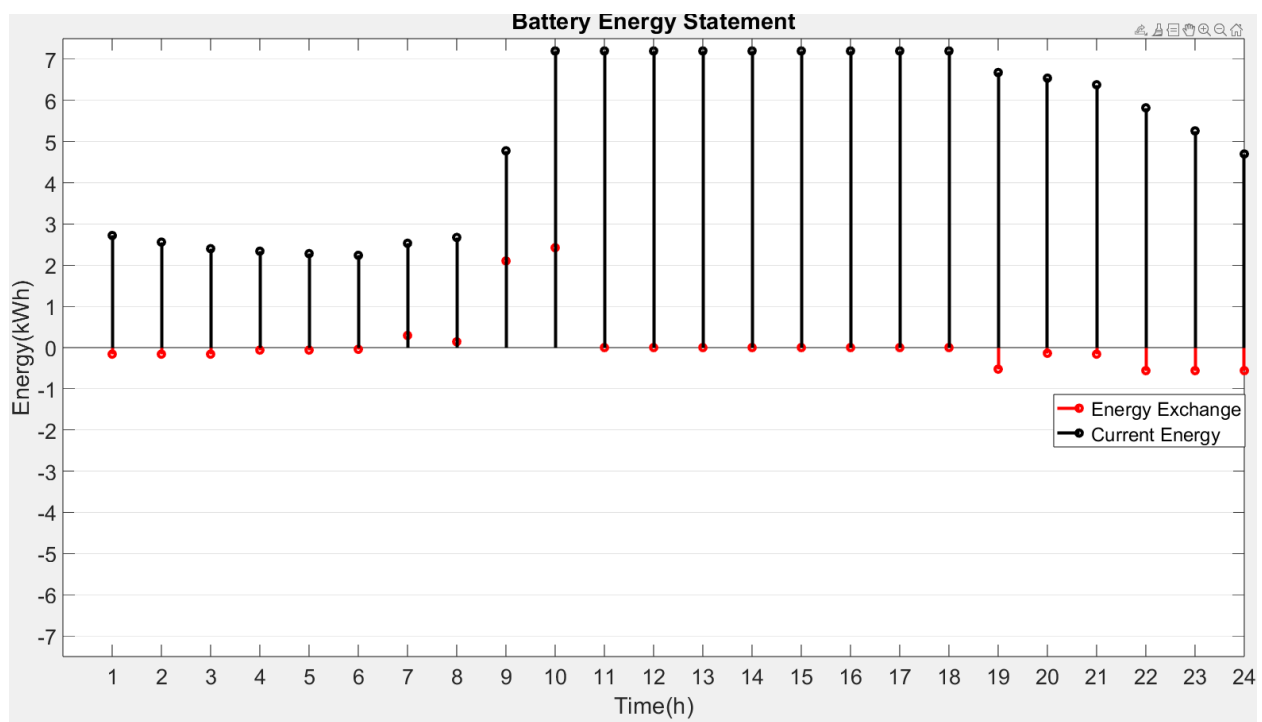


Σχήμα 4.30: Διάγραμμα ενέργειας κτηρίου σεναρίου 5 – χωρίς τη χρήση του συστήματος.

Στο Σχήμα 4.30 φαίνεται πως η επιλογή του χρήστη να μετακινήσει τα φορτία του προς το απόγευμα έχει θετικά αποτελέσματα στο οικονομικό όφελος του. Από τις 15:00 και έπειτα τα φορτία αυξάνονται, λόγω και της λειτουργίας του κλιματισμού, ωστόσο η παραγωγή τα καλύπτει.

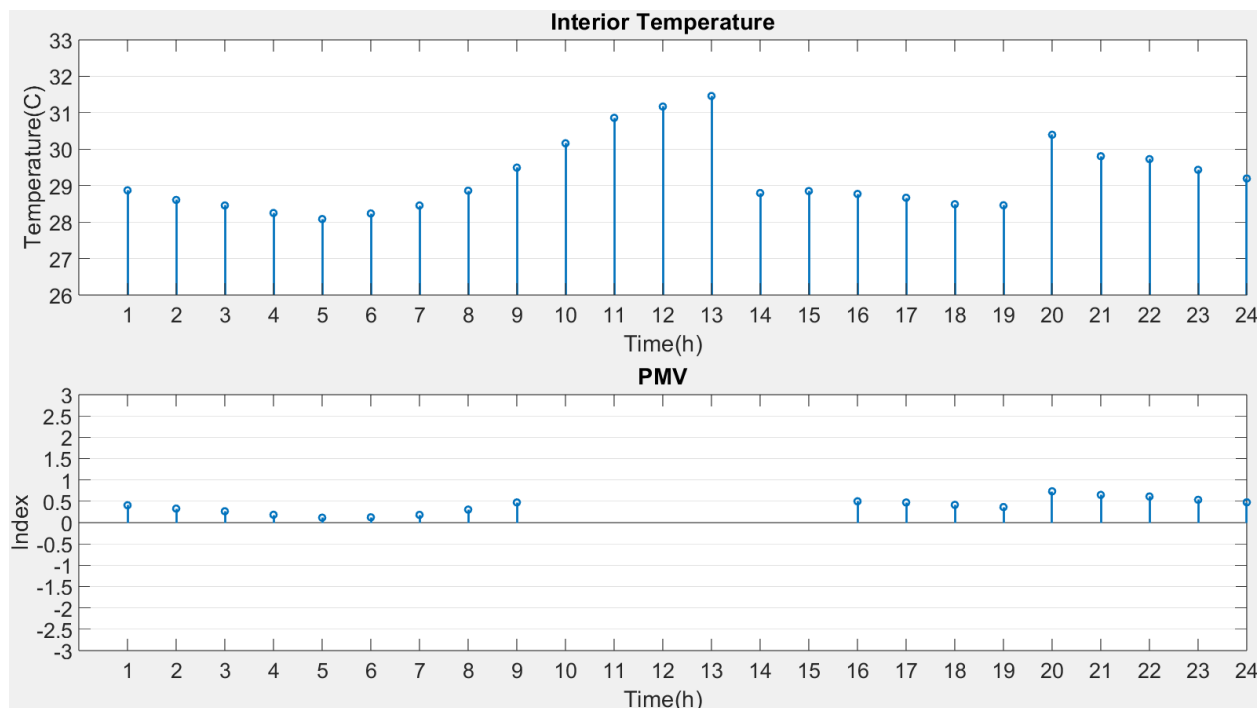


Σχήμα 4.31: Διάγραμμα SOC μπαταρίας σεναρίου 5 – χωρίς τη χρήση του συστήματος.



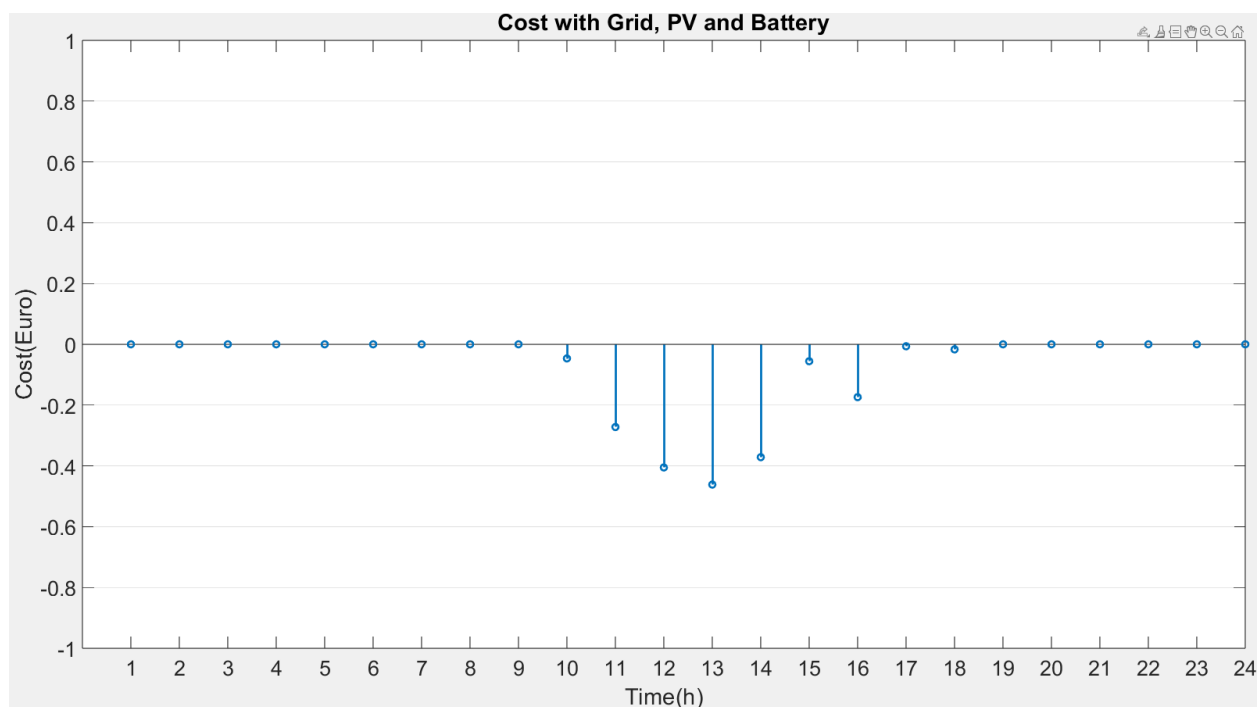
Σχήμα 4.32: Διάγραμμα ενέργειας μπαταρίας σεναρίου 5 – χωρίς τη χρήση του συστήματος.

Όπως στα παραπάνω διαγράμματα, έτσι και στα παρόντα των Σχημάτων 4.31 και 4.32 η συστοιχία μπαταριών διατηρεί τη μέγιστη κατάσταση φόρτισής της για μεγάλα χρονικά διαστήματα και τελικά, καταλήγει να διαθέτει μεγαλύτερο ποσοστό στο τέλος του εικοσιτετραώρου σε σχέση με την αρχή του.



Σχήμα 4.33: Διάγραμμα θερμοκρασίας και PMV Σεναρίου 5 – χωρίς χρήση του συστήματος.

Στο Σχήμα 4.33 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επιλογής του χρήστη στην εσωτερική θερμοκρασία. Σε ό,τι αφορά τη θερμική του άνεση, φαίνεται πως η απενεργοποίηση του κλιματισμού στις 19:00 επιφέρει αύξηση της θερμοκρασίας και του PMV, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που επικρατεί στη συγκεκριμένη ημερομηνία. Το PMV ξεπερνά το 0.5 στο διάστημα 19:00-21:00, ωστόσο στη συνέχεια μειώνεται.



Σχήμα 4.34: Διάγραμμα ωριαίου κόστους κτηρίου σεναρίου 5 – χωρίς χρήση του συστήματος.

Στο Σχήμα 4.34 φαίνεται πως το κέρδος φτάνει τα 0.5 € σε μία ώρα και σε γενικές γραμμές παραμένει υψηλό.

Πίνακας 4.22: Χρονοπρογραμματισμός συσκευών σεναρίου 5 – με σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.				
Συσκευή	Πλυντήριο ρούχων	Ηλ. σκούπα	πλυντήριο Πιάτων	Ψυγείο
Ώρα ενεργοποίησης	7:00	0:00	17:00	0:00
Συσκευή	TV	PC	Ηλ. κουζίνα	Φωτισμός
Ώρα ενεργοποίησης	21:00	19:00	14:00	21:00
Συσκευή	Κλιματισμός		Θερμοσίφοντας	
Ώρα ενεργοποίησης	14:00 (Διάρκεια 6 ώρες)		20:00 (Διάρκεια 0 ώρες)	

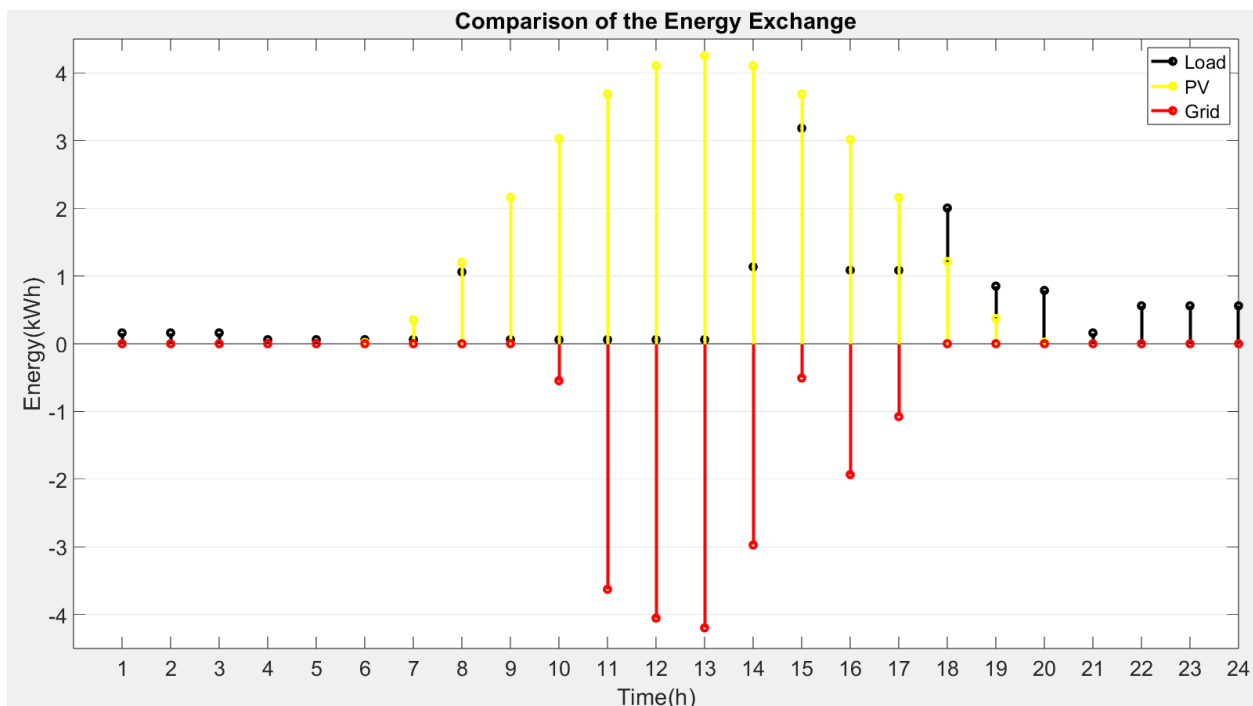
Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας στο παρόν σενάριο, σύμφωνα με τον Πίνακα 4.22, ακολουθεί τη λογική της εξοικονόμησης ενέργειας, ενεργοποιώντας τις προγραμματιζόμενες συσκευές σε ώρες που το ηλεκτρικό ρεύμα έχει τη χαμηλότερη τιμή του εύρους που του δίνεται. Σε ό,τι αφορά τον κλιματισμό, επιλέγει την ενεργοποίησή του στις 14:00, λίγο πριν την προσέλευση του χρήστη, όπως θα επέλεγε και ο ίδιος χωρίς τη χρήση αυτού. Ωστόσο, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας εντοπίζει την αυξημένη θερμοκρασία προς το απόγευμα και κρατά τον κλιματισμό ενεργοποιημένο για μία παραπάνω ώρα, με συνολική διάρκεια 6 ώρες.

**Πίνακας 4.23: Αποτελέσματα κριτηρίων σεναρίου 5 – με σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.**

Συντελεστής χρονικής ικανοποίησης	Συντελεστής σταθερότητας δικτύου	Ποινή PMV	Κόστος χωρίς PV (€)	Κόστος χωρίς μπαταρία (€)	Κόστος με PV/μπαταρία (€)
9.86	0	0.08	2.66	-1.43	-1.88

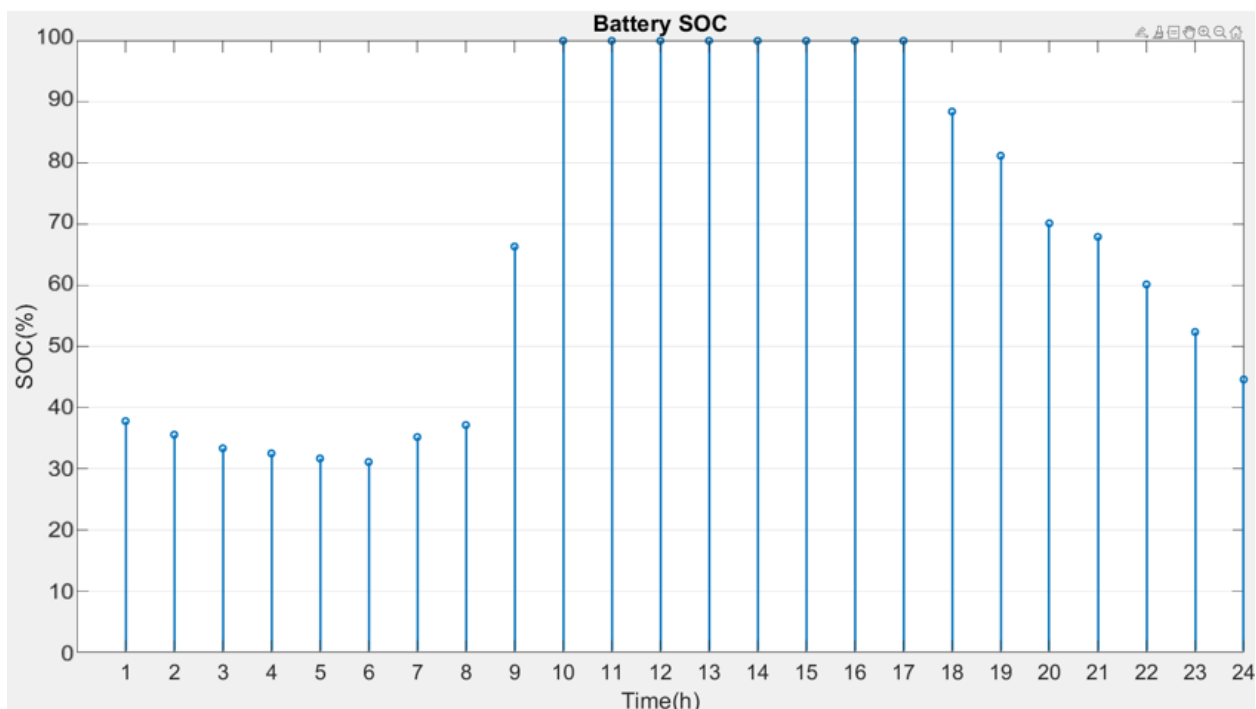
Τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.23 παρουσιάζουν τις τιμές των κριτηρίων στο εξισορροπημένο σενάριο. Τα κριτήρια (με εξαίρεση τον συντελεστή σταθερότητας δικτύου) δεν έχουν τις βέλτιστες τιμές τους, ωστόσο δεν παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση από αυτές. Ο συντελεστής χρονικής ικανοποίησης είναι ίσος με 9.86, με τη μέγιστη τιμή του να είναι ίση με 10. Ο συντελεστής σταθερότητας δικτύου είναι ο βέλτιστος λόγω της αυξημένης παραγωγής των φωτοβολταϊκών. Η ποινή του PMV λόγω υπέρβασης των ορίων του είναι ίση με 0.08, μία αποδεκτή τιμή, καθώς στην πλειονότητα των ωρών που ο χρήστης βρίσκεται στο κτήριο, η θερμική του άνεση είναι εντός αποδεκτών ορίων, με εξαίρεση ορισμένες μικρές αποκλίσεις που είναι αμελητέες. Τέλος, το κέρδος είναι αρκετά υψηλό, αν ληφθούν υπόψη τα παραπάνω, το οποίο είναι ίσο με 1.88 €. Φυσικά, η απουσία της συστοιχίας μπαταριών επιφέρει μεγάλη διαφορά στο κέρδος, καθώς βρίσκεται στα 1.43 €, ενώ αν απουσίαζαν τα φωτοβολταϊκά, το κόστος του θα ήταν ίσο με 2.66 €. Συνεπώς, με την παρουσία του φωτοβολταϊκού συστήματος χωρίς συστοιχία μπαταριών, το κόστος μειώνεται κατά 153.7 %, ενώ με την ταυτόχρονη παρουσία της συστοιχίας μπαταριών το κόστος μειώνεται κατά 170.7 %. Με τη χρήση του συστήματος διαχείρισης ενέργειας στο παρόν σενάριο, ο συντελεστής χρονικής ικανοποίησης παρουσιάζει μικρή μείωση κατά 1.4 % και το κόστος με φωτοβολταϊκό σύστημα και συστοιχία

μπαταριών αυξάνεται κατά 3.87 %, ωστόσο η ποινή λόγω υπέρβασης των ορίων του PMV παρουσιάζει μείωση κατά 55.5 %. Επομένως, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας προκειμένου να επιφέρει μια ισορροπία μειώνει την ποινή κατά ένα μεγάλο ποσοστό, ενώ κατά ένα μικρό ποσοστό αυξάνει το κόστος και μειώνει το συντελεστή χρονικής ικανοποίησης. Ο συντελεστής σταθερότητας δικτύου παραμένει μηδενικός.

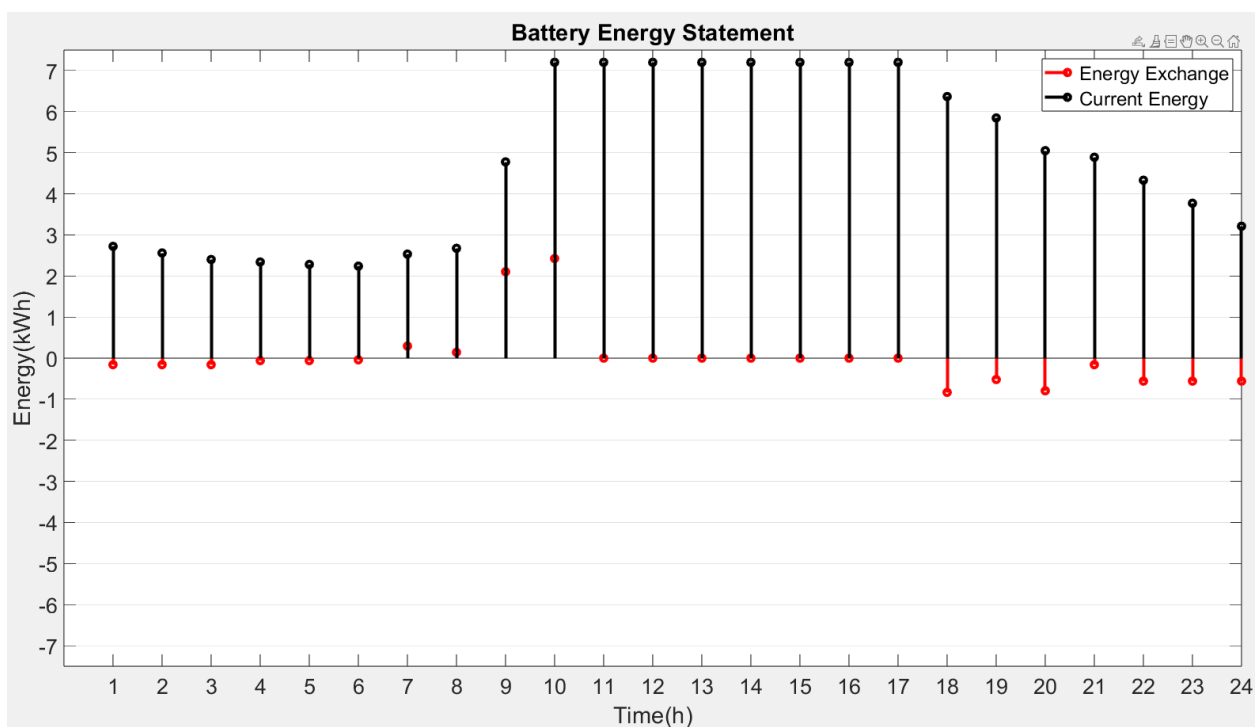


Σχήμα 4.35: Διάγραμμα ενέργειας κτηρίου σεναρίου 5 – με χρήση του συστήματος.

Η λογική του διαγράμματος του Σχήματος 4.35 δεν διαφέρει ριζικά από τα προηγούμενα σενάρια, καθώς το σύστημα διαχείρισης ενέργειας επιλέγει να δώσει ενέργεια στο ηλεκτρικό δίκτυο κατά τις ώρες που η τιμολόγηση είναι αυξημένη. Από τις 14:00 και έπειτα, τα φορτία φαίνονται να αυξάνονται, με αποκορύφωμα στο διάστημα 14:00-15:00, λόγω της ταυτόχρονης λειτουργίας κλιματισμού και ηλεκτρικής κουζίνας και στο διάστημα 17:00-18:00, λόγω της ταυτόχρονης λειτουργίας του κλιματισμού και του πλυντηρίου πιάτων. Ωστόσο, ακόμη και εάν τα φορτία ξεπερνούν τη παραγωγή ενέργειας στο τελευταίο διάστημα, η συστοιχία μπαταριών μπορεί να αντιμετωπίσει αυτό το έλλειμμα με ευκολία, καθώς εξακολουθεί να υποστηρίζει τα φορτία μετά τη δύση του ηλίου χωρίς αγορά ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο.



Σχήμα 4.36: Διάγραμμα SOC μπαταρίας σεναρίου 5 – με χρήση του συστήματος.

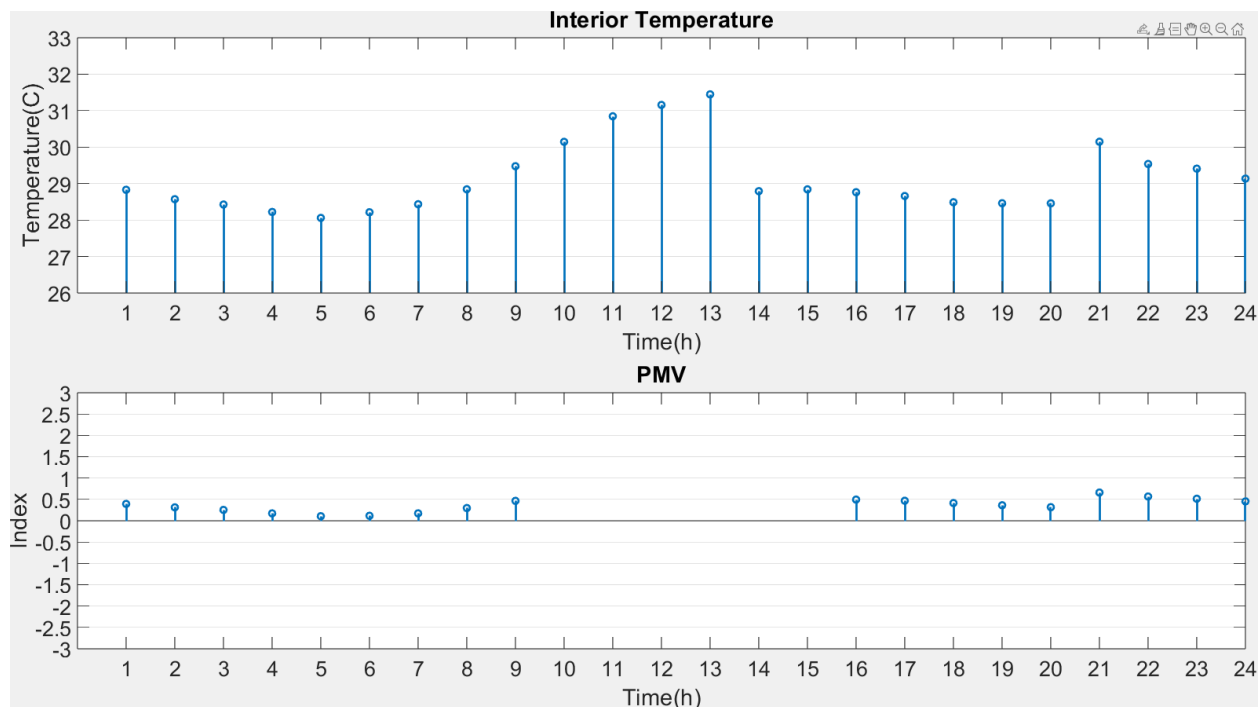


Σχήμα 4.37: Διάγραμμα ενέργειας μπαταρίας σεναρίου 5 – με χρήση του συστήματος.

Στα Σχήματα 4.36 και 4.37 φαίνεται πως η συστοιχία μπαταριών είναι σε θέση να υποστηρίξει τα φορτία τις πρώτες πρωινές ώρες και διατηρεί υψηλά επίπεδα μέχρι το διάστημα 16:00-17:00. Στο διάστημα 17:00-20:00 μειώνεται σταδιακά, καθώς συνεργάζεται με την απευθείας

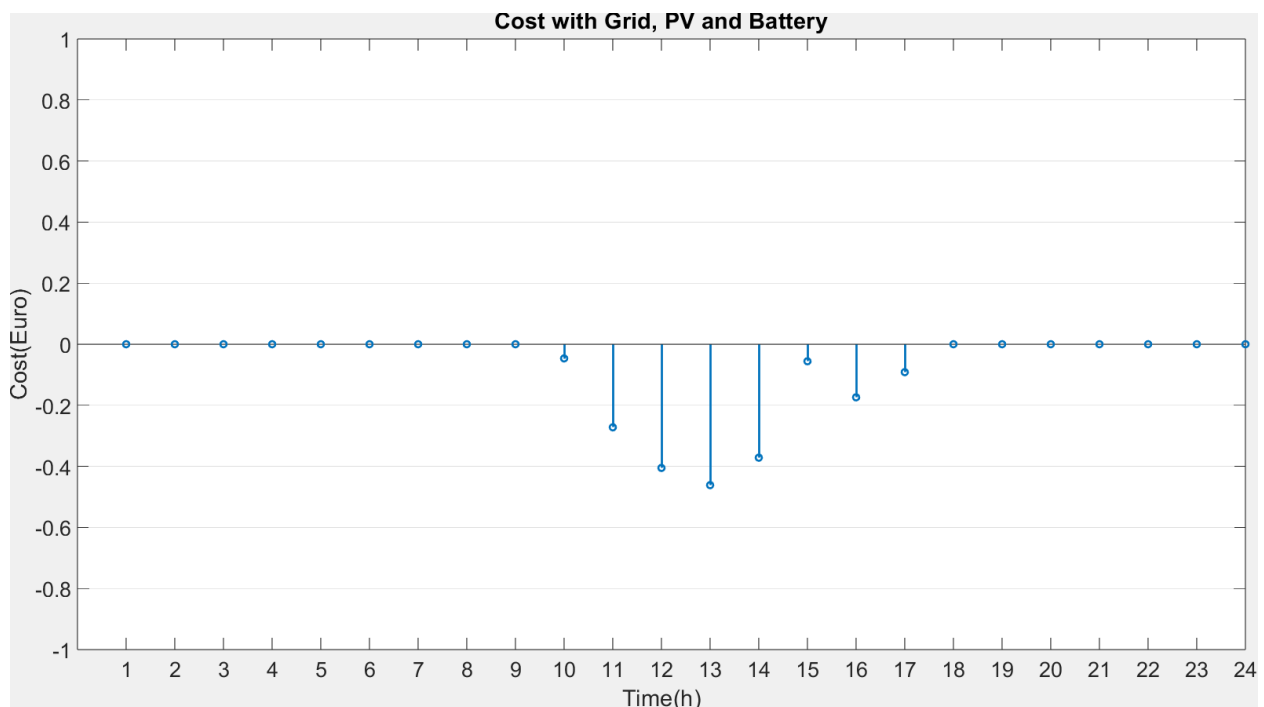


παραγωγή των φωτοβολταϊκών και καλύπτει τα φορτία. Από τις 20:00 και έπειτα συντηρεί εξ ολοκλήρου τα φορτία και καταλήγει στο αρχικό ποσοστό της, χωρίς να εξαντληθεί πλήρως.



Σχήμα 4.38: Διάγραμμα θερμοκρασίας και PMV σεναρίου 5 – με χρήση του συστήματος.

Στο Σχήμα 4.38 φαίνεται πως στο διάστημα 0:00 με 9:00 ο χρήστης βρίσκεται σε επιτρεπτά επίπεδα χωρίς τη χρήση του κλιματισμού. Το μεσημέρι οι θερμοκρασίες αυξάνονται έντονα, επομένως ο κλιματισμός λειτουργεί και διατηρεί το PMV κοντά στο 0.5 μέχρι και τις 20:00. Από εκείνο το χρονικό διάστημα και έπειτα, το PMV αυξάνεται, ωστόσο βρίσκεται σε ανεκτά επίπεδα.



Σχήμα 4.39: Διάγραμμα ωριαίων κόστους κτηρίου σεναρίου 5 – με χρήση του συστήματος.

Στο Σχήμα 4.39 φαίνεται πως το κέρδος είναι υψηλό και φτάνει τα 0.5 € σε μία ώρα. Κατά τη διάρκεια του μεσημεριού, λοιπόν, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας επωφελείται από την πώληση ενέργειας, ενώ στα υπόλοιπα διαστήματα δεν πραγματοποιείται αγοραπωλησία ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο.

### 4.3 Χειμερινοί μήνες

Επιλέγεται ενδεικτικά η 4<sup>η</sup> Ιανουαρίου, κατά την οποία η παραγωγή ενέργειας από το φωτοβολταϊκό σύστημα είναι μειωμένη, όχι όμως μηδενική. Όπως παρουσιάζεται παρακάτω, η παραγωγή των φωτοβολταϊκών το χειμώνα δεν επαρκεί για να κρατήσει το κτήριο αυτόνομο, εφόσον το μέγιστο που μπορεί να φτάσει είναι 1.83 kWh σε μία ώρα. Μάλιστα, η διάρκεια κατά την οποία υπάρχει ηλιοφάνεια είναι μειωμένη σε σχέση με το καλοκαίρι. Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.1, επικρατεί ευελιξία στις προγραμματιζόμενες συσκευές και σε αυτή τη περίπτωση. Ο χρήστης ακολουθεί παρόμοια λογική για τις συσκευές του και το χειμώνα. Σε ό,τι αφορά το φωτισμό, θεωρείται ότι ενεργοποιεί το σύνολο των φωτιστικών σωμάτων έπειτα από τη δύση του ηλίου, στις 18:00 με διάρκεια μέχρι τις 24:00. Κατά τους χειμερινούς μήνες θεωρείται ότι ο ηλιακός θερμοσίφωνας δεν επαρκεί για να καλύψει τις ανάγκες του κτηρίου για ζεστό νερό, επομένως δίνει εντολή στο σύστημα για λειτουργία του ηλεκτρικού για μία ώρα, γεγονός που αυξάνει σε μεγάλο βαθμό τα συνολικά φορτία, εφόσον ο ηλεκτρικός θερμοσίφωνας είναι η πιο ενεργοβόρα συσκευή του κτηρίου. Τέλος, η ώρα ενεργοποίησης του κλιματισμού κατευθύνεται

σε αυτή τη περίπτωση προς τις απογευματινές ώρες, κατά τις οποίες η θερμοκρασία μειώνεται έντονα και ο χρήστης βρίσκεται στην οικία του. Η αρχική κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας ορίζεται στην ελάχιστη τιμή της στο 20%, καθώς στο τέλος κάθε ημέρας, το σύστημα την εξαντλεί στο σύνολο των σεναρίων. Παρόμοια και σε αυτή τη περίπτωση, το κόστος που υπολογίζει το σύστημα διαχείρισης ενέργειας αποτελεί καθαρό κόστος και περιγράφεται από τη διαφορά των εσόδων από τα έξοδα αγοραπωλησίας ηλεκτρικής ενέργειας. Εάν τα έξοδα είναι περισσότερα από τα έσοδα, το κόστος είναι θετικό, ενώ αν τα έσοδα είναι περισσότερα, το κόστος είναι αρνητικό.

Date/Time	Dry Bulb Temperature [C]
01/04 @ 00:00:00	13.7
01/04 @ 01:00:00	13.8
01/04 @ 02:00:00	13.4
01/04 @ 03:00:00	13
01/04 @ 04:00:00	12.6
01/04 @ 05:00:00	12.2
01/04 @ 06:00:00	11.8
01/04 @ 07:00:00	11.4
01/04 @ 08:00:00	12.1
01/04 @ 09:00:00	12.7
01/04 @ 10:00:00	13.4
01/04 @ 11:00:00	14.1
01/04 @ 12:00:00	14.7
01/04 @ 13:00:00	15.4
01/04 @ 14:00:00	14.6
01/04 @ 15:00:00	13.8
01/04 @ 16:00:00	13
01/04 @ 17:00:00	12.8
01/04 @ 18:00:00	12.6
01/04 @ 19:00:00	12.4
01/04 @ 20:00:00	12.5
01/04 @ 21:00:00	12.5
01/04 @ 22:00:00	12.6
01/04 @ 23:00:00	12.2

Σχήμα 4.40: Εξωτερικές καταγεγραμμένες θερμοκρασίες για την ημέρα προσομοίωσης.

Στο Σχήμα 4.40 παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες που επικρατούν στο εξωτερικό του κτηρίου στις 4 Ιανουαρίου. Όπως γίνεται αντιληπτό, είναι μία μέση μέρα του χειμώνα με θερμοκρασίες που φτάνουν από 12 έως 15 °C. Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας, λοιπόν, θα κληθεί να αντιμετωπίσει τις χαμηλές αυτές θερμοκρασίες που επηρεάζουν και το εσωτερικό του κτηρίου.

Στον Πίνακα 4.24 παρουσιάζονται οι προτιμήσεις του χρήστη σε ό,τι αφορά την λειτουργία των συσκευών κατά τους χειμερινούς μήνες. Οι συσκευές με αστερίσκο (\*) υποδηλώνουν ότι είναι

μη-προγραμματιζόμενες, επομένως το σύστημα διαχείρισης ενέργειας δεν δύναται να επιλέξει την ώρα ενεργοποίησής τους.

<b>Πίνακας 4.24: Κατάλογος των οικιακών συσκευών – χειμερινή λειτουργία.</b>			
Συσκευή	Προτιμώμενη ώρα ενεργοποίησης	Κατανάλωση/ώρα (kWh)	Διάρκεια λειτουργίας (h)
Πλυντήριο ρούχων	7:00-23:00	1	1
Αυτόματη ηλεκτρική σκούπα (φόρτιση)	0:00-19:00	0.1	3
Πλυντήριο πιάτων	16:00-23:00	1	1
Ψυγείο*	0:00-0:00	0.06	24
Τηλεόραση*	21:00-21:00	0.1	3
Υπολογιστής*	19:00-19:00	0.1	2
Ηλεκτρική κουζίνα*	14:00-14:00	2.1	1
Φωτισμός*	21:00-21:00	0.4	3
Ηλεκτρικός θερμοσίφωνας	19:00-21:00	Μη-σταθερή	1
Κλιματισμός	18:00-21:00	Μη-σταθερή	Μη-σταθερή

### 4.3.1 Σενάριο 6: Βαρύτητα εξ ολοκλήρου στη διατήρηση του PMV μεταξύ των επιτρεπτών ορίων

Στο Σενάριο 6 που πραγματοποιείται κατά τους χειμερινούς μήνες, δίνεται στο σύστημα η απόλυτη προτεραιότητα στο κριτήριο PMV penalty, δηλαδή δίνεται η εντολή να διατηρήσει το PMV του χρήστη στα επιτρεπτά όρια με κάθε κόστος, για όσο βρίσκεται μέσα στο κτήριο.

