



**Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
και Μηχανικών Υπολογιστών**

Διπλωματική Εργασία

**Βελτιστοποίηση Διαχείρισης Ηλεκτρικής Ενέργειας σε
Κτήρια με Τεχνικές Μηχανικής Μάθησης**

Δημήτριος Αποστολάκης

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Αναπλ. Καθηγητής Ευτύχιος Κουτρούλης (Επιβλέπων)

Αναπλ. Καθηγητής Μιχαήλ Λαγουδάκης

Αναπλ. Καθηγητής Φώτιος Κανέλλος

Χανιά, Δεκέμβριος 2021



**Technical University of Crete
School of Electrical and Computer
Engineering**

Diploma Work

**Optimization of Electric Energy Management in
Buildings based on Machine Learning Techniques**

Dimitrios Apostolakis

THESIS COMMITTEE

Associate Professor Eftichios Koutroulis (Supervisor)

Associate Professor Michail G. Lagoudakis

Associate Professor Fotios D. Kanellos

Chania, December 2021

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι διαρκώς αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες των οικιακών καταναλωτών προκαλούν αύξηση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας και επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η εργασία αυτή αφορά την υλοποίηση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, με στόχο τη βέλτιστη διαχείριση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε συστήματα οικιακών καταναλωτών σε κτήρια. Το σύστημα που εξετάζεται περιλαμβάνει ένα φωτοβολταϊκό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μία διάταξη αποθήκευσης ενέργειας σε μπαταρίες και το ηλεκτρικό δίκτυο με οποίο είναι διασυνδεδεμένα. Αναπτύχθηκε αλγόριθμος βελτιστοποίησης για τον υπολογισμό της βέλτιστης χρονοσειράς ηλεκτρικής ενέργειας που ανταλλάσσεται με το ηλεκτρικό δίκτυο έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας του οικιακού καταναλωτή. Παράλληλα, γίνεται επιπλέον μείωση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας με εφαρμογή αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού των ωρών λειτουργίας των επιμέρους ηλεκτρικών φορτίων του καταναλωτή. Ο βασικός αλγόριθμος μηχανικής μάθησης που ενσωματώνεται στη διαδικασία βελτιστοποίησης είναι ο Q-Learning, ενώ υλοποιούνται ακόμα δύο διαφορετικές εκδοχές του, ο αλγόριθμος Sarsa και ο Double-Q-Learning, με στόχο τη σύγκριση της απόδοσής τους στο πρόβλημα βελτιστοποίησης που εξετάζεται. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι με τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας που αναπτύχθηκε μπορεί να επιτευχθεί σημαντική μείωση του συνολικού κόστους ηλεκτρικής ενέργειας του καταναλωτή.

ABSTRACT

The continuously increasing energy demands of household consumers are causing higher electricity costs and environmental impact as well. This work concerns the implementation of machine learning algorithms, aiming at the management of electricity consumption in buildings. The system under consideration includes a photovoltaic system for generating electricity, a battery storage system and the electrical grid with which they are interconnected. An optimization algorithm has been developed to calculate the optimal time series of electricity exchanged with the grid to minimize the cost of electricity for the household consumer. At the same time, the cost of electricity is further reduced by applying an algorithm for scheduling the operating hours of individual electrical loads. The basic machine learning algorithm that is integrated in the optimization process is Q-Learning, while two more different versions are implemented, which are the Sarsa and the Double-Q-Learning algorithms, in order to compare their performance in the optimization problem. The results show that the energy management algorithm can reduce significantly the total electricity cost for the consumer.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Καθώς ολοκληρώνεται ο προπτυχιακός κύκλος σπουδών μου θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στο κομμάτι αυτό, είτε με τη βοήθειά τους, είτε με τη στήριξή τους.

Ευχαριστώ εκ βάθρων τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Κουτρούλη Ευτύχιο, ο οποίος μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, καθώς επίσης για την υπομονή του, την αμέριστη βοήθεια και τη συνεχή καθοδήγησή του για την επίλυση διαφόρων θεμάτων.

Επιπλέον, ευχαριστώ τους γονείς μου για την υπομονή, κατανόηση και συμπαράσταση που παρουσίασαν κατά τη διάρκεια όλης της περιόδου των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
1.1 Γενικά	8
1.2 Συμβολή της διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας	9
1.3 Στόχος και επίλυση μέσω μηχανικής μάθησης.....	10
1.4 Υπάρχουσες προσεγγίσεις και συμβολή	10
1.5 Δομή της διπλωματικής	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΤΗΡΙΩΝ ΜΕ ΑΠΕ	13
2.1 Εισαγωγή.....	13
2.2 Φωτοβολταϊκά συστήματα	13
2.2.1 Φωτοβολταϊκά στοιχεία	13
2.2.2 Ηλιακή ακτινοβολία.....	15
2.2.3 Βασικές έννοιες και τοπολογίες των φωτοβολταϊκών συστημάτων	20
2.3 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας	25
2.4 Αποθήκευση ενέργειας σε μπαταρίες	27
2.4.1 Πυκνότητα ενέργειας και ειδική ενέργεια	27
2.4.2 Πυκνότητα ισχύος.....	28
2.4.3 Κύκλος ζωής και ημερολογιακή ζωή	29
2.4.4 Θερμοκρασία λειτουργίας.....	30
2.4.5 Ασφάλεια	30
2.4.6 Τεχνολογίες BES.....	31
2.5 Συστήματα διαχείρισης ενέργειας κτηρίων με χρήση συστοιχιών μπαταριών και Φ/Β διατάξεων σε οικιακές εγκαταστάσεις	33
2.6 Τεχνικές διαχείρισης ενέργειας και τύποι φορτίου σε οικιακούς καταναλωτές.....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΤΗΡΙΩΝ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ.....	41
3.1 Περιγραφή του συστήματος βελτιστοποίησης.....	41
3.1.1 Περιγραφή του συστήματος.....	41
3.1.2 Εναλλακτικές τοπολογίες διασύνδεσης και ανάλυση των ροών ισχύος	43
3.1.3 Επιλογή δεδομένων για την παραγωγή από τη Φ/Β συστοιχία	50
3.2 Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκε.....	51
3.3 Αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης που χρησιμοποιήθηκαν για τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης ενέργειας.....	55
3.4 Περιγραφή εφαρμογής του αλγορίθμου Q-Learning	57
3.5 Η εφαρμογή του αλγορίθμου σε πραγματικό σύστημα	61

3.5.1	Πρώτη διαμόρφωση	62
3.5.2	Δεύτερη διαμόρφωση	72
3.5.3	Τρίτη διαμόρφωση	75
3.6	Χρονοπρογραμματισμός του φορτίου με τη χρήση του αλγορίθμου Q-Learning	75
3.7	Περιγραφή εφαρμογής του αλγορίθμου SARSA.....	78
3.8	Περιγραφή εφαρμογής του αλγορίθμου Double-Q-Learning	80
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....		82
4.1	Ανακεφαλαίωση.....	82
4.2	Αποτελέσματα με τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης Q-Learning	82
4.2.1	Μελέτη παραμέτρων και συμπεριφοράς αλγορίθμου (πρώτη προσομοίωση)	82
4.2.2	Αναδιαμόρφωση καταστάσεων και πολιτικής (δεύτερη προσομοίωση)	89
4.2.3	Προσαρμογή πολιτικής για καλύτερη εκπαίδευση (δεύτερη προσομοίωση)	101
4.3	Χρονοπρογραμματιζόμενο φορτίο	109
4.4	Τρίτη προσομοίωση με τον αλγόριθμο QL	113
4.5	Αποτελέσματα με τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης SARSA	124
4.6	Αποτελέσματα με τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης Double-Q-Learning	127
4.7	Σύγκριση των αλγορίθμων	131
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....		132
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		134

Κεφάλαιο 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας, καθώς και οι τελευταίες τάσεις που σχετίζονται με την πράσινη ενέργεια προσανατολίζουν την παραγωγή, καθώς και την κατανάλωση ενέργειας με αειφόρο και βιώσιμο τρόπο. Απώτερος στόχος είναι η αντιμετώπιση των διαρκώς αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών και από περιβαλλοντικής οπτικής, ο περιορισμός εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου στο άμεσο μέλλον, ώστε να ανατραπούν τα δυστοπικά σενάρια, τα οποία προβλέπονται ως προς την εξέλιξη του κλίματος του πλανήτη, εάν δεν αναχαιτιστεί το υπάρχον συμβατικό ενεργειακό μοντέλο σε παγκόσμια κλίμακα.