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται για ένα εικοσιτετράωρο, στο διάστημα 0:00 έως 24:00 μίας ημέρας. Στα αποτελέσματα που ακολουθούν, λαμβάνονται δείγματα στο τέλος κάθε ώρας, δηλαδή τιμές από 1 έως 24.

Πίνακας 4.25: Παράμετροι εισόδου για το σενάριο 6.			
Βαρύτητα συντελεστή χρονικής ικανοποίησης	Βαρύτητα ποινής PMV	Βαρύτητα συντελεστή σταθερότητας δικτύου	Βαρύτητα κόστους ενέργειας
0	1	0	0
Ενδυματολογική μόνωση	Επίπεδο δραστηριότητας	Λειτουργία κτηρίου	Λειτουργία φωτισμού
1.9 (0:00-7:00) 0.9 (7:00-24:00)	1 (0:00-7:00) 1.2 (7:00-24:00)	0:00-9:00 & 15:00-24:00	18:00-24:00
Ανώτατο επίπεδο θερμοκρασίας HVAC	Κατώτατο επίπεδο θερμοκρασίας HVAC	Θερμοκρασία εισερχόμενου κρύου νερού	Θερμοκρασία θερμοσίφωνα
28.5 °C	21 °C	15 °C	40 °C

Εάν ο χρήστης επιλέξει τις ώρες ενεργοποίησης των συσκευών σύμφωνα με τη δική του κρίση, προκύπτει ο χρονοπρογραμματισμός του Πίνακα 4.26 και του Πίνακα 4.27.

<b>Πίνακας 4.26: Χρονοπρογραμματισμός συσκευών σεναρίου 6 – χωρίς σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.</b>				
Συσκευή	Πλυντήριο ρούχων	Ηλ. σκούπα	Πλυντήριο πιάτων	Ψυγείο
Ωρα ενεργοποίησης	7:00	0:00	16:00	0:00
Συσκευή	TV	PC	Ηλ. κουζίνα	Φωτισμός
Ωρα ενεργοποίησης	21:00	19:00	14:00	18:00
Συσκευή	Κλιματισμός		Θερμοσίφωνας	
Ωρα ενεργοποίησης	17:00 (Διάρκεια 6 ώρες)		19:00 (Διάρκεια 1 ώρα)	

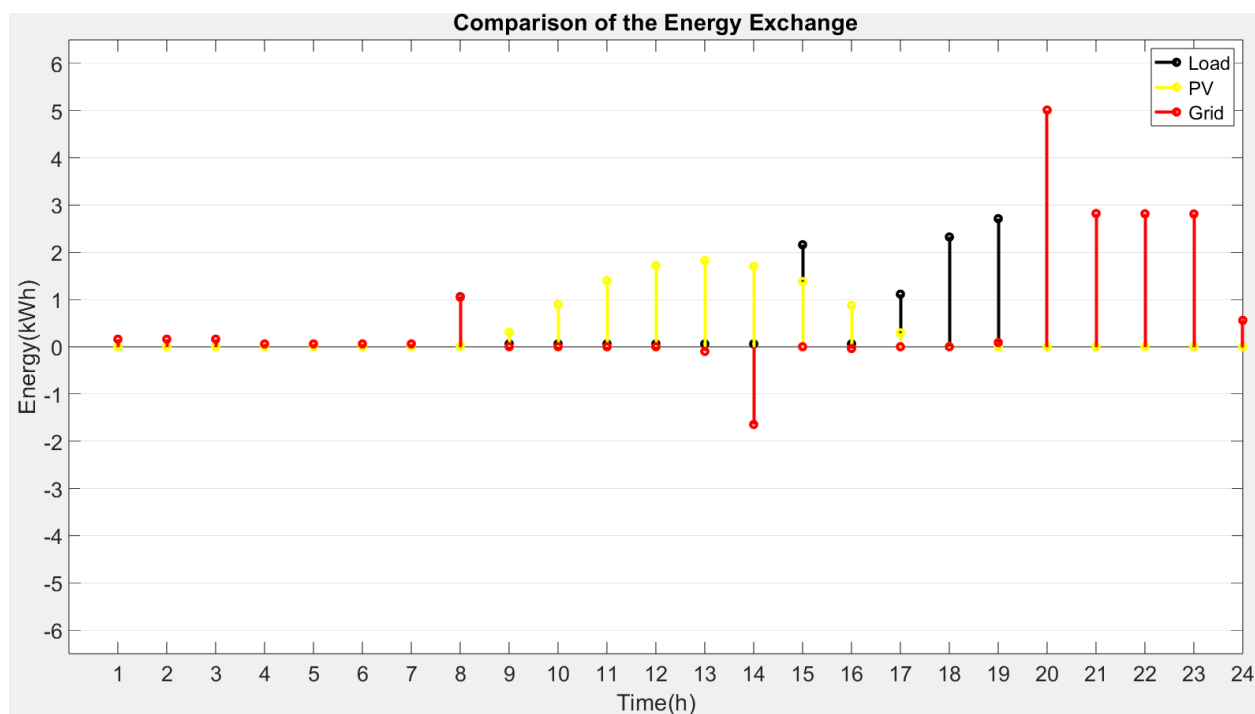
Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.26 , ο χρήστης ενεργοποιεί τις συσκευές στην αρχική τιμή του εύρους του, όπως στις προηγούμενες προσομοιώσεις και έχοντας ως στόχο του την θερμική του άνεση, ενεργοποιεί τον κλιματισμό στις 17:00 με διάρκεια 6 ώρες. Επίσης, ενεργοποιεί τον ηλεκτρικό θερμοσίφωνα στις 19:00 με τη σταθερή διάρκεια της μίας ώρας.

**Πίνακας 4.27: Αποτελέσματα κριτηρίων σεναρίου 6 – χωρίς σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.**

Συντελεστής χρονικής ικανοποίησης	Συντελεστής σταθερότητας δικτύου	Ποινή PMV	Κόστος χωρίς PV (€)	Κόστος χωρίς μπαταρία (€)	Κόστος με PV/μπαταρία (€)
10	1.50	1.02	4.47	3.39	2.74

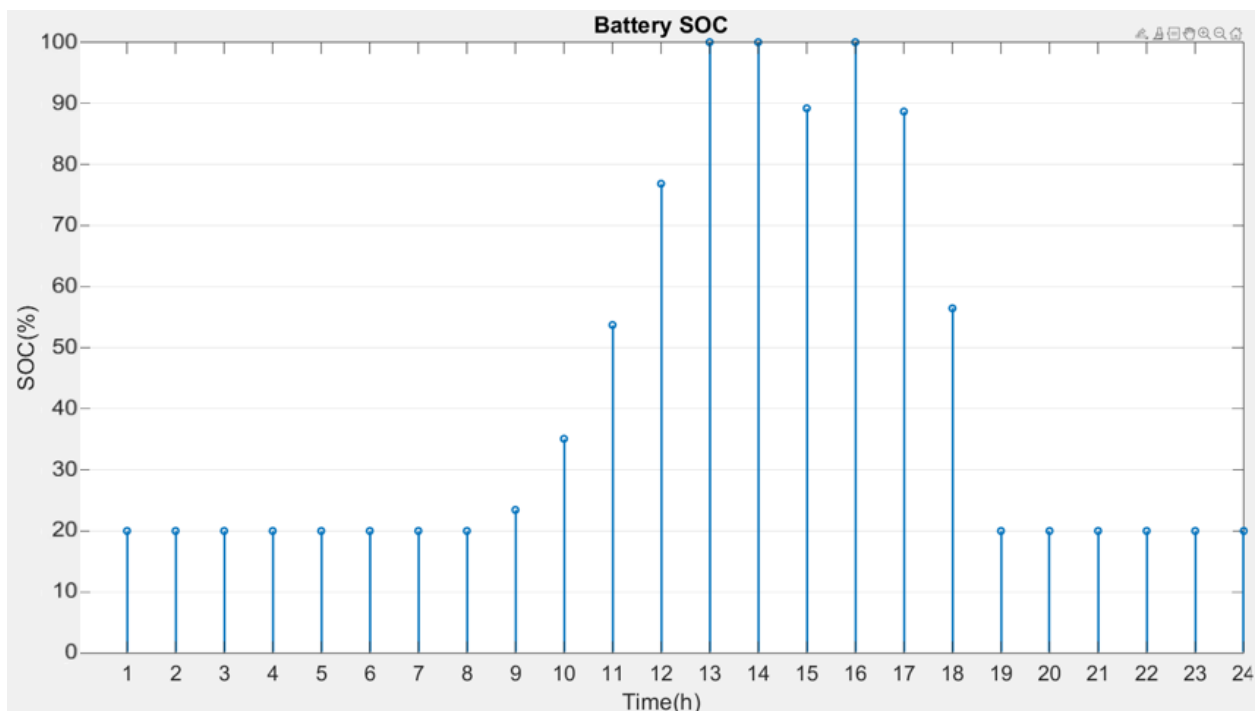
Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα του Πίνακα 4.27, οι μειωμένες θερμοκρασίες της εποχής, που επηρεάζουν το εσωτερικό του κτηρίου, επιφέρουν πρόβλημα στη θερμική άνεση του χρήστη και το συγκεκριμένο πρόγραμμα λειτουργίας του κλιματισμού δεν επαρκεί για την τήρηση του αποδεκτού εύρους, επιφέροντας ποινή στο PMV ίση με 1.02. Ο χρήστης χρεώνεται στο λογαριασμό του εκείνο το εικοσιτετράωρο 2.74 €. Αν απουσίαζε η συστοιχία μπαταριών, τότε το κόστος θα αυξανόταν και θα ήταν ίσο με 3.39 €. Υπό τη πλήρη απουσία των φωτοβολταϊκών, ο λογαριασμός φτάνει στα 4.47 €. Συνεπώς, η παρουσία των φωτοβολταϊκών χωρίς συστοιχία μπαταριών επιφέρει μείωση στο κόστος κατά 24.18 % και με την ταυτόχρονη παρουσία της συστοιχίας μπαταριών το κόστος μειώνεται κατά 36.52 %. Τέλος, ο συντελεστής χρονικής ικανοποίησης είναι ο βέλτιστος, ωστόσο ο συντελεστής σταθερότητας δικτύου εμφανίζει αυξημένη τιμή, στο 1.50.



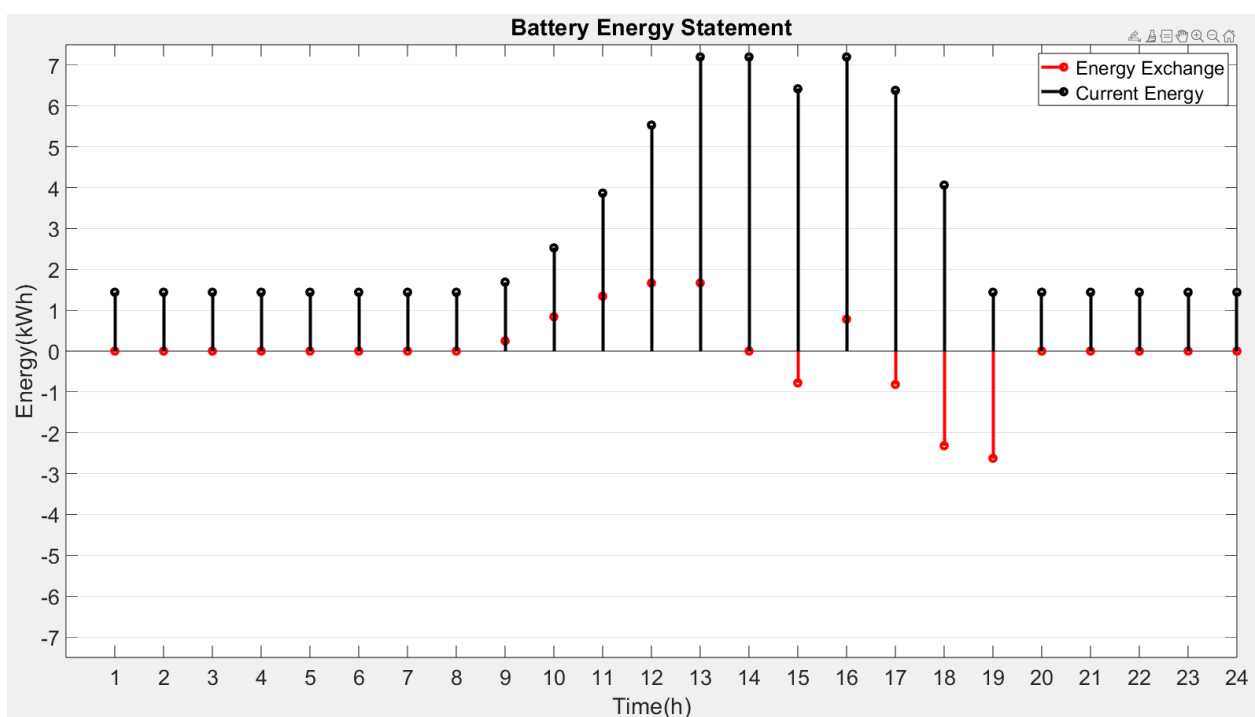


Σχήμα 4.41: Διάγραμμα ενέργειας κτηρίου σεναρίου 6 – χωρίς τη χρήση του συστήματος.

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.41 τα φορτία είναι ιδιαίτερα αυξημένα. Παρατηρείται ότι είναι μετατοπισμένα προς το απόγευμα, όπου από τις 20:00 και έπειτα είναι υψηλά και καλύπτονται πλήρως από το ηλεκτρικό δίκτυο. Το μεσημέρι η μικρή παραγωγή ενέργειας καλύπτει τα χαμηλά φορτία και φορτίζει τη συστοιχία μπαταριών, σε σημείο που καταφέρνει να δώσει ελάχιστη ενέργεια στο ηλεκτρικό δίκτυο στο διάστημα 13:00-14:00. Ωστόσο, από τις 15:00 και έπειτα τα φορτία ξεκινούν να αυξάνονται, τα οποία καλύπτονται αρχικά από τη συστοιχία μπαταριών, ωστόσο εξαντλείται σε σύντομο χρονικό διάστημα.



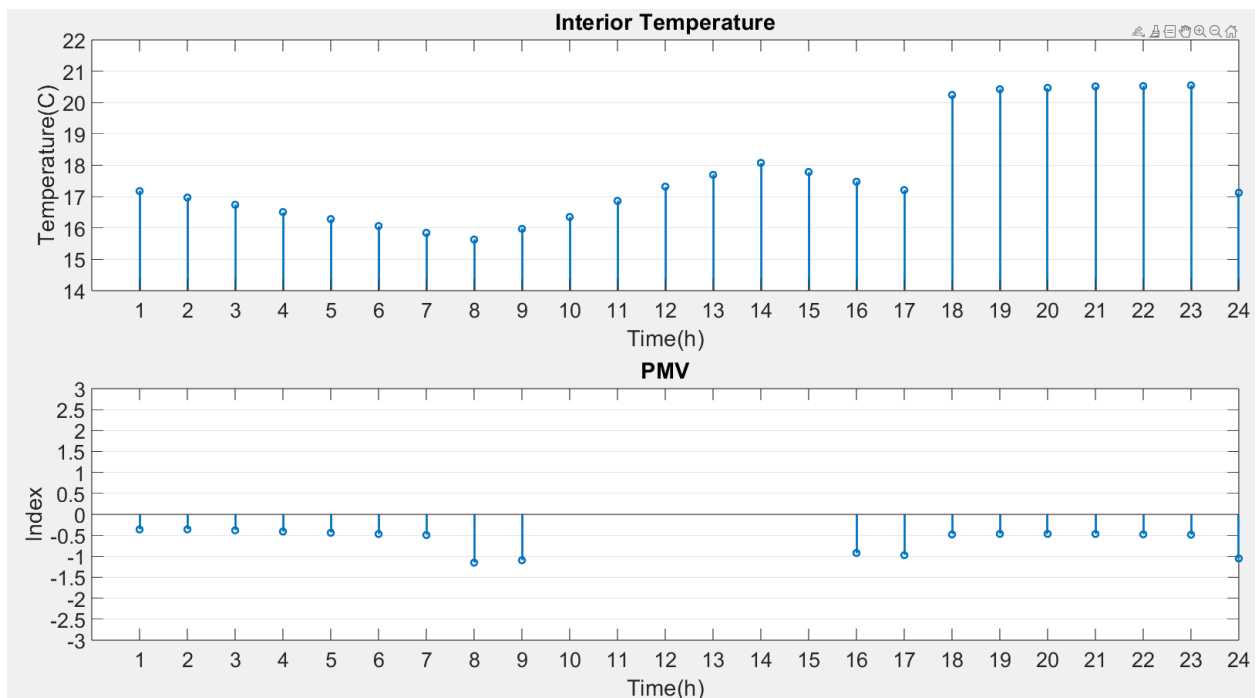
Σχήμα 4.42: Διάγραμμα SOC μπαταρίας σεναρίου 6 – χωρίς τη χρήση του συστήματος.



Σχήμα 4.43: Διάγραμμα ενέργειας μπαταρίας σεναρίου 6 – χωρίς τη χρήση του συστήματος.

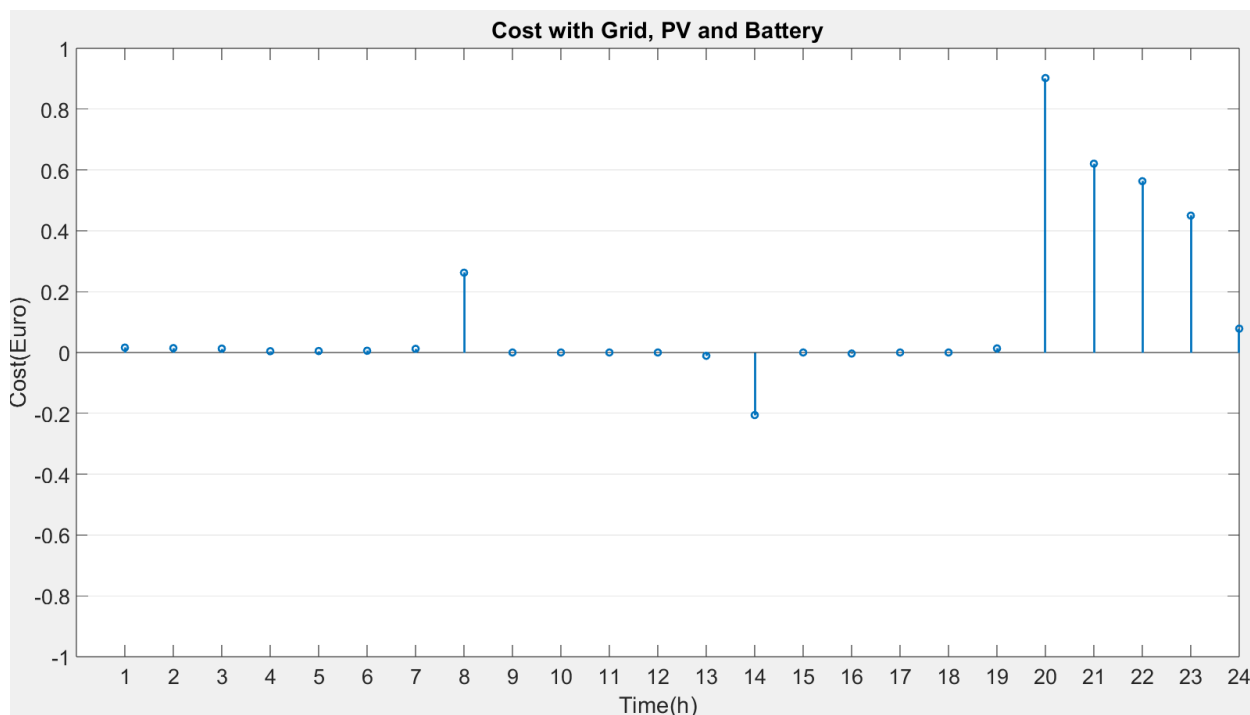
Στα Σχήματα 4.42 και 4.43 φαίνεται πως τα πλεονάσματα ενέργειας καταφέρνουν να φορτίσουν τη συστοιχία μπαταριών πλήρως έως τις 13:00. Παραμένει στο μέγιστο της φόρτισής της για μία ώρα καθώς η παραγωγή από το φωτοβολταϊκό σύστημα καλύπτει πλήρως τα φορτία. Ωστόσο

από τις 15:00 αυξάνονται, προκαλούνται ελλείμματα ενέργειας και τελικά την εξαντλούν πολύ σύντομα.



Σχήμα 4.44: Διάγραμμα θερμοκρασίας και PMV σεναρίου 6 – χωρίς χρήση του συστήματος.

Η χαμηλή θερμοκρασία το πρωί σε συνδυασμό με τη μείωση της ενδυματολογικής μόνωσης του χρήστη προκαλεί πτώση του PMV κάτω από -1. Το ίδιο συμβαίνει και στο διάστημα 15:00-17:00, καθώς ο χρήστης επιλέγει να ενεργοποιήσει τον κλιματισμό από τις 17:00 και έπειτα. Καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας του ο χρήστης βρίσκεται σε ιδανική θερμική άνεση, ωστόσο η απενεργοποίησή του στις 23:00 προκαλεί ποινή στο PMV, επομένως και στην αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης.



Σχήμα 4.45: Διάγραμμα ωριαίου κόστους κτηρίου σεναρίου 6 – χωρίς χρήση του συστήματος.

Στο Σχήμα 4.45 φαίνεται πως τις πρώτες πρωινές ώρες πραγματοποιείται ελάχιστη αγορά ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο μέχρι τις 8:00 που αυξάνεται ραγδαία. Τις επόμενες ώρες παραμένει μηδενική, σε σημείο που πραγματοποιείται και πώληση αυτής στις 14:00, ωστόσο προς τις βραδινές ώρες πραγματοποιείται αγορά, η οποία πλησιάζει το 1 € στις 20:00.

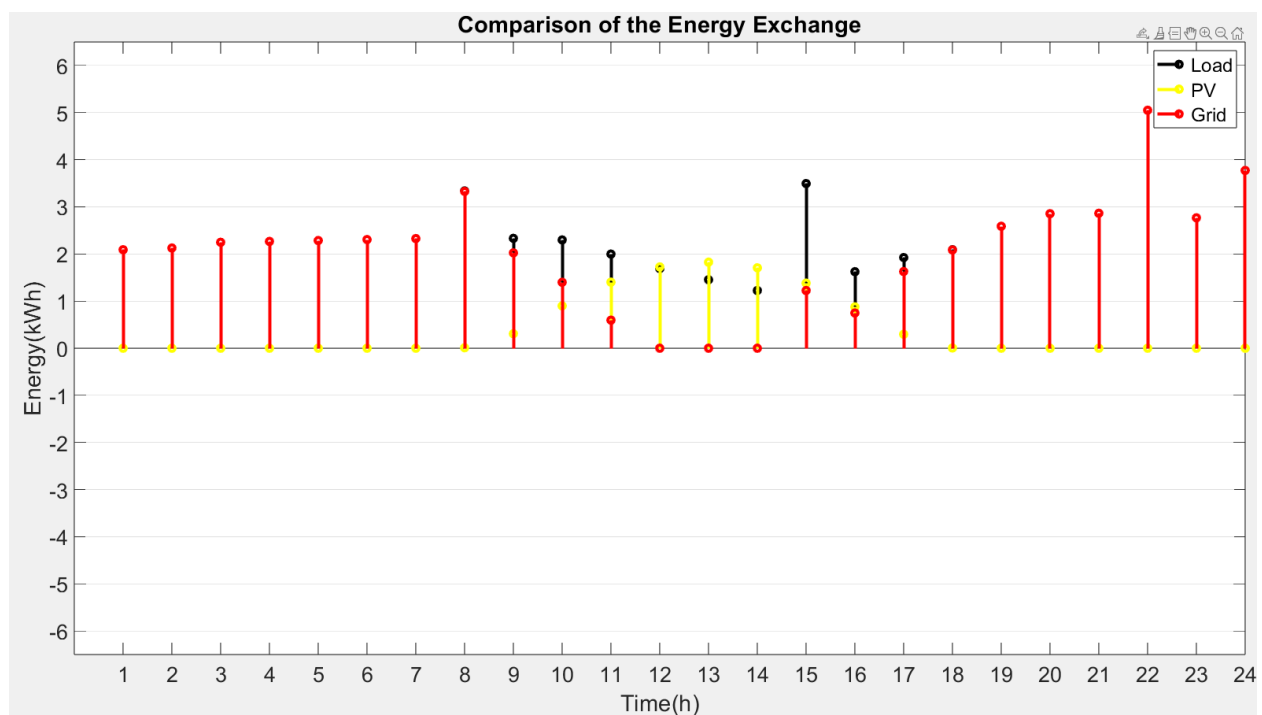
Με χρήση του συστήματος διαχείρισης ενέργειας προκύπτει ο χρονοπρογραμματισμός του Πίνακα 4.28.

<b>Πίνακας 4.28: Χρονοπρογραμματισμός συσκευών σεναρίου 6 – με σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.</b>				
Συσκευή	Πλυντήριο ρούχων	Ηλ. σκούπα	Πλυντήριο πιάτων	Ψυγείο
Ωρα ενεργοποίησης	7:00	19:00	23:00	0:00
Συσκευή	TV	PC	Ηλ. κουζίνα	Φωτισμός
Ωρα ενεργοποίησης	21:00	19:00	14:00	18:00
Συσκευή	Κλιματισμός		Θερμοσίφωνα	
Ωρα ενεργοποίησης	0:00 (Διάρκεια 24 ώρες)		21:00 (Διάρκεια 1 ώρα)	

Στον Πίνακα 4.28 φαίνεται πως το σύστημα έχει στόχο μόνο τη θερμική άνεση του χρήστη. Επομένως ενεργοποιεί με τυχαίο τρόπο τις συσκευές και κρατά τον κλιματισμό ενεργοποιημένο για ολόκληρο το εικοσιτετράωρο. Καθώς το σύστημα δεν δύναται να ενεργοποιήσει και να απενεργοποιήσει την ίδια συσκευή πολλές φορές μέσα στο εικοσιτετράωρο, ενεργοποιεί τον κλιματισμό από τις πρώτες πρωινές ώρες για να εξασφαλίσει μηδενική τιμή καθ' όλη τη διάρκεια. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται ότι ο κλιματισμός θα λειτουργεί ακόμα και τις ώρες στις οποίες ο χρήστης απουσιάζει.

<b>Πίνακας 4.29: Αποτελέσματα κριτηρίων σεναρίου 6 – με σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.</b>					
Συντελεστής χρονικής ικανοποίησης	Συντελεστής σταθερότητας δικτύου	Ποινή PMV	Κόστος χωρίς PV	Κόστος χωρίς μπαταρία	Κόστος με PV/μπαταρία
6.94	0.89	0	9.80	7.99	7.70

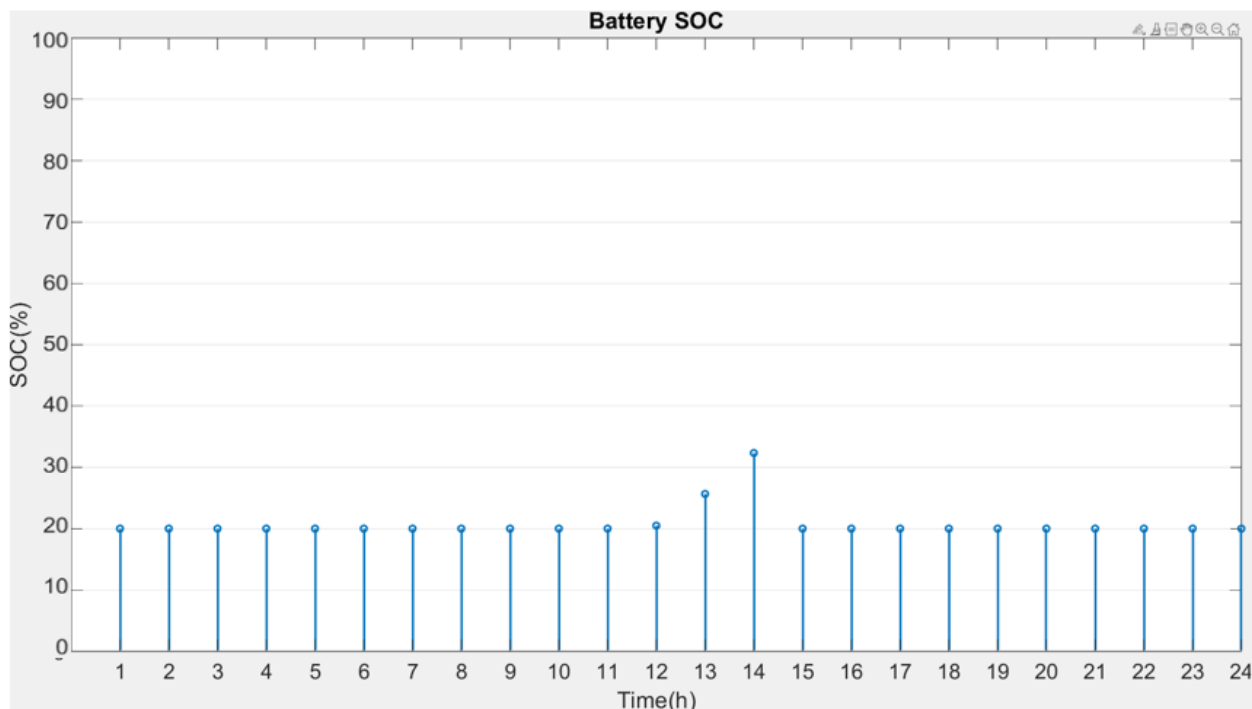
Όπως είναι αναμενόμενο, στον Πίνακα 4.29 φαίνεται πως το σύστημα διαχείρισης ενέργειας καταφέρνει να διατηρήσει το PMV εντός ορίων και να επιφέρει μηδενική ποινή, σε αντίθεση με την περίπτωση που απουσιάζει. Ωστόσο, οι τιμές για τα υπόλοιπα κριτήρια είναι οι χειρίστες που καταγράφονται στη παρούσα μελέτη. Η συνεχής λειτουργία του κλιματισμού επιφέρει κόστος ίσο με 7.70 €. Το κόστος χωρίς συστοιχία μπαταριών είναι ίσο με 7.99 €, ενώ υπό την πλήρη απουσία φωτοβολταϊκών, ο χρήστης χρεώνεται για εκείνο το εικοσιτετράωρο 9.80 €. Επομένως, με την παρουσία του φωτοβολταϊκού συστήματος χωρίς συστοιχία μπαταριών το κόστος μειώνεται κατά 18.47 % και με την ταυτόχρονη παρουσία της συστοιχίας μπαταριών το κόστος μειώνεται κατά 20.41 %. Ο συντελεστής χρονικής ικανοποίησης είναι ίσος με 6.94 και ο συντελεστής σταθερότητας δικτύου ίσος με 0.89. Συνεπώς, με την ύπαρξη του συστήματος διαχείρισης ενέργειας, η ποινή λόγω υπέρβασης των ορίων του PMV μειώνεται κατά 100 % πραγματοποιώντας το στόχο του. Ωστόσο, ο συντελεστής χρονικής ικανοποίησης μειώνεται κατά 30.6 %, ο συντελεστής σταθερότητας δικτύου μειώνεται κατά 40.7 % και το κόστος εμφανίζει την έντονη αύξηση της τιμής του 180.6 %. Είναι προφανές ότι η απόλυτη βαρύτητα στη θερμική άνεση του χρήστη επιβαρύνει σε μεγάλο βαθμό τα υπόλοιπα κριτήρια.



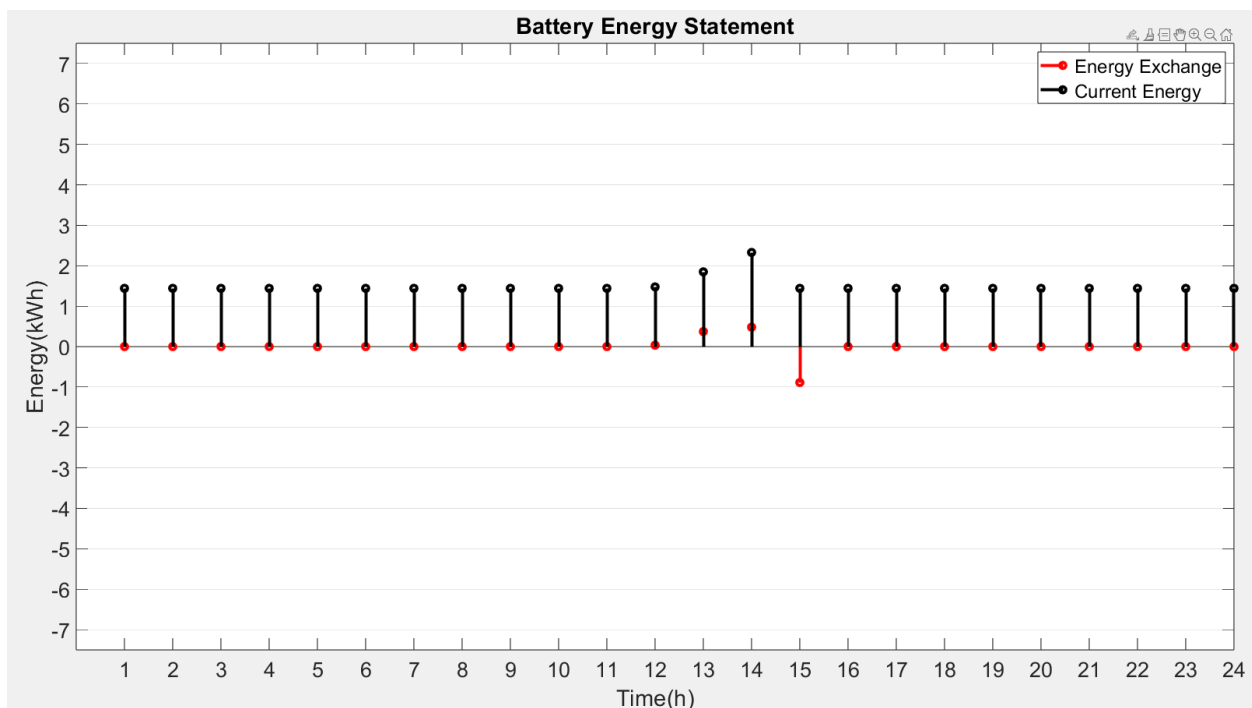
Σχήμα 4.46: Διάγραμμα ενέργειας κτηρίου σεναρίου 6 – με χρήση του συστήματος.

Στο Σχήμα 4.46 φαίνεται πως η πλειονότητα των φορτίων βρίσκεται πάνω από την παραγωγή ενέργειας και ξεπερνά ακόμη και τις 5 kWh, με εξαίρεση το μεσημέρι που το μικρό πλεόνασμα καταφέρνει να φορτίσει τη συστοιχία μπαταριών. Συνεπώς, το μεγαλύτερο μέρος του

διαγράμματος που αφορά τη κατανάλωση ενέργειας των φορτίων ταυτίζεται με την προμήθεια ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο.



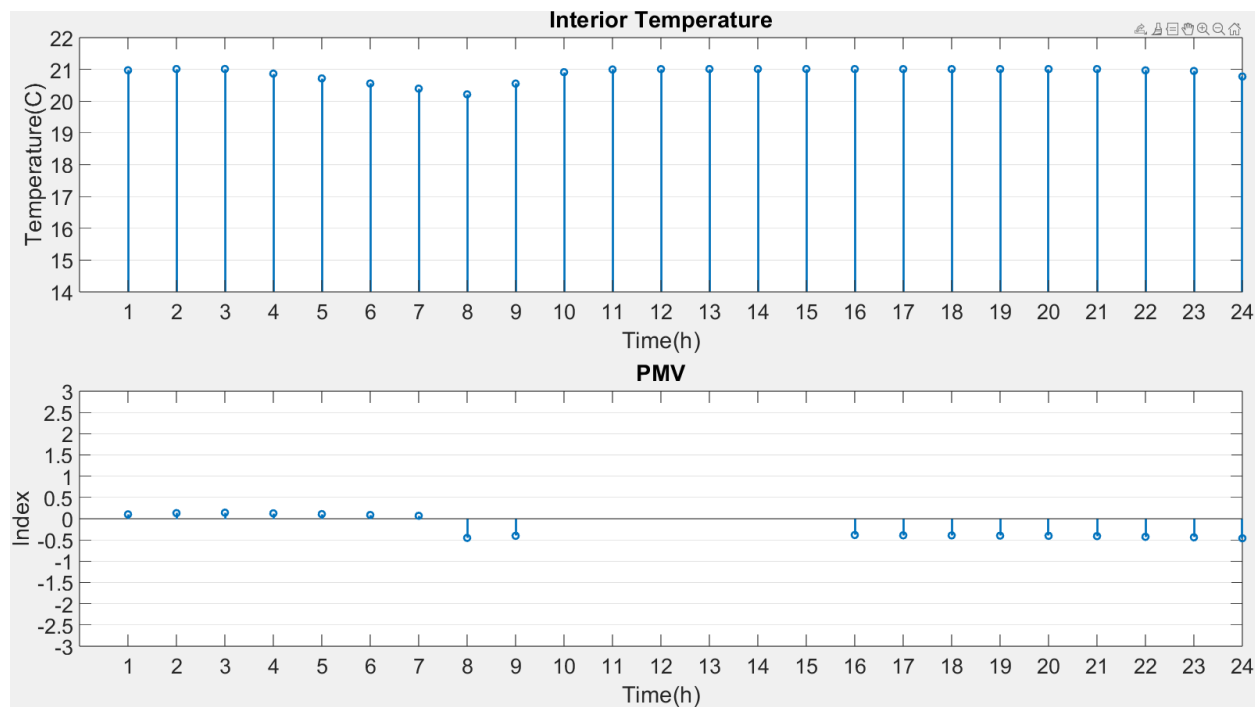
Σχήμα 4.47: Διάγραμμα SOC μπαταρίας σεναρίου 6 – με χρήση του συστήματος.



Σχήμα 4.48: Διάγραμμα ενέργειας μπαταρίας σεναρίου 6 – με χρήση του συστήματος.

Στα Σχήματα 4.47 και 4.48 φαίνεται πως η συστοιχία μπαταριών βρίσκεται στο ελάχιστο της κατάστασης φόρτισής της για το μεγαλύτερο μέρος του εικοσιτετραώρου. Τα μεγάλα φορτία δεν

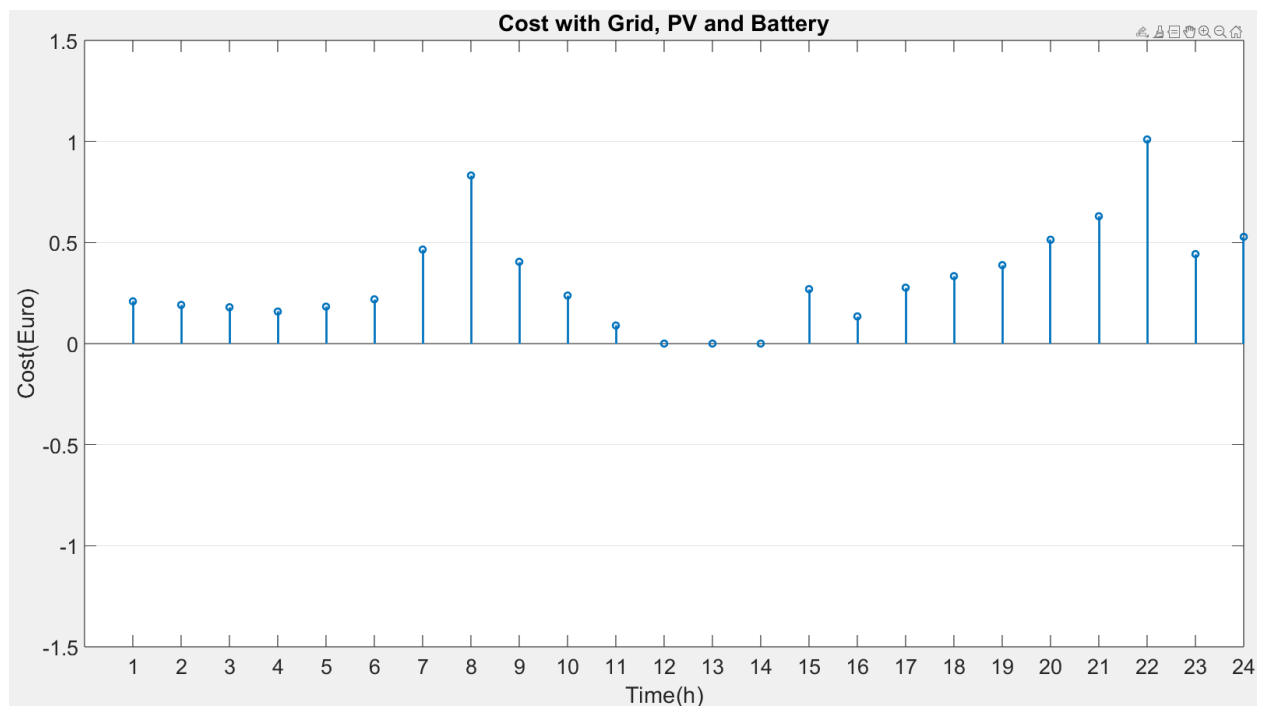
επιτρέπουν τη φόρτισή της με εξαίρεση στις 13:00 που η παραγωγή ενέργειας αυξάνεται. Ωστόσο, το μικρό απόθεμα που αποκτά χάνεται σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα.



Σχήμα 4.49: Διάγραμμα θερμοκρασίας και PMV σεναρίου 6 – με χρήση του συστήματος.

Η απόλυτη βαρύτητα στη θερμική άνεση του χρήστη κρατά τον κλιματισμό ενεργοποιημένο για 24 ώρες. Επομένως, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.49, η θερμοκρασία παραμένει σταθερή στο μεγαλύτερο μέρος του εικοσιτετραώρου και διατηρεί το PMV εντός ορίων, σε σημείο που καταλήγει να είναι θετικό, κατά τη διάρκεια του ύπνου των κατοίκων του κτηρίου.





Σχήμα 4.50: Διάγραμμα ωριαίου κόστους κτηρίου σεναρίου 6 – με χρήση του συστήματος.

Στο Σχήμα 4.50 παρουσιάζονται οι υψηλές τιμές αγοράς ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο που ξεπερνούν και το 1 € σε μία ώρα. Στο μεγαλύτερο μέρος του εικοσιτετραώρου, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας αγοράζει ενέργεια από το ηλεκτρικό δίκτυο, με εξαίρεση τις μεσημεριανές ώρες που καταφέρνει να είναι αυτόνομο.

#### 4.3.2 Σενάριο 7: Βαρύτητα εξ ολοκλήρου στην ελαχιστοποίηση του κόστους του χρήστη

Στο σενάριο 7 δίνεται στο σύστημα διαχείρισης ενέργειας η απόλυτη προτεραιότητα στο κριτήριο της ελαχιστοποίησης του κόστους. Όπως καταγράφεται και στο σενάριο 2, στο οποίο δίνεται η αντίστοιχη βαρύτητα στους θερινούς μήνες, αναμένεται το σύστημα διαχείρισης ενέργειας να κρατήσει απενεργοποιημένο τον κλιματισμό, αγνοώντας τη θερμική άνεση του χρήστη. Μοναδικό του μέλημα είναι να χρονοπρογραμματίσει τις συσκευές με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να επιφέρει το ελάχιστο δυνατό κόστος.

**Πίνακας 4.30: Παράμετροι εισόδου για το σενάριο 7.**

Βαρύτητα συντελεστή χρονικής ικανοποίησης	Βαρύτητα ποινής PMV	Βαρύτητα συντελεστή σταθερότητας δικτύου	Βαρύτητα κόστους ενέργειας
0	0	0	<b>1</b>
Ενδυματολογική μόνωση	Επίπεδο δραστηριότητας	Λειτουργία κτηρίου	Λειτουργία φωτισμού
1.9 (0:00-7:00) 0.9 (7:00-24:00)	1 (0:00-7:00) 1.2 (7:00-24:00)	0:00-9:00 & 15:00-24:00	18:00-24:00
Ανώτατο επίπεδο θερμοκρασίας HVAC	Κατώτατο επίπεδο θερμοκρασίας HVAC	Θερμοκρασία εισερχόμενου κρύου νερού	Θερμοκρασία θερμοσίφωνα
28.5 °C	21 °C	15 °C	40 °C

Εάν ο χρήστης επιλέξει το χρονοπρογραμματισμό των συσκευών σύμφωνα με τη δική του κρίση, προκύπτουν τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.31 και του Πίνακα 4.32.

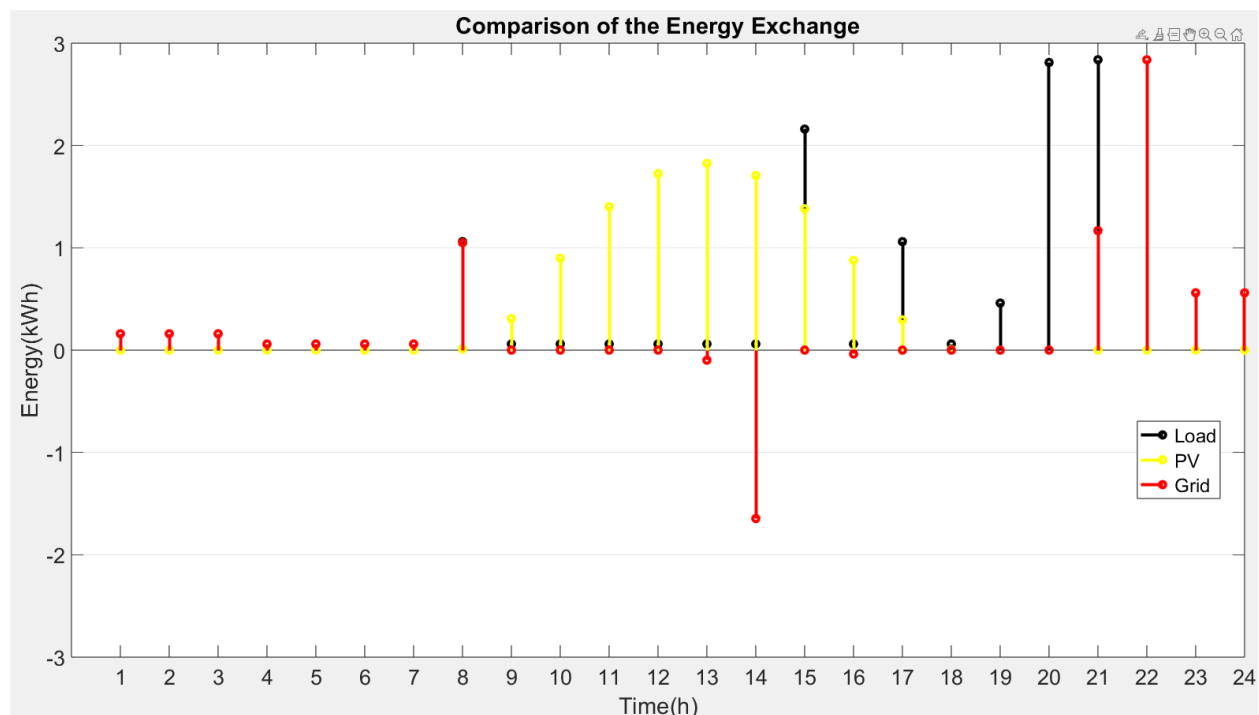
<b>Πίνακας 4.31: Χρονοπρογραμματισμός συσκευών σεναρίου 7 – χωρίς σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.</b>				
Συσκευή	Πλυντήριο ρούχων	Ηλ. σκούπα	Πλυντήριο πιάτων	Ψυγείο
Ωρα ενεργοποίησης	7:00	0:00	16:00	0:00
Συσκευή	TV	PC	Ηλ. κουζίνα	Φωτισμός
Ωρα ενεργοποίησης	21:00	19:00	14:00	18:00
Συσκευή	Κλιματισμός		Θερμοσίφωνα	
Ωρα ενεργοποίησης	20:00 (Διάρκεια 2 ώρες)		19:00 (Διάρκεια 1 ώρα)	

Όπως σε κάθε εγχείρημα του χρήστη να λειτουργήσει χωρίς σύστημα διαχείρισης ενέργειας, οι συσκευές ενεργοποιούνται τις ώρες τις οποίες έχει ορίσει ως αρχικές τιμές στο επιθυμητό περιθώριο. Έχοντας ως στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους, επιλέγει να ενεργοποιήσει τον κλιματισμό για δύο ώρες, κατά τις βραδινές ώρες που η θερμοκρασία είναι χαμηλή.

<b>Πίνακας 4.32: Αποτελέσματα κριτηρίων σεναρίου 7 – χωρίς σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.</b>					
Συντελεστής χρονικής ικανοποίησης	Συντελεστής σταθερότητας δικτύου	Ποινή PMV	Κόστος χωρίς PV (€)	Κόστος χωρίς μπαταρία (€)	Κόστος με PV/μπαταρία (€)
10	0.35	1.86	3.02	1.94	1.10

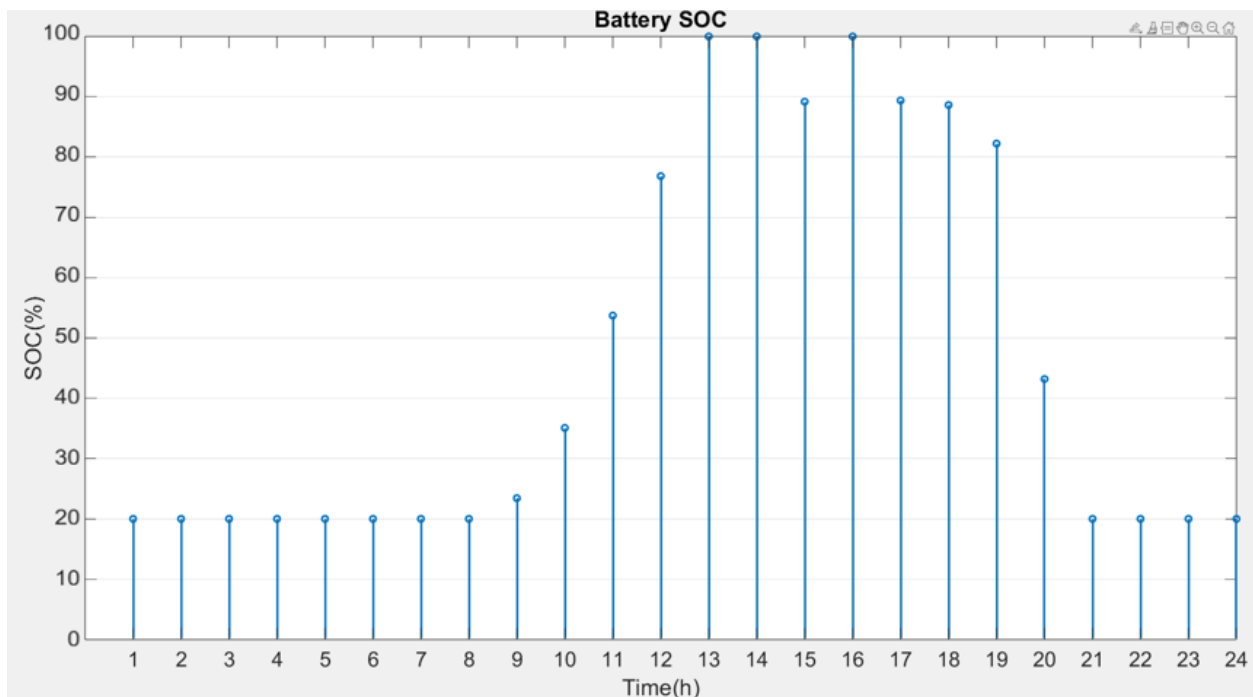
Η προσπάθεια του χρήστη φαίνεται να είναι αποδοτική καθώς επιφέρει ένα χαμηλό κόστος της τάξης του 1.10 €. Εάν απουσίαζε η συστοιχία μπαταριών, το κόστος θα ανερχόταν στα 1.94 €,

ενώ υπό την πλήρη απουσία φωτοβολταϊκών, το κόστος θα ήταν ίσο με 3.02 €. Συνεπώς, με την παρουσία φωτοβολταϊκού συστήματος χωρίς συστοιχία μπαταριών το κόστος μειώνεται κατά 35.76 % και με την παράλληλη παρουσία της συστοιχίας μπαταριών, το κόστος μειώνεται κατά 62.25 %. Η ποινή του PMV είναι αρκετά υψηλή λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών που επιφέρει η απουσία του κλιματισμού στο μεγαλύτερο μέρος του εικοσιτετραώρου, ωστόσο ο συντελεστής σταθερότητας δικτύου εμφανίζει χαμηλή τιμή, λόγω της αντίστοιχης χαμηλής αγοράς ενέργειας από το δίκτυο.

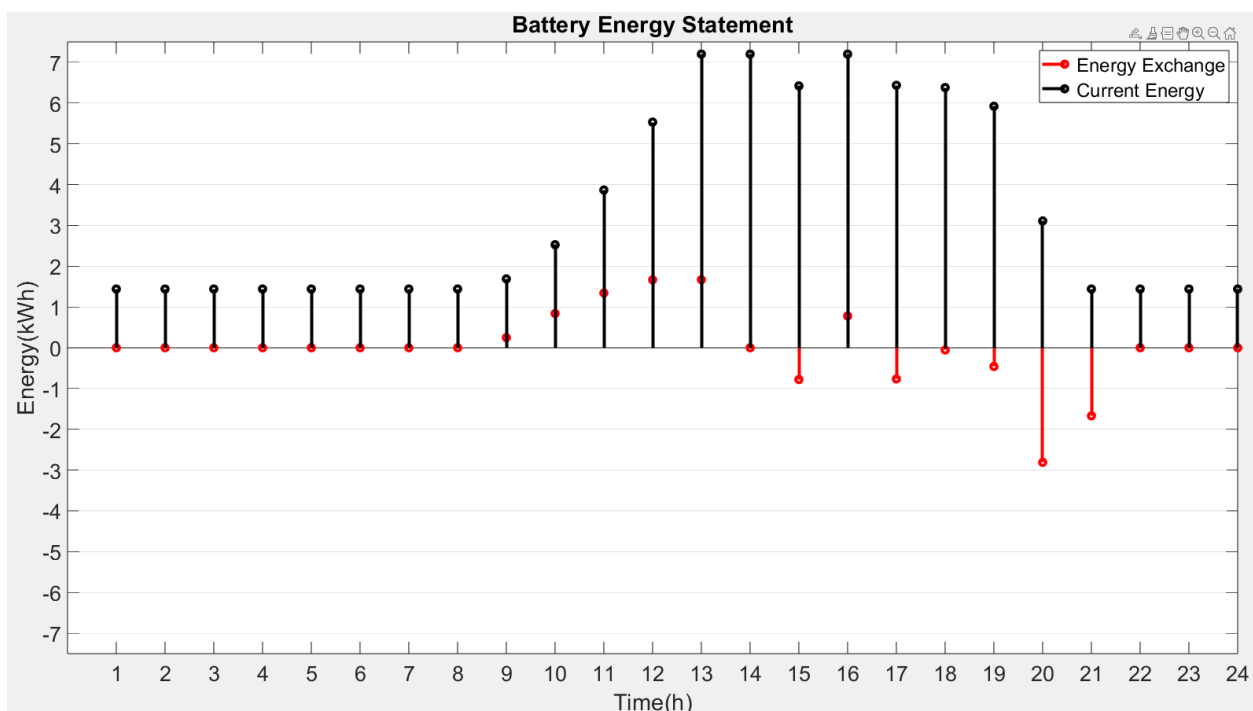


Σχήμα 4.51: Διάγραμμα ενέργειας κτηρίου σεναρίου 7 – χωρίς τη χρήση του συστήματος.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.51, μέχρι τις 8:00 κάθε φορτίο αγοράζεται απευθείας από το δίκτυο. Σε αυτό το χρονικό διάστημα τα φορτία είναι χαμηλά με εξαίρεση το διάστημα 7:00-8:00. Η επιλογή του χρήστη είναι ικανή να προσφέρει ενέργεια στο ηλεκτρικό δίκτυο, σε ώρα που η τιμολόγηση είναι αυξημένη. Η παραγωγή των φωτοβολταϊκών διατηρεί αυτονομία έως τις 21:00, ωστόσο στη συνέχεια αντλείται μεγάλο ποσό ενέργειας, λόγω του κλιματισμού.

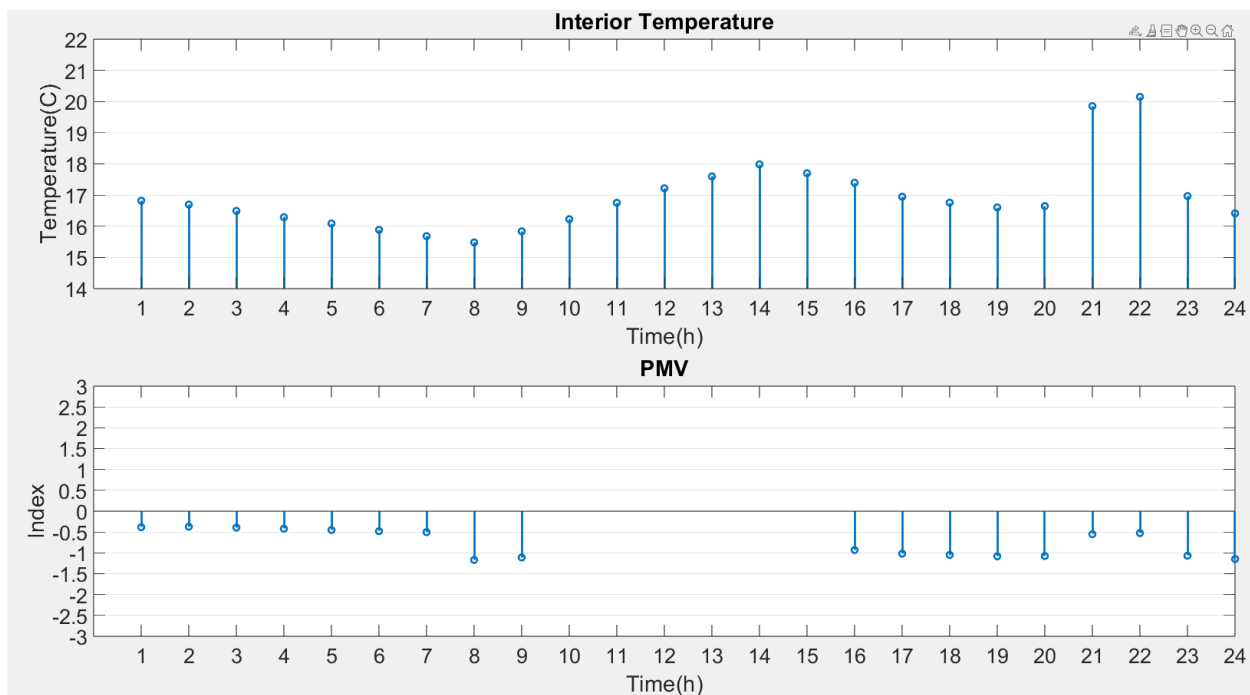


Σχήμα 4.52: Διάγραμμα ενέργειας μπαταρίας σεναρίου 7 – χωρίς τη χρήση του συστήματος.



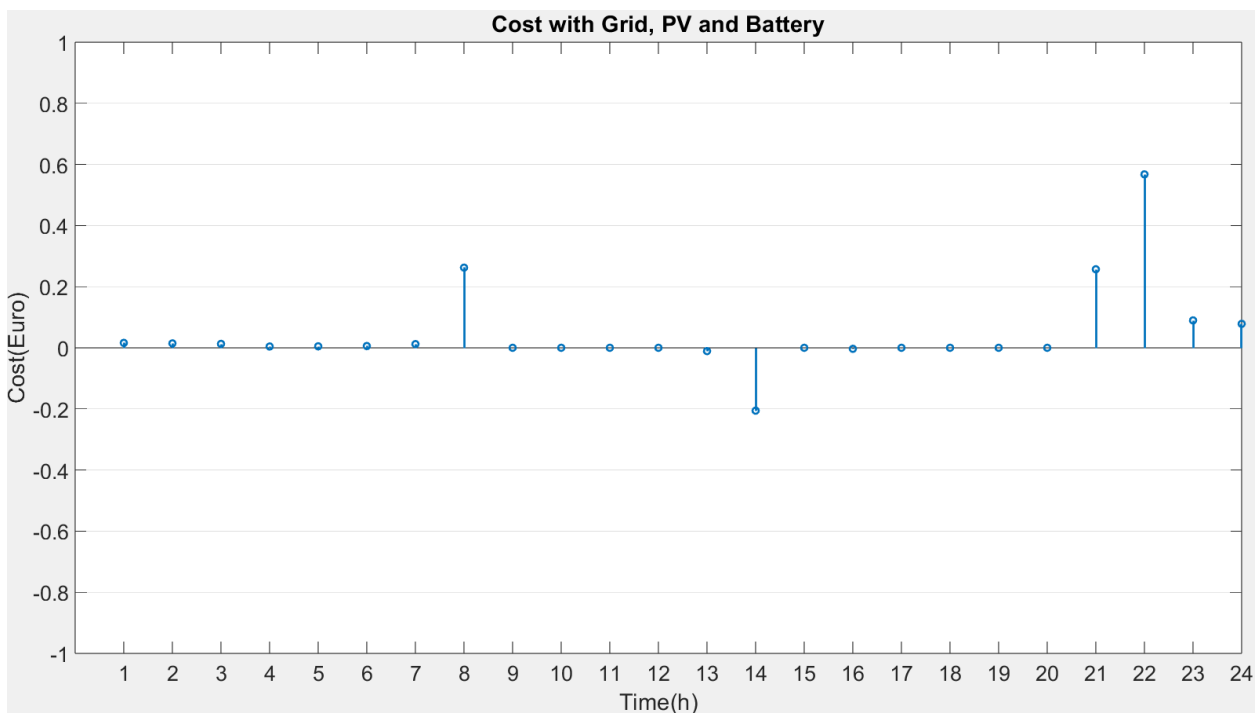
Σχήμα 4.53: Διάγραμμα ενέργειας μπαταρίας σεναρίου 7 – χωρίς τη χρήση του συστήματος.

Στα Σχήματα 4.52 και 4.53 παρατηρείται πως κατά τη διάρκεια του μεσημεριού η συστοιχία μπαταριών αποκτά τη μέγιστη κατάσταση φόρτισής της. Παρά το γεγονός ότι το μέγιστο SOC δεν διαρκεί για μεγάλο χρονικό διάστημα, τα επίπεδα της φόρτισής της εξακολουθούν να είναι υψηλά. Ωστόσο οι υψηλές απαιτήσεις του διαστήματος 19:00 με 20:00 σε συνδυασμό με την μηδενική παραγωγή ενέργειας, εξαντλούν τα αποθέματά της σύντομα.



Σχήμα 4.54: Διάγραμμα θερμοκρασίας και PMV σεναρίου 7 – χωρίς χρήση του συστήματος.

Όπως είναι αναμενόμενο, με εξαίρεση τις πρώτες πρωινές ώρες που η ενδυματολογική μόνωση είναι αυξημένη αλλά και τις δύο ώρες το βράδυ που ο κλιματισμός είναι ενεργοποιημένος, τις υπόλοιπες ώρες που ο χρήστης βρίσκεται στο κτήριο, το PMV βρίσκεται κάτω από -1, τιμή στην οποία νιώθει έντονα το κρύο, με θερμοκρασίες 16-17 °C.



Σχήμα 4.55: Διάγραμμα ωριαίου κόστους κτηρίου σεναρίου 7 – χωρίς χρήση του συστήματος.

Τα επίπεδα κόστους για το χρήστη σύμφωνα με το Σχήμα 4.55 είναι χαμηλά για μεγάλα χρονικά διαστήματα, ωστόσο στα διαστήματα 7:00-8:00 και 21:00-23:00 εμφανίζονται έντονες αυξήσεις. Η πώληση ενέργειας κατά το διάστημα 13:00-14:00 εξομαλύνει αυτές τις αυξήσεις, χωρίς όμως να τις αντιμετωπίζει ολοκληρωτικά.

<b>Πίνακας 4.33: Χρονοπρογραμματισμός συσκευών σεναρίου 7 – με σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.</b>				
Συσκευή	Πλυντήριο ρούχων	Ηλ. σκούπα	Πλυντήριο πιάτων	Ψυγείο
Ωρα ενεργοποίησης	10:00	2:00	23:00	0:00
Συσκευή	TV	PC	Ηλ. κουζίνα	Φωτισμός
Ωρα ενεργοποίησης	21:00	19:00	14:00	18:00
Συσκευή	Κλιματισμός		Θερμοσίφωνα	
Ωρα ενεργοποίησης	20:00 (Διάρκεια 0 ώρες)		21:00 (Διάρκεια 1 ώρα)	

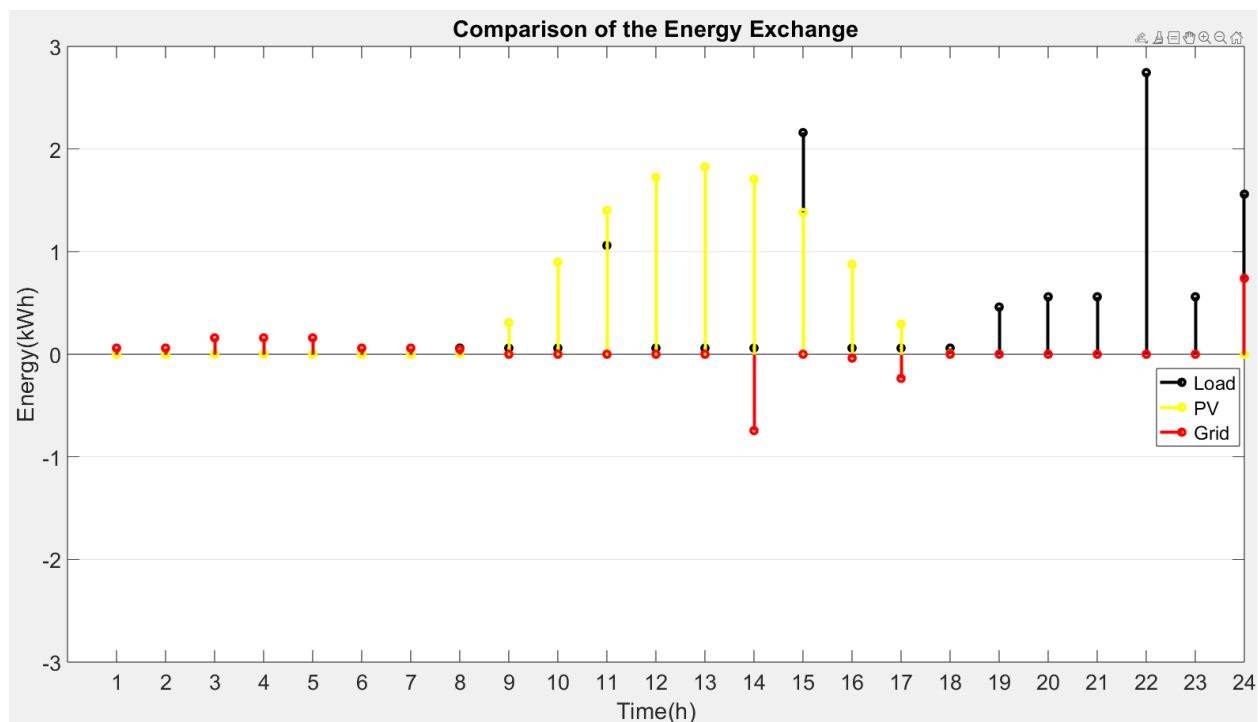
Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.33, παρατηρείται παρόμοια λογική όπως στο σενάριο 2 στους χειμερινούς μήνες, καθώς το σύστημα διαχείρισης ενέργειας ενεργοποιεί τις προγραμματιζόμενες συσκευές είτε νωρίς το πρωί, είτε αργά το βράδυ. Τις πρώτες πρωινές ώρες, παρά το γεγονός ότι η συστοιχία μπαταριών δεν έχει αποθέματα, η τιμολόγηση είναι αρκετά χαμηλή. Κατά τη διάρκεια του μεσημεριού, επιλέγει να φορτίσει πλήρως τη συστοιχία μπαταριών και να διατηρήσει ένα μικρό πλεόνασμα ενέργειας έτσι ώστε να εκμεταλλευτεί την πώληση της σε ώρα αυξημένης τιμολόγησης. Όπως είναι αναμενόμενο, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας αγνοώντας κάθε άλλο κριτήριο, δεν ενεργοποιεί τον κλιματισμό μέσα στο εικοσιτετράωρο, προκειμένου να επιφέρει το ελάχιστο κόστος.

**Πίνακας 4.34: Αποτελέσματα κριτηρίων σεναρίου 7 – με σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.**

Συντελεστής χρονικής ικανοποίησης	Συντελεστής σταθερότητας δικτύου	Ποινή PMV	Κόστος χωρίς PV (€)	Κόστος χωρίς μπαταρία (€)	Κόστος με PV/μπαταρία (€)
7.71	0.07	2.33	1.96	0.83	0.07

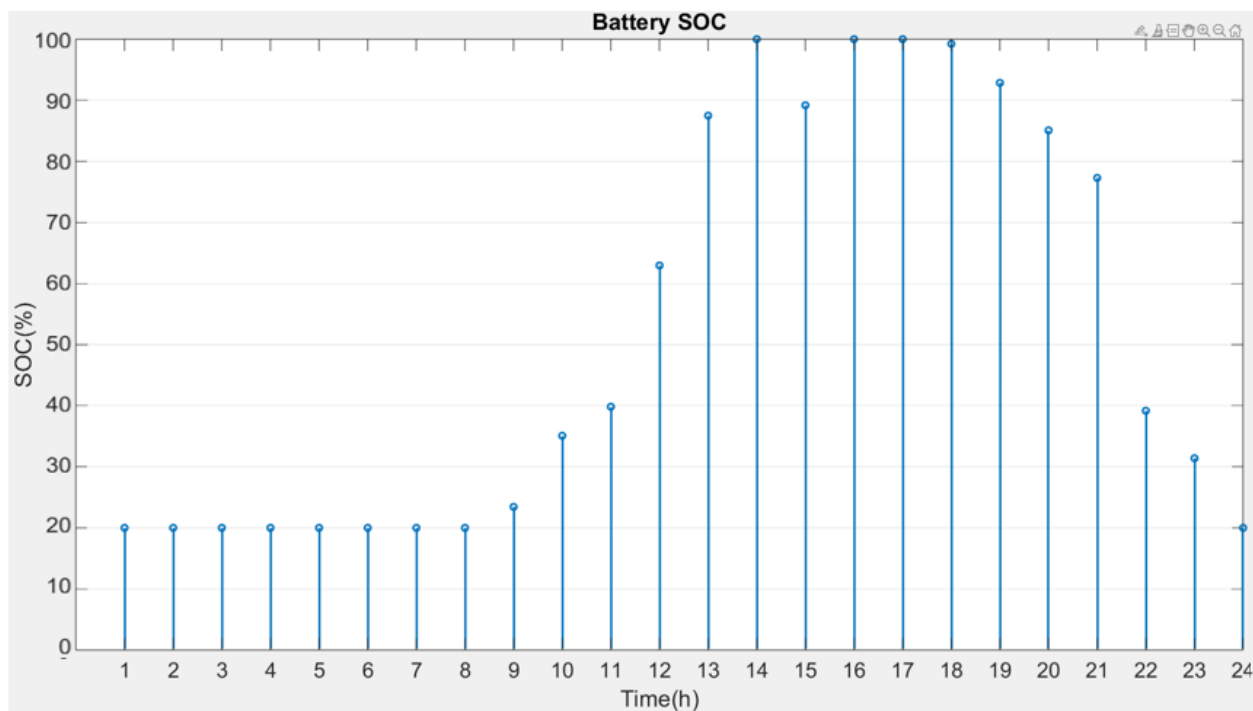
Τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.34 είναι ενθαρρυντικά, αν συνυπολογιστεί ότι η παραγωγή των φωτοβολταϊκών είναι χαμηλή, καθώς το κόστος ανέρχεται στα 0.07 €. Μικρό είναι και το κόστος υπό την απουσία μπαταρίας και φωτοβολταϊκών, καθώς ανέρχεται στα 0.83 € και 1.96 € αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, με την παρουσία φωτοβολταϊκού συστήματος χωρίς συστοιχία μπαταριών το κόστος μειώνεται κατά 57.14 % και με την παράλληλη παρουσία της μπαταρίας, το κόστος μειώνεται κατά 96.36 %. Και στις τρεις περιπτώσεις, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την αυθαίρετη προσπάθεια του χρήστη. Εξαιρετικά χαμηλός είναι και ο συντελεστής σταθερότητας δικτύου λόγω της αντίστοιχης χαμηλής αγοράς ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο. Ωστόσο, η ποινή του PMV είναι η πιο υψηλή που καταγράφεται στη παρούσα εργασία, καθώς είναι υψηλότερη και από τον αντίστοιχο χρονοπρογραμματισμό του σεναρίου 2. Συνεπώς, με την παρουσία συστήματος διαχείρισης ενέργειας, ο συντελεστής χρονικής ικανοποίησης μειώνεται κατά 22.9 %, ο συντελεστής σταθερότητας δικτύου μειώνεται κατά 80 % και η ποινή λόγω υπέρβασης των ορίων του PMV αυξάνεται κατά 25.3 %. Η απόλυτη προτεραιότητα του σεναρίου 7, όμως, είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους και το σύστημα επιφέρει μείωσή του κατά 93.6 %.



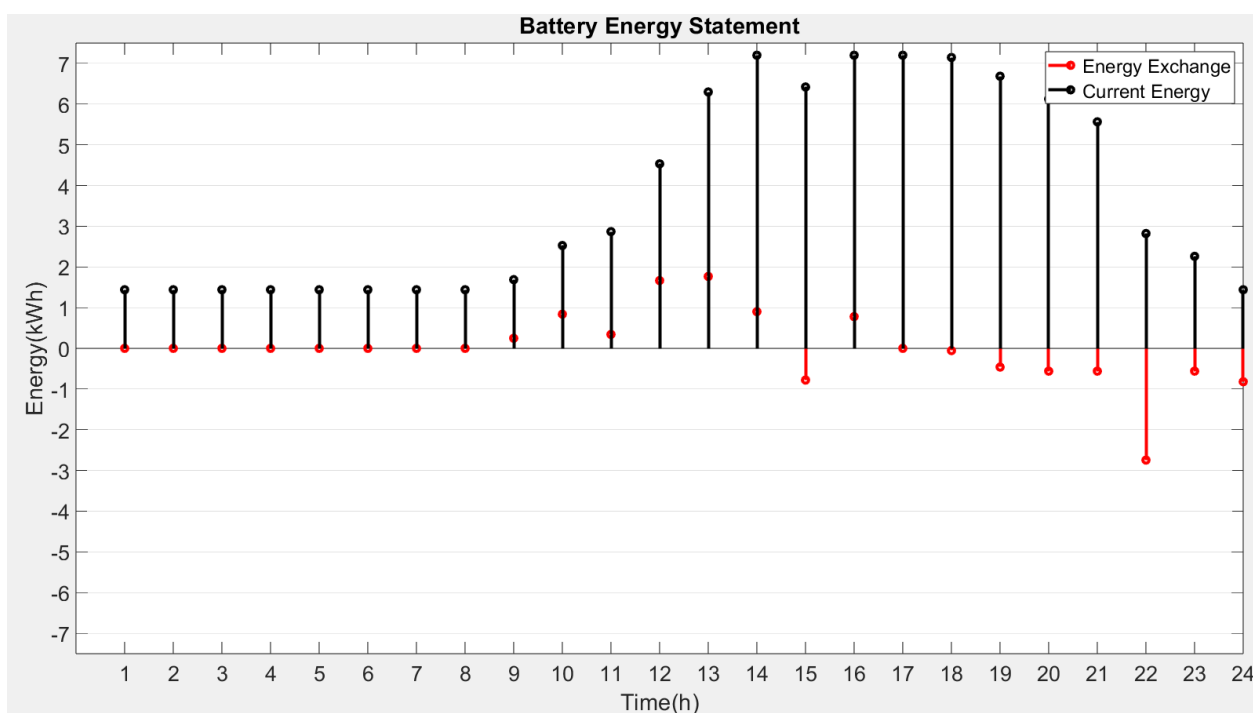


Σχήμα 4.56: Διάγραμμα ενέργειας κτηρίου σεναρίου 7 – με χρήση του συστήματος.

Στο Σχήμα 4.56 παρατηρείται πως τα φορτία τις πρώτες πρωινές ώρες είναι χαμηλά και αγοράζονται εξ ολοκλήρου από το ηλεκτρικό δίκτυο. Κατά τη διάρκεια του μεσημεριού αυξάνεται μόνο το φορτίο των μη-προγραμματιζόμενων συσκευών, ενώ το σύστημα διαχείρισης ενέργειας καταφέρνει να παρέχει ενέργεια στο ηλεκτρικό δίκτυο σε διάστημα μίας ώρας. Τα αποθέματα της συστοιχία μπαταριών, αλλά και το κέρδος της πώλησης ενέργειας, καταφέρνουν να κρατήσουν χαμηλό το κόστος, παρά την μικρή αύξηση φορτίων κατά το απόγευμα.