Με γνώμονα τα προηγούμενα και σε επίπεδο ενεργειακής κατανάλωσης κτηρίων, ο κύριος προσανατολισμός έγκειται αφενός στην αύξηση της ενεργειακής τους αποδοτικότητας, ενώ αφετέρου και κατά κύριο λόγο στην καλύτερη διαχείριση της αυξημένης ενεργειακής τους κατανάλωσης. Επιπλέον όφελος αποτελεί η δημιουργία κτηρίων μηδενικών εκπομπών αερίων θερμοκηπίου ή πιο σωστά μηδενικού ενεργειακού αποτυπώματος. Προς επίτευξη του τελευταίου εφαρμόζονται ποικίλες τεχνικές.

Μία εξ αυτών είναι η τεχνική της διαχείρισης της ενεργειακής κατανάλωσης κτηρίων, με στόχο τη μείωση του συνολικού κόστους αγοράς ενέργειας από τον καταναλωτή, αλλά και του αντίκτυπου που προσδίδει στο περιβάλλον. Κάτι τέτοιο προκύπτει από την κυμαινόμενη τιμή αγοράς ανά μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας, που με τη σειρά της προκύπτει από τη μεταβαλλόμενη διείσδυση των μονάδων παραγωγής που κάνουν χρήση ανανεώσιμων ενεργειακών πόρων (ηλιακή ακτινοβολία, αιολική ενέργεια, νερό κλπ.), αλλά και από την εκάστοτε ωριαία ζήτηση ενέργειας σε επίπεδο ηλεκτρικού δικτύου.

1.2 Συμβολή της διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας

Σημαντική παράμετρος που συμβάλει στο όλο εγχείρημα είναι η μαζική αύξηση της διεσπαρμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών. Οι προσεγγίσεις που προτείνονται στη βιβλιογραφία και αφορούν συνήθως σε λύσεις τεχνολογικής αιχμής εφαρμόζονται στην πραγματική οικονομία και είναι πολυάριθμες. Στοχεύουν στην αύξηση του ποσοστού της συμβολής κάθε μορφής ανανεώσιμης πηγής ενέργειας (ΑΠΕ) και στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας, όπου στη βιβλιογραφία μετράται σε τόνους ισοδύναμου πετρελαίου (tons of oil equivalent – toe). Ωστόσο, η αντικατάσταση της χρήσης των ορυκτών καυσίμων μπορεί να συντελεστεί με αμεσότερο τρόπο, τουλάχιστον όσον αφορά τα φορτία που καταναλώνουν ηλεκτρική ισχύ. Η αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος με ΑΠΕ επιτυγχάνεται μέσω της ανάπτυξης αιολικών ή φωτοβολταϊκών πάρκων μικρής, μέσης ή μεγάλης ισχύος. Προβλήματα που σχετίζονται με την ευστάθεια του δικτύου, καθώς και διακυμάνσεις στην παραγωγή από ΑΠΕ λόγω στοχαστικότητας στην παροχή ενέργειας από τα αξιοποιούμενα μέσα (λόγου χάριν στην ταχύτητα του ανέμου) έχουν παρατηρηθεί, μελετώνται και προτείνονται λύσεις.

Μια επιπλέον όχι και τόσο καινούργια ιδέα, η οποία εφαρμόζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία και έρχεται με ραγδαίους ρυθμούς πιο κοντά στο προσκήνιο τα τελευταία χρόνια λόγω της καινοτομίας της, σχετίζεται με τις έξυπνες πόλεις – σπίτια. Πρόκειται για μια προσέγγιση που καλείται να αντιμετωπίσει αρκετά προβλήματα στο προφίλ της ενεργειακής κατανάλωσης και να συμβάλει αποτελεσματικά στην αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ. Η λύση αυτή και η οποία διερευνάται διεξοδικά αφορά στην εφαρμογή μεθόδων βελτιστοποίησης του προφίλ της ηλεκτρικής κατανάλωσης μικρών (οικιακών) κυρίως καταναλωτών, οι οποίοι διαθέτουν φωτοβολταϊκή (Φ/Β) εγκατάσταση, καθώς και ένα σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με μπαταρίες. Η σημασία του θέματος αυτού είναι τεράστια, καθώς εάν αναπτυχθεί σωστά θα μπορεί να επιτρέψει δυνητικά την αξιοποίηση ολόκληρης της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος του Φ/Β συστήματος. Αυτή θα μπορεί να διατίθεται στο ηλεκτρικό δίκτυο με βάση τις κυμαινόμενες στιγμιαίες απαιτήσεις σε ισχύ (on-demand), ενώ ταυτόχρονα θα διασφαλίζεται το μέγιστο οικονομικό όφελος για τον

παραγωγό-καταναλωτή. Η βελτιστοποίηση αυτή θα μπορέσει να λειτουργήσει ως κίνητρο για τη διεύρυνση της εφαρμογής τέτοιων τεχνολογικά καινοτόμων κατοικιών ως προς την ενεργειακή τους διαχείριση, ενώ θα επιτρέψει δυνητικά την αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ.

1.3 Στόχος και επίλυση μέσω μηχανικής μάθησης

Με βάση τις δύο προηγούμενες ενότητες ανακύπτει το πρόβλημα της εύρεσης λύσεων αναφορικά με την ενεργειακή διαχείριση κτηρίων. Στην παρούσα εργασία, αφού προηγηθεί όλη η απαραίτητη θεωρητική ανάλυση γύρω από το υπό εξέταση θέμα, διερευνάται η ενδελεχής αξιολόγηση διαφόρων μεθόδων μηχανικής μάθησης (Machine Learning), οι οποίες ανήκουν στην κατηγορία της ενισχυτικής μάθησης (Reinforcement Learning). Υπάρχουν και τεχνικές που κάνουν χρήση νευρωνικών δικτύων, αλλά δε θα αναλυθούν περαιτέρω λόγω της αυξημένης πολυπλοκότητας υλοποίησής τους. Σε κάθε περίπτωση, όλες αυτές οι τεχνικές στηρίζονται στην αλληλεπίδραση με το περιβάλλον και στην ανάδραση με αυτό για τη λήψη αποφάσεων. Έτσι, οι παραπάνω τεχνικές έχουν την ιδιότητα να μαθαίνουν κατά τη διαδικασία της εκπαίδευσης δυναμικά και σε συνεχή χρόνο να παίρνουν καλύτερες αποφάσεις, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται βελτιστοποίηση των παραμέτρων καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας των αλγορίθμων. Μάλιστα, αυτό το σύστημα μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε προφίλ καταναλωτή χάρη στην ευελιξία του και να έχει τα αντίστοιχα αποτελέσματα.