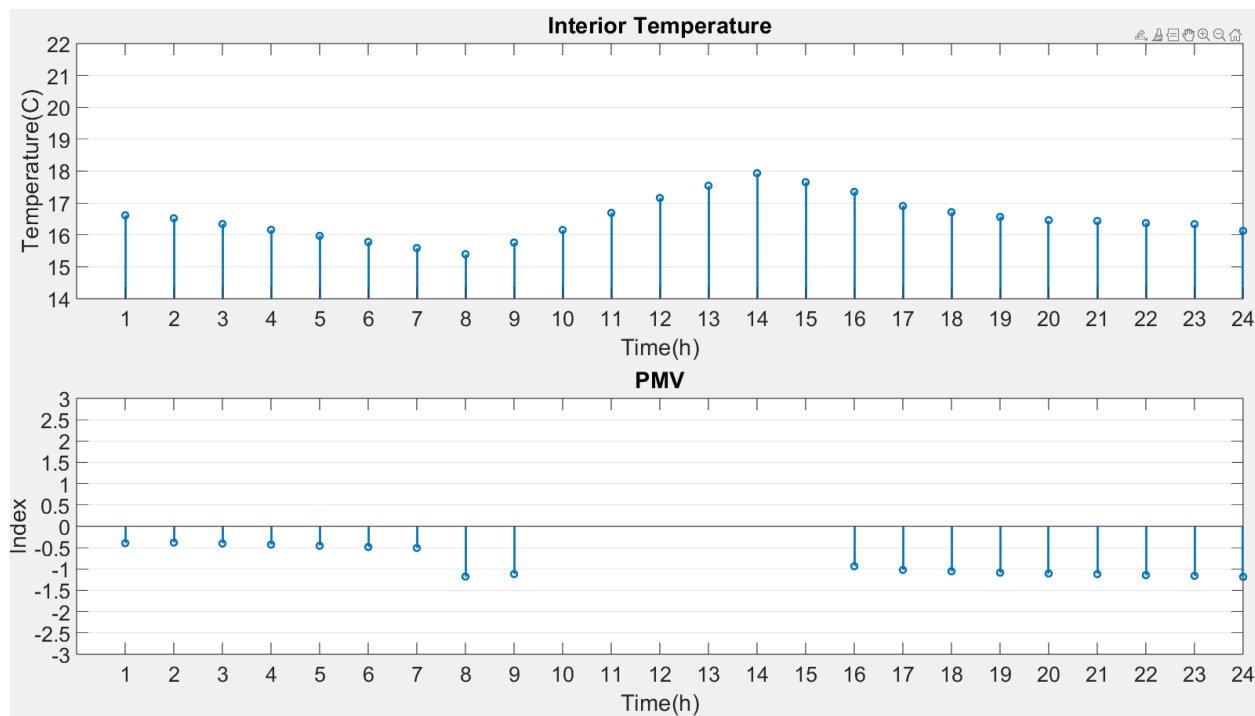
Σχήμα 4.57: Διάγραμμα SOC μπαταρίας σεναρίου 7 – με χρήση του συστήματος.



Σχήμα 4.58: Διάγραμμα ενέργειας μπαταρίας σεναρίου 7 – με χρήση του συστήματος.

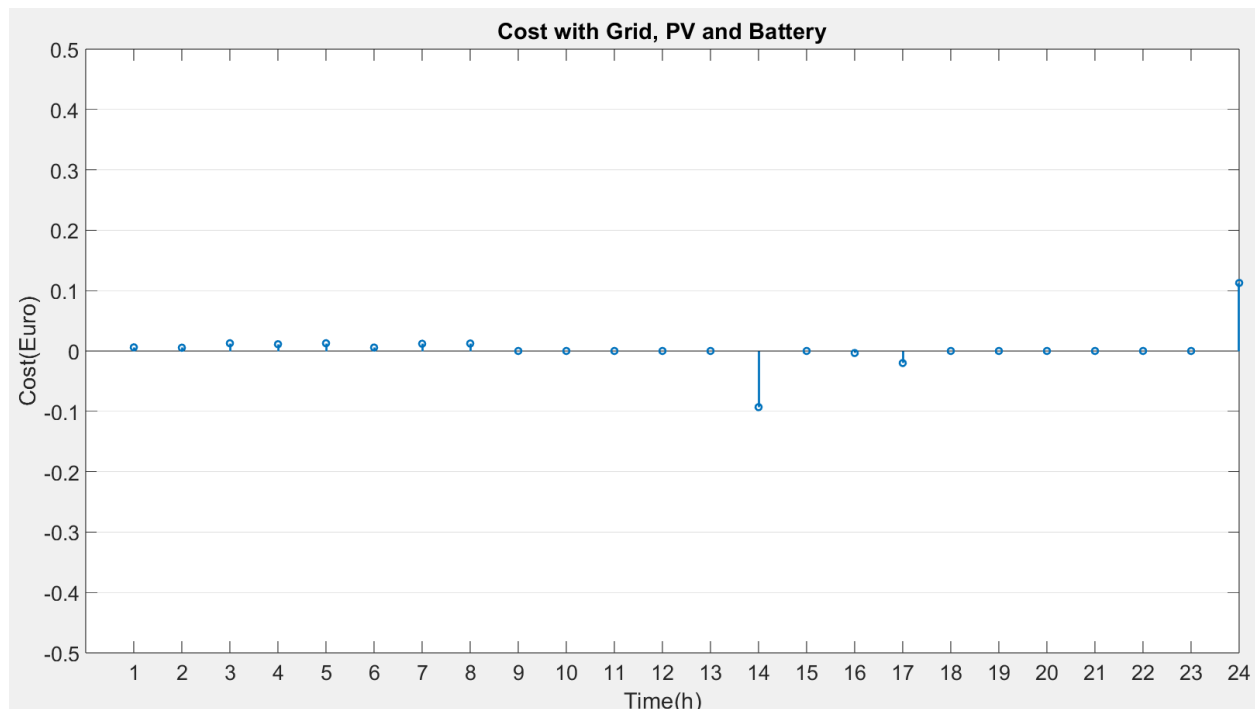
Στα Σχήματα 4.57 και 4.58 φαίνεται πως τα χαμηλά φορτία καταφέρνουν να διατηρήσουν τα επίπεδα φόρτισης της συστοιχίας μπαταριών σε υψηλά επίπεδα για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Εφόσον τα φορτία έχουν μετακινηθεί προς το απόγευμα και το βράδυ, μετά τις 21:00

διακρίνεται πτώση του ποσοστού της, μέχρι να βρεθεί στο ελάχιστό αυτού στο τέλος του εικοσιτετραώρου.



Σχήμα 4.59: Διάγραμμα θερμοκρασίας και PMV σεναρίου 7 – με χρήση του συστήματος.

Σε αντίθεση με την αντίστοιχη περίπτωση χωρίς το σύστημα διαχείρισης ενέργειας, στο Σχήμα 4.59 φαίνεται πως στο σύνολο του διαστήματος από τις 8:00 μέχρι τις 24:00 το PMV βρίσκεται εκτός ορίων, με τιμή κάτω από -1. Οι θερμοκρασίες του εσωτερικού του κτηρίου είναι ιδιαίτερα χαμηλές και λόγω της εποχής και κυμαίνονται από 15-18 °C, για όσο ο χρήστης βρίσκεται μέσα στο κτήριο.



Σχήμα 4.60: Διάγραμμα ωριαίου κόστους κτηρίου σεναρίου 7 – με χρήση του συστήματος.

Όπως είναι αναμενόμενο, στο Σχήμα 4.60 φαίνεται πως η αγορά ενέργειας από το δίκτυο είναι χαμηλή καθ' όλη τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου. Η πώληση ενέργειας που πραγματοποιείται στο διάστημα 13:00-14:00 αντισταθμίζει ολοκληρωτικά την αυξημένη αγορά ενέργειας κατά το διάστημα 23:00-24:00.

### 4.3.3 Σενάριο 8: Βαρύτητα εξ ολοκλήρου στο συντελεστή σταθερότητας δικτύου

Η συνάρτηση βελτιστοποίησης, σε αντίθεση με το αντίστοιχο σενάριο στους θερινούς μήνες, καλείται σε αυτή τη περίπτωση να μοιράσει τα φορτία που θα αντληθούν από το δίκτυο σε όλο το διάστημα του εικοσιτετραώρου. Με αυτό τον τρόπο, θα αποφευχθούν οι ώρες αιχμής και το κτήριο θα συμβάλλει στη συλλογική προσπάθεια της σταθερότητας του δικτύου, προγραμματίζοντας τις συσκευές που του επιτρέπεται ετεροχρονισμένα. Η σταθερότητα του δικτύου δεν ωφελεί μόνο το δίκτυο αλλά και το ίδιο το κτήριο, εξασφαλίζοντας την ασφάλεια των συσκευών του, καθώς μειώνεται η πιθανότητα της πτώσης τάσης του ηλεκτρικού δικτύου και της ολικής διακοπής παροχής ηλεκτρικού ρεύματος λόγω υπερφόρτωσης. Εφόσον στους χειμερινούς μήνες πραγματοποιείται αγορά ενέργειας από το δίκτυο, λόγω της χαμηλής παραγωγής από τα φωτοβολταϊκά, το σύστημα θα προσπαθήσει να αντλήσει τη λιγότερη δυνατή, προκειμένου να ελαχιστοποιήσει τον συντελεστή.

**Πίνακας 4.34: Παράμετροι εισόδου για το σενάριο 8.**

Βαρύτητα συντελεστή χρονικής ικανοποίησης	Βαρύτητα ποινής PMV	Βαρύτητα συντελεστή σταθερότητας δικτύου	Βαρύτητα κόστους ενέργειας
0	0	1	0
Ενδυματολογική μόνωση	Επίπεδο δραστηριότητας	Λειτουργία κτηρίου	Λειτουργία φωτισμού
1.9 (0:00-7:00) 0.9 (7:00-24:00)	1 (0:00-7:00) 1.2 (7:00-24:00)	0:00-9:00 & 15:00-24:00	18:00-24:00
Ανώτατο επίπεδο θερμοκρασίας HVAC	Κατώτατο επίπεδο θερμοκρασίας HVAC	Θερμοκρασία εισερχόμενου κρύου νερού	Θερμοκρασία θερμοσίφωνα
28.5 °C	21 °C	15 °C	40 °C

Εάν ο χρήστης επιλέξει σύμφωνα με τη δική του κρίση το χρονοπρογραμματισμό των συσκευών, προκύπτουν τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.35 και του Πίνακα 4.36.

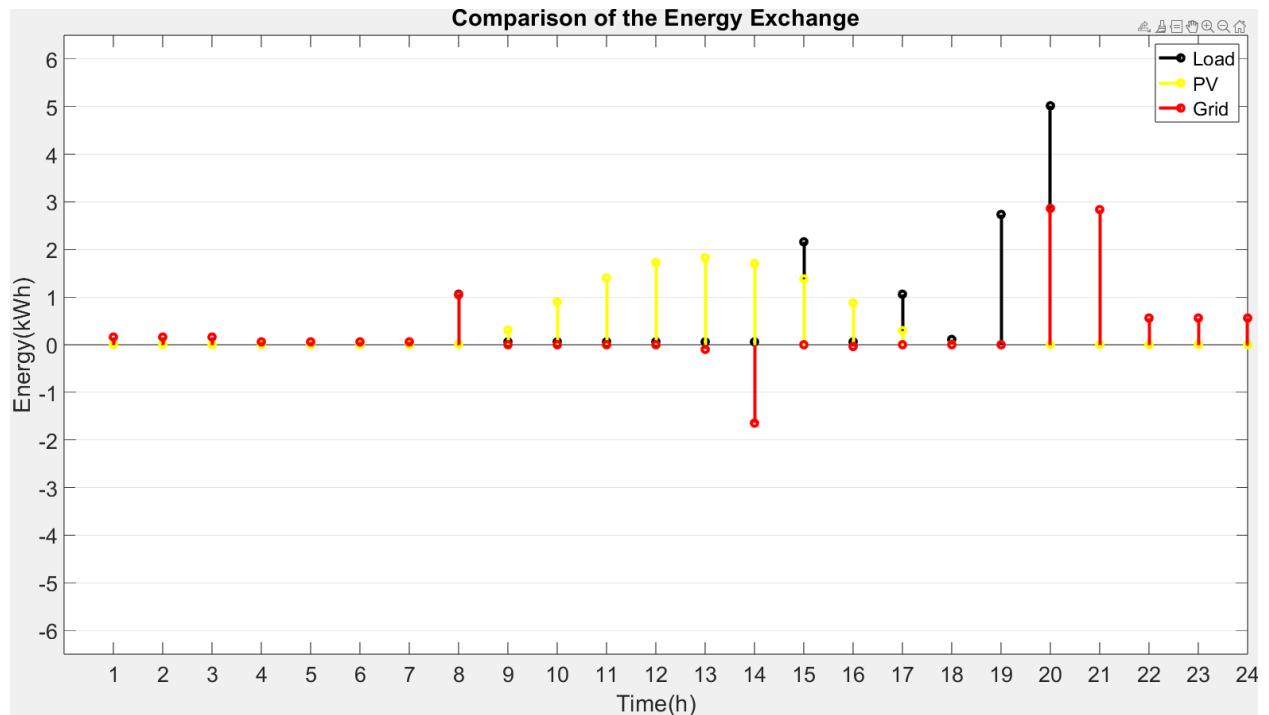
<b>Πίνακας 4.35: Χρονοπρογραμματισμός συσκευών σεναρίου 8 – χωρίς σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.</b>				
Συσκευή	Πλυντήριο ρούχων	Ηλ. σκούπα	Πλυντήριο πιάτων	Ψυγείο
Ωρα ενεργοποίησης	7:00	0:00	16:00	0:00
Συσκευή	TV	PC	Ηλ. κουζίνα	Φωτισμός
Ωρα ενεργοποίησης	21:00	19:00	14:00	18:00
Συσκευή	Κλιματισμός		Θερμοσίφονας	
Ωρα ενεργοποίησης	18:00 (Διάρκεια 3 ώρες)		19:00 (Διάρκεια 1 ώρα)	

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.35, ο χρήστης ενεργοποιεί τις συσκευές στην αρχική τιμή του εύρους του, όπως στις προηγούμενες προσομοιώσεις και ενεργοποιεί τον κλιματισμό για 3 ώρες το απόγευμα.

<b>Πίνακας 4.36: Αποτελέσματα κριτηρίων σεναρίου 8 – χωρίς σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.</b>					
Συντελεστής χρονικής ικανοποίησης	Συντελεστής σταθερότητας δικτύου	Ποινή PMV	Κόστος χωρίς PV (€)	Κόστος χωρίς μπαταρία (€)	Κόστος με PV/μπαταρία (€)
10	0.56	1.64	3.31	2.23	1.53

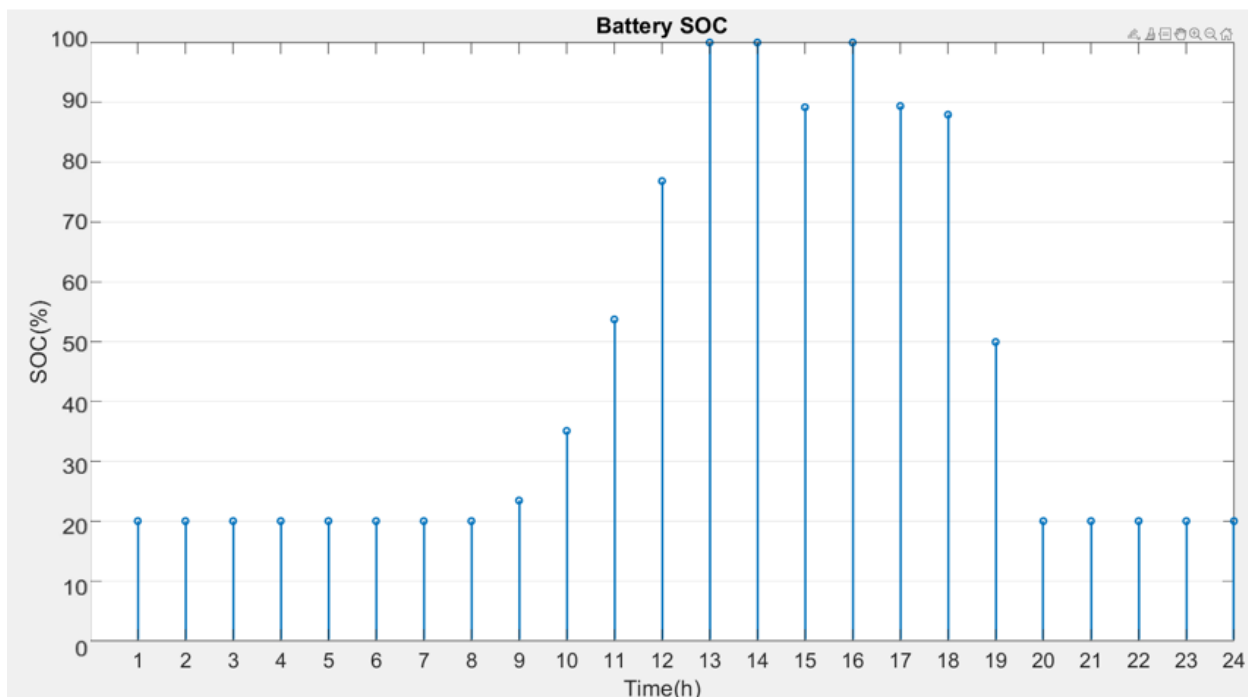
Όπως φαίνεται από το Πίνακα 4.36, η προσπάθεια του χρήστη να λάβει έναν μειωμένο συντελεστή σταθερότητας δικτύου είναι ανεπιτυχής. Η τιμή που επιφέρει είναι υψηλή, ακόμη και σε σχέση με το σενάριο 7, κατά το οποίο μοναδικός του στόχος ήταν το κόστος. Το κόστος

στο παρόν σενάριο χωρίς φωτοβολταϊκό σύστημα είναι ίσο με 3.31 €. Με την παρουσία φωτοβολταϊκών χωρίς συστοιχία μπαταριών το κόστος εμφανίζει μείωση 32.60 % και είναι ίσο με 2.23 €, ενώ με την προσθήκη συστοιχίας μπαταριών, το κόστος εμφανίζει μείωση ίση με 56.19 % και είναι ίσο με 1.53 €.

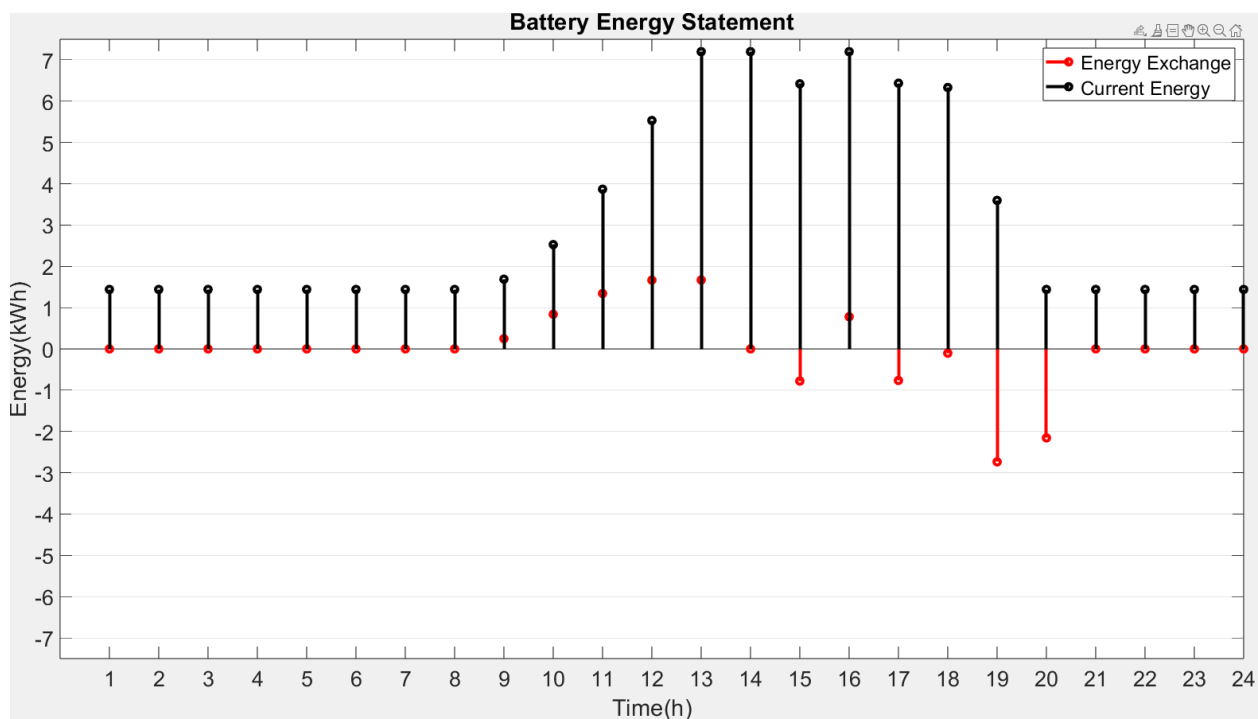


Σχήμα 4.61: Διάγραμμα ενέργειας κτηρίου σεναρίου 8 – χωρίς τη χρήση του συστήματος.

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.61, από το μεσημέρι και έπειτα τα φορτία φαίνεται να λειτουργούν ταυτόχρονα σε αρκετές χρονικές στιγμές και σε ώρες αιχμής. Μάλιστα, κατά τις βραδινές ώρες αντλείται ενέργεια από το ηλεκτρικό δίκτυο που φτάνει τις 3 kWh σε μία ώρα.



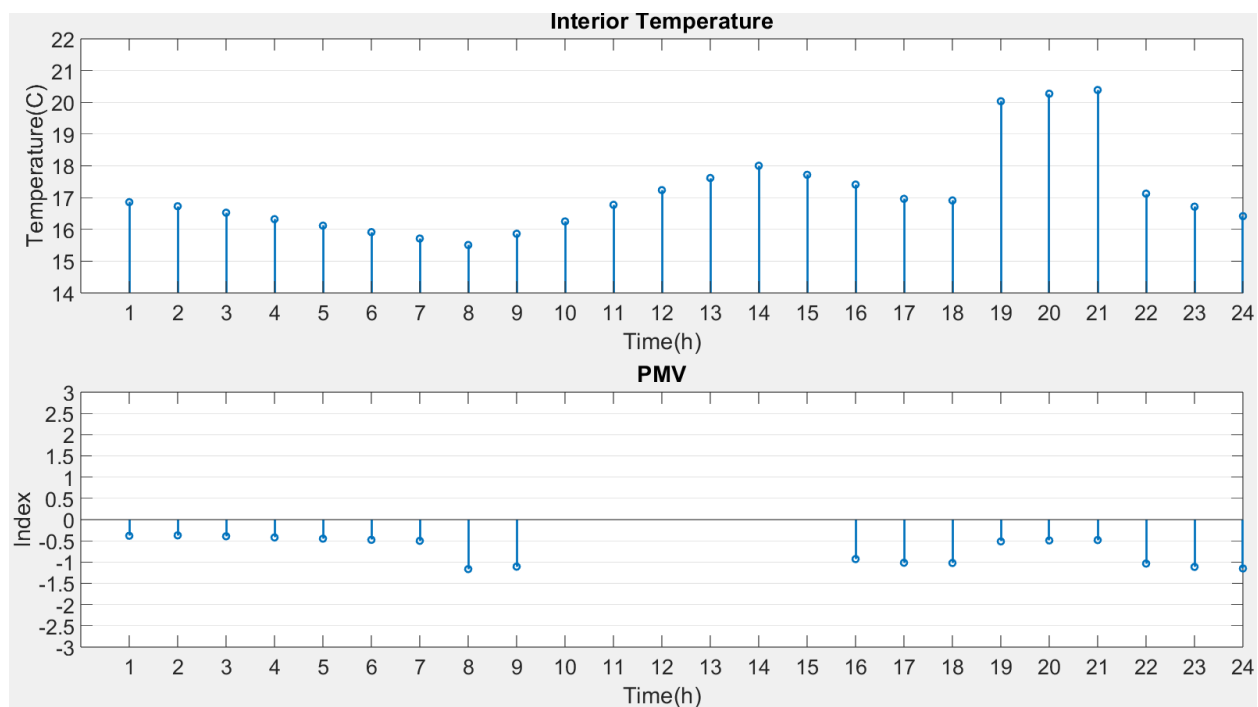
Σχήμα 4.62: Διάγραμμα SOC μπαταρίας σεναρίου 8 – χωρίς τη χρήση του συστήματος.



Σχήμα 4.63: Διάγραμμα ενέργειας μπαταρίας σεναρίου 8 – χωρίς τη χρήση του συστήματος.

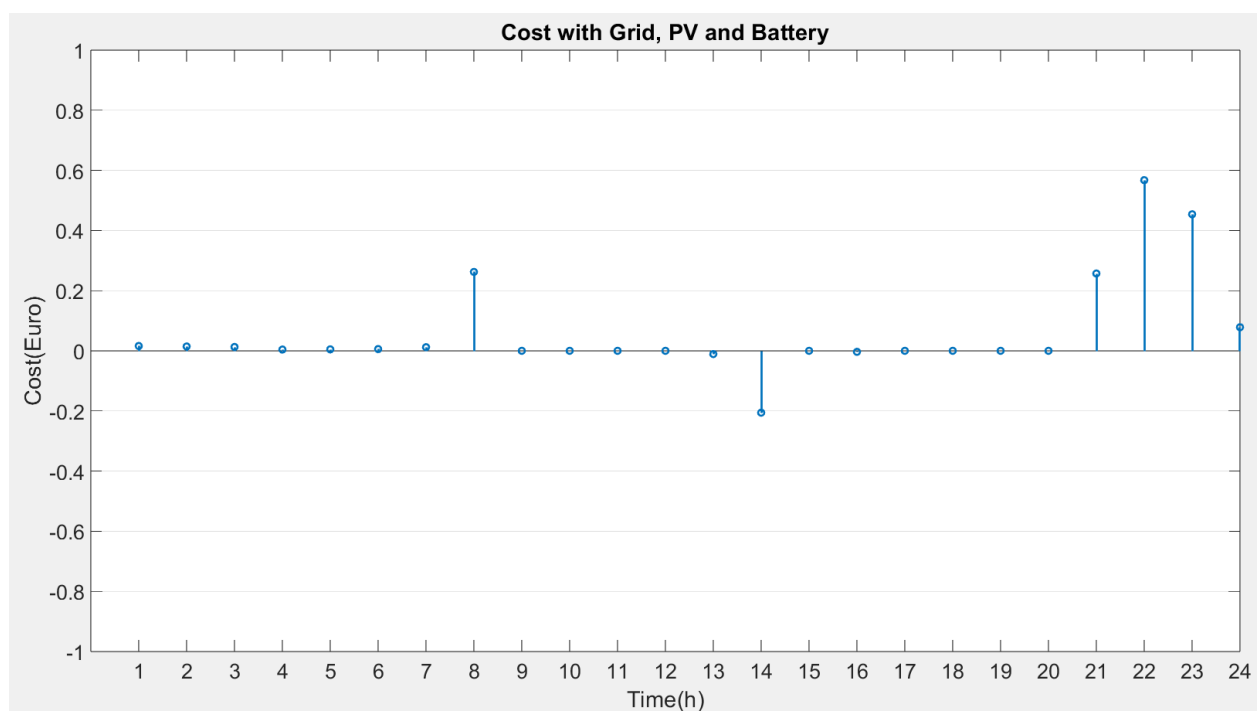
Στην περίπτωση του σεναρίου 8 όπως φαίνεται και στα Σχήματα 4.62 και 4.63, παρά το γεγονός ότι η συστοιχία μπαταριών διατηρεί υψηλά επίπεδα φόρτισης κατά το μεσημέρι, το απόγευμα εξαντλούνται σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα.





Σχήμα 4.64: Διάγραμμα θερμοκρασίας και PMV σεναρίου 8 – χωρίς χρήση του συστήματος.

Για το σενάριο 8 ο χρήστης επιλέγει να ενεργοποιήσει τον κλιματισμό μόνο για τρεις ώρες το βράδυ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.64. Για εκείνες τις χρονικές στιγμές, το PMV βρίσκεται στα επιτρεπτά όρια. Ωστόσο στα υπόλοιπα χρονικά διαστήματα, το αποτέλεσμα είναι παρόμοιο με το αντίστοιχο του σεναρίου 7, καθώς η χαμηλή θερμοκρασία της εποχής προκαλεί πτώση του PMV σε τιμή κάτω από το -1.



Σχήμα 4.65: Διάγραμμα ωριαίου κόστους κτηρίου σεναρίου 8 – χωρίς χρήση του συστήματος.

Στη παρούσα περίπτωση παρατηρείται έντονη αύξηση του κόστους κατά τις βραδινές ώρες. Το αποτέλεσμα αυτό προκαλείται από την παρουσία υψηλών φορτίων τις συγκεκριμένες ώρες, γεγονός που επιδρά και στον συντελεστή σταθερότητας δικτύου.

Κατά τη λειτουργία του συστήματος διαχείρισης ενέργειας προκύπτουν τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.37 και 4.38.

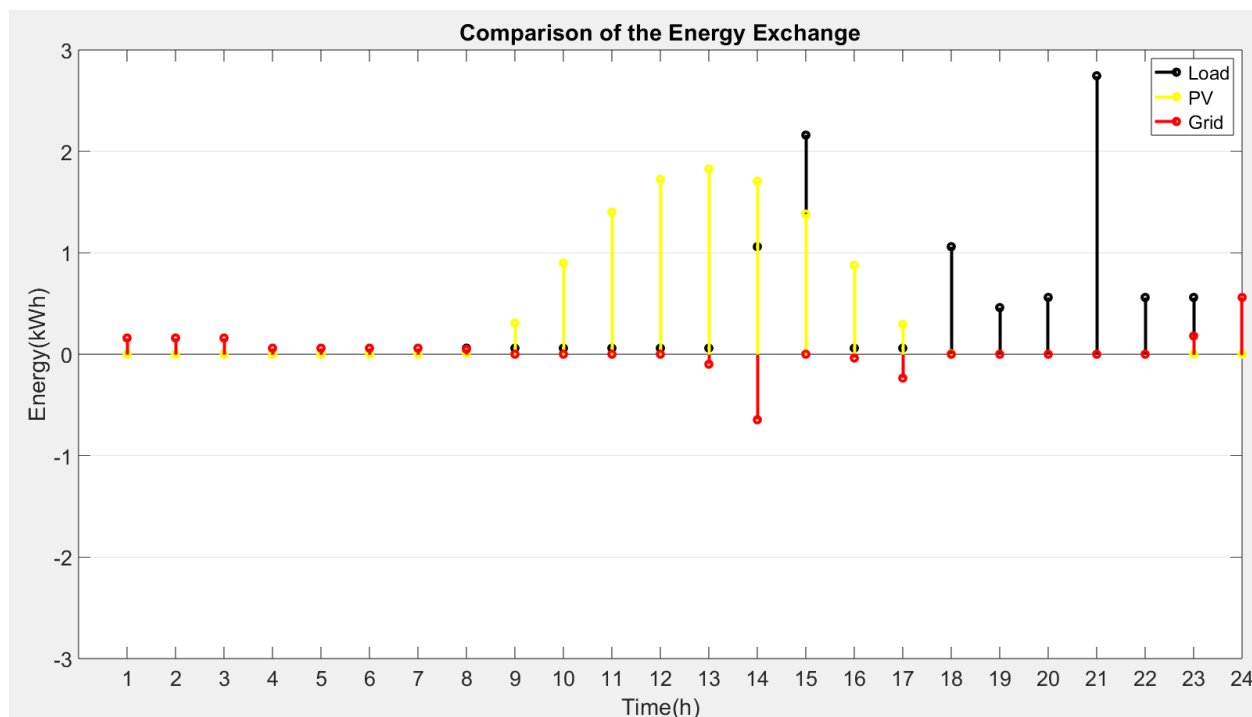
<b>Πίνακας 4.37: Χρονοπρογραμματισμός συσκευών σεναρίου 8 – με σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.</b>				
Συσκευή	Πλυντήριο ρούχων	Ηλ. σκούπα	Πλυντήριο πιάτων	Ψυγείο
Ωρα ενεργοποίησης	13:00	0:00	17:00	0:00
Συσκευή	TV	PC	Ηλ. κουζίνα	Φωτισμός
Ωρα ενεργοποίησης	21:00	19:00	14:00	18:00
Συσκευή	Κλιματισμός		Θερμοσίφωνα	
Ωρα ενεργοποίησης	20:00 (Διάρκεια 0 ώρες)		20:00 (Διάρκεια 1 ώρα)	

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.37, τα φορτία κατατάσσονται στο εικοσιτετράωρο σε όλη του την έκταση, καθώς οι προγραμματιζόμενες συσκευές έχουν χρονοπρογραμματιστεί με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να μην λειτουργούν ταυτόχρονα μεταξύ τους αλλά και μεταξύ των μη-προγραμματιζόμενων. Το θετικό της περίπτωσης αυτής είναι ότι και ο ίδιος ο χρήστης ενεργοποιεί τις περισσότερες μη-προγραμματιζόμενες συσκευές σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα, γεγονός που ωφελεί τον συντελεστή σταθερότητας δικτύου. Όπως συμβαίνει και στο Σενάριο 7, το σύστημα δεν λαμβάνει υπόψη τη θερμική άνεση του χρήστη, επομένως προκειμένου να ελαχιστοποιήσει τον συντελεστή, διατηρεί απενεργοποιημένο τον κλιματισμό καθ' όλη τη διάρκεια του εικοσιτετράωρου.

**Πίνακας 4.38: Αποτελέσματα κριτηρίων σεναρίου 8 – με σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.**

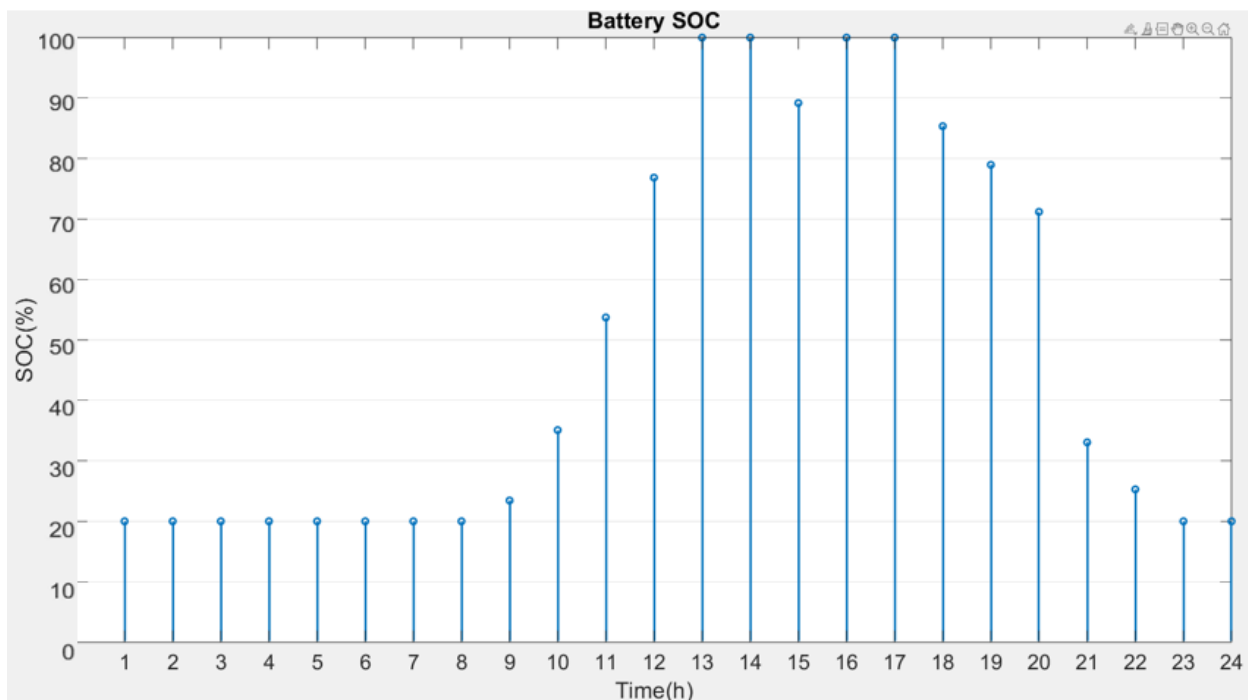
Συντελεστής χρονικής ικανοποίησης	Συντελεστής σταθερότητας δικτύου	Ποινή PMV	Κόστος χωρίς PV (€)	Κόστος χωρίς μπαταρία (€)	Κόστος με PV/μπαταρία (€)
8.98	0.01	2.33	2.13	0.94	0.16

Στον Πίνακα 4.38 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σεναρίου 8, τα οποία επιφέρουν έναν ιδιαίτερα χαμηλό συντελεστή σταθερότητας δικτύου. Ωστόσο δεν είναι μηδενικός, καθώς υπάρχει ταυτόχρονη λειτουργία ορισμένων μη-προγραμματιζόμενων συσκευών σε μικρά χρονικά διαστήματα. Η παρούσα τιμή, όμως, είναι αμελητέα. Η συγκεκριμένη λειτουργία επιφέρει καλά αποτελέσματα και στο κόστος, το οποίο είναι ίσο με 0.16 €. Χαμηλές είναι επίσης οι τιμές στις περιπτώσεις που απουσιάζουν μπαταρία και φωτοβολταϊκά, οι οποίες ανέρχονται στα 0.94 € και 2.13 € αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, το φωτοβολταϊκό σύστημα χωρίς συστοιχία μπαταριών επιφέρει μείωση στο κόστος κατά 55.64 % και με την προσθήκη συστοιχίας μπαταριών το κόστος μειώνεται κατά 92.51 %. Η τιμή, όμως, της ποινής του PMV είναι ίση με την αντίστοιχη του σεναρίου 7, καθώς και στις δύο περιπτώσεις ο κλιματισμός είναι απενεργοποιημένος και παραβιάζεται σε μεγάλο βαθμό η θερμική άνεση του χρήστη. Συνεπώς, με τη χρήση του συστήματος διαχείρισης ενέργειας στο παρόν σενάριο, ο συντελεστής χρονικής ικανοποίησης μειώνεται κατά 10.2 %, η ποινή λόγω υπέρβασης των ορίων του PMV αυξάνεται κατά 42.07 % και το κόστος μειώνεται κατά 89.54 %. Η απόλυτη προτεραιότητα, όμως, είναι ο συντελεστής σταθερότητας δικτύου, ο οποίος μειώνεται κατά 98.21 %. Προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος, η θερμική άνεση του χρήστη (όπως αντίστοιχα στο σενάριο 7) αποκτά τη χείριστη τιμή της, ωστόσο το συνολικό κόστος του εικοσιτετραώρου είναι αντίστοιχα χαμηλό, εφόσον επωφελείται από την μείωση του συντελεστή σταθερότητας δικτύου.

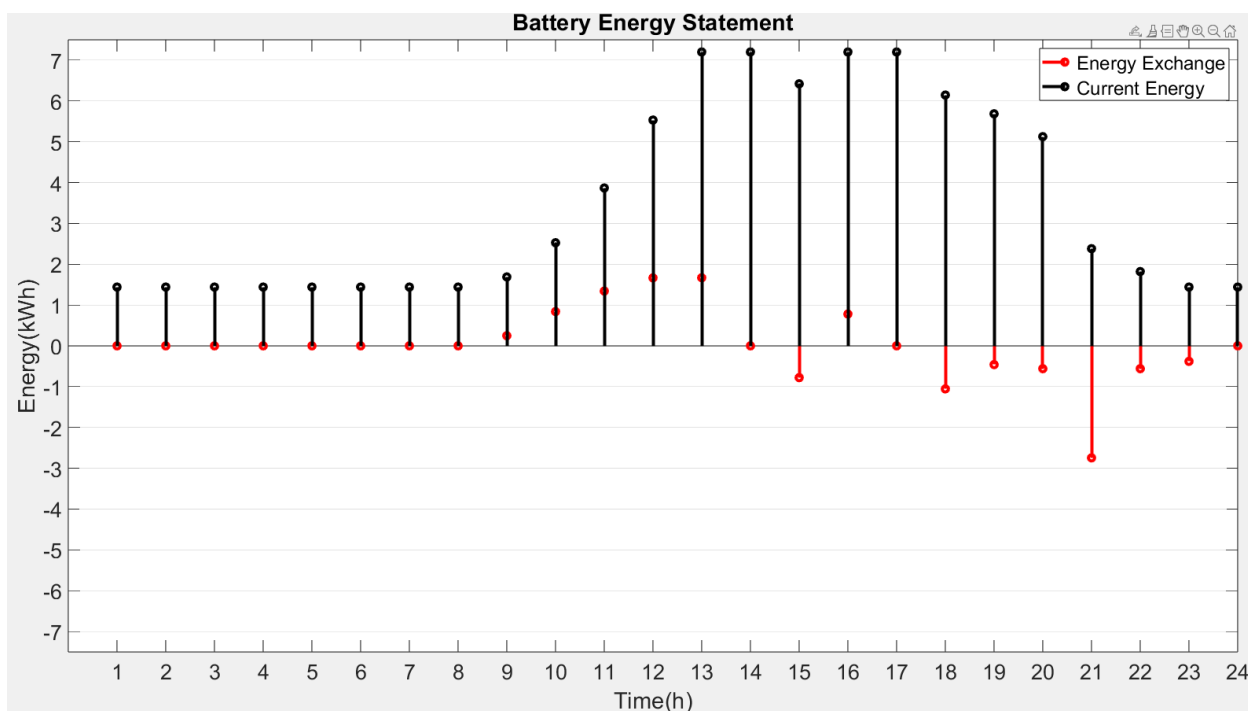


Σχήμα 4.66: Διάγραμμα ενέργειας κτηρίου σεναρίου 8 – με χρήση του συστήματος.

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.66, τα φορτία δεν ξεπερνούν την τιμή της 1 kWh κατά το μεγαλύτερο μέρος του εικοσιτετραώρου, με εξαίρεση τα δύο χρονικά διαστήματα κατά τα οποία λειτουργεί η ηλεκτρική κουζίνα και ο θερμοσίφωνας. Ωστόσο, τα φωτοβολταϊκά και η συστοιχία μπαταριών καλύπτουν τα συγκεκριμένα φορτία και τελικά η αγορά ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο είναι χαμηλή. Τα φορτία, τελικά, είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα σε όλο το διάστημα του εικοσιτετραώρου.



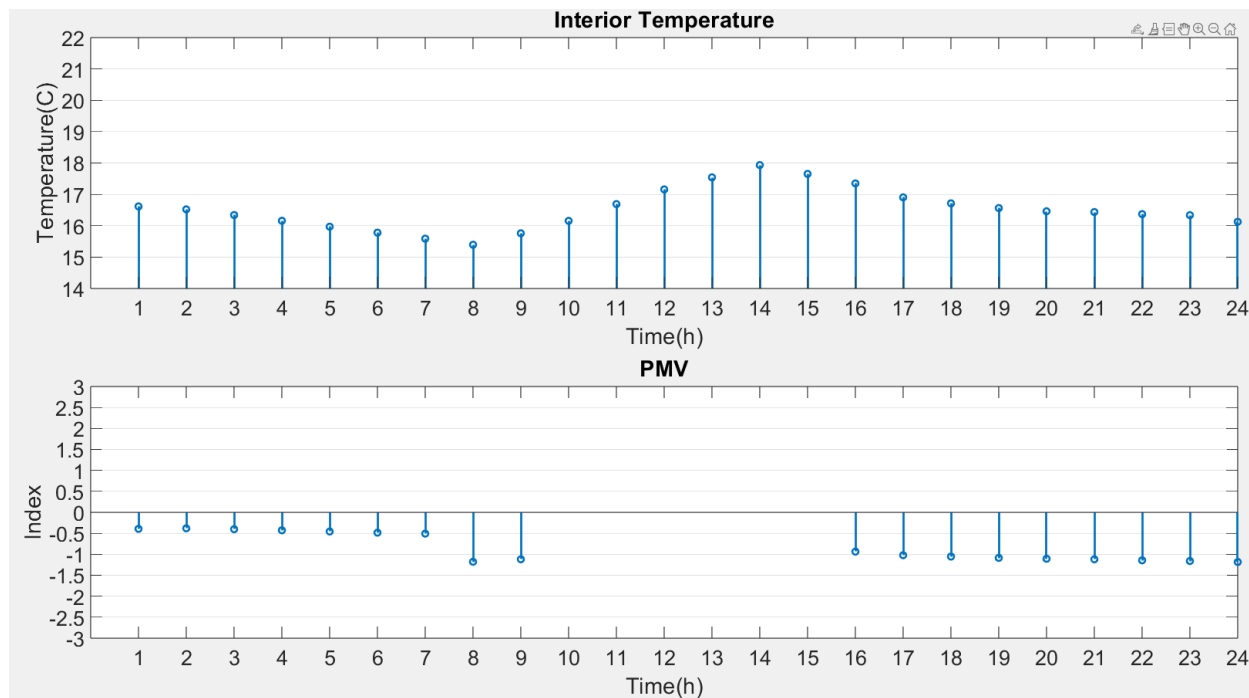
Σχήμα 4.67: Διάγραμμα SOC μπαταρίας σεναρίου 8 – με χρήση του συστήματος.



Σχήμα 4.68: Διάγραμμα ενέργειας μπαταρίας σεναρίου 8 – με χρήση του συστήματος.

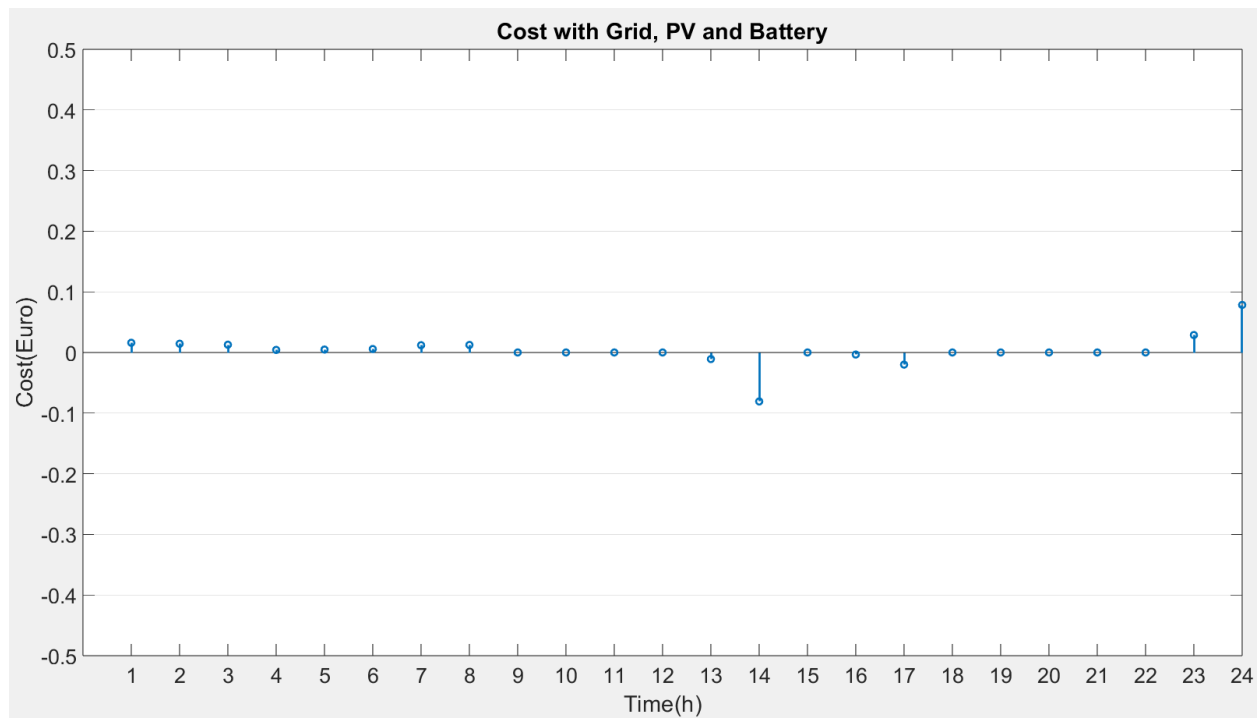
Στα Σχήματα 4.67 και 4.68 περιγράφεται η επίδραση του Σεναρίου 8 στη συστοιχία μπαταριών, καθώς αποκτά ποσά ενέργειας το μεσημέρι, τα οποία ωστόσο χάνει σε σύντομο χρονικό διάστημα, προκειμένου να καλύψει τα υψηλά φορτία που επικρατούν από τις 15:00 και έπειτα. Συνεπώς, καταφέρνει να οδηγήσει το σύστημα διαχείρισης ενέργειας να αγοράσει ελάχιστη

ενέργεια στο σύνολο του εικοσιτετραώρου από το ηλεκτρικό δίκτυο, την οποία μάλιστα κατανέμει ομοιόμορφα μέσα στη διάρκεια της ημέρας.



Σχήμα 4.69: Διάγραμμα θερμοκρασίας και PMV σεναρίου 8 – με χρήση του συστήματος.

Το διάγραμμα του Σχήματος 4.69 είναι ίδιο με το αντίστοιχο του σεναρίου 7, καθώς και στις δύο περιπτώσεις ο κλιματισμός είναι απενεργοποιημένος. Η χαμηλή θερμοκρασία του εσωτερικού του κτηρίου επιφέρει χαμηλές τιμές στο PMV στο σύνολο του εικοσιτετραώρου, με εξαίρεση τις πρώτες πρωινές ώρες που η ενδυματολογική μόνωση είναι αυξημένη.



Σχήμα 4.70: Διάγραμμα ωριαίου κόστους κτηρίου σεναρίου 8 – με χρήση του συστήματος.

Όπως είναι αναμενόμενο, στο Σχήμα 4.70 απεικονίζεται η χαμηλή αγορά ενέργειας του συστήματος διαχείρισης ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο, η οποία κατανέμεται ομοιόμορφα καθ' όλη τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου και επιφέρει αντίστοιχο χαμηλό κόστος.

#### 4.3.4 Σενάριο 9: Βαρύτητα εξ ολοκλήρου στο συντελεστή χρονικής ικανοποίησης χρήστη

Το παρόν σενάριο, όπως αντίστοιχα το σενάριο 4, ταυτίζει την επιλογή του χρήστη με αυτή του συστήματος διαχείρισης ενέργειας. Μοναδικός του στόχος είναι να μεγιστοποιήσει τον συντελεστή χρονικής ικανοποίησης του χρήστη, ενεργοποιώντας τις συσκευές στις χρονικές στιγμές που έχει ορίσει ως αρχική τιμή στο επιθυμητό περιθώριο. Ωστόσο, η χρονική ικανοποίηση δεν συνδέεται με τη θερμική άνεση. Συνεπώς, το σύστημα θα αγνοήσει την τελευταία και θα ορίσει τη διάρκεια λειτουργίας του κλιματισμού χωρίς να επηρεάζει το συντελεστή χρονικής ικανοποίησης.

**Πίνακας 4.39: Παράμετροι εισόδου για το σενάριο 9.**

Βαρύτητα συντελεστή χρονικής ικανοποίησης	Βαρύτητα ποινής PMV	Βαρύτητα συντελεστή σταθερότητας δικτύου	Βαρύτητα κόστους ενέργειας
<b>1</b>	0	0	0
Ενδυματολογική μόνωση	Επίπεδο δραστηριότητας	Λειτουργία κτηρίου	Λειτουργία φωτισμού
1.9 (0:00-7:00) 0.9 (7:00-24:00)	1 (0:00-7:00) 1.2 (7:00-24:00)	0:00-9:00 & 15:00-24:00	18:00-24:00
Ανώτατο επίπεδο θερμοκρασίας HVAC	Κατώτατο επίπεδο θερμοκρασίας HVAC	Θερμοκρασία εισερχόμενου κρύου νερού	Θερμοκρασία θερμοσίφωνα
28.5 °C	21 °C	15 °C	40 °C

Εάν ο χρήστης επιλέξει το χρονοπρογραμματισμό των συσκευών σύμφωνα με τη δική του κρίση, προκύπτουν τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.40 και του Πίνακα 4.41.



**Πίνακας 4.40: Χρονοπρογραμματισμός συσκευών σεναρίου 9 – με σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.**

Συσκευή	Πλυντήριο ρούχων	Ηλ. σκούπα	Πλυντήριο πιάτων	Ψυγείο
Ωρα ενεργοποίησης	7:00	0:00	16:00	0:00
Συσκευή	TV	PC	Ηλ. κουζίνα	Φωτισμός
Ωρα ενεργοποίησης	21:00	19:00	14:00	18:00
Συσκευή	Κλιματισμός		Θερμοσίφονας	
Ωρα ενεργοποίησης	19:00 (Διάρκεια 2 ώρες)		19:00 (Διάρκεια 1 ώρα)	

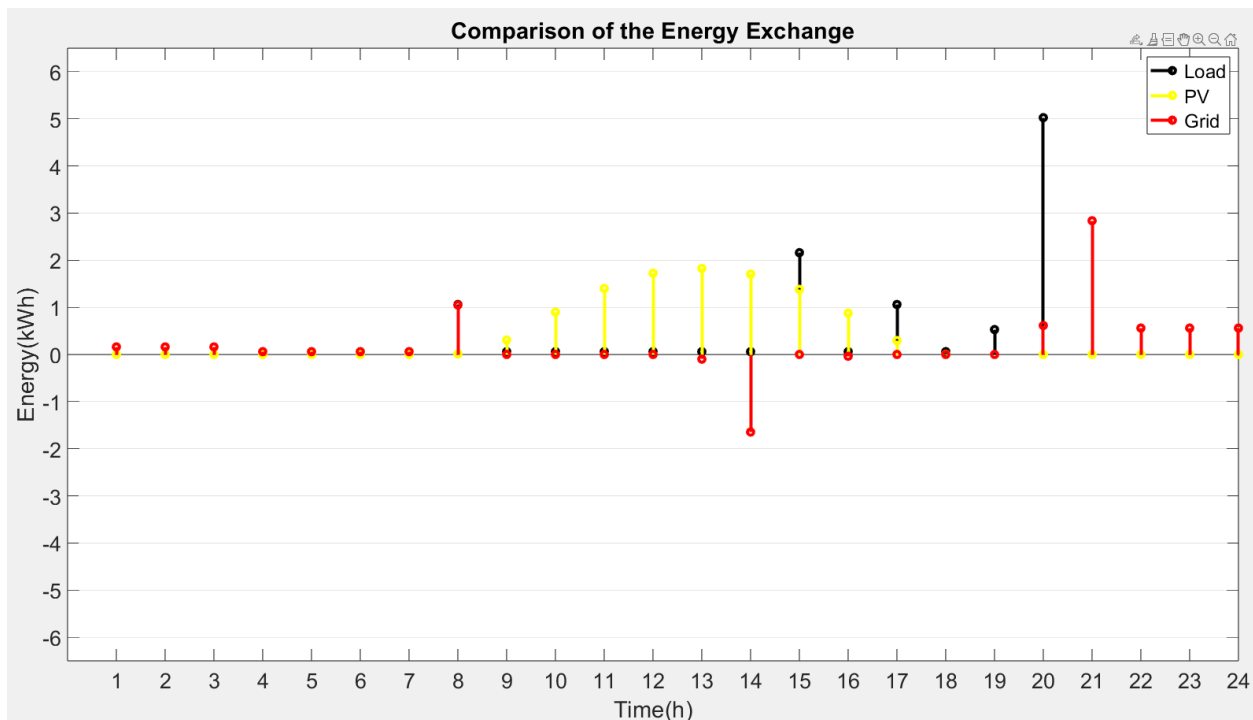
Όπως σε κάθε περίπτωση, οι ώρες ενεργοποίησης είναι οι αρχικές τιμές του επιθυμητού εύρους.

**Πίνακας 4.41: Αποτελέσματα κριτηρίων σεναρίου 9 – με σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.**

Συντελεστής χρονικής ικανοποίησης	Συντελεστής σταθερότητας δικτύου	Ποινή PMV	Κόστος χωρίς PV (€)	Κόστος χωρίς μπαταρία (€)	Κόστος με PV/μπαταρία (€)
10	0.40	1.87	2.88	1.80	0.99

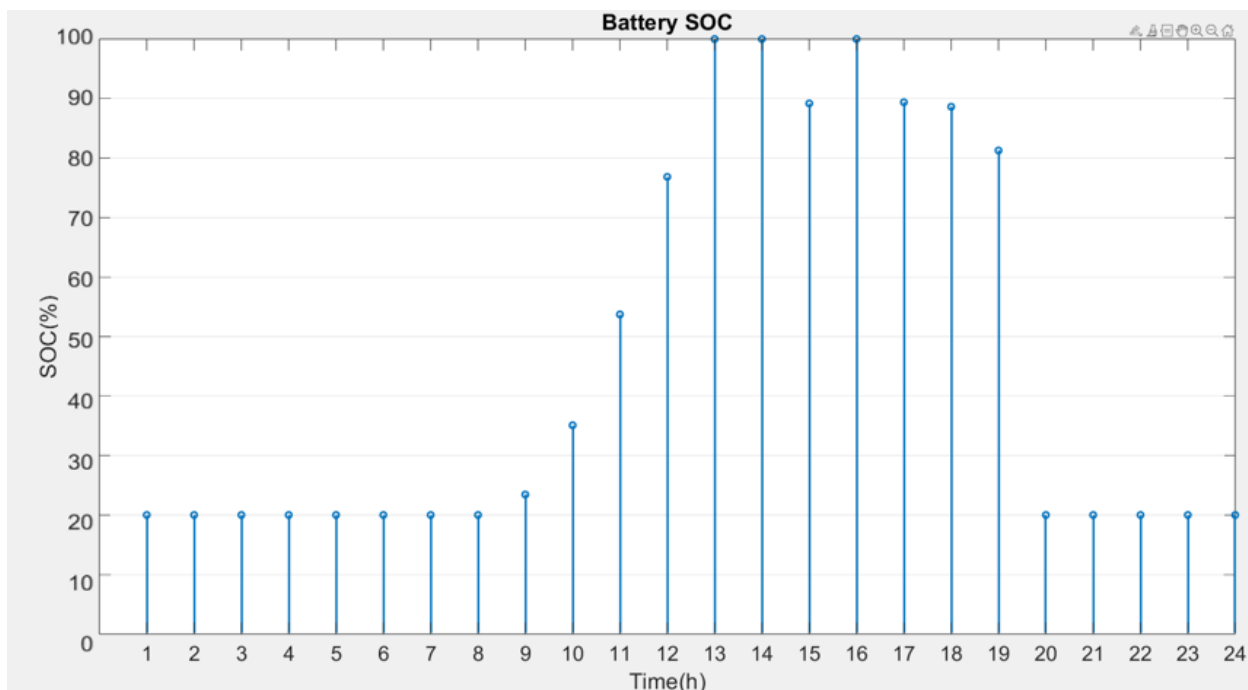
Όπως είναι αναμενόμενο, ο συντελεστής χρονικής ικανοποίησης είναι ο μέγιστος. Ωστόσο, ο συντελεστής σταθερότητας δικτύου εμφανίζει αυξημένη τιμή, γεγονός που είναι επίσης αναμενόμενο, εφόσον οι χρήστες συνηθίζουν να ενεργοποιούν πολλά από τα φορτία τους ταυτόχρονα. Επιπλέον, αυξημένη είναι και η τιμή του PMV, καθώς η θερμική άνεση του χρήστη δεν συνδέεται με τη χρονική, επομένως το σύστημα λειτουργεί αυθαίρετα. Τέλος, αυξημένο

είναι και το τελικό κόστος του εικοσιτετραώρου, το οποίο σχεδόν αγγίζει το 1 €. Ανάλογη πορεία ακολουθούν και οι τιμές χωρίς συστοιχία μπαταριών και φωτοβολταϊκά, που ανέρχονται στα 1.80 € και 2.88 € αντίστοιχα. Συνεπώς, με την παρουσία φωτοβολταϊκού συστήματος, το κόστος μειώνεται κατά 37.50 %, ενώ με την προσθήκη συστοιχίας μπαταριών το κόστος μειώνεται κατά 65.97 %.

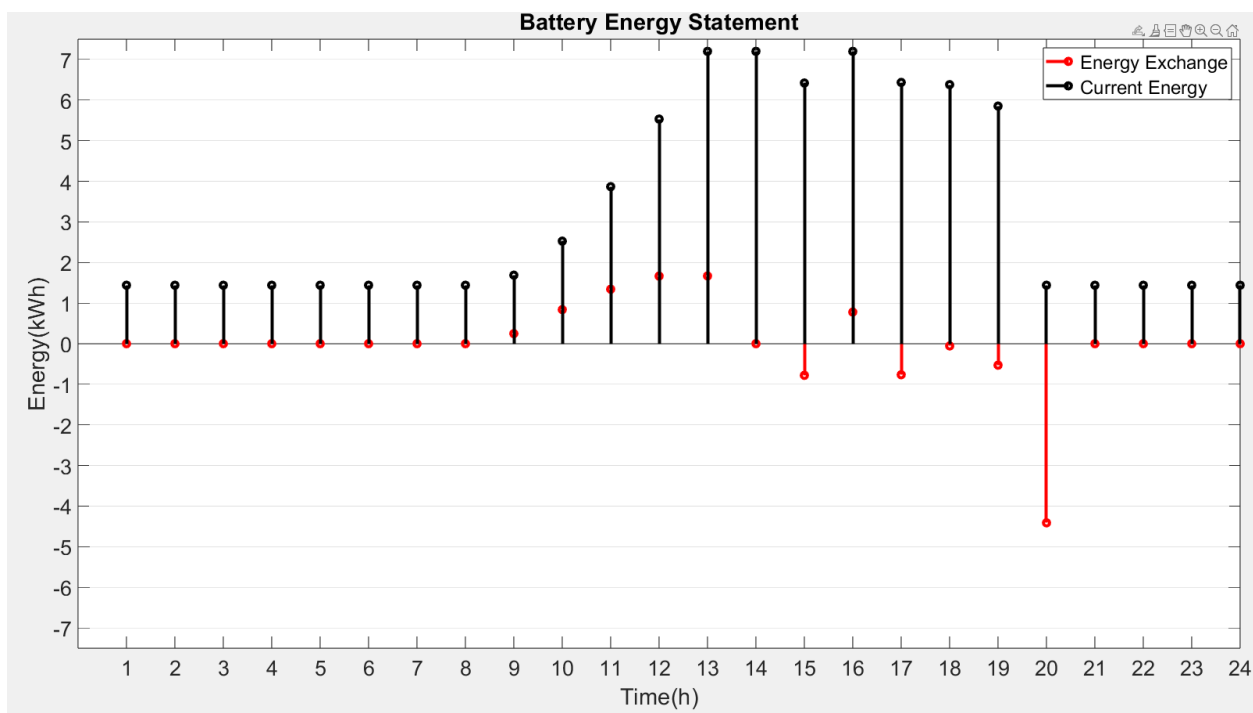


Σχήμα 4.71: Διάγραμμα ενέργειας κτηρίου σεναρίου 9 –με χρήση του συστήματος.

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.71, η απόλυτη βαρύτητα του συστήματος διαχείρισης ενέργειας στις προτιμήσεις του χρήστη επιφέρει έντονες διακυμάνσεις. Τα φορτία τις πρώτες πρωινές ώρες είναι ελάχιστα, όπως επίσης και νωρίς το μεσημέρι. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς οι χρήστες δεν ενεργοποιούν τις συσκευές τους κατά τη διάρκεια του ύπνου και της απουσίας τους από το κτήριο. Ωστόσο, από τις 15:00 και έπειτα, φαίνεται πως τα φορτία αυξάνονται απότομα, γεγονός που επιδρά στα υπόλοιπα κριτήρια. Παρά το γεγονός ότι μέχρι τις 14:00 τα φορτία είναι χαμηλά, το πλεόνασμα ενέργειας που προκύπτει δίνεται απευθείας στην μπαταρία. Στο διάστημα 13:00-14:00 δίνεται μεγάλο ποσό ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο, που βρίσκεται λίγο κάτω από τις 2 kWh.

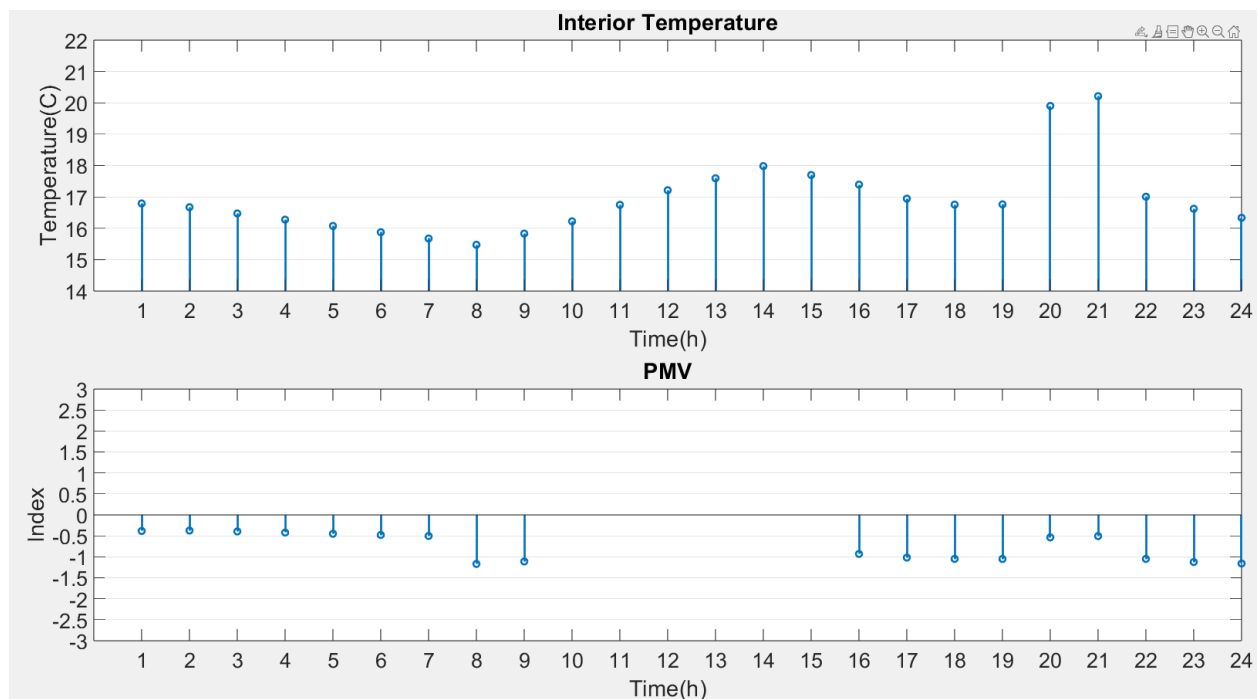


Σχήμα 4.72: Διάγραμμα SOC μπαταρίας σεναρίου 9 – με χρήση του συστήματος.



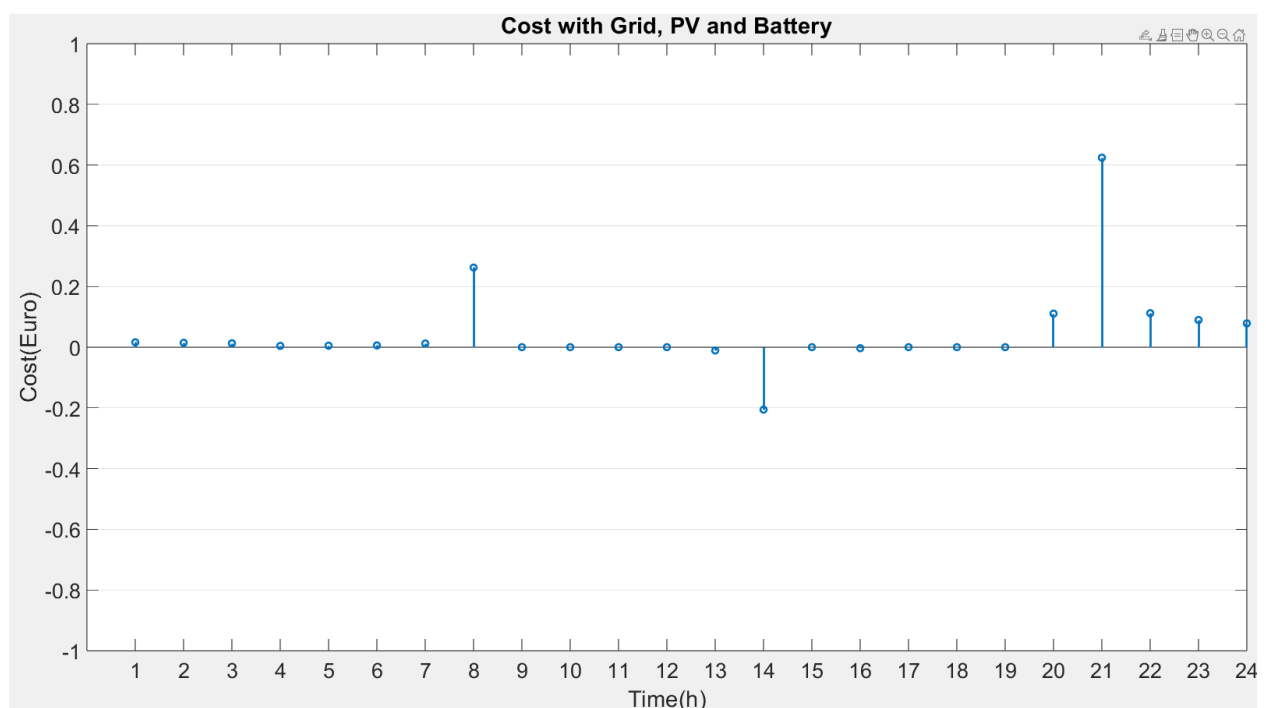
Σχήμα 4.73: Διάγραμμα ενέργειας μπαταρίας σεναρίου 9 – με χρήση του συστήματος.

Στα Σχήματα 4.72 και 4.73 παρατηρείται πως η μπαταρία φορτίζεται σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα, καθώς τα φορτία είναι χαμηλά. Επομένως η μικρή παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά δίνεται σε αυτή. Το μεσημέρι διατηρεί υψηλά επίπεδα φόρτισης, λόγω της ταυτόχρονης παραγωγής ενέργειας που βρίσκεται στο μέγιστο, ωστόσο τα υψηλά φορτία το απόγευμα την εκφορτίζουν απευθείας.



Σχήμα 4.74: Διάγραμμα θερμοκρασίας και PMV σεναρίου 9 – με χρήση του συστήματος.

Όπως σε κάθε κριτήριο που αγνοεί τη θερμική άνεση του χρήστη, έτσι και το συγκεκριμένο διατηρεί απενεργοποιημένο τον κλιματισμό μέχρι τις 20:00, γεγονός που προκαλεί χαμηλές τιμές στο PMV. Καθώς ενεργοποιείται για δύο ώρες, στο διάστημα 19:00-21:00 ο δείκτης επανέρχεται στα επιτρεπτά όρια, ωστόσο οι χαμηλές θερμοκρασίες τον επαναφέρουν κάτω από την τιμή του -1, αμέσως μετά την απενεργοποίηση του κλιματισμού.



Σχήμα 4.75: Διάγραμμα ωριαίου κόστους κτηρίου σεναρίου 9 – με χρήση του συστήματος.

Το διάγραμμα του κόστους εμφανίζει απότομες αυξήσεις, καθώς το σύστημα διαχείρισης ενέργειας ενεργοποιεί μεγάλα φορτία κατά τη διάρκεια αυξημένης τιμολόγησης. Ωστόσο, στο μεγαλύτερο μέρος του εικοσιτετραώρου η αγορά ενέργειας είναι μειωμένη, ενώ στο διάστημα 13:00-14:00 πραγματοποιείται πώληση ενέργειας, γεγονός που αντισταθμίζει ως ένα βαθμό τα παραπάνω.

#### 4.3.5 Σενάριο 10: Εξισορροπημένη βαρύτητα των συντελεστών

Παρόμοια με το σενάριο 5, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας ρυθμίζεται προκειμένου να δώσει ίση βαρύτητα και στα τέσσερα κριτήρια και να εκτελέσει ένα χρονοπρογραμματισμό που θα επιφέρει ισορροπία.

Πίνακας 4.42: Παράμετροι εισόδου για το σενάριο 10.			
Βαρύτητα συντελεστή χρονικής ικανοποίησης	Βαρύτητα ποινής PMV	Βαρύτητα συντελεστή σταθερότητας δικτύου	Βαρύτητα κόστους ενέργειας
0.25	0.25	0.25	0.25
Ενδυματολογική μόνωση	Επίπεδο δραστηριότητας	Λειτουργία κτηρίου	Λειτουργία φωτισμού
1.9 (0:00-7:00) 0.9 (7:00-24:00)	1 (0:00-7:00) 1.2 (7:00-24:00)	0:00-9:00 & 15:00-24:00	18:00-24:00
Ανώτατο επίπεδο θερμοκρασίας HVAC	Κατώτατο επίπεδο θερμοκρασίας HVAC	Θερμοκρασία εισερχόμενου κρύου νερού	Θερμοκρασία θερμοσίφωνα
28.5 °C	21 °C	15 °C	40 °C

Εάν ο χρήστης επιλέξει το χρονοπρογραμματισμό των συσκευών σύμφωνα με τη δική του κρίση, προκύπτουν τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.43 και του Πίνακα 4.44.

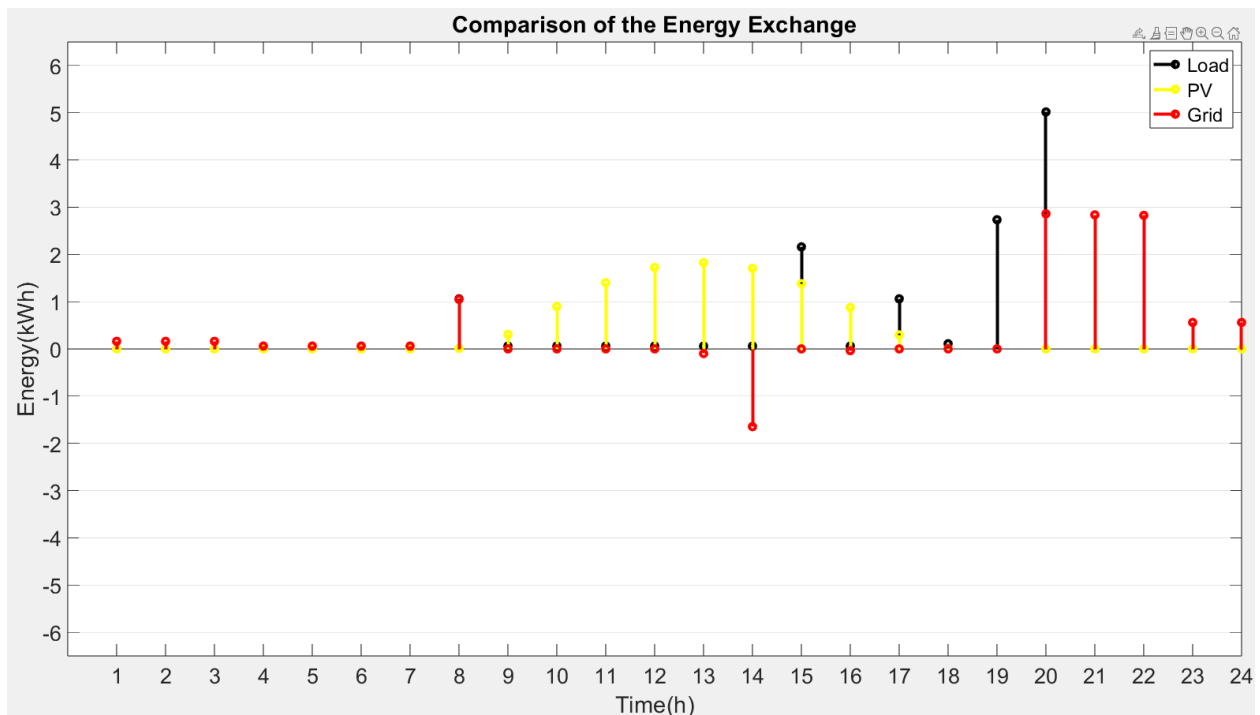
<b>Πίνακας 4.43: Χρονοπρογραμματισμός συσκευών σεναρίου 10 – χωρίς σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.</b>				
Συσκευή	Πλυντήριο ρούχων	Ηλ. σκούπα	Πλυντήριο πιάτων	Ψυγείο
Ωρα ενεργοποίησης	7:00	0:00	16:00	0:00
Συσκευή	TV	PC	Ηλ. κουζίνα	Φωτισμός
Ωρα ενεργοποίησης	21:00	19:00	14:00	18:00
Συσκευή	Κλιματισμός		Θερμοσίφωνας	
Ωρα ενεργοποίησης	18:00 (Διάρκεια 4 ώρες)		19:00 (Διάρκεια 1 ώρα)	

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.43 , ο χρήστης ενεργοποιεί τις συσκευές στην αρχική τιμή του εύρους του, όπως στις προηγούμενες προσομοιώσεις και ενεργοποιεί τον κλιματισμό για 4 ώρες από το απόγευμα.