1.4 Υπάρχουσες προσεγγίσεις και συμβολή

Τόσο στη βιβλιογραφία όσο και στην πράξη συναντάται η εφαρμογή μεθόδων μηχανικής μάθησης στην ενεργειακή διαχείριση κτηρίων. Πιο συγκεκριμένα, προτείνονται λύσεις που εφαρμόζονται σε συστήματα του τύπου κτήριο – μονάδες αποθήκευσης ενέργειας – μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Λαμβάνοντας

υπόψιν την κυμαινόμενη τιμή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνουν εξοικονόμηση χρημάτων στον καταναλωτή.

Η παρούσα διπλωματική εργασία συνεισφέρει στη διερεύνηση της αξιοποίησης μεθόδων μηχανικής μάθησης (Machine Learning), στη βελτιστοποίηση της διάθεσης ηλεκτρικής ισχύος στους καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας, είτε πρόκειται για παραγωγή είτε για κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος. Έτσι, ασχολείται με ένα συγκεκριμένο είδος καταναλωτών, που στη βιβλιογραφία αναφέρονται ως “prosumers”, δηλαδή καταναλωτές που είναι σε θέση να συνεισφέρουν στην κάλυψη ενός μέρους του φορτίου τους, μέσω παραγωγής ενέργειας από Φ/Β συστοιχίες. Στην περίπτωση όπου η διαθέσιμη ισχύς υπερκαλύπτει τις ανάγκες της οικίας, η πλεονάζουσα παραγόμενη ισχύς διοχετεύεται στο δίκτυο ή εναλλακτικά αποθηκεύεται σε μια συστοιχία μπαταριών. Η εργασία αυτή, λοιπόν, εξετάζει όλα τα ενδεχόμενα που μπορούν να προκύψουν στους προαναφερθέντες καταναλωτές και τις βελτιστοποιήσεις που δύνανται να επιτευχθούν με την εφαρμογή διαφόρων αλγορίθμων μηχανικής μάθησης εστιάζοντας κυρίως στη διερεύνηση της επιλογής των κατάλληλων παραμέτρων των αλγορίθμων αυτών, καθώς και τη γενικότερη δυναμική τους.

Η συνεισφορά αυτής της διπλωματικής εργασίας συνοψίζεται ως εξής:

- Μελέτη των οικιακών καταναλωτών με συμπαραγωγή από Φ/Β συστοιχίες και αξιοποίηση συστημάτων αποθήκευσης.
- Εφαρμογή αλγορίθμων βελτιστοποίησης, με στόχο τη μείωση του συνολικού κόστους της ενέργειας που αγοράζεται από τον καταναλωτή.
- Επίτευξη περαιτέρω εξοικονόμησης χρημάτων με την παράλληλη εφαρμογή τεχνικών χρονο-προγραμματισμού του φορτίου.
- Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων βάσει των παραμέτρων και εύρεση της αναγκαίας αποθηκευτικής ικανότητας των συστημάτων αποθήκευσης.
- Σύγκριση των αποτελεσμάτων των διαφορετικών αλγορίθμων.
- Βελτιστοποιήσεις που σχετίζονται με το μέγεθος της αποθηκευτικής ικανότητας του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με βάση το προφίλ κατανάλωσης του καταναλωτή.

1.5 Δομή της διπλωματικής

Αφού αναφερθεί όλο το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο, παρουσιάζονται οι αλγόριθμοι σε επίπεδο εννοιών και αρχών λειτουργίας, και αναλύονται οι τρόποι που αυτοί υλοποιούνται. Οι αξιοποιούμενες μέθοδοι μηχανικής μάθησης συγκρίνονται μεταξύ τους βάσει των αποτελεσμάτων. Εξυφάνεται λοιπόν, τόσο η ικανότητα της κάθε μεθόδου να προσφέρει λύση στο πρόβλημα, όσο και λοιπές παράμετροι του υπό βελτιστοποίηση συστήματος που δύνανται να βελτιστοποιηθούν εμμέσως από τα εξαχθέντα σε κάθε περίπτωση αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή των μεθόδων.

Πιο συγκεκριμένα, στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται εκτενής ανάλυση του κάθε επιμέρους υποσυστήματος, από το οποίο απαρτίζεται το υπό εξέταση σύστημα. Έτσι, αναλύονται τα Φ/Β συστήματα, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (με έμφαση στα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες), τα συστήματα διαχείρισης ενέργειας κτηρίων και οι τεχνικές διαχείρισης ενέργειας.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται το σύστημα προς βελτιστοποίηση, η τοπολογία του, οι ροές ισχύος και η συνάρτηση βελτιστοποίησης. Κατόπιν, αναλύονται οι μέθοδοι μηχανικής μάθησης που εφαρμόζονται και ο τρόπος που προσαρμόζονται στην προσέγγιση του προβλήματος.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις καθώς και η σύγκριση μεταξύ τους.

Στο πέμπτο κεφάλαιο εξάγονται τα συμπεράσματα σχετικά με τις μεθόδους που εφαρμόστηκαν.

Κεφάλαιο 2 : ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΤΗΡΙΩΝ ΜΕ ΑΠΕ

2.1 Εισαγωγή

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, η παρούσα εργασία πραγματεύεται τη βελτιστοποίηση της αξιοποίησης της ηλεκτρικής ενέργειας σε επίπεδο καταναλωτή. Ο καταναλωτής αυτός διέπεται από ορισμένα χαρακτηριστικά παραγωγής και κατανάλωσης, όπου συνδυάζεται η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από φωτοβολταϊκά συστήματα και η δυνατότητα αποθήκευσης της ισχύος αυτής σε συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

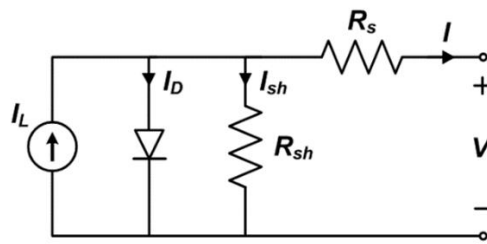
Γίνεται, λοιπόν, αντιληπτό πως απαιτείται η ανάλυση του απαραίτητου θεωρητικού υποβάθρου όλων αυτών των συστημάτων και ο τρόπος αξιοποίησής τους, ώστε να γίνει περισσότερο αντιληπτός ο τρόπος με τον οποίο όλα αυτά συνεργάζονται μεταξύ τους, καθώς και η βελτιστοποίηση που επιχειρείται.

2.2 Φωτοβολταϊκά συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα ουσιαστικά αποτελούν μετατροπείς ενέργειας μέσω των οποίων τμήμα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στις επιφάνειές τους μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια.

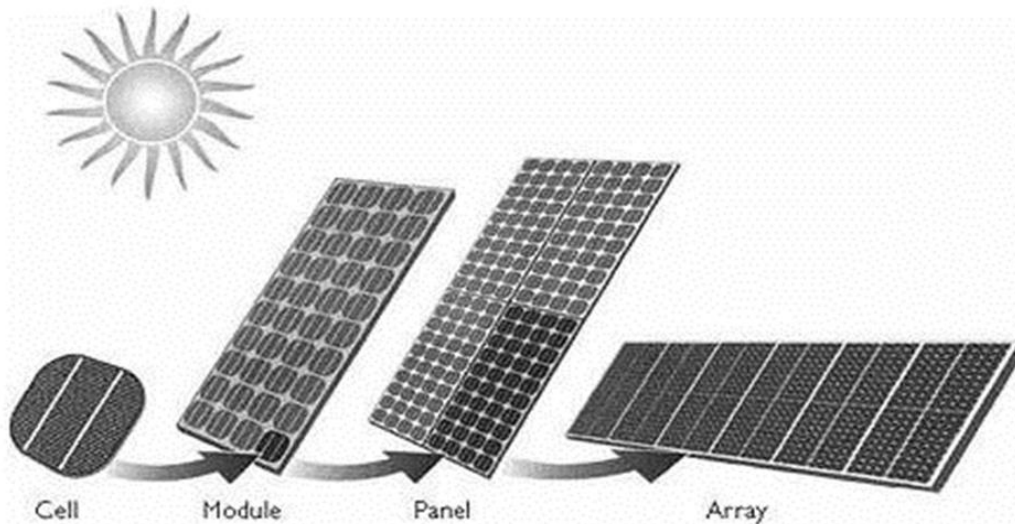
2.2.1 Φωτοβολταϊκά στοιχεία

Το θεμελιώδες στοιχείο από το οποίο απαρτίζεται κάθε φωτοβολταϊκό σύστημα ονομάζεται φωτοβολταϊκό κύτταρο. Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού κυττάρου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1 και προκύπτει από το [1].