<b>Πίνακας 4.44: Αποτελέσματα κριτηρίων σεναρίου 10 – χωρίς σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.</b>					
Συντελεστής χρονικής ικανοποίησης	Συντελεστής σταθερότητας δικτύου	Ποινή PMV	Κόστος χωρίς PV (€)	Κόστος χωρίς μπαταρία (€)	Κόστος με PV/μπαταρία (€)
10	0.77	1.42	3.76	2.68	1.99

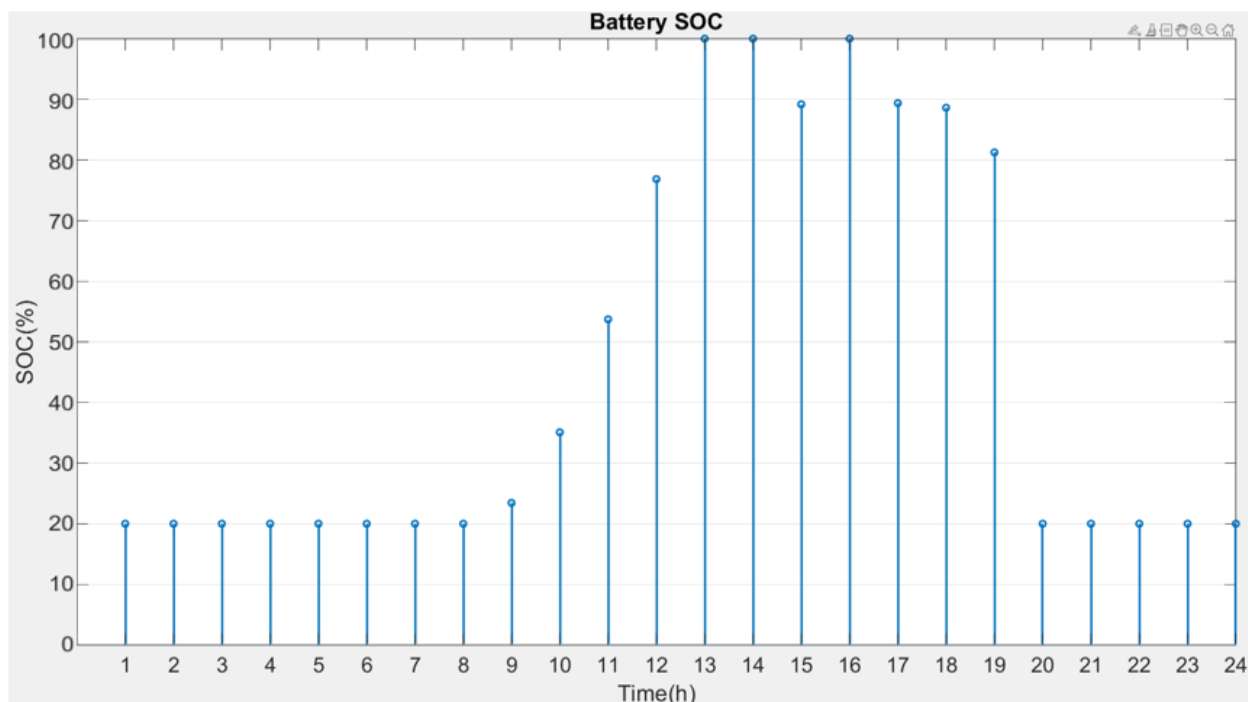
Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.44, οι επιλογές του χρήστη δεν επιφέρουν ισορροπία στις τιμές των κριτηρίων, καθώς η ποινή του PMV είναι αυξημένη, το οποίο προκύπτει από την αυθαίρετη

ενεργοποίηση του κλιματισμού για 4 ώρες. Το γεγονός αυτό επιφέρει σχετικά χαμηλές τιμές στο κόστος, ωστόσο η απόκλιση από την ποιή του PMV είναι μεγάλη. Συγκεκριμένα, το κόστος χωρίς φωτοβολταϊκά είναι ίσο με 3.76 €, με την παρουσία φωτοβολταϊκών χωρίς συστοιχία μπαταριών είναι ίσο με 2.68 € εμφανίζοντας μείωση κατά 28.72 %, ενώ με την προσθήκη συστοιχίας μπαταριών το κόστος είναι ίσο με 1.99 €, εμφανίζοντας μείωση κατά 47.08 %.

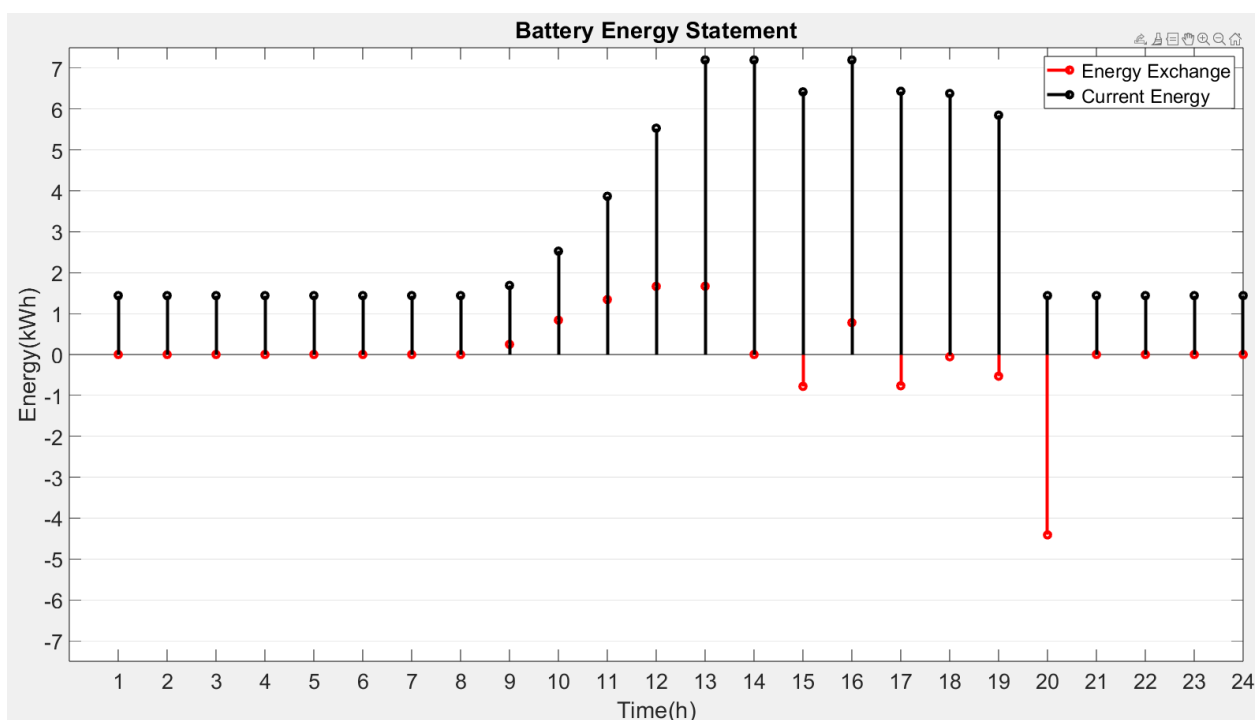


Σχήμα 4.76: Διάγραμμα ενέργειας κτηρίου σεναρίου 10 – χωρίς τη χρήση του συστήματος.

Σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήματος 4.76 υπάρχουν έντονες διακυμάνσεις στα φορτία, ιδιαίτερα από τις 15:00 και έπειτα. Στο διάστημα 13:00-14:00 το σύστημα διαχείρισης ενέργειας δίνει μεγάλο ποσό ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο, ωστόσο αντίστοιχα μεγάλα είναι τα ποσά ενέργειας που αντλεί κατά τις βραδινές ώρες.



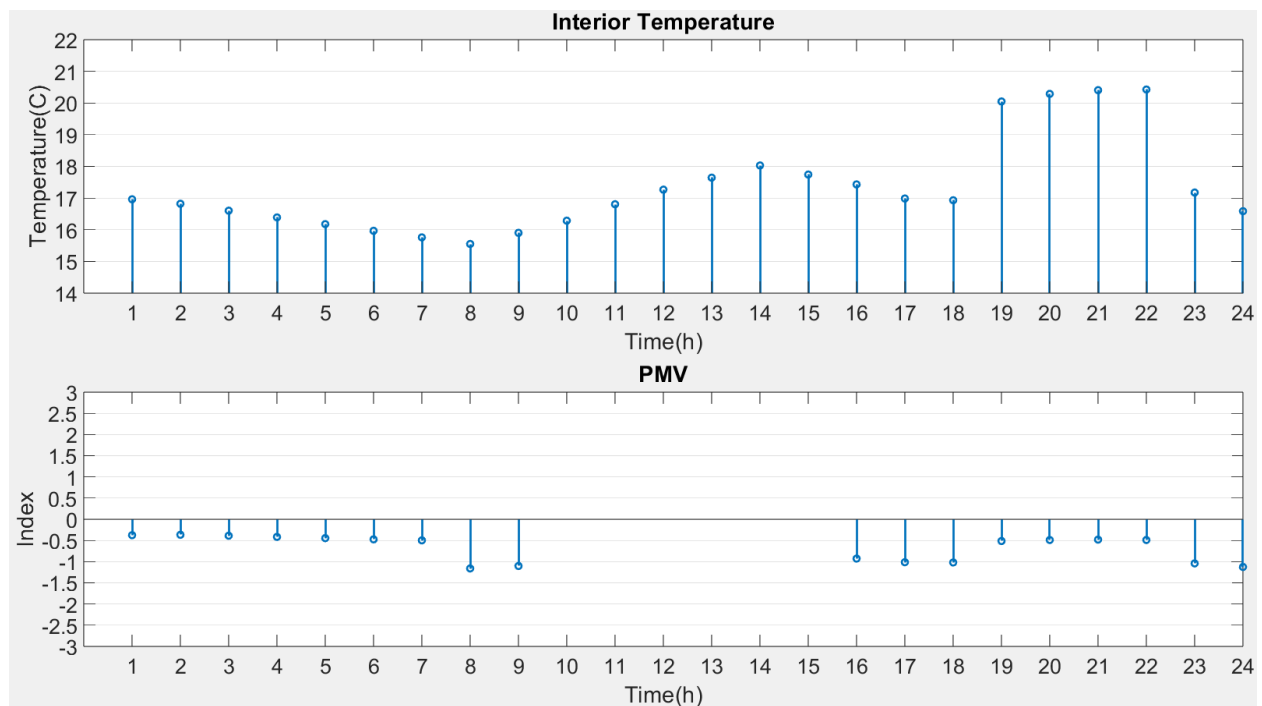
Σχήμα 4.77: Διάγραμμα SOC μπαταρίας σεναρίου 10 – χωρίς τη χρήση του συστήματος.



Σχήμα 4.78: Διάγραμμα ενέργειας μπαταρίας σεναρίου 10 – χωρίς τη χρήση του συστήματος.

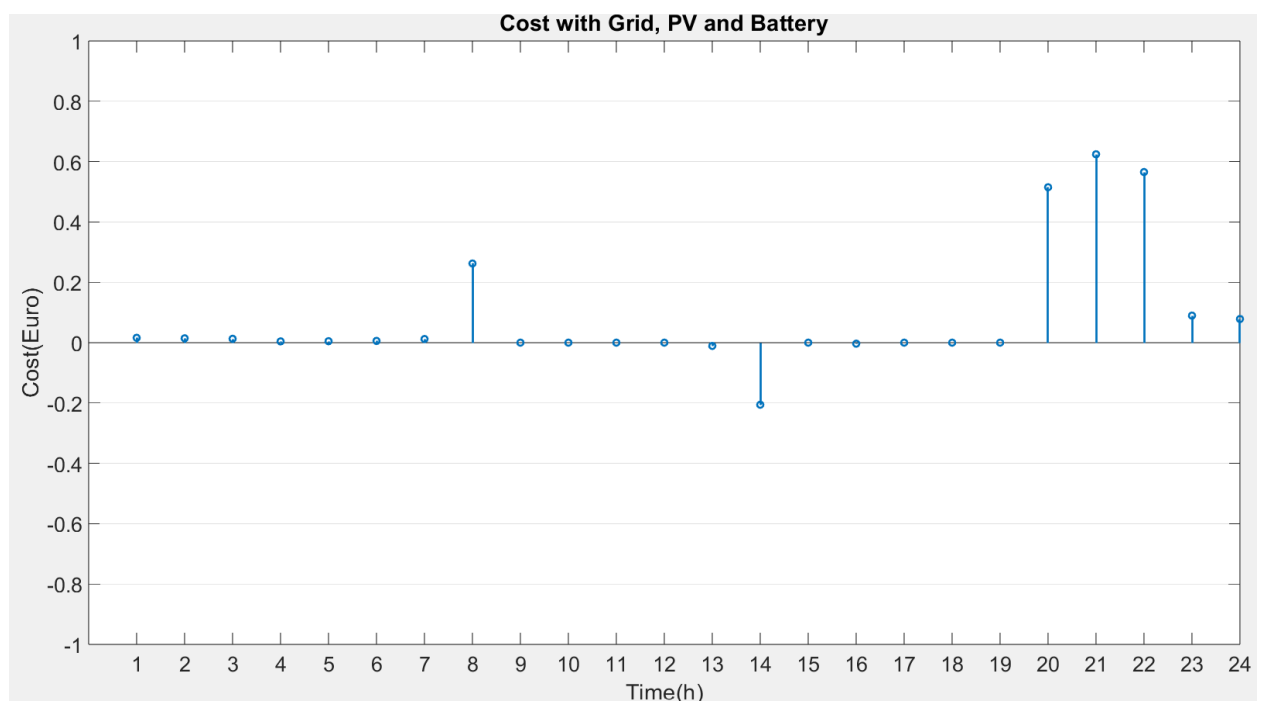
Η συστοιχία μπαταριών, όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.77 και 4.78 φορτίζεται με αργό ρυθμό, διατηρεί υψηλά επίπεδα κατά τη διάρκεια του μεσημεριού και τελικά αποφορτίζεται απότομα, όταν τα φορτία αυξάνονται προς το απόγευμα, αναγκάζοντας το σύστημα διαχείρισης να προμηθευτεί ενέργεια από το ηλεκτρικό δίκτυο τις επόμενες ώρες.





Σχήμα 4.79: Διάγραμμα θερμοκρασίας και PMV σεναρίου 10 – χωρίς χρήση του συστήματος.

Σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήματος 4.79, το PMV λαμβάνει τιμές εκτός ορίων για 7 δειγματοληψίες, καθώς το χρονικό διάστημα που ο χρήστης επιλέγει να ενεργοποιήσει τον κλιματισμό δεν επαρκεί για να διατηρήσει τη θερμική του άνεση. Μάλιστα, οι χαμηλές θερμοκρασίες τις εποχής, προκαλούν μείωση της θερμοκρασίας αμέσως μετά την απενεργοποίηση του κλιματισμού.



Σχήμα 4.80 Διάγραμμα ωριαίου κόστους κτηρίου σεναρίου 10 – χωρίς χρήση του συστήματος.

Στο διάγραμμα του Σχήματος 4.80, φαίνεται πως το κόστος από την αγορά ενέργειας κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα, με εξαίρεση τις χρονικές στιγμές που λειτουργεί ο κλιματισμός και ο θερμοσίφοντας. Ωστόσο, οι συσκευές αυτές έχουν μικρή διάρκεια και το συνολικό κόστος παραμένει χαμηλό.

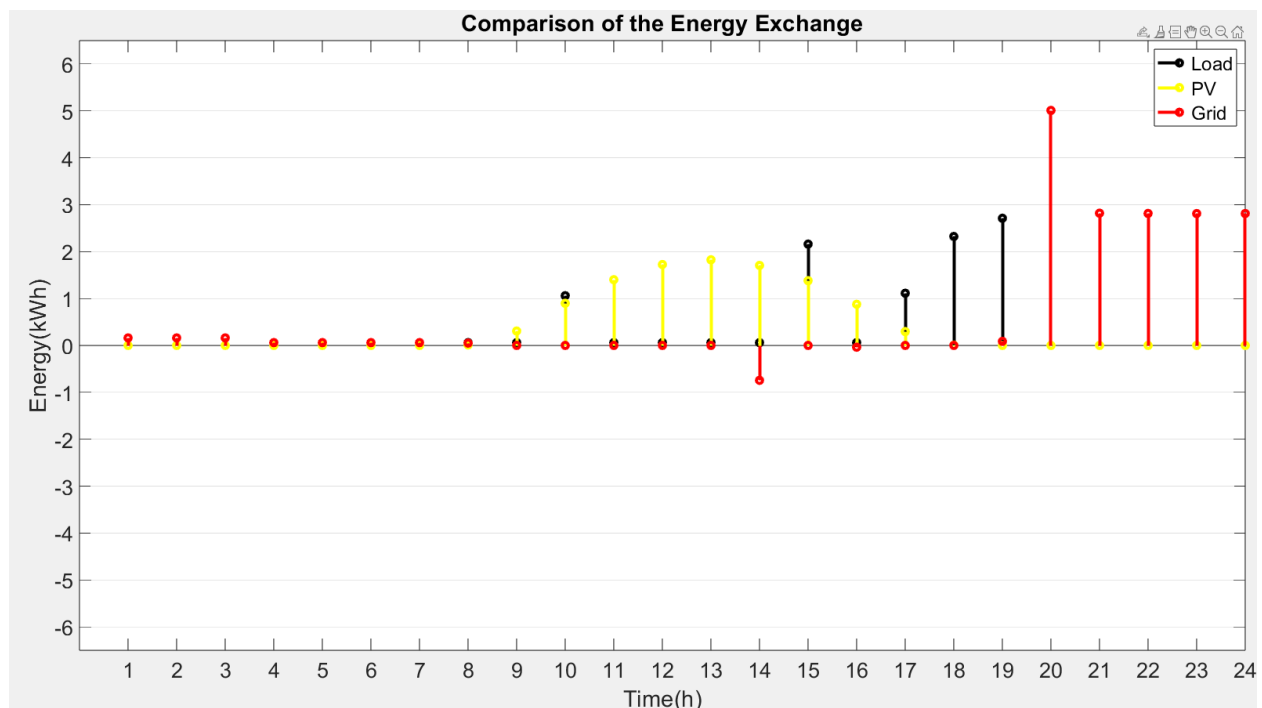
<b>Πίνακας 4.45: Χρονοπρογραμματισμός συσκευών σεναρίου 10 – με σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.</b>				
Συσκευή	Πλυντήριο ρούχων	Ηλ. σκούπα	Πλυντήριο πιάτων	Ψυγείο
Ώρα ενεργοποίησης	9:00	0:00	16:00	0:00
Συσκευή	TV	PC	Ηλ. κουζίνα	Φωτισμός
Ώρα ενεργοποίησης	21:00	19:00	14:00	18:00
Συσκευή	Κλιματισμός		Θερμοσίφοντας	
Ώρα ενεργοποίησης	17:00 (Διάρκεια 7 ώρες)		19:00 (Διάρκεια 1 ώρα)	

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.45 , οι συσκευές ενεργοποιούνται σε διάφορες χρονικές στιγμές μέσα στο εικοσιτετράωρο. Παρατηρείται ότι το σύστημα διαχείρισης ενέργειας φροντίζει να αξιοποιεί τις ώρες χαμηλής τιμολόγησης του ηλεκτρικού ρεύματος αλλά και τις ώρες που η παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά είναι αυξημένη. Παράλληλα λαμβάνει υπόψη και η θερμική άνεση του χρήστη, η οποία λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών, απαιτεί ενεργοποίηση του κλιματισμού για μεγάλα χρονικά διαστήματα

**Πίνακας 4.46: Αποτελέσματα κριτηρίων σεναρίου 10 – με σύστημα.**

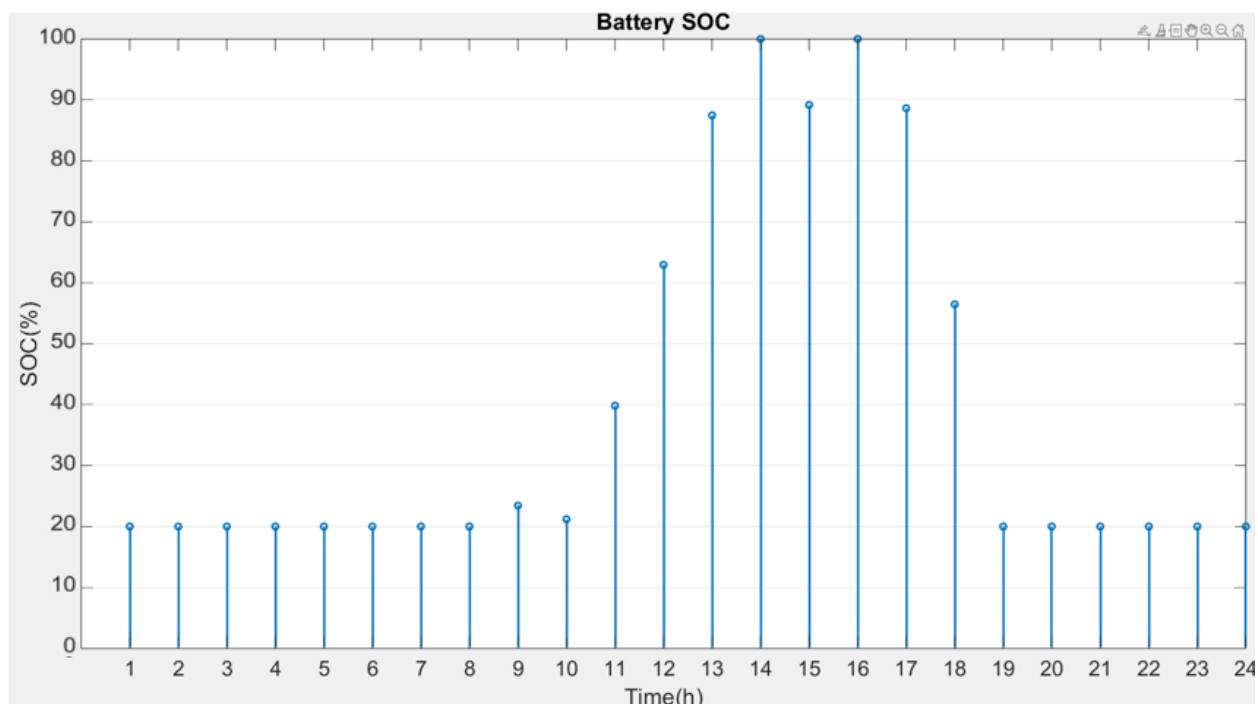
Συντελεστής χρονικής ικανοποίησης	Συντελεστής σταθερότητας δικτύου	Ποινή PMV	Κόστος χωρίς PV (€)	Κόστος χωρίς μπαταρία (€)	Κόστος με PV/μπαταρία (€)
9.88	0.98	0.83	4.71	3.56	2.93

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.46, πράγματι οι τιμές εμφανίζουν μία εξομάλυνση. Ο συντελεστής χρονικής ικανοποίησης παρουσιάζει αποτέλεσμα αρκετά κοντινό στο μέγιστο, το οποίο είναι ίσο με 9.88. Ο συντελεστής σταθερότητας δικτύου εμφανίζει αυξημένη τιμή, ωστόσο είναι δικαιολογημένη, καθώς το απόγευμα λειτουργούν ταυτόχρονα τα υψηλά φορτία του θερμοσίφωνα και του κλιματισμού, τα οποία είναι αναπόφευκτα, εφόσον συνυπολογίζεται η θερμική άνεση του χρήστη. Η ποινή που προκύπτει από την υπέρβαση των αποδεκτών ορίων του PMV ανέρχεται στα 0.83, η οποία είναι αποδεκτή για τη βαρύτητα που δίνεται, συνυπολογίζοντας το γεγονός ότι τις πρωινές ώρες ο κλιματισμός είναι απενεργοποιημένος με χαμηλές θερμοκρασίες. Τέλος, το κόστος βρίσκεται σε φυσιολογικά πλαίσια για την εποχή και ανέρχεται στα 2.93 €. Η διαφορά, όμως, μεγαλώνει στις περιπτώσεις που απουσιάζουν η μπαταρία και τα φωτοβολταϊκά, καθώς ανέρχονται στα 3.56 € και 4.71 € αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, με την παρουσία φωτοβολταϊκών χωρίς συστοιχία μπαταριών, το κόστος μειώνεται κατά 24.43 % και με την προσθήκη συστοιχίας μπαταριών το κόστος μειώνεται κατά 37.63 %. Οι τιμές του συντελεστή χρονικής ικανοποίησης και της ποινής του PMV είναι κοντινές με τις αντίστοιχες του σεναρίου 5. Ωστόσο οι τιμές του κόστους και του συντελεστή σταθερότητας δικτύου είναι σαφώς πιο αυξημένες, λόγω της εποχής που περιλαμβάνει χαμηλή παραγωγή ενέργειας και υψηλότερα φορτία. Συνεπώς, με την παρουσία συστήματος διαχείρισης ενέργειας, ο συντελεστής χρονικής ικανοποίησης μειώνεται κατά 1.2 %, ο συντελεστής σταθερότητας δικτύου αυξάνεται κατά 27.27 %, το κόστος με φωτοβολταϊκό σύστημα και μπαταρία αυξάνεται κατά 46.73 %, η ποινή, όμως, λόγω υπέρβασης ορίων του PMV μειώνεται κατά 41.55 %. Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας, προκειμένου να επιφέρει ισορροπία στα κριτήρια, αυξάνει τη διάρκεια του κλιματισμού σε σχέση με τον αντίστοιχο χρονοπρογραμματισμό που επιλέγει ο χρήστης και επομένως παρατηρούνται οι παραπάνω μεταβολές.

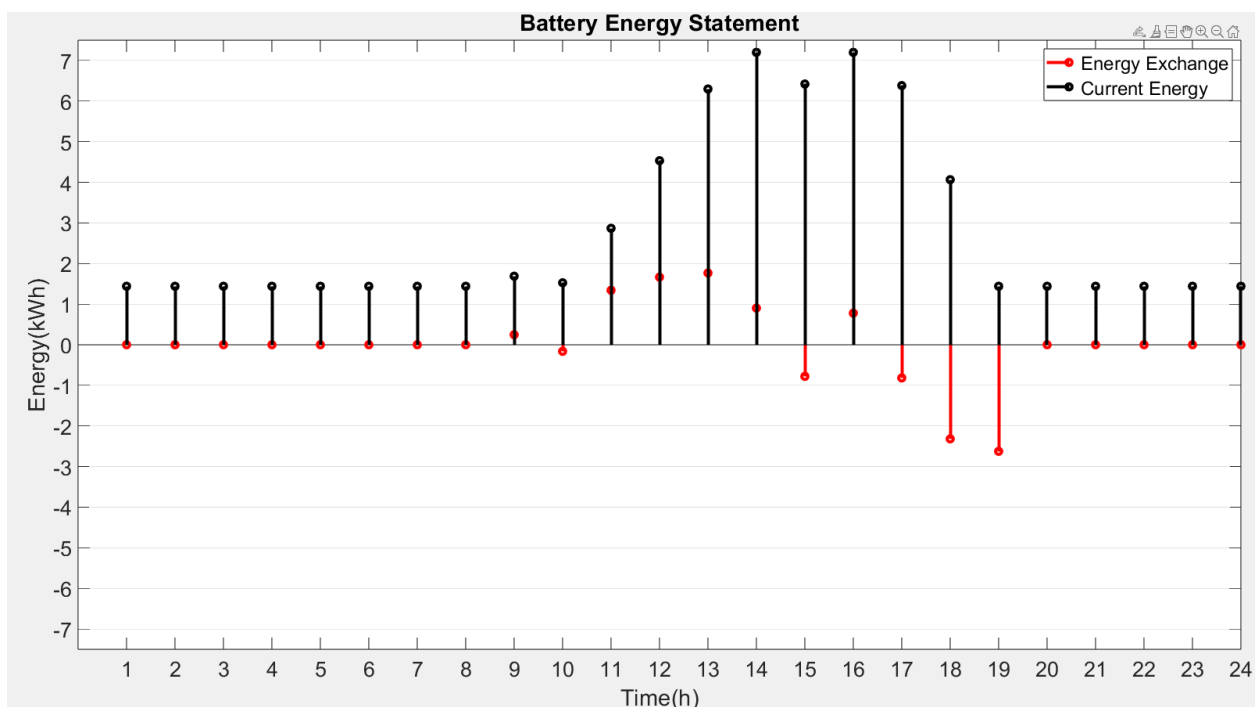


Σχήμα 4.81: Διάγραμμα ενέργειας κτηρίου σεναρίου 10 – με χρήση του συστήματος.

Σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήματος 4.81, μέχρι τις 20:00 το κτήριο προμηθεύεται ελάχιστη ενέργεια από το ηλεκτρικό δίκτυο, ενώ μάλιστα καταφέρνει να δώσει ένα μικρό ποσό στο διάστημα 13:00-14:00. Από τις 17:00 και έπειτα, η λειτουργία του κλιματισμού αυξάνει το συνολικό φορτίο, το οποίο αρχικά καλύπτεται από τη συστοιχία μπαταριών. Η αναπόφευκτη λειτουργία, όμως του θερμοσίφωνα σε συνδυασμό με τη λειτουργία του κλιματισμού, επιφέρουν μεγάλη αύξηση του φορτίου στο διάστημα 19:00-20:00. Το γεγονός αυτό επιδρά στον συντελεστή σταθερότητας δικτύου, ωστόσο το κόστος βρίσκεται σε αποδεκτά πλαίσια, καθώς η πώληση ενέργειας που πραγματοποιείται το μειώνει.



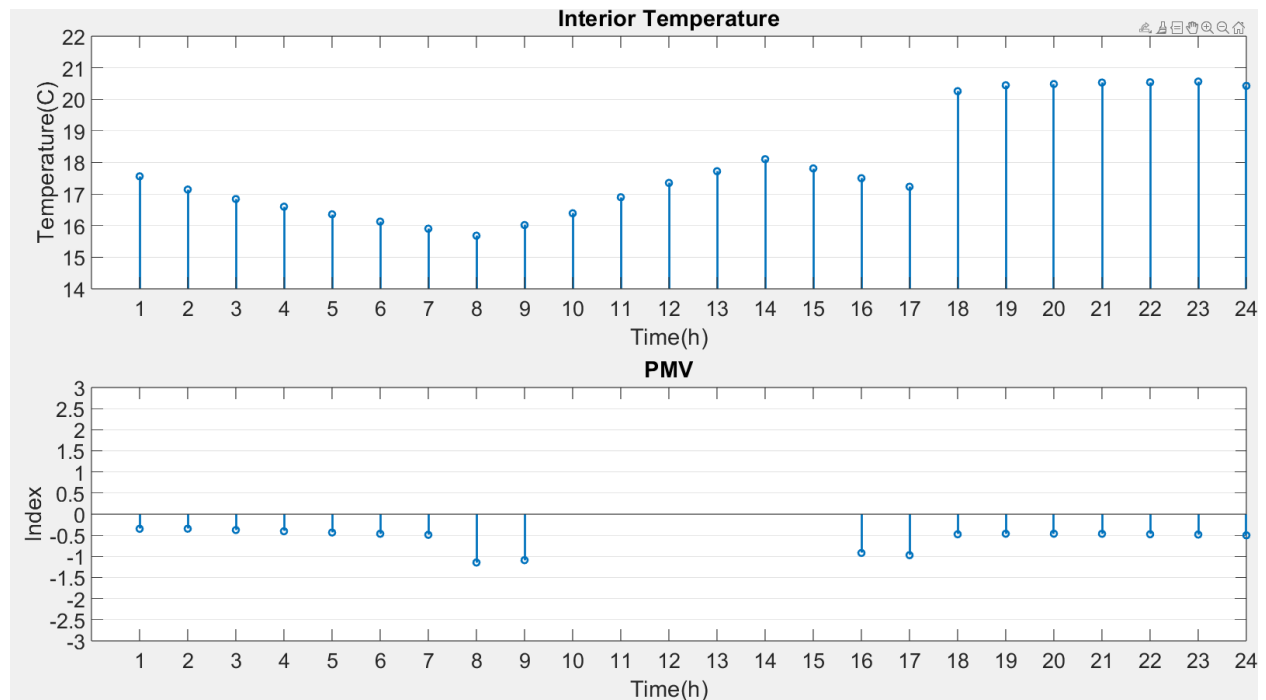
Σχήμα 4.82: Διάγραμμα SOC μπαταρίας σεναρίου 10 – με χρήση του συστήματος.



Σχήμα 4.83: Διάγραμμα ενέργειας μπαταρίας σεναρίου 10 – με χρήση του συστήματος.

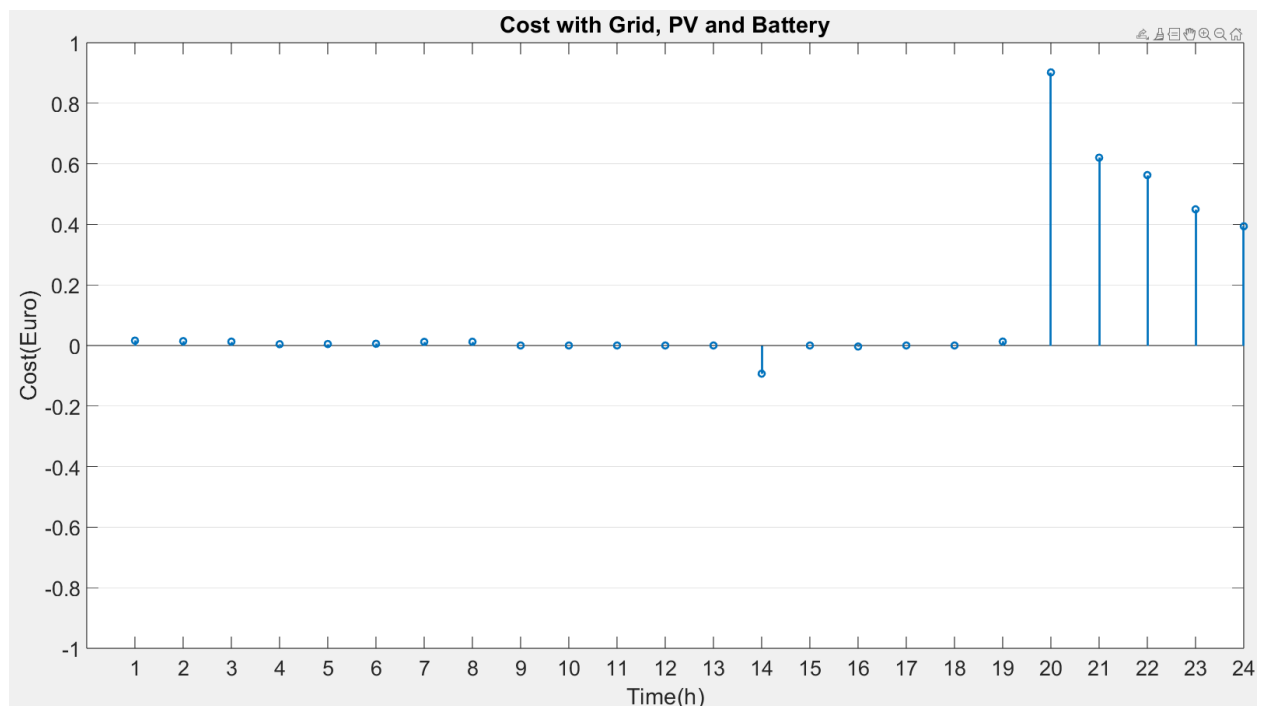
Στα Σχήματα 4.83 και 4.84 φαίνεται πως η συστοιχία μπαταριών ακολουθεί παρόμοιο μοτίβο σε σχέση με τα προηγούμενα σενάρια, καθώς από τις 10:00 μέχρι τις 14:00 λαμβάνει ποσά ενέργειας με σταθερό ρυθμό έως ότου μεγιστοποιηθεί η κατάσταση φόρτισής της. Το μεσημέρι δίνει κάποια μικρά ποσά, λόγω των ελλειμάτων ενέργειας που προκύπτουν μεταξύ των φορτίων και της παραγωγής από τα φωτοβολταϊκά, ωστόσο διατηρεί τα υψηλά ποσοστά φόρτισής της.

Από το απόγευμα, όμως, σε σύντομο χρονικό διάστημα εκφορτίζεται λόγω της αύξησης των φορτίων που πραγματοποιείται από τις 18:00 και έπειτα.



Σχήμα 4.84: Διάγραμμα θερμοκρασίας και PMV σεναρίου 10 – με χρήση του συστήματος.

Το εξισορροπημένο σενάριο επιφέρει αποδεκτά αποτελέσματα για το PMV. Στο μεγαλύτερο μέρος του εικοσιτετράωρου βρίσκεται εντός ορίων. Η τιμή πλησιάζει τη τιμή του -1 τις δύο πρώτες ώρες που ο χρήστης επιστρέφει στο κτήριο το μεσημέρι και ξεπερνά τη τιμή του -1 τις δύο πρώτες ώρες το πρωί, που οι θερμοκρασίες είναι χαμηλές και ο χρήστης μειώνει την ενδυματολογική του μόνωση. Μία περαιτέρω βελτίωση του συστήματος διαχείρισης ενέργειας μπορεί να εξαλείψει το πρόβλημα για εκείνο το χρονικό διάστημα, προσθέτοντας τη δυνατότητα να ενεργοποιεί και να απενεργοποιεί τον κλιματισμό παραπάνω από μία φορές μέσα στο εικοσιτετράωρο. Η επέκταση αυτή θα μείωνε την ποινή του PMV, η οποία είναι μεγαλύτερη σε σχέση με το αντίστοιχο σενάριο του καλοκαιριού.



Σχήμα 4.85: Διάγραμμα ωριαίου κόστους κτηρίου σεναρίου 10 – με χρήση του συστήματος.

Σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήματος 4.85, στο μεγαλύτερο μέρος του εικοσιτετραώρου η κοστολόγηση που προκύπτει από την προμήθεια ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο είναι χαμηλή. Παρά τη μικρή παραγωγή ενέργειας, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας κερδίζει ένα μικρό ποσό από την πώληση ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο. Ωστόσο, από τις 20:00 και έπειτα, τα φορτία αυξάνονται, η μπαταρία αποφορτίζεται και η παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά είναι μηδενική. Επομένως, το κόστος αυξάνεται, το οποίο όμως δεν ξεπερνά την τιμή του 1 € ακόμη και στο διάστημα 19:00-20:00, καθώς η τιμολόγηση (με εξαίρεση το διάστημα 21:00-22:00) είναι μειωμένη.

## 4.4 Εαρινοί μήνες

Επιλέγεται ενδεικτικά η 26<sup>η</sup> Απριλίου. Η παραγωγή ενέργειας στην παρούσα εποχή βρίσκεται σε επίπεδα ανάμεσα από τα αντίστοιχα της θερινής και της χειμερινής περιόδου. Η υψηλότερη τιμή που μπορεί να λάβει σε μία ώρα είναι 3 kWh, ενώ καταγράφονται τιμές ηλιοφάνειας μέχρι και το διάστημα 18:00-19:00. Ο χρήστης καθορίζει το περιθώριο ωρών ενεργοποίησης όπως στις παραπάνω περιπτώσεις. Σε ό,τι αφορά το φωτισμό, θεωρείται ότι ενεργοποιεί το σύνολο των φωτιστικών σωμάτων έπειτα από τη δύση του ηλίου, στις 20:00 με διάρκεια μέχρι τις 24:00. Η διάρκεια του ηλεκτρικού θερμοσίφωνα ορίζεται στη μισή ώρα, προκειμένου να συμπληρώσει το ζητούμενο ζεστό νερό. Λόγω της μειωμένης διάρκειας αλλά και της μεγαλύτερης θερμοκρασίας

του εισερχόμενου νερού, η κατανάλωσή του αναμένεται να είναι μειωμένη. Η ώρα ενεργοποίησης του κλιματισμού ορίζεται από το μεσημέρι, ωστόσο αναμένεται να παραμείνει απενεργοποιημένος, λόγω του θερμοστάτη. Εάν οι θερμοκρασίες δεν βρεθούν κάτω από τη θερμοκρασία των 20 βαθμών Κελσίου, ή πάνω από τους 28.5 °C, τότε ο κλιματισμός παραμένει σε κατάσταση αναμονής (standby). Το γεγονός αυτό ωφελεί σε μεγάλο βαθμό το σύστημα διαχείρισης ενέργειας, καθώς μία από τις πιο ενεργοβόρες συσκευές του κτηρίου παραμένει απενεργοποιημένη. Η αρχική κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας ορίζεται στο 40%, τιμή που αποκτά προς το τέλος της ημέρας στο εξισορροπημένο σενάριο και επομένως προσομοιώνεται η συμπεριφορά της για συνεχόμενα εικοσιτετράωρα που αφορούν τους συγκεκριμένους μήνες. Το κόστος που υπολογίζει το σύστημα διαχείρισης ενέργειας αποτελεί καθαρό κόστος και περιγράφεται από τη διαφορά των εσόδων από τα έξοδα αγοραπωλησίας ηλεκτρικής ενέργειας.



Date/Time	Dry Bulb Temperature [C]
04/26 @ 00:00:00	17.9
04/26 @ 01:00:00	18
04/26 @ 02:00:00	17.9
04/26 @ 03:00:00	17.9
04/26 @ 04:00:00	17.8
04/26 @ 05:00:00	17.7
04/26 @ 06:00:00	17.7
04/26 @ 07:00:00	17.6
04/26 @ 08:00:00	18.7
04/26 @ 09:00:00	19.7
04/26 @ 10:00:00	20.8
04/26 @ 11:00:00	21.3
04/26 @ 12:00:00	21.9
04/26 @ 13:00:00	22.4
04/26 @ 14:00:00	22.5
04/26 @ 15:00:00	22.7
04/26 @ 16:00:00	22.8
04/26 @ 17:00:00	22.5
04/26 @ 18:00:00	22.3
04/26 @ 19:00:00	22
04/26 @ 20:00:00	20.1
04/26 @ 21:00:00	18.1
04/26 @ 22:00:00	16.2
04/26 @ 23:00:00	15.9

Σχήμα 4.86: Εξωτερικές καταγεγραμμένες θερμοκρασίες για την ημέρα προσομοίωσης.

Στον Πίνακα 4.47 παρουσιάζονται οι προτιμήσεις του χρήστη σε ό,τι αφορά την λειτουργία των συσκευών κατά τους εαρινούς μήνες. Οι συσκευές με αστερίσκο (\*) υποδηλώνουν ότι είναι μη-προγραμματιζόμενες, επομένως το σύστημα διαχείρισης ενέργειας δεν δύναται να επιλέξει την ώρα ενεργοποίησής τους.

<b>Πίνακας 4.47: Κατάλογος των οικιακών συσκευών – εαρινή λειτουργία.</b>			
Συσκευή	Προτιμώμενη ώρα ενεργοποίησης	Κατανάλωση/ώρα (kWh)	Διάρκεια λειτουργίας (h)
Πλυντήριο ρούχων	7:00-23:00	1	1
Αυτόματη ηλεκτρική σκούπα (φόρτιση)	0:00-19:00	0.1	3
Πλυντήριο πιάτων	16:00-23:00	1	1
Ψυγείο*	0:00-0:00	0.06	24
Τηλεόραση*	21:00-21:00	0.1	3
Υπολογιστής*	19:00-19:00	0.1	2
Ηλεκτρική κουζίνα*	14:00-14:00	2.1	1
Φωτισμός*	20:00-24:00	0.4	4
Ηλεκτρικός θερμοσίφωνας	19:00-21:00	Μη-σταθερή	0.5
Κλιματισμός	15:00-18:00	Μη-σταθερή	Μη-σταθερή

#### 4.4.1 Σενάριο 11: Εξισορροπημένη βαρύτητα των συντελεστών

Το παρακάτω σενάριο, που αναπτύσσεται και στα σενάρια 5 και 10, είναι το πιο σύνηθες και προτείνεται για τη χρήση του συστήματος διαχείρισης ενέργειας, προκειμένου να δίνεται βαρύτητα και στα τέσσερα κριτήρια, καθένα από τα οποία είναι πολύ σημαντικό.

**Πίνακας 4.48: Παράμετροι εισόδου για το σενάριο 11.**

Βαρύτητα συντελεστή χρονικής ικανοποίησης	Βαρύτητα ποινής PMV	Βαρύτητα συντελεστή σταθερότητας δικτύου	Βαρύτητα κόστους ενέργειας
0.25	0.25	0.25	0.25
Ενδυματολογική μόνωση	Επίπεδο δραστηριότητας	Λειτουργία κτηρίου	Λειτουργία φωτισμού
1.3 (0:00-7:00) 0.7 (7:00-24:00)	1 (0:00-7:00) 1.2 (7:00-24:00)	0:00-9:00 & 15:00-24:00	20:00-24:00
Ανώτατο επίπεδο θερμοκρασίας HVAC	Κατώτατο επίπεδο θερμοκρασίας HVAC	Θερμοκρασία εισερχόμενου κρύου νερού	Θερμοκρασία θερμοσίφωνα
28.5 °C	19 °C	18 °C	40 °C

**Πίνακας 4.49: Χρονοπρογραμματισμός συσκευών σεναρίου 11 – με σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.**

Συσκευή	Πλυντήριο ρούχων	Ηλ. σκούπα	Πλυντήριο πιάτων	Ψυγείο
Ωρα ενεργοποίησης	18:00	0:00	16:00	0:00
Συσκευή	TV	PC	Ηλ. κουζίνα	Φωτισμός
Ωρα ενεργοποίησης	21:00	19:00	14:00	20:00
Συσκευή	Κλιματισμός		Θερμοσίφωνα	
Ωρα ενεργοποίησης	15:00 (Διάρκεια 0 ώρες)		19:00 (Διάρκεια 0.5 ώρες)	

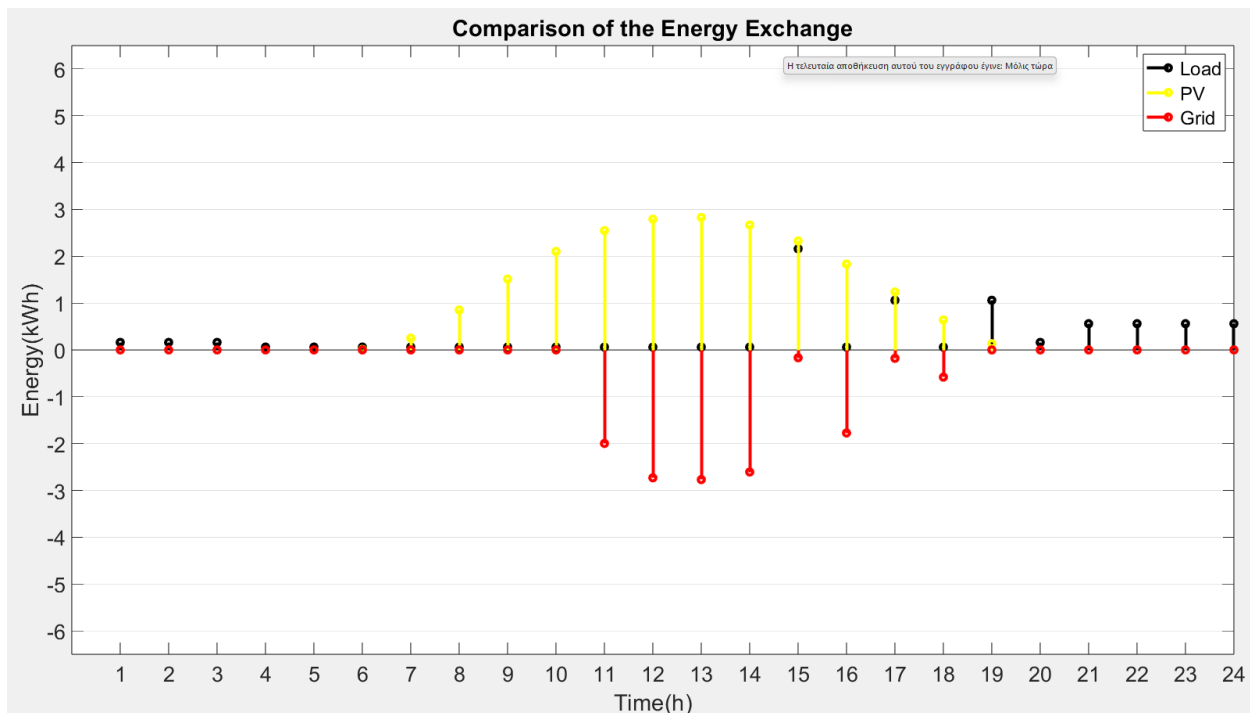
Το μοτίβο χρονοπρογραμματισμού των συσκευών του Πίνακα 4.49 είναι παρόμοιο με το αντίστοιχο των θερινών μηνών. Παρατηρείται ότι κατά τη διάρκεια του μεσημεριού στην οποία η τιμολόγηση του ηλεκτρικού δικτύου είναι αυξημένη, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας επιλέγει να μειώσει τα φορτία, προκειμένου να δώσει την διαθέσιμη ενέργεια στο δίκτυο, αφού πρωτίστως έχει φορτίσει τη συστοιχία μπαταριών. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το σύστημα δεν ενεργοποιεί τον κλιματισμό, καθώς ο χρήστης βρίσκεται στα επιτρεπτά όρια του PMV, χωρίς επέμβαση. Επομένως, παραμένει απενεργοποιημένος, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το κόστος, όπως άλλωστε επιφέρει και η λειτουργία του θερμοστάτη.

**Πίνακας 4.50: Αποτελέσματα κριτηρίων σεναρίου 11 – με σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.**

Συντελεστής χρονικής ικανοποίησης	Συντελεστής σταθερότητας δικτύου	Ποινή PMV	Κόστος χωρίς PV (€)	Κόστος χωρίς μπαταρία (€)	Κόστος με PV/μπαταρία (€)
9.51	0	0	1.42	-0.94	-1.29

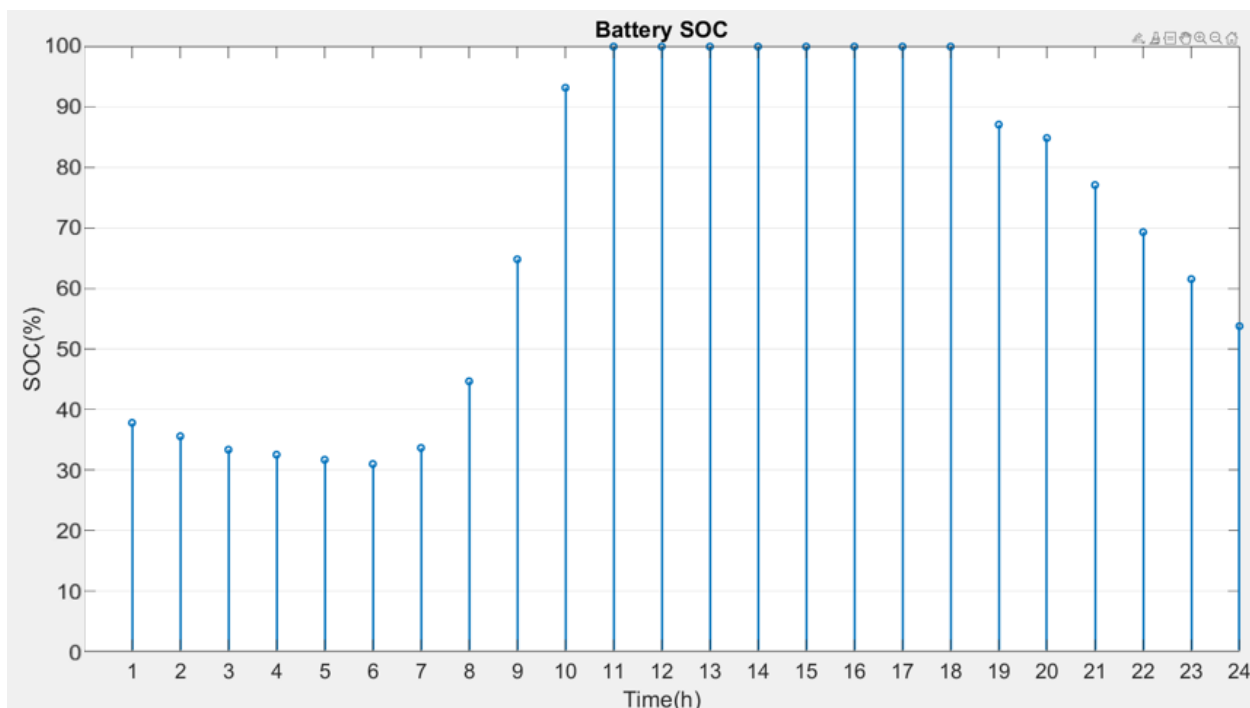
Τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.50 είναι πολύ ενθαρρυντικά, εφόσον οι τιμές του συντελεστή σταθερότητας δικτύου και της ποινής που προκύπτει από την υπέρβαση των αποδεκτών του ορίων του PMV, είναι μηδενικές. Παράλληλα, αποδεκτή τιμή παρουσιάζει ο συντελεστής χρονικής ικανοποίησης αλλά και το κόστος, το οποίο είναι αρνητικό. Παρά το γεγονός ότι η παραγωγή ενέργειας είναι μειωμένη σε σχέση με το καλοκαίρι, το χαμηλό φορτίο επιφέρει ένα μικρό κέρδος. Συγκεκριμένα, το κόστος χωρίς την παρουσία φωτοβολταϊκού συστήματος είναι ίσο με 1.42 €. Με την παρουσία φωτοβολταϊκών χωρίς συστοιχία μπαταριών το κόστος είναι ίσο με -0.94 € (κέρδος) και εμφανίζει μείωση 166.2 %, ενώ με τη προσθήκη συστοιχίας μπαταριών είναι ίσο με -1.29 € (κέρδος) και εμφανίζει μείωση 191.55 %. Επιπρόσθετα, με την παρουσία συστήματος διαχείρισης ενέργειας, ο συντελεστής χρονικής ικανοποίησης μειώνεται κατά 4.9 % σε σύγκριση με τη μη-χρήση του, ο συντελεστής σταθερότητας δικτύου παραμένει μηδενικός (λόγω αυξημένης παραγωγής των φωτοβολταϊκών), το κόστος με φωτοβολταϊκό σύστημα και μπαταρία μειώνεται κατά 31.63 % και η ποινή λόγω υπέρβασης ορίων του PMV παραμένει επίσης μηδενική, εφόσον οι θερμοκρασίες της εποχής βρίσκονται στα επιτρεπτά όρια.

Επομένως, στη παρούσα περίπτωση το σύστημα διαχείρισης ενέργειας μειώνει το ημερήσιο κόστος ενέργειας με μία μικρή μείωση στο συντελεστή χρονικής ικανοποίησης του χρήστη. Σε σύγκριση με τα σενάρια του χειμώνα και του καλοκαιριού που προσδίδουν εξισορροπημένη βαρύτητα των συντελεστών, στο παρόν σενάριο παρατηρείται μείωση του ημερησίου κόστους ενέργειας, καθώς το σύστημα διαχείρισης ενέργειας δεν καλείται να αντιμετωπίσει ακραίες θερμοκρασίες στο εσωτερικό με χρήση του κλιματισμού, εφόσον αυτές βρίσκονται σε επιτρεπτά όρια την άνοιξη.

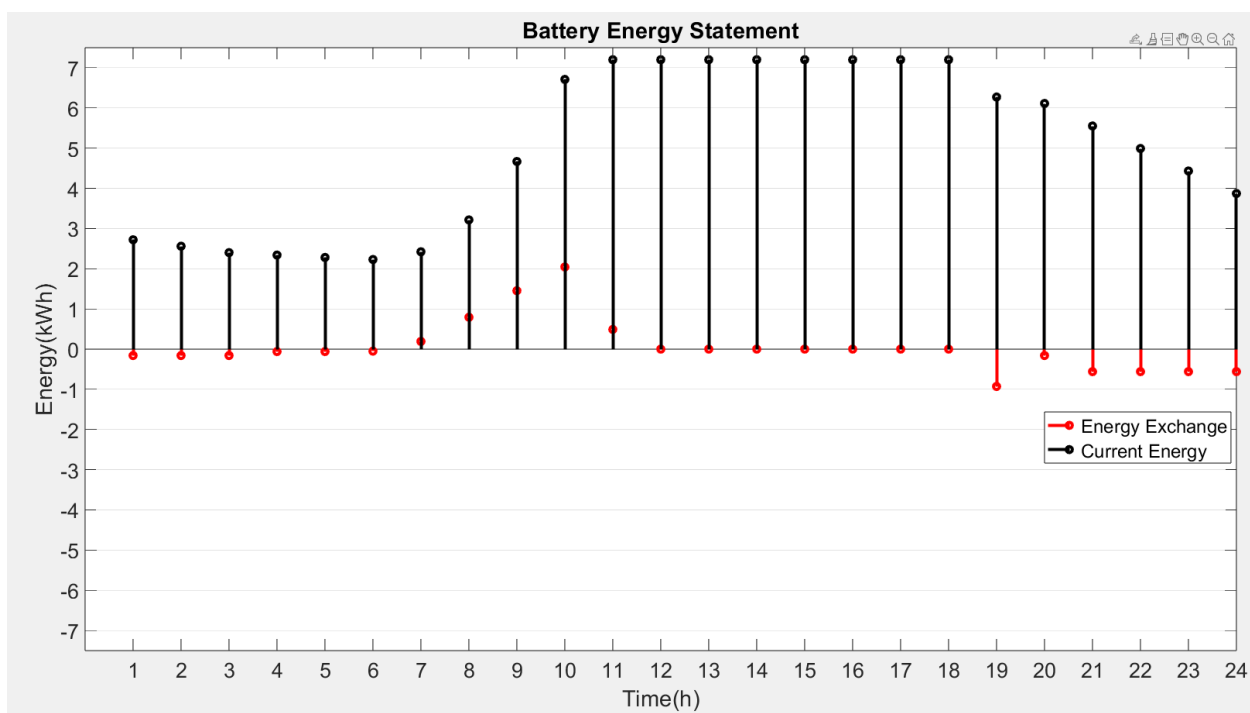


Σχήμα 4.88: Διάγραμμα ενέργειας κτηρίου Σεναρίου 11 – Με χρήση του συστήματος.

Στο διάγραμμα του Σχήματος 4.88 φαίνεται πως η παραγωγή ενέργειας είναι ομοιόμορφα κατανομημένη και έχει τιμές μέχρι το διάστημα 18:00-19:00. Δεν ξεπερνά τις 3 kWh σε μία ώρα, ωστόσο το φορτίο είναι αντίστοιχα μειωμένο. Τις πρώτες πρωινές ώρες ενεργοποιούνται ελάχιστα φορτία, όπως συμβαίνει μέχρι και το διάστημα 14:00-15:00. Η πλειονότητα των φορτίων ενεργοποιείται από το μεσημέρι και έπειτα και φαίνεται πως καλύπτονται τόσο απευθείας από τη παραγωγή των φωτοβολταϊκών, όσο και από την συστοιχία μπαταριών αργότερα. Το θετικό είναι ότι η αγορά ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο παραμένει μηδενική σε όλο το χρονικό διάστημα του εικοσιτετραώρου, ενώ μάλιστα η επιλογή του συστήματος διαχείρισης ενέργειας να μην ενεργοποιήσει συσκευές νωρίς το μεσημέρι, επιφέρει ένα σημαντικό κέρδος, προσδίδοντας το πλεόνασμα ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο. Η κατανάλωση ενέργειας του θερμοσίφωνα πράγματι είναι μειωμένη.



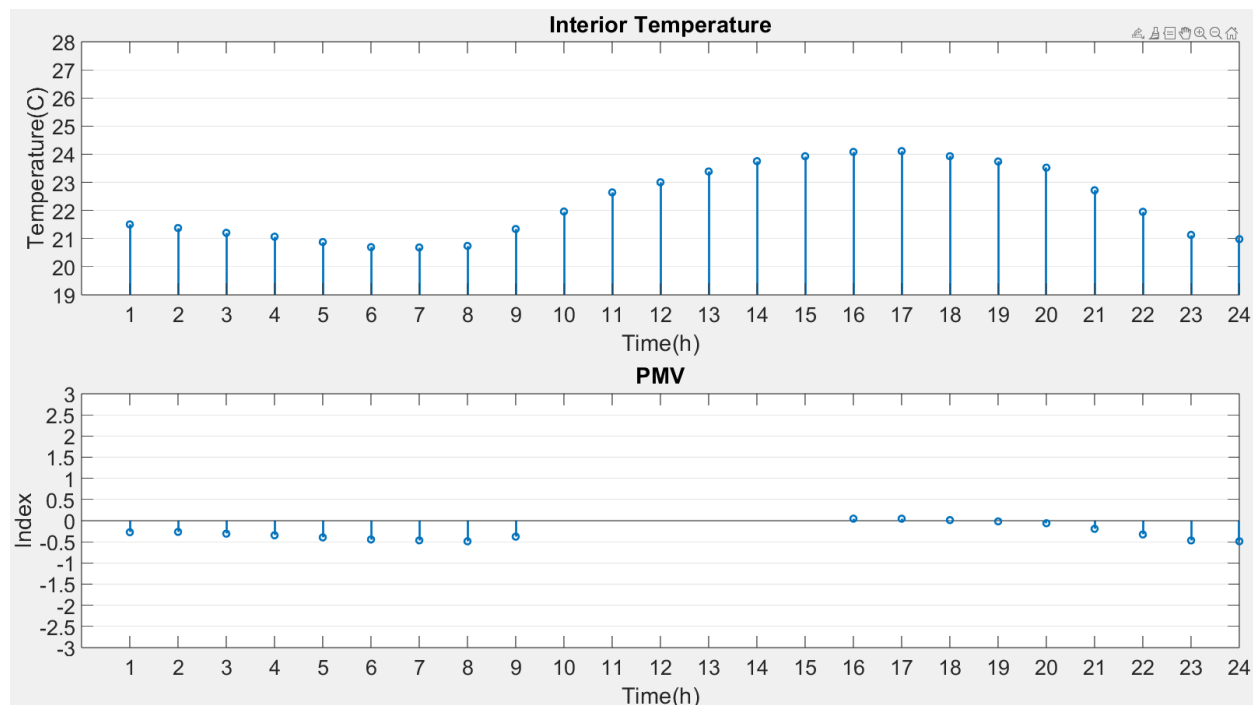
Σχήμα 4.89: Διάγραμμα SOC μπαταρίας σεναρίου 11 – με χρήση του συστήματος.



Σχήμα 4.90: Διάγραμμα ενέργειας μπαταρίας σεναρίου 11 – με χρήση του συστήματος.

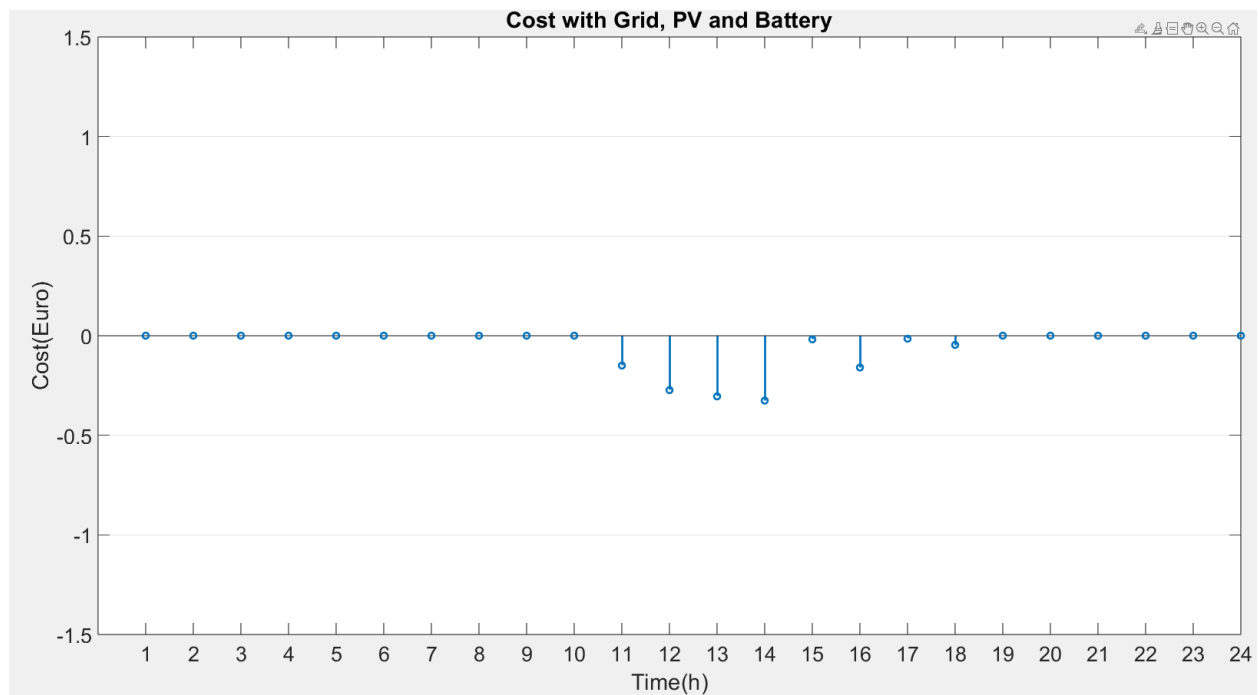
Τα χαμηλά φορτία έχουν θετική επίδραση και στην συστοιχία μπαταριών, όπως απεικονίζεται στα Σχήματα 4.89 και 4.90. Τις πρώτες πρωινές ώρες καλύπτει με άνεση τα λιγοστά φορτία και το μεσημέρι φορτίζεται πλήρως μέχρι και τις 18:00. Η δύση του ηλίου από εκείνο το διάστημα

και έπειτα, σε συνδυασμό με την αύξηση των φορτίων επιφέρουν μείωση του ποσοστού, το οποίο όμως μειώνεται ομαλά και καταλήγει να ξεπερνά το 50 % στο τέλος της προσομοίωσης.



Σχήμα 4.91: Διάγραμμα θερμοκρασίας και PMV σεναρίου 11 – με χρήση του συστήματος.

Στο διάγραμμα του Σχήματος 4.91 φαίνεται πως η θερμοκρασία του εσωτερικού του κτηρίου κυμαίνεται από 20 έως 24 °C. Σε συνδυασμό με την αντίστοιχη ενδυματολογική μόνωση που επιφέρει η εποχή, ο χρήστης καθ' όλη τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου βρίσκεται στα επιτρεπτά όρια του PMV, χωρίς την ενεργοποίηση του κλιματισμού.



Σχήμα 4.92: Διάγραμμα ωριαίου κόστους κτηρίου σεναρίου 11 – με χρήση του συστήματος.

Στο Σχήμα 4.92 φαίνεται πως στο σύνολο του εικοσιτετραώρου δεν πραγματοποιείται αγορά ενέργειας από το δίκτυο, ενώ μάλιστα κατά τη διάρκεια του μεσημεριού παρατηρείται ένα μικρό κέρδος από την πώληση του πλεονάσματος σε αυτό.

## 4.5 Φθινοπωρινοί μήνες

Επιλέγεται ενδεικτικά η 21<sup>η</sup> Οκτωβρίου. Η παραγωγή ενέργειας στην παρούσα εποχή βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα, ελαφρώς υψηλότερα από τα αντίστοιχα της χειμερινής περιόδου. Η υψηλότερη τιμή που μπορεί να λάβει σε μία ώρα είναι 2 kWh, ενώ καταγράφονται τιμές ηλιοφάνειας μέχρι και το διάστημα 17:00-18:00. Ο χρήστης προσδίδει το εύρος ωρών ενεργοποίησης όπως στις παραπάνω περιπτώσεις. Ο φωτισμός ενεργοποιείται από τις 18:00 έως τις 24:00. Η διάρκεια του ηλεκτρικού θερμοσίφωνα ορίζεται στη μία ώρα, ωστόσο η θερμοκρασία του εισερχόμενου κρύου νερού σε αυτόν είναι μεγαλύτερη από του χειμώνα, συνεπώς η κατανάλωσή του αναμένεται να είναι μικρότερη. Η ώρα ενεργοποίησης του κλιματισμού ορίζεται από το απόγευμα, ωστόσο αναμένεται να παραμείνει απενεργοποιημένος και σε αυτή τη περίπτωση, λόγω του θερμοστάτη. Εάν οι θερμοκρασίες δεν βρεθούν κάτω από τη θερμοκρασία των 19 °C, ή πάνω από τους 28.5 °C, τότε ο κλιματισμός παραμένει σε κατάσταση αναμονής (standby). Στην περίπτωση που ο κλιματισμός δεν λειτουργεί, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας επωφελείται, ωστόσο η παραγωγή είναι μικρότερη από το εαρινό σενάριο, επομένως αναμένεται μεγαλύτερο κόστος. Η αρχική κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας



ορίζεται στο 30%, τιμή που αποκτά προς το τέλος της ημέρας στο εξισορροπημένο σενάριο. Επομένως, και σε αυτή τη περίπτωση προσομοιώνεται η συμπεριφορά της για συνεχόμενα εικοσιτετράωρα που αφορούν τους φθινοπωρινούς μήνες. Το κόστος που υπολογίζει το σύστημα διαχείρισης ενέργειας αποτελεί καθαρό κόστος και περιγράφεται από τη διαφορά των εσόδων από τα έξοδα αγοραπωλησίας ηλεκτρικής ενέργειας.

Date/Time	Dry Bulb Temperature [C]
10/21 @ 00:00:00	15.7
10/21 @ 01:00:00	16.4
10/21 @ 02:00:00	16
10/21 @ 03:00:00	16
10/21 @ 04:00:00	17.2
10/21 @ 05:00:00	16
10/21 @ 06:00:00	16
10/21 @ 07:00:00	17.2
10/21 @ 08:00:00	18
10/21 @ 09:00:00	21
10/21 @ 10:00:00	20.6
10/21 @ 11:00:00	22
10/21 @ 12:00:00	22
10/21 @ 13:00:00	21.2
10/21 @ 14:00:00	22
10/21 @ 15:00:00	21
10/21 @ 16:00:00	21
10/21 @ 17:00:00	18
10/21 @ 18:00:00	17
10/21 @ 19:00:00	17.6
10/21 @ 20:00:00	16
10/21 @ 21:00:00	16
10/21 @ 22:00:00	16.4
10/21 @ 23:00:00	15

Σχήμα 4.93: Εξωτερικές καταγεγραμμένες θερμοκρασίες για την ημέρα προσομοίωσης.

Στον Πίνακα 4.51 παρουσιάζονται οι προτιμήσεις του χρήστη σε ό,τι αφορά την λειτουργία των συσκευών κατά τους φθινοπωρινούς μήνες. Οι συσκευές με αστερίσκο (\*) υποδηλώνουν ότι

είναι μη-προγραμματιζόμενες, επομένως το σύστημα διαχείρισης ενέργειας δεν δύναται να επιλέξει την ώρα ενεργοποίησής τους.

<b>Πίνακας 4.51: Κατάλογος των οικιακών συσκευών – φθινοπωρινή λειτουργία.</b>			
Συσκευή	Προτιμώμενη ώρα ενεργοποίησης	Κατανάλωση/ώρα (kWh)	Διάρκεια λειτουργίας (h)
Πλυντήριο ρούχων	7:00-23:00	1	1
Αυτόματη ηλεκτρική σκούπα (Φόρτιση)	0:00-19:00	0.1	3
Πλυντήριο πιάτων	16:00-23:00	1	1
Ψυγείο*	0:00-0:00	0.06	24
Τηλεόραση*	21:00-21:00	0.1	3
Υπολογιστής*	19:00-19:00	0.1	2
Ηλεκτρική κουζίνα*	14:00-14:00	2.1	1
Φωτισμός*	18:00-24:00	0.4	4
Ηλεκτρικός θερμοσίφωνας	19:00-21:00	Μη-σταθερή	1
Κλιματισμός	18:00-21:00	Μη-σταθερή	Μη-σταθερή

#### 4.5.1 Σενάριο 12: Εξισορροπημένη βαρύτητα των συντελεστών

Το σενάριο 12 ακολουθεί την λογική της εξισορροπημένης βαρύτητας και πραγματοποιείται κατά τους φθινοπωρινούς μήνες, κατά τους οποίους η παραγωγή ενέργειας είναι μειωμένη, ωστόσο οι θερμοκρασίες της περιοχής επιφέρουν μία ιδανική εσωτερική ατμόσφαιρα, στην οποία δεν χρειάζεται επέμβαση από τον κλιματισμό.

**Πίνακας 4.52: Παράμετροι εισόδου για το σενάριο 12.**

Βαρύτητα συντελεστή χρονικής ικανοποίησης	Βαρύτητα ποινής PMV	Βαρύτητα συντελεστή σταθερότητας δικτύου	Βαρύτητα κόστους ενέργειας
0.25	0.25	0.25	0.25
Ενδυματολογική μόνωση	Επίπεδο δραστηριότητας	Λειτουργία κτηρίου	Λειτουργία φωτισμού
1.3 (0:00-7:00) 0.8 (7:00-24:00)	1 (0:00-7:00) 1.2 (7:00-24:00)	0:00-9:00 & 15:00-24:00	18:00-24:00
Ανώτατο επίπεδο θερμοκρασίας HVAC	Κατώτατο επίπεδο θερμοκρασίας HVAC	Θερμοκρασία εισερχόμενου κρύου νερού	Θερμοκρασία θερμοσίφωνα
28.5 °C	19 °C	18 °C	40 °C

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.52, τα κριτήρια λαμβάνουν ίσες βαρύτητες στην συνάρτηση βελτιστοποίησης. Η ενδυματολογική μόνωση είναι ίση με 1.3 κατά τη διάρκεια του ύπνου των χρηστών και 0.8 στο υπόλοιπο διάστημα. Ο φωτισμός ενεργοποιείται από τις 18:00 και έπειτα. Η θερμοκρασία του εισερχόμενου νερού είναι ίση με 18 °C.

**Πίνακας 4.53: Χρονοπρογραμματισμός συσκευών σεναρίου 12 – με σύστημα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίηση.**

Συσκευή	Πλυντήριο Ρούχων	Ηλ. σκούπα	Πλυντήριο πιάτων	Ψυγείο
Ωρα ενεργοποίησης	9:00	0:00	16:00	0:00
Συσκευή	TV	PC	Ηλ. κουζίνα	Φωτισμός
Ωρα ενεργοποίησης	21:00	19:00	14:00	18:00
Συσκευή	Κλιματισμός		Θερμοσίφωνας	
Ωρα ενεργοποίησης	15:00 (Διάρκεια 0 ώρες)		19:00 (Διάρκεια 1 ώρα)	

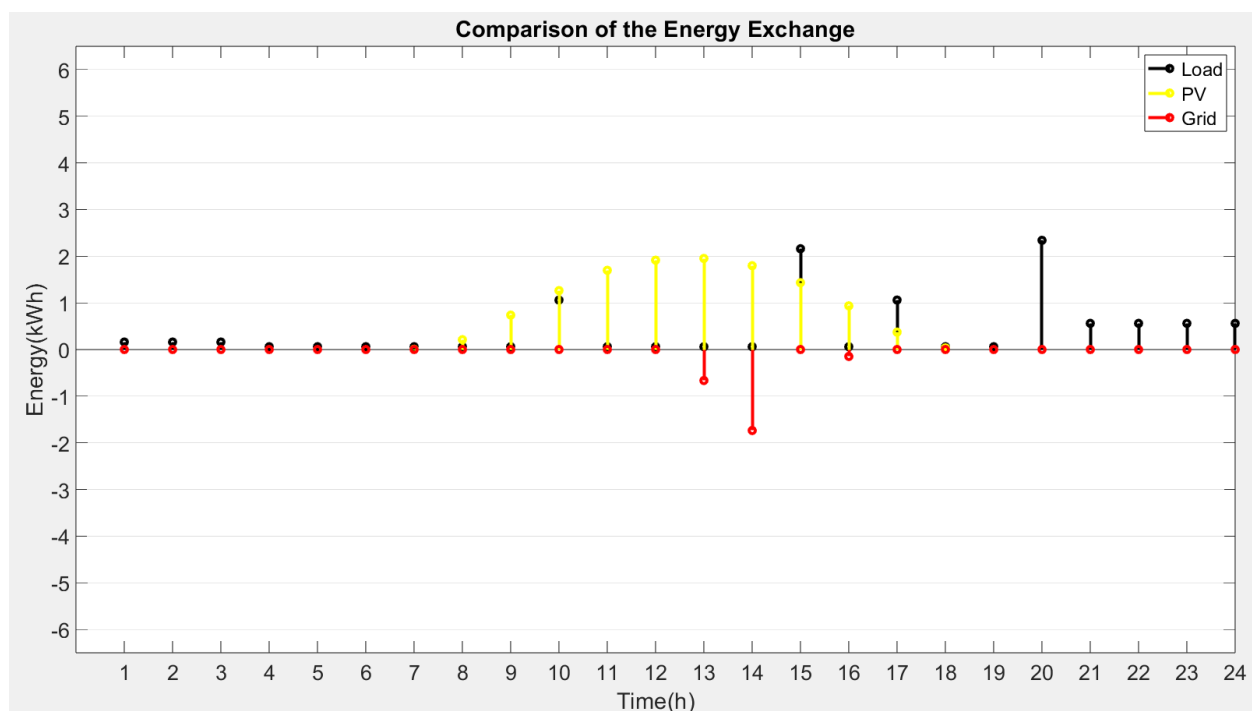
Ο χρονοπρογραμματισμός του Πίνακα 4.53 ακολουθεί παρόμοιο μοτίβο με το σενάριο 11 τους εαρινούς μήνες. Το σύστημα δεν ενεργοποιεί τις προγραμματιζόμενες συσκευές το μεσημέρι, προκειμένου να δώσει το πλεόνασμα ενέργειάς του στο ηλεκτρικό δίκτυο. Ο κλιματισμός και σε αυτή τη περίπτωση είναι απενεργοποιημένος.