Σχήμα 2.1: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου [1].

Αποτελείται από μία πηγή ρεύματος εξαρτώμενη από την ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Η συμπεριφορά του μπορεί εύκολα να εξαχθεί από τη χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης, η οποία παρουσιάζεται σε επόμενη ενότητα (Σχήμα 2.8). Η χαρακτηριστική αυτή στην ουσία περιγράφει τη λειτουργία ενός μεμονωμένου Φ/Β στοιχείου ή ενός συνόλου από Φ/Β στοιχεία, τα οποία συνδεόμενα με κατάλληλο τρόπο διαμορφώνουν μία χαρακτηριστική και η οποία με τη σειρά της περιγράφει τη λειτουργία του ευρύτερου αυτού συνόλου. Η ανάλυση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος από το φωτοβολταϊκό στοιχείο έως και τη φωτοβολταϊκή συστοιχία απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2 και προκύπτει από το [2].



Σχήμα 2.2: Διαβάθμιση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Άκρη αριστερά φαίνεται το θεμελιώδες φωτοβολταϊκό στοιχείο (κύτταρο – cell), ενώ άκρη δεξιά φαίνεται η φωτοβολταϊκή συστοιχία (array) [2].

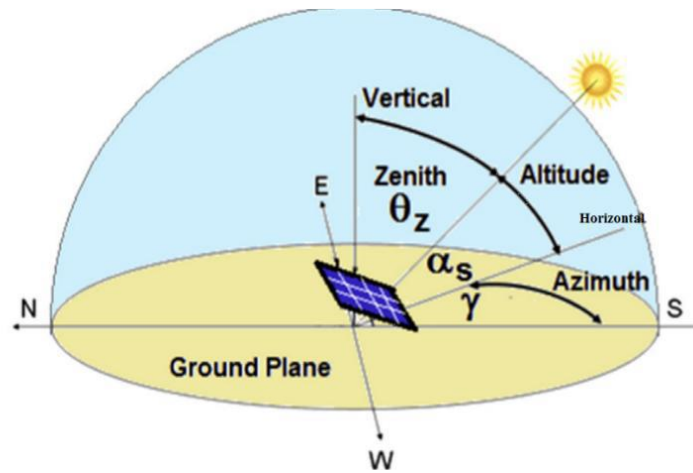
Τα φωτοβολταϊκά συνήθως διατίθενται σε επίπεδο πάνελ, δηλαδή σε ένα ήδη προκαθορισμένο σύνολο φωτοβολταϊκών κυττάρων, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με κατάλληλο τρόπο (συνήθως σε σειρά για την ανύψωση της τάσης).

Αυτό που επιδρά στη χαρακτηριστική λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού πάνελ είναι η εκάστοτε τιμή της αξιοποιήσιμης ηλιακής ακτινοβολίας από αυτό. Με λίγα λόγια, η χαρακτηριστική ενός φωτοβολταϊκού πάνελ μεταβάλλεται σημαντικά με βάση την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνειά του, η οποία απεικονίζεται σε επόμενη ενότητα (Σχήμα 2.11).

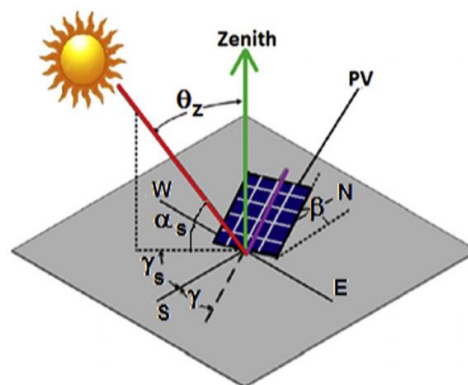
Επομένως, με βάση τα προηγούμενα για τη μελέτη εγκατάστασης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η μελέτη της συμπεριφοράς της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια μίας ημέρας, αλλά και σε επίπεδο ενός έτους.

2.2.2 Ηλιακή ακτινοβολία

Σε κατασκευαστικό επίπεδο είναι πολύ σημαντικό να προσδιοριστούν οι παράμετροι εκείνες, οι οποίες επιτρέπουν τελικά τη μεγαλύτερη δυνατή αξιοποίηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας [3], καθώς ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο δεν εκμεταλλεύεται όλη την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Έτσι, οι παράμετροι οι οποίες καταδεικνύουν τη μέγιστη κάθε φορά αξιοποιήσιμη από το φωτοβολταϊκό προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία περιγράφονται από τα παρακάτω σχήματα, όπου στο Σχήμα 2.3 αναπαρίστανται οι διάφορες γωνίες που επιδρούν στη λαμβανόμενη από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ένταση ηλιακής ακτινοβολίας και στο Σχήμα 2.4 προστίθεται σε αυτό η γωνία της κεκλιμένης επιφάνειας [4]. Το Σχήμα 2.3 και το Σχήμα 2.4 προκύπτουν από το [5].



Σχήμα 2.3: Γωνίες υπό τις οποίες προδιορίζεται η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα κεκλιμένο επίπεδο [5].



Σχήμα 2.4: Γωνίες υπό τις οποίες προσδιορίζεται η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα κεκλιμένο επίπεδο και η γωνία της κεκλιμένης επιφάνειας [5].

Η ανάλυση της κάθε γωνίας ξεχωριστά παρατίθεται παρακάτω:

- Ηλιακή αζιμουθιακή γωνία (γ) είναι η γωνία που δείχνει την κλίση των ηλιακών ακτίνων στο Βορρά σε ωρολογιακή κατεύθυνση.
- Γωνία υψομέτρου (α_s) είναι η γωνία μεταξύ της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας και του ορίζοντα. Ορίζεται ως:

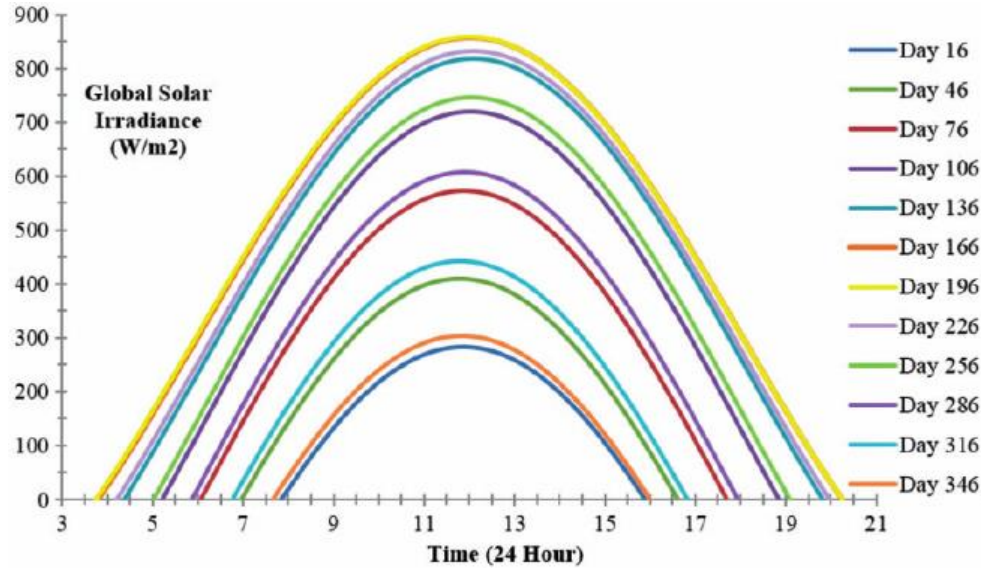
$$\alpha_s = 90 - \theta_z \quad (2.1)$$

όπου θ_z είναι η ζενιθιακή γωνία.

- Ωριαία γωνία (ω) είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο μεσημβρινό επίπεδο και στη θέση του ήλιου (γωνιακή μετατόπιση του ήλιου, ανατολικά ή δυτικά της ηλιακής μεσημβρίας).
- Επιφανειακή αζιμουθιακή γωνία είναι η γωνία που δείχνει την απόκλιση της κατακόρυφης επιφάνειας από το τοπικό γεωγραφικό μήκος. Ισχύει ότι $\gamma = 0^\circ$ για τις επιφάνειες που είναι προσανατολισμένες προς το Νότο. Λαμβάνει θετικές τιμές για επιφάνειες στραμμένες προς την Ανατολή, ενώ λαμβάνει αρνητικές τιμές για επιφάνειες στραμμένες προς τη Δύση.
- Γωνία κλίσης είναι η γωνία μεταξύ του επιπέδου του Ισημερινού και των ηλιακών ακτινών στις 12 μ.μ.
- Γωνία πρόσπτωσης είναι η γωνία μεταξύ της επιφάνειας και των ηλιακών ακτινών.
- Το γεωγραφικό πλάτος και μήκος είναι οι πιο βασικές παράμετροι, που επιδρούν στη διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια που καταφθάνει σε μια επιφάνεια στη διάρκεια ενός έτους.

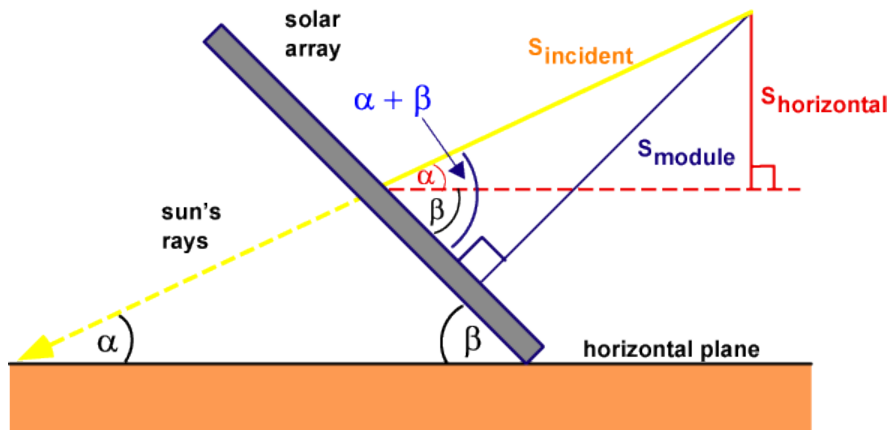
Όπως λοιπόν παρατηρείται από τα παραπάνω, ο προσδιορισμός της βέλτιστης γωνίας εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι μια διαδικασία που απαιτεί πληθώρα υπολογισμών που βασίζονται σε παραμέτρους, όπως αυτές προαναφέρθηκαν. Στο πλαίσιο όμως της παρούσας εργασίας ο υπολογισμός αυτός θα απλοποιηθεί, καθώς θα γίνει χρήση μιας εφαρμογής που διατίθεται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και που υπολογίζει την παραγόμενη ισχύ ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, δεχόμενο ως εισόδους τις συντεταγμένες της εγκατάστασης, την ονομαστική ισχύ της, καθώς και τον προσανατολισμό της επιφάνειας των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Η απλοποίηση αυτή στηρίζεται στο γεγονός ότι στην πλειονότητα των εγκαταστάσεων φωτοβολταϊκών συστημάτων στους οικιακούς καταναλωτές η θέση εγκατάστασης - για παράδειγμα στις στέγες - προκαθορίζεται εκ των πραγμάτων.

Η ενδεικτική μεταβολή των ωριαίων τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια ενός έτους, σε δεδομένες συντεταγμένες παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5 και προκύπτει από το [6].



Σχήμα 2.5: Παράδειγμα των ωριαίων τιμών της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας με παράμετρο τον αριθμό της ημέρας ενός ημερολογιακού έτους για δεδομένες γεωγραφικές συντεταγμένες [6].

Η συνολική κάθετα προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία προκύπτει από την υπέρθεση των ακολούθων συνιστωσών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6 και προκύπτει από το [7]:



Σχήμα 2.6: Γωνίες ενός κεκλιμένου επιπέδου ως προς τις προσπίπτουσες ηλιακές ακτίνες [7].

$$S_{\text{horizontal}} = S_{\text{incident}} \sin \alpha \quad (2.2)$$

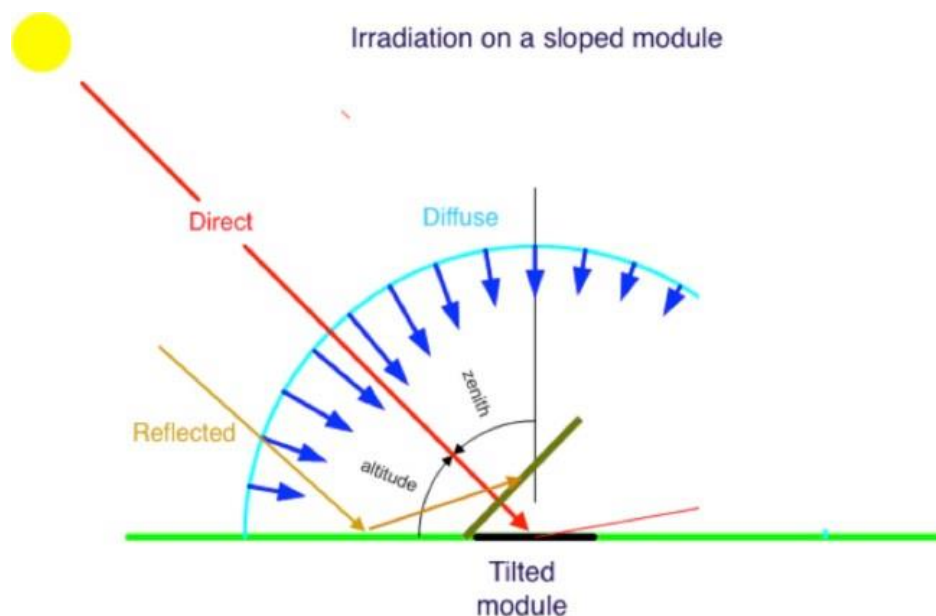
$$S_{\text{module}} = S_{\text{incident}} \sin(\alpha + \beta) \quad (2.3)$$

όπου η γωνία α είναι η γωνία α_s των Σχημάτων 2.3 και 2.4, το S_{incident} είναι η ισχύς της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας, το $S_{\text{horizontal}}$ είναι η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει κάθετα στο οριζόντιο επίπεδο ανά μονάδα επιφάνειας και το S_{module} είναι η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει κάθετα στο Φ/Β πλαίσιο ανά μονάδα επιφάνειας και η μονάδα μέτρησής τους είναι το W/m^2 . Επίσης, η γωνία α ορίζεται ως:

$$\alpha = 90 - \phi + \delta \quad (2.4)$$

όπου ϕ είναι το γεωγραφικό πλάτος και δ η γωνία κλίσης.

Ωστόσο, ανάλογα με τη μορφολογία του εδάφους ή τη σύστασή του μεταβάλλονται οι συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας (συνολικό προσπίπτον ηλιακό φως), που δύνανται να αξιοποιηθούν.



Σχήμα 2.7: Οι συνιστώσες του προσπίπτοντος ηλιακού φωτός σε ένα κεκλιμένο Φ/Β πλαίσιο [8].

Οι συνιστώσες του ηλιακού φωτός που συμβάλουν στη διαμόρφωση της τελικής προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε ένα κεκλιμένο επίπεδο απεικονίζονται στο Σχήμα 2.7, που προκύπτει από το [8] και είναι οι ακόλουθες:

- Άμεση ηλιακή ακτινοβολία.
- Ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία.
- Διαχεόμενη από την ατμόσφαιρα ηλιακή ακτινοβολία.

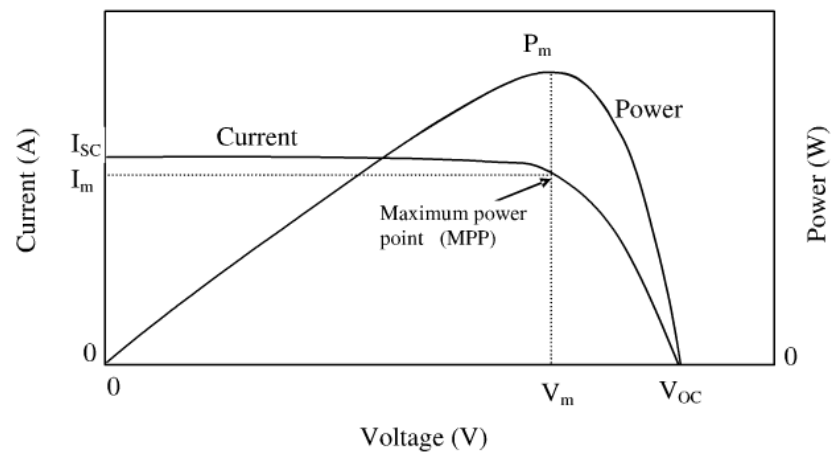
Κατά τη σχεδίαση ενός Φ/Β συστήματος, πρέπει να γίνει σαφής διάκριση μεταξύ της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας και της μεταβολής της στιγμιαίας ηλιακής ισχύος στη διάρκεια μιας ημέρας, αλλά και στη μεταβολή των ωριαίων τιμών της ηλιακής ισχύος στη διάρκεια ενός έτους, λόγω εποχικών μεταβολών που προκαλούν μεταβολή της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας.

2.2.3 Βασικές έννοιες και τοπολογίες των φωτοβολταϊκών συστημάτων

Με τον όρο χαρακτηριστική μιας φωτοβολταϊκής διάταξης εννοείται η απόκριση του ηλεκτρικού της κυκλώματος στη μεταβολή της τάσης εξόδου της. Η χαρακτηριστική αυτή ονομάζεται χαρακτηριστική ρεύματος – τάσης (I-V) και παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.8, που προκύπτει από το [1], όπου δηλώνονται όλα τα επιτρεπτά σημεία λειτουργίας της φωτοβολταϊκής διάταξης.

Ένα σημαντικό δεδομένο για κάθε φωτοβολταϊκή διάταξη είναι η ονομαστική του ισχύς. Αυτή αναφέρεται ως μέγιστη ισχύς, δηλαδή είναι το σημείο μέγιστης ισχύος (MPP) της χαρακτηριστικής I-V, που προκύπτει από την ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια και ανέρχεται σε 1pu . Στη βιβλιογραφία το 1pu ηλιακής ακτινοβολίας αντιστοιχίζεται σε 1000W/m^2 .

Το σημείο μέγιστης ισχύος ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου εξάγεται άμεσα από την εκάστοτε χαρακτηριστική του.

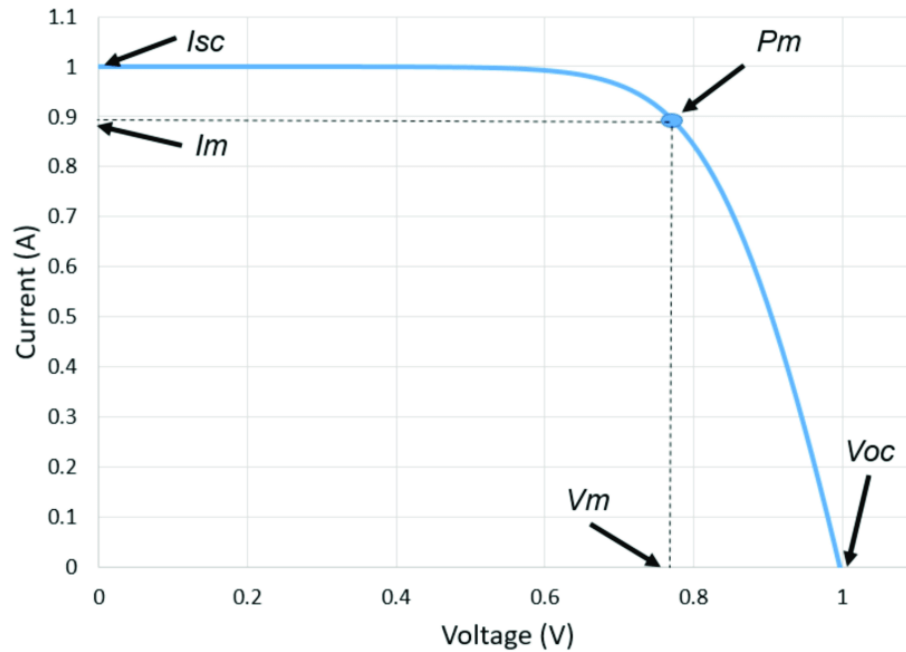


Σχήμα 2.8: Χαρακτηριστικές ισχύος-τάσης και ρεύματος-τάσης (I-V) μιας φωτοβολταϊκής διάταξης [1].

Μια ακόμη χαρακτηριστική που προκύπτει από την προηγούμενη και η οποία απεικονίζεται επίσης στο Σχήμα 2.8 ονομάζεται χαρακτηριστική ισχύος – τάσης (P-V). Στην τελευταία παρατηρείται ότι σε κάθε συνδυασμό ρεύματος – τάσης ή αλλιώς σημείο της χαρακτηριστικής I-V αντιστοιχεί ένα συγκεκριμένο σημείο ισχύος. Η τιμή της ισχύος μεγιστοποιείται στο γόνατο της χαρακτηριστικής I-V.

Ουσιαστικά η ισχύς προκύπτει από το γινόμενο $I \times V$ δηλαδή από το γινόμενο του ρεύματος με την τάση του εκάστοτε σημείου λειτουργίας της φωτοβολταϊκής διάταξης πάνω στη χαρακτηριστική I-V.

Το γινόμενο αυτό μεγιστοποιείται όταν το εμβαδόν που προκύπτει από το γινόμενο του ρεύματος επί την τάση είναι το μέγιστο στην κανονικοποιημένη χαρακτηριστική ως προς V_{oc} και I_{sc} . Επεξηγηματικά, το V_{oc} είναι το χαρακτηριστικό σημείο της τάσης ανοικτοκύκλωσης, όπου το ρεύμα είναι μηδέν και το I_{sc} είναι το ρεύμα βραχυκυκλώσεως, όπου η τάση είναι μηδενική, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9 και προκύπτει από το [9].

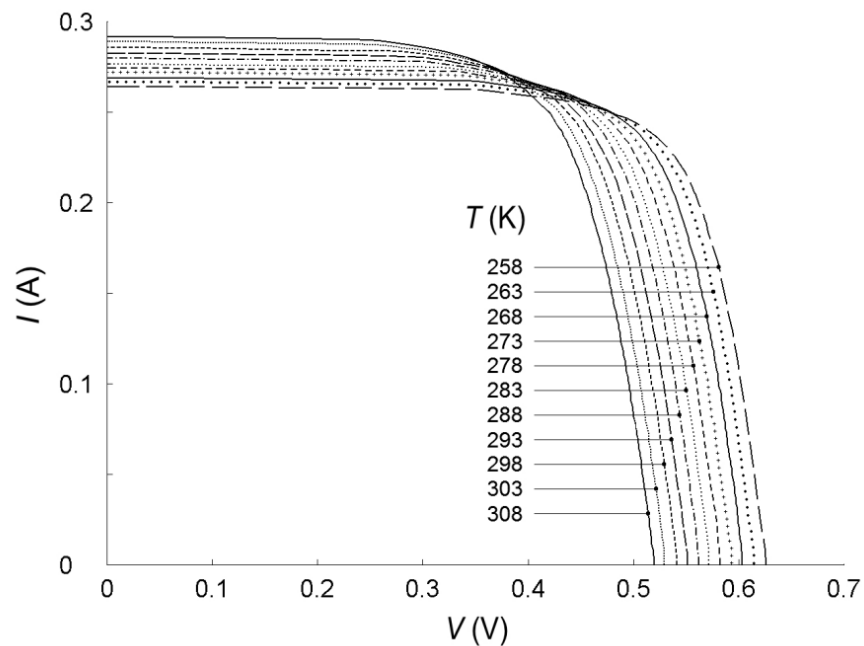


Σχήμα 2.9: Κανονικοποιημένη χαρακτηριστική I-V ενός Φ/Β στοιχείου [9].

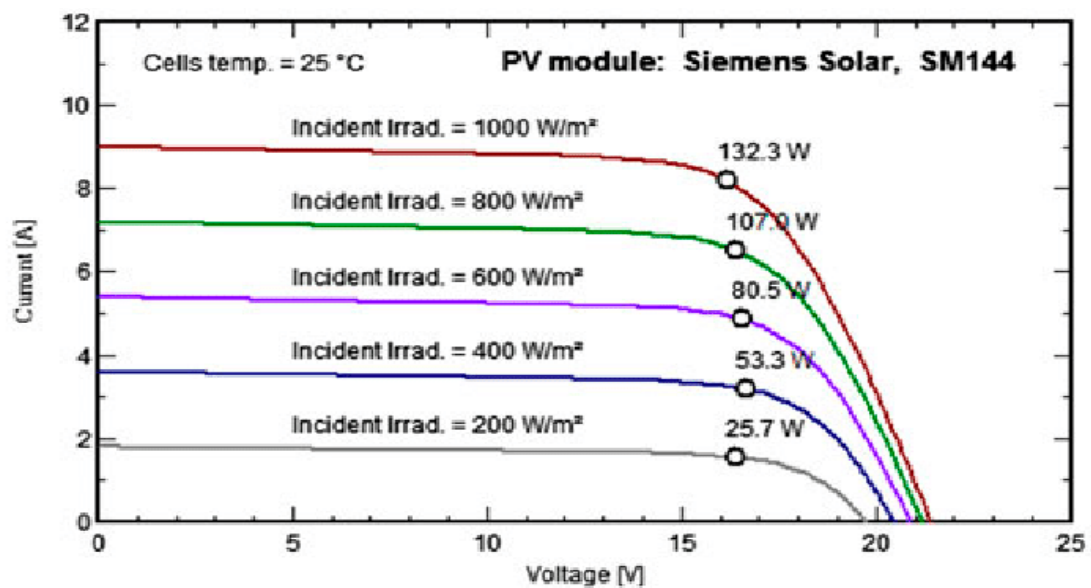
Φυσικά, η χαρακτηριστική αυτή εξαρτάται από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και τη θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών στοιχείων της Φ/Β διάταξης.

Η θερμοκρασία στην πλειονότητα των υπολογισμών λογίζεται ως παράμετρος για δεδομένη ένταση ηλιακής ακτινοβολίας. Η επίδρασή της στη χαρακτηριστική υπολογίζεται βάσει των συντελεστών θερμοκρασίας που είναι διαφορετικοί για τη μεταβολή της και ισχύει ότι $T_{C,Voc} < 0$ και $T_{C,Isc} > 0$ ενώ $|T_{C,Isc}| < |T_{C,Voc}|$, όπου $T_{C,Voc}$ είναι ο συντελεστής θερμοκρασίας της τάσης ανοικτοκυκλώσεως και $T_{C,Isc}$ είναι ο συντελεστής θερμοκρασίας του ρεύματος βραχυκυκλώσεως. Παράδειγμα μεταβολής της χαρακτηριστικής I-V μιας φωτοβολταϊκής διάταξης λόγω της μεταβολής θερμοκρασίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.10, που προκύπτει από το [10].

Τη σημαντικότερη όμως επίδραση στη χαρακτηριστική I-V επιφέρει η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, όπως μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί στο παράδειγμα του Σχήματος 2.11, που προκύπτει από το [11].



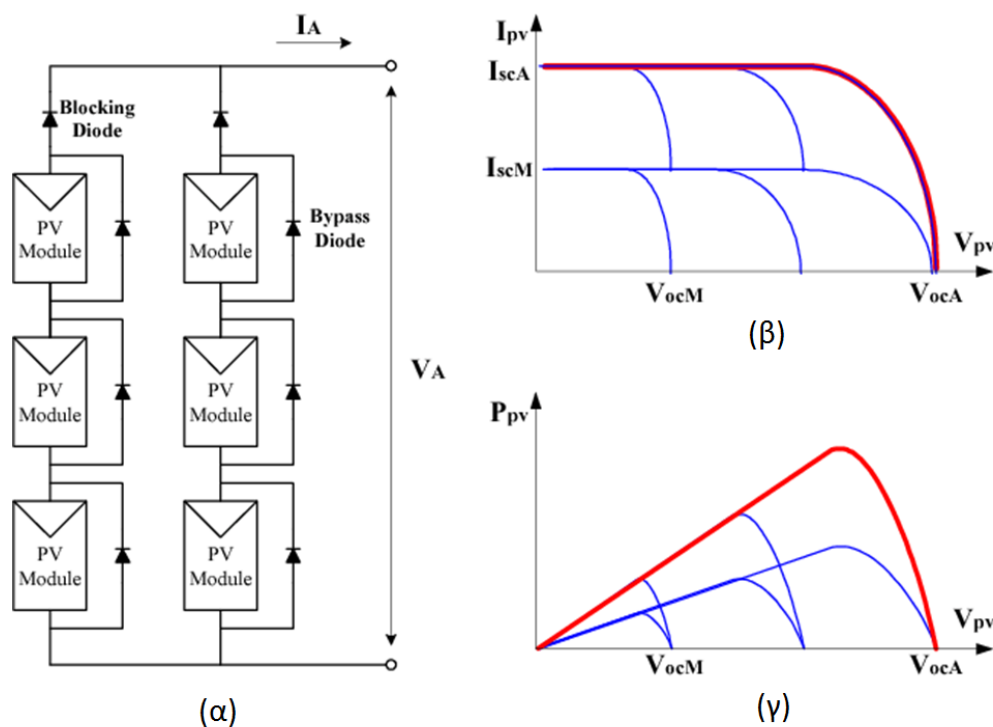
Σχήμα 2.10: Παράδειγμα επίδρασης της θερμοκρασίας στη μεταβολή της χαρακτηριστικής I - V μιας φωτοβολταϊκής διάταξης, υπό σταθερή ένταση ηλιακής ακτινοβολίας [10].



Σχήμα 2.11: Παράδειγμα επίδρασης της συνολικής έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στη μεταβολή της χαρακτηριστικής I - V της φωτοβολταϊκής διάταξης υπό σταθερή θερμοκρασία [11].

Επιπλέον, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδυάζονται με κατάλληλο τρόπο, ώστε να συνθέσουν Φ/Β πλαίσια και τα τελευταία επίσης συνδυάζονται για να συνθέσουν μια φωτοβολταϊκή διάταξη ή συστοιχία φωτοβολταϊκών.

Τα Φ/Β πλαίσια λειτουργούν με την ίδια χαρακτηριστική κάθε φορά, αφού λαμβάνουν την ίδια ένταση ηλιακής ακτινοβολίας και έχουν την ίδια κλίση ως προς την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Όταν τα Φ/Β πλαίσια συνδέονται σε σειρά οι χαρακτηριστικές I-V υπερτίθενται ως προς την τάση, ενώ το ρεύμα τους είναι το ίδιο.



Σχήμα 2.12: Ενδεικτική τοπολογία φωτοβολταϊκής διάταξης που συνίσταται σε συνδυασμό παράλληλης και σε σειρά συνδεσμολογίας [12].

Στο Σχήμα 2.12, που προκύπτει από το [12] και ειδικότερα στα γραφήματα (β) και (γ) ισχύει ότι η τάση ανοικτοκυκλώσεως του κάθε Φ/Β πλαισίου αναγράφεται ως V_{ocM} , η τάση ανοικτοκυκλώσεως της κάθε σειράς (string) διαμορφώνεται σε V_{ocA} , ενώ το ρεύμα βραχυκυκλώσεως της κάθε σειράς ισούται με I_{scM} . Η σύνδεση δύο σειρών παράλληλα διαμορφώνει την τελική χαρακτηριστική της Φ/Β συστοιχίας των έξι Φ/Β πλαισίων, όπου το ρεύμα βραχυκυκλώσεως και η τάση ανοικτοκυκλώσεως διαμορφώνονται στα V_{ocA} και I_{scA} αντίστοιχα.

Επίσης, στο Σχήμα 2.12(α) απεικονίζονται επιπλέον δύο τύποι διόδων, οι δίοδοι διαφυγής (bypass diodes) και οι δίοδοι αντεπιστροφής (blocking diodes). Η σημασία της χρήσης των διόδων αυτών διαπιστώνεται εάν θεωρηθεί ένα σενάριο, στο οποίο κάποιο Φ/Β πλαίσιο λαμβάνει λιγότερη ηλιακή ακτινοβολία, εξαιτίας πχ. σκιάσής του. Στη βιβλιογραφία το φαινόμενο αυτό αναφέρεται ως μερική σκίαση (partial shading) και έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή της χαρακτηριστικής I-V του συγκεκριμένου Φ/Β πλαισίου, αλλά και της αντίστοιχης ολόκληρου του Φ/Β πάνελ.

Χωρίς τη χρήση των διόδων διαφυγής και στην περίπτωση που θα λάμβανε χώρα μια μερική σκίαση ενός ή περισσότερων Φ/Β πλαισίων, το ρεύμα της σειράς θα περιοριζόταν στο ρεύμα του σκιασμένου Φ/Β πλαισίου. Με τη χρήση όμως των διόδων διαφυγής επιτυγχάνεται η δυνατότητα παράκαμψης της σκιασμένης μονάδας, ενώ η τάση της σειράς περιορίζεται.

Για την προστασία των σειρών (ή παράλληλων κλάδων), των οποίων η τάση έχει περιοριστεί σημαντικά, αλλά και για την αποφυγή της ροής ισχύος προς το Φ/Β πάνελ γίνεται η χρήση των διόδων αντεπιστροφής.

2.3 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας

Οι πολλές και διαφορετικές μεταξύ τους τεχνολογίες επιτρέπουν την αποθήκευση ενέργειας και είναι πλέον διαθέσιμες προς αξιοποίηση σε πληθώρα εφαρμογών στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σε κάτι τέτοιο έχει συμβάλει η βελτίωση των χαρακτηριστικών των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Τα πιο βασικά χαρακτηριστικά των συστημάτων αυτών είναι τα ακόλουθα:

- Η αποθηκευτική ικανότητα ή αλλιώς ειδική ενέργεια ή πυκνότητα ενέργειας, η οποία μετριέται σε ποσότητα ενέργειας ανά κιλό (kWh/kg) ή ανά λίτρο (kWh/liter) του ESS (Energy Storage System), αντίστοιχα.
- Η ειδική ισχύς ή πυκνότητα ισχύος μετρά την αποδιδόμενη ισχύ ανά κιλό (kW/kg) ή ανά λίτρο (kW/liter) του ESS, αντίστοιχα.

- Η ικανότητα φόρτισης μετρά την ποσότητα ενέργειας που αποθηκεύεται στο ESS ανά δευτερόλεπτο (kWh/s).
- Το κόστος σε χρηματικές μονάδες.
- Η θερμοκρασία λειτουργίας (εύρος θερμοκρασιών στην κλίμακα Kelvin/Celsius/Fahrenheit).
- Η διάρκεια ή κύκλος ζωής μετρά τον αριθμό των κύκλων πλήρους φορτίσεως-εκφορτίσεως, μέχρις ότου το ESS φτάσει στη συνθήκη τερματισμού της ζωής του – EOL (End Of Life). Ο ορισμός της συνθήκης EOL ποικίλει ανάλογα με τη χρήση του ESS. Μια κοινή συνθήκη EOL σχετίζεται με την επίτευξη χωρητικότητας ίσης με το 80% της αρχικής χωρητικότητας.
- Η ημερολογιακή διάρκεια ζωής μετρά το χρόνο, όπου το ESS μπορεί να παραμείνει φορτισμένο με ελάχιστη έως μηδενική χρήση μέχρι να επιτευχθεί η συνθήκη EOL.

Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, οι οποίες εφαρμόζονται κατά περίπτωση ανάλογα με τα πλεονεκτήματα ή τα μειονεκτήματα και το κατά πόσο τελικά ταιριάζουν στο είδος της εφαρμογής όπου πρόκειται να αξιοποιηθούν. Έτσι, υπάρχουν ηλεκτροχημικές κυψέλες (οι μπαταρίες) που στη βιβλιογραφία αναφέρονται ως συστήματα αποθήκευσης μπαταριών. Επιπλέον, υπάρχουν κυψέλες υπερ-πυκνωτών που συχνά χρησιμοποιούνται σε υβριδικές διατάξεις σε συνδυασμό με συστήματα αποθήκευσης μπαταριών. Ο σκοπός τους είναι να ικανοποιούν καταστάσεις λειτουργίας που δεν μπορούν να εξυπηρετήσουν από μόνες τους οι μπαταρίες και που σχετίζονται με αιχμές ισχύος, είτε πρόκειται για αποθήκευση, είτε για απόδοση ισχύος.

Άλλες τεχνολογίες που είναι διαθέσιμες στην αγορά που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση ενέργειας είναι τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σφονδύλων και οι κυψέλες καυσίμου.

2.4 Αποθήκευση ενέργειας σε μπαταρίες

Τα πιο συνήθη συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, τα οποία εφαρμόζονται σε οικιακούς καταναλωτές με συμπαραγωγή από Φ/Β συστήματα είναι αυτά που αποτελούνται από συσσωρευτές ή