**Πίνακας 4.54: Αποτελέσματα Κριτηρίων Σεναρίου 12 – με σύστημα διαχείρισης ενέργειας.**

Συντελεστής χρονικής ικανοποίησης	Συντελεστής σταθερότητας δικτύου	Ποινή PMV	Κόστος χωρίς PV (€)	Κόστος χωρίς μπαταρία (€)	Κόστος με PV/μπαταρία (€)
9.88	0	0.13	1.84	0.48	-0.30

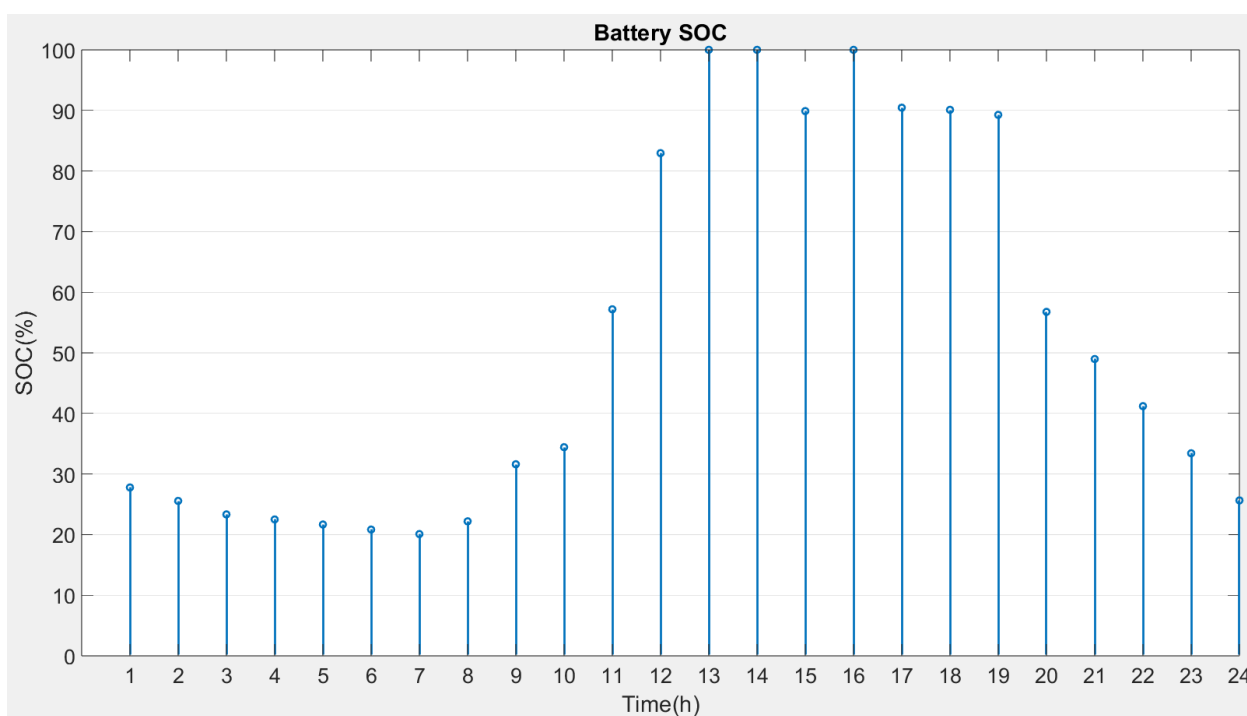
Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.54, τα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά, καθώς ο συντελεστής χρονικής ικανοποίησης είναι υψηλός. Ο συντελεστής σταθερότητας δικτύου είναι μηδενικός,

λόγω της αντίστοιχης μηδενικής αγοράς, ενώ εμφανίζεται μία μικρή ποινή στην τιμή του PMV που προκύπτει από την υπέρβαση των αποδεκτών του ορίων, η οποία όμως είναι αμελητέα. Θετικό είναι, επίσης, πως παρά τη μικρή παραγωγή ενέργειας, το σύστημα έχει κέρδος στο εικοσιτετράωρο, ωστόσο είναι μικρότερο από τους εαρινούς μήνες. Ο χρήστης κερδίζει 0.30 €, ενώ υπό την απουσία συστοιχίας μπαταριών και φωτοβολταϊκών, ο χρήστης χρεώνεται 0.48 € και 1.84 € αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, το κόστος με την προσθήκη φωτοβολταϊκών χωρίς συστοιχία μπαταριών μειώνεται κατά 62.97 %, ενώ με την παρουσία και της συστοιχίας μπαταριών μειώνεται κατά 116.3 %, επιφέροντας κέρδος στο χρήστη. Επιπρόσθετα, με την παρουσία συστήματος διαχείρισης ενέργειας, ο συντελεστής χρονικής ικανοποίησης μειώνεται κατά 1.2 % σε σύγκριση με τη μη-χρήση του, ο συντελεστής σταθερότητας δικτύου παραμένει μηδενικός, το κόστος με φωτοβολταϊκό σύστημα και μπαταρία μειώνεται κατά 83.33 % και η ποινή λόγω υπέρβασης ορίων του PMV παραμένει στην τιμή 0.13, εφόσον ο κλιματισμός παραμένει απενεργοποιημένος και στις δύο περιπτώσεις. Όπως στο σενάριο 11 που πραγματοποιείται την άνοιξη, έτσι και στο παρόν το σύστημα διαχείρισης ενέργειας μειώνει το ημερήσιο κόστος ενέργειας, με μία μικρή μείωση του συντελεστή χρονικής ικανοποίησης. Οι θερμοκρασίες του φθινοπώρου δεν απαιτούν χρήση του κλιματισμού, επομένως το σύστημα διαχείρισης ενέργειας λαμβάνει ικανοποιητικές τιμές για το PMV χωρίς να πραγματοποιεί περαιτέρω ενέργειες για αυτό.

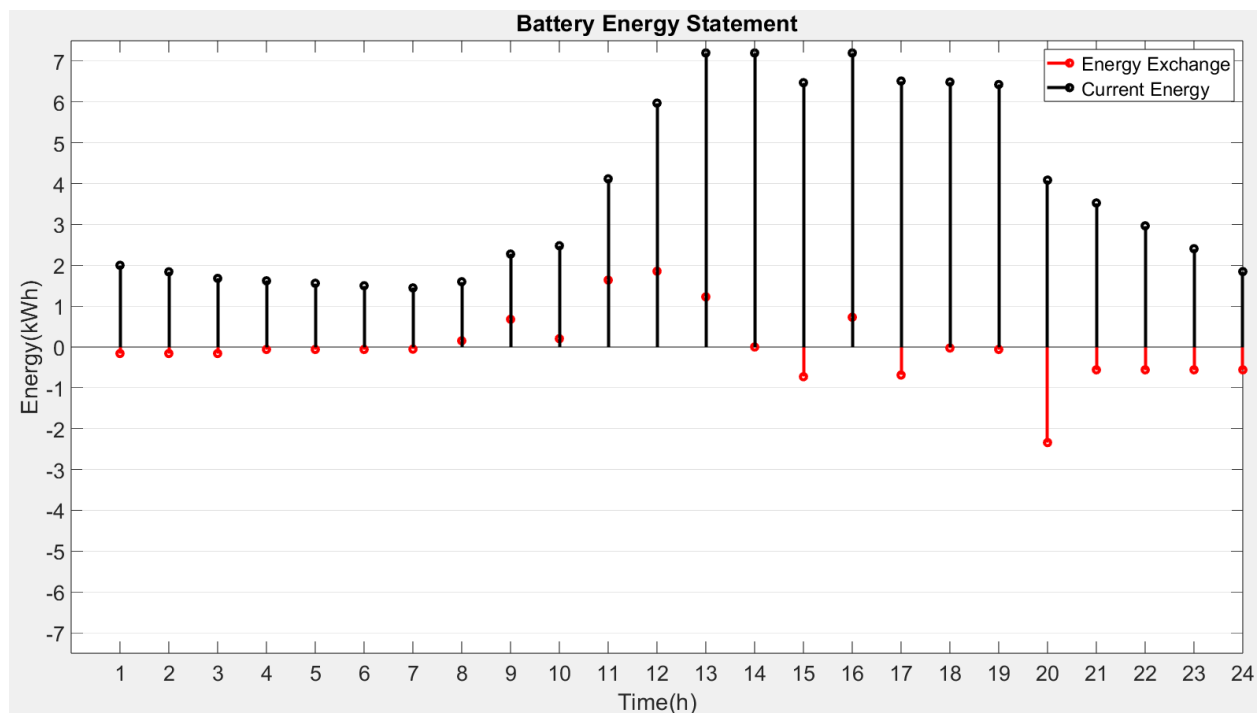


Σχήμα 4.94: Διάγραμμα ενέργειας κτηρίου σεναρίου 12 – με χρήση του συστήματος.

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.94, η παραγωγή ενέργειας αγγίζει τις 2 kWh κατά το μεσημέρι, ωστόσο δεν τις ξεπερνά. Είναι γεγονός ότι είναι μεγαλύτερη από τους χειμερινούς μήνες, αλλά μικρότερη από τους εαρινούς. Τα φορτία είναι ελαφρώς αυξημένα από την άνοιξη, λόγω της μεγαλύτερης διάρκειας του θερμοσίφωνα, ωστόσο ο κλιματισμός είναι απενεργοποιημένος σε όλη τη διάρκεια και σε αυτή τη περίπτωση. Συνεπώς, στο διάστημα 12:00-14:00 δίνεται ενέργεια στο ηλεκτρικό δίκτυο, ενώ η προμήθεια από αυτό είναι μηδενική. Η πλειονότητα των φορτίων κατευθύνεται προς το βράδυ. Το σύνολό τους, όμως, καλύπτεται είτε απευθείας από τη παραγωγή των φωτοβολταϊκών, είτε από τη συστοιχία μπαταριών.

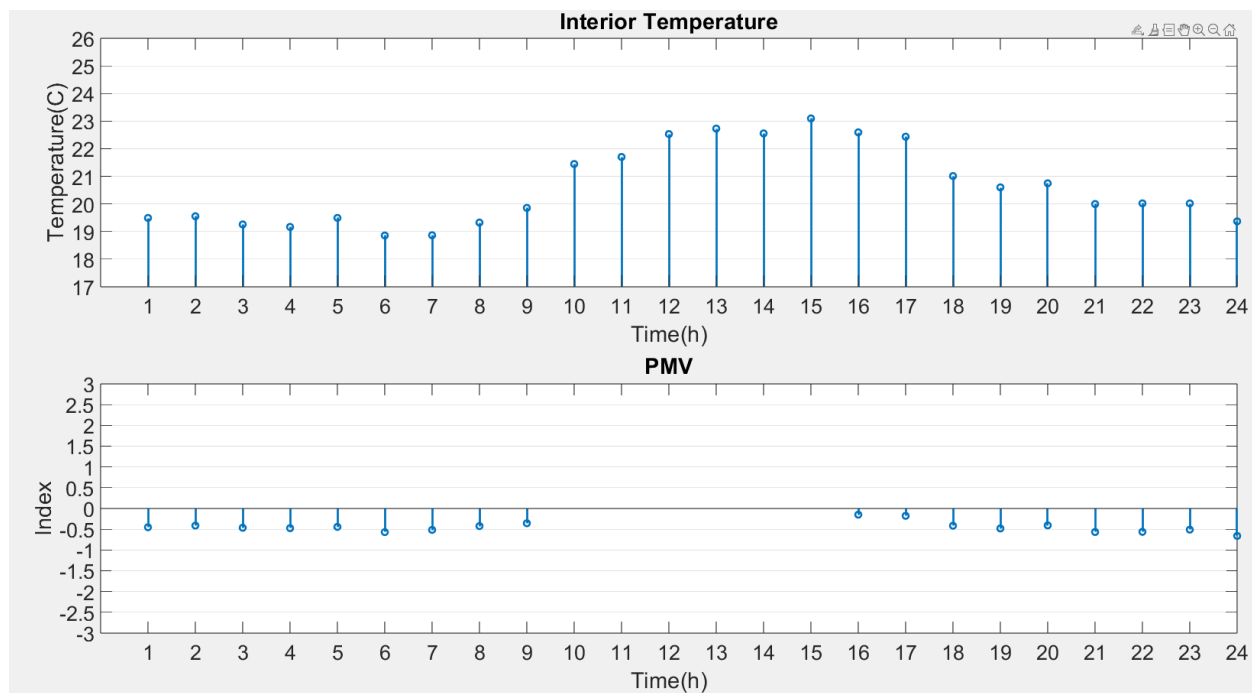


Σχήμα 4.95: Διάγραμμα SOC μπαταρίας σεναρίου 12 – με χρήση του συστήματος.



Σχήμα 4.96: Διάγραμμα ενέργειας μπαταρίας σεναρίου 12 – με χρήση του συστήματος.

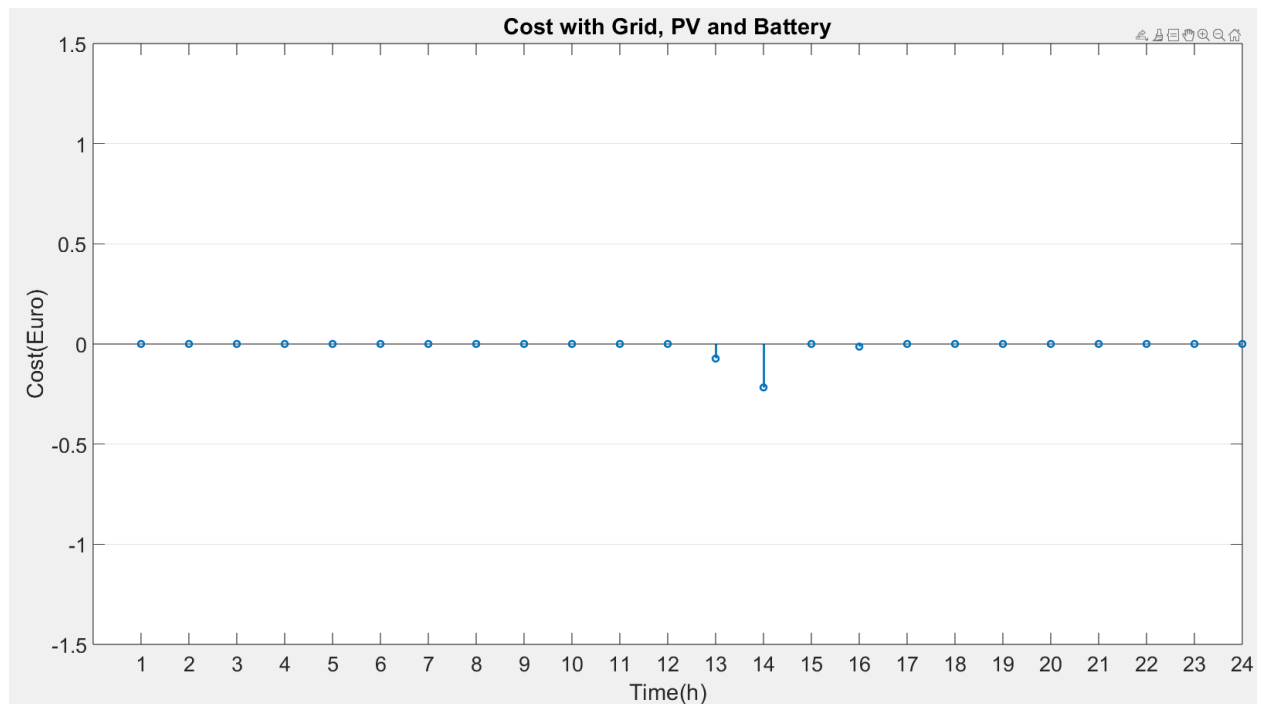
Στα Σχήματα 4.95 και 4.96 φαίνεται πως η συστοιχία μπαταριών είναι σε θέση να καλύψει τα φορτία στις πρώτες πρωινές ώρες μέχρι να φτάσει στο ελάχιστο της κατάστασης φόρτισής της. Ωστόσο, το πλεόνασμα ενέργειας την φορτίζει πλήρως σε μικρό χρονικό διάστημα και κρατάει υψηλά τα επίπεδά της μέχρι και τις 19:00. Από εκείνη τη χρονική στιγμή και έπειτα, τα φορτία τροφοδοτούνται εξ ολοκλήρου από εκείνη και δύναται να τα καλύψει χωρίς να αποφορτιστεί πλήρως.



Σχήμα 4.97: Διάγραμμα θερμοκρασίας και PMV σεναρίου 12 – με χρήση του συστήματος.

Η εσωτερική θερμοκρασία του κτηρίου κυμαίνεται από 19 έως 23 °C. Το PMV φαίνεται να βρίσκεται στα επιτρεπτά όρια στο μεγαλύτερο μέρος του εικοσιτετραώρου, ωστόσο υπάρχουν στιγμές που βρίσκεται ελάχιστα κάτω από -0.5. Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας όμως, με βάση τη βαρύτητα που διαθέτει για τη ποινή που προκύπτει από την υπέρβαση των ορίων του PMV, θεωρεί ότι το κέρδος που θα αποκομιστεί στο PMV από την ενεργοποίηση του κλιματισμού είναι πολύ μικρό σε σχέση με το έλλειμμα που θα προκύψει στα υπόλοιπα κριτήρια. Επομένως, η μικρή απόκλιση σε ορισμένες χρονικές στιγμές θεωρείται αμελητέα και ο κλιματισμός παραμένει απενεργοποιημένος.





Σχήμα 4.98: Διάγραμμα ωριαίου κόστους κτηρίου σεναρίου 12 – με χρήση του συστήματος.

Στο Σχήμα 4.98 φαίνεται πως πραγματοποιείται μηδενική αγορά ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο, ενώ υπάρχει ένα μικρό κέρδος προς το μεσημέρι, από τη προσφορά ενέργειας σε αυτό.

# 5.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

Οι παραπάνω τιμές και τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4 αποδεικνύουν πως η ύπαρξη ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας σε ένα κτήριο επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα για κάθε σενάριο, σε σχέση με την εκάστοτε επιλογή των χρηστών του. Οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη είναι πολυάριθμες και μόνο ένα υπολογιστικό σύστημα μπορεί να βρει την βέλτιστη λύση, που συνδυάζει εξοικονόμηση ενέργειας και άνεση των χρηστών. Επομένως, για την αξιοποίηση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος σε ένα κτήριο, εκτός από τη σωστή μελέτη για την επιλογή μοντέλου και τοποθέτησης, η παρούσα εργασία προτείνει και ένα «έξυπνο» σύστημα διαχείρισης ενέργειας, προκειμένου να αξιοποιείται πλήρως η διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια με ταχύτερη απόσβεση του κόστους κατασκευής του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Παράλληλα, συμπεραίνεται ότι το φωτοβολταϊκό σύστημα επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα στο σύστημα διαχείρισης ενέργειας με τη χρήση συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, καθώς αξιοποιείται η προσφερόμενη ενέργεια σε οποιοδήποτε χρονικό διάστημα μέσα σε ένα εικοσιτετράωρο, όπως επίσης και η σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο, με τη δυνατότητα παροχής ενέργειας σε αυτό, συνοδευόμενη από το αντίστοιχο κέρδος στον συνολικό λογαριασμό του κτηρίου. Μάλιστα, ο έξυπνος μετρητής που παρέχει την πληροφορία ενός κυμαινόμενου τιμολογίου προσδίδει μία επιπλέον παράμετρο στο σύστημα για τον βέλτιστο χρονοπρογραμματισμό των συσκευών του κτηρίου, έχοντας επίδραση τόσο στην αγορά όσο και στην πώληση ενέργειας.

Σε ό,τι αφορά τα σενάρια λειτουργίας του συστήματος διαχείρισης ενέργειας, γίνεται αντιληπτό ότι όσα επικεντρώνονται σε ένα μόνο κριτήριο με την απόλυτη βαρύτητα, επιφέρουν τα βέλτιστα αποτελέσματα για αυτό, ωστόσο επιβαρύνουν τα υπόλοιπα κριτήρια σε μεγάλο βαθμό. Όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 1, καθένα από τα τέσσερα κριτήρια που λαμβάνονται υπόψη στη παρούσα εργασία έχει δέουσα σημασία, τόσο για τη προσωπική άνεση των χρηστών, όσο και για την εξοικονόμηση ενέργειας και χρημάτων που επιδρά συλλογικά και στο περιβάλλον. Ο χρήστης μπορεί να ρυθμίσει με οποιαδήποτε βαρύτητα το κάθε κριτήριο, ωστόσο προτείνεται σε μεγάλο βαθμό η ισότητα αυτών. Παρακάτω, ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας με τα αποτελέσματα που προκύπτουν ύστερα από τη χρήση του συστήματος διαχείρισης ενέργειας. Για κάθε κριτήριο, παρατίθεται η ποσοστιαία μεταβολή του με τη χρήση του συστήματος διαχείρισης ενέργειας, σε σύγκριση με το αντίστοιχο αποτέλεσμα που προκύπτει από την αποκλειστική επιλογή του χρήστη για τον χρονοπρογραμματισμό των συσκευών του. Για τα σενάρια 4 και 9, που δίνουν απόλυτη βαρύτητα στο συντελεστή χρονικής ικανοποίησης, δεν παρατίθεται σύγκριση με αποτελέσματα χωρίς το σύστημα διαχείρισης ενέργειας, καθώς ο χρονοπρογραμματισμός των συσκευών με ή χωρίς τη χρήση αυτού είναι ο ίδιος. Παρόμοια, στο σενάριο 3 που δίνεται η απόλυτη βαρύτητα στο συντελεστή σταθερότητας δικτύου, δεν παρατίθεται σύγκριση με αποτελέσματα χωρίς το σύστημα διαχείρισης ενέργειας, καθώς λόγω της αυξημένης παραγωγής του φωτοβολταϊκού συστήματος, ο συντελεστής σταθερότητας δικτύου είναι μηδενικός είτε με ή χωρίς χρήση συστήματος διαχείρισης ενέργειας.

Πίνακας 5.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κριτηρίων ανά εποχή.

Σενάριο	Συντελεστής χρονικής ικανοποίησης	Συντελεστής σταθερότητας δικτύου	Ποινή PMV	Κόστος με PV/ μπαταρία (€)	Κόστος χωρίς μπαταρία (€)	Κόστος χωρίς PV (€)
1: Καλοκαίρι- Βαρύτητα στη ποινή PMV	8.60 / -14 %	0.02 / -	0 / -100 %	-1.33/ +26.5 %	-1.06 / +32.14 %	2.89 / +13.28%
2: Καλοκαίρι- Βαρύτητα στο κόστος	6.83 / -31.7 %	0 / -	1.64 / +58.1%	-2.53 / -17.75 %	-2 / -1.48 %	1.43 / -24.71 %
3: Καλοκαίρι- Βαρύτητα στο συντελεστή σταθερότητας δικτύου	8.93 / -	0 / -	1.64 / -	-2.43 / -	-2.07 / -	1.42 / -
4: Καλοκαίρι- Βαρύτητα στο συντελεστή χρονικής ικανοποίησης	10 / -	0 / -	0.61 / -	-1.91 / -	-1.77 / -	2.29 / -
5: Καλοκαίρι- Εξισορροπημένο σενάριο	9.83 / -1.4 %	0 / -	0.08 / -55.5%	-1.88 / +3.87%	-1.43 / +11.22 %	2.66 / +3.91 %
6: Χειμώνας- Βαρύτητα στη ποινή PMV	6.94 / -30.6 %	0.89 / -40.7 %	0 / -100%	7.70 / +180.6%	7.99 / +135.66 %	9.80/ +116.7%
7: Χειμώνας- Βαρύτητα στο κόστος	7.71 / -22.9 %	0.06 / -80 %	2.33 / +25.3%	0.07 / -93.6 %	0.83 / - 57.22 %	1.96 / -54.61 %
8: Χειμώνας- Βαρύτητα στο συντελεστή σταθερότητας δικτύου	8.98 / -10.2 %	0.01 / -98.2 %	2.33 / +42.1 %	0.16 / -89.54%	0.94 / -57.85 %	2.13 / -55.56 %
9: Χειμώνας- Βαρύτητα στο συντελεστή χρονικής ικανοποίησης	10 / -	0.40 / -	1.87 / -	0.99 / -	1.80 / -	2.88 / -

10:Χειμώνας-Εξισορροπημένο σενάριο	9.88 / -1.2%	0.98 / +27.27%	0.83 / -41.55%	2.93 / +46.73%	3.56 / +32.86 %	4.71 / +25.2 %
11: Άνοιξη-Εξισορροπημένο σενάριο	9.51 / -4.9 %	0 / -	0 / -	-1.29 / -31.63 %	-0.94 / -88 %	1.42 / -17.44 %
12:Φθινόπωρο-Εξισορροπημένο σενάριο	9.88 / -1.2 %	0 / -	0.13 / -	-0.30 / -83.33 %	0.48 / -50.52 %	1.84 / -8 %

Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1, το καλοκαίρι η προσφορά ενέργειας από το φωτοβολταϊκό σύστημα είναι ιδιαίτερα αυξημένη και παρέχει οικονομικό όφελος στο σύστημα διαχείρισης ενέργειας. Σε κάθε σενάριο την συγκεκριμένη εποχή, το κτήριο παρουσιάζει αρνητικό κόστος στον ημερήσιο λογαριασμό, το οποίο συνεπάγεται σε κέρδος. Ωστόσο, οι αυξημένες θερμοκρασίες προκαλούν ανάγκη για πολύωρη λειτουργία του κλιματισμού, η οποία εξαρτάται και από τη παρουσία των χρηστών στο κτήριο. Αυτός είναι και ο λόγος που το εξισορροπημένο σενάριο παρουσιάζει μειωμένο κέρδος, σε σχέση με τα υπόλοιπα σενάρια, πλην του σεναρίου 1 που προσδίδει απόλυτη βαρύτητα στο PMV. Επίσης, το καλοκαίρι η πλήρης ανεξαρτησία του κτηρίου ωφελεί τη σταθερότητα του ηλεκτρικού δικτύου, καθώς δεν αντλείται ενέργεια από αυτό. Επομένως, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας δεν αντιμετωπίζει κάποια σχετική πρόκληση και εμφανίζει παρόμοια συμπεριφορά με το σενάριο εξοικονόμησης κόστους. Το εξισορροπημένο σενάριο παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα για κάθε κριτήριο.

Τον χειμώνα, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας καλείται να αντιμετωπίσει τη χαμηλή παραγωγή ενέργειας σε συνδυασμό με τις αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις των ηλεκτρικών φορτίων, κυρίως λόγω της ανάγκης αντιμετώπισης των χαμηλών θερμοκρασιών. Σε κάθε σενάριο την εποχή εκείνη το κόστος είναι θετικό και αυξημένο. Ωστόσο και σε αυτή τη περίπτωση, η διαφορά στον λογαριασμό του κτηρίου είναι μεγάλη σε σχέση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα χωρίς την παρουσία φωτοβολταϊκών και συστήματος διαχείρισης ενέργειας.

Η άνοιξη παρουσιάζει κερδοφόρα αποτελέσματα, παρά την μειωμένη παραγωγή ενέργειας σε σχέση με το καλοκαίρι. Ο βασικός λόγος είναι ότι οι θερμοκρασίες που επικρατούν έχουν ως αποτέλεσμα την απουσία ανάγκης κλιματισμού, μία από τις πιο ενεργοβόρες συσκευές στο κτήριο. Παρόμοια συμπεριφορά εμφανίζει και το φθινόπωρο, στο οποίο υπάρχει ελαφρώς περισσότερη παραγωγή ενέργειας σε σχέση με το χειμώνα, ωστόσο και σε αυτή τη περίπτωση ο κλιματισμός δεν χρησιμοποιείται. Είναι προφανές, ότι οι χρήστες οφείλουν να ακολουθούν την

εκάστοτε ενδυματολογική μόνωση της εποχής, προκειμένου να συμβάλλουν στην εξοικονόμηση ενέργειας, όπως περιγράφει ο δείκτης θερμικής άνεσης PMV.

Στο σύνολο των σεναρίων, ο συντελεστής χρονικής ικανοποίησης επιβαρύνει το σύστημα διαχείρισης ενέργειας, καθώς τείνει να ακολουθήσει τις επιθυμίες των χρηστών, οι οποίες συνήθως δεν λαμβάνουν υπόψη τα υπόλοιπα κριτήρια. Αυτός είναι και ο λόγος που στην πλειονότητα των σεναρίων ο συντελεστής χρονικής ικανοποίησης παρουσιάζει μείωση με τη χρήση του συστήματος διαχείρισης ενέργειας, σε σχέση με τη μη-χρήση του, κατά την οποία είναι ο μέγιστος εφόσον ο χρονοπρογραμματισμός πραγματοποιείται σύμφωνα με τις επιθυμίες του χρήστη. Επομένως, η χρονική ικανοποίηση των χρηστών αποτελεί το μοναδικό κριτήριο που μπορεί σταδιακά να παραλείπεται προκειμένου να επωφελείται το σύστημα διαχείρισης ενέργειας. Ωστόσο, η παρουσία του αρχικά είναι σημαντική, έτσι ώστε οι χρήστες να προσαρμοστούν και να αποδεχτούν σε βάθος χρόνου νέες συνήθειες που συνεισφέρουν στην εξοικονόμηση ενέργειας.

Το κόστος ενέργειας που παρουσιάζεται σε κάθε σενάριο αφορά ένα συγκεκριμένο εικοσιτετράωρο σε μία εποχή. Τα αποτελέσματα, όμως, οφείλουν να συνυπολογίζονται σε ένα ολόκληρο έτος προκειμένου να προσδίδουν πλήρη εικόνα. Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας φαίνεται να παρουσιάζει κέρδος, ωστόσο αυτό εξαρτάται και από το μέγεθος του φωτοβολταϊκού συστήματος, την απόδοσή του, τον τύπο της μπαταρίας αλλά και το πλήθος και το είδος των συσκευών μέσα σε ένα κτήριο. Σε κάθε περίπτωση, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας παρουσιάζει αποδοτικά αποτελέσματα για όλα τα κριτήρια.

Όπως γίνεται αντιληπτό από τον Πίνακα 5.1, στα σεναρία που προσδίδουν απόλυτη βαρύτητα σε κάποιο κριτήριο, προκύπτουν σε αυτά αυξημένες μεταβολές με τη χρήση του συστήματος διαχείρισης ενέργειας. Το αποτέλεσμα αυτό αποδεικνύει πως το σύστημα δύναται να παρουσιάσει τη βέλτιστη λύση για το κάθε σενάριο, σε αντίθεση με την εκάστοτε προσπάθεια του χρήστη να χρονοπρογραμματίσει τις συσκευές του χωρίς βελτιστοποίηση. Επίσης, οι μεταβολές του κόστους με χρήση φωτοβολταϊκού συστήματος και συστοιχία μπαταριών είναι παρόμοιες με τις αντίστοιχες μεταβολές χωρίς συστοιχία μπαταριών και χωρίς φωτοβολταϊκό σύστημα, όταν αξιοποιείται το σύστημα διαχείρισης ενέργειας. Τέλος, στα σεναρία εξισορροπημένης βαρύτητας των κριτηρίων της θερινής και της χειμερινής περιόδου παρατηρείται ότι με χρήση του συστήματος παρουσιάζεται βελτίωση μόνο στη ποινή λόγω υπέρβασης ορίων του PMV. Οι ακραίες θερμοκρασίες που επικρατούν εκείνες τις εποχές, οδηγούν το σύστημα σε αυξημένη χρήση του κλιματιστικού (σε σχέση με την διάρκεια που

προσδίδει ο χρήστης χωρίς σύστημα) προκειμένου να ελέγξει τη θερμική άνεση του χρήστη και να επιφέρει ισορροπία στα κριτήρια. Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι τα υπόλοιπα κριτήρια δεν παρουσιάζουν βελτιωμένες τιμές, η ποσοστιαία μεταβολή τους λόγω της χρήσης του συστήματος είναι χαμηλή. Την άνοιξη και το φθινόπωρο, οι ιδανικές θερμοκρασίες της εκάστοτε εποχής ωφελούν το σύστημα διαχείρισης ενέργειας, καθώς δεν ενεργοποιεί τον κλιματισμό. Ως αποτέλεσμα, η βελτιστοποίηση οδηγεί σε μείωση του ημερησίου κόστους για αυτές τις εποχές, με ελάχιστη μείωση του συντελεστή χρονικής ικανοποίησης.

Στη παρούσα εργασία παρουσιάζεται ο κεντρικός πυρήνας του συστήματος διαχείρισης ενέργειας που διαθέτει τη συνάρτηση βελτιστοποίησης και επικοινωνία τόσο με το χρήστη και τις συσκευές του, όσο και με πληθώρα εξαρτημάτων, όπως είναι τα φωτοβολταϊκά, η μπαταρία, ο έξυπνος μετρητής και ο αισθητήρας θερμοκρασίας. Ωστόσο, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας στη μορφή του επιδέχεται περαιτέρω επεκτάσεις. Υπάρχει δυνατότητα πρόσθεσης επιπλέον λειτουργιών, οι οποίες αυξάνουν την ανεξαρτησία του συστήματος, όπως για παράδειγμα πρόβλεψη των επερχόμενων καιρικών συνθηκών και καταγραφή των συνηθειών των χρηστών που αφορούν την χρήση των συσκευών τους. Οι παραπάνω λειτουργίες, οι οποίες βασίζονται στην αξιοποίηση της τεχνητής νοημοσύνης, δίνουν τη δυνατότητα στο σύστημα διαχείρισης ενέργειας να αποφασίζει για τη βαρύτητα του κάθε κριτηρίου, χωρίς να απαιτείται η παρέμβαση των χρηστών του. Τέλος, δύναται να προστεθεί επέκταση για το φωτισμό του κτηρίου, ο οποίος θα περιλαμβάνει έλεγχο των συστημάτων σκίασης για τον περιορισμό ή την επιδίωξη αύξησης θερμοκρασίας ανάλογα με την εποχή, όπως επίσης έλεγχο των φωτιστικών σωμάτων με την απαραίτητη συνοδεία αντίστοιχων αισθητήρων. Είναι φυσικό πως η υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος διαχείρισης ενέργειας απαιτεί ενισχυμένη επεξεργαστική ισχύ και σύνδεση με το διαδίκτυο για την επικοινωνία με το χρήστη και το ηλεκτρικό δίκτυο.

# 6.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- [1] International Energy Agency, "World Energy Outlook 2021", IEA Publications, pp. 1-500, 2021.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change, "Climate Change 2021: The Physical Science Basis", IPCC Sixth Assessment Report, pp. 1-3949, 2021.
- [3] Vasseur V., Marique A-F., Udalov V., "A Conceptual Framework to Understand Households' Energy Consumption", *Energies*, vol.12, no. 12, pp. 1-22, 2019.
- [4] M. S. Bakare, A. Abdulkarim, M. Zeeshan, and A. N. Shuaibu, "A comprehensive overview on demand side energy management towards smart grids: challenges, solutions, and future direction", *Energy Informatics*, vol. 6, no. 1, pp. 1-59, 2023.
- [5] Milousi, M., Souliotis, M., Arampatzis, G., & Papaefthimiou, S., "Evaluating the Environmental Performance of Solar Energy Systems Through a Combined Life Cycle Assessment and Cost Analysis", *Sustainability*, vol. 11, no. 9, 2539, 2019.
- [6] Abdi, H., Saidi, H., Hosseini, S. E., & Fathi, M., "Overview and Comparative Study of Energy Management Strategies for Residential PV Systems with Battery Storage", *Energies*, vol. 14, no. 1, pp. 14-20, 2021.
- [7] Al-Ezzi A.S., Ansari M.N.M., "Photovoltaic Solar Cells: A Review", *Applied System Innovation*, vol. 5, no. 4, pp. 67, 2022.



- [8] A. M. Muzathik, "Optimization of tilt angle for solar collectors under clear sky conditions: a review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 6, pp. 4784-4793, 2012.
- [9] Louzazni M., Cotfas D.T., Cotfas P.A., "Management and Performance Control Analysis of Hybrid Photovoltaic Energy Storage System under Variable Solar Irradiation", *Energies*, vol. 13, no. 12, pp. 3043, 2020.
- [10] Κουτρούλης Ε., "Ηλεκτρονικά συστήματα διαχείρισης ενέργειας", Σχολή ΗΜΜΥ, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2024.
- [11] Song, Z., Guan, X., & Cheng, M., "Multi-objective optimization strategy for home energy management system including PV and battery energy storage", *Energy Reports*, 8, 5396–5411, 2022.
- [12] Jelle, B.P., "Building Integrated Photovoltaics: A Concise Description of the Current State of the Art and Possible Research Pathways", *Energies*, vol. 9, no.1, 2016.
- [13] Denholm, P., Margolis, R. M., & Eichman, J., "Evaluating the Technical and Economic Performance of PV Plus Storage Power Plants", National Renewable Energy Laboratory (NREL), U.S. Department of Energy, 2017.
- [14] Xu W., Li Y., He G., Xu Y., Gao W., "Performance Assessment and Comparative Analysis of Photovoltaic-Battery System Scheduling in an Existing Zero-Energy House Based on Reinforcement Learning Control", *Energies*, vol. 16, no. 13, pp. 4844, 2023.
- [15] M. Coleman, C. K. Lee, C. Zhu, and W. G. Hurley, "State-of-charge determination from EMF voltage estimation: Using impedance, terminal voltage, and current for lead-acid and lithium-ion batteries", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 5, pp. 2550-2557, 2007.
- [16] Crawley D. B., Lawrie L. K., Winkelmann F. C., Buhl W. F., Huang Y. J., Pedersen C. O. & Glazer J., "EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program", *Energy and Buildings*, 33(4), 319-331. 2001.
- [17] Faruqui, A., Harris, D., & Hledik, R., "Unlocking the €53 Billion Savings from Smart Meters in the EU: How Increasing the Adoption of Dynamic Tariffs Could Make or Break the EU's Smart Grid Investment", *Energy Policy*, vol. 38, no. 10, pp. 6222-6231, 2010.

- [18] Sahu, S. & Choudhary, J., "IoT Based Smart Energy Meter", International Journal of Research Publication and Reviews, vol. 4, no. 11, pp. 3175-3183, 2023.
- [19] ASHRAE, "ASHRAE Handbook—Fundamentals", American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021.
- [20] MathWorks, "Particle Swarm Optimization Algorithm", MATLAB Documentation, 2021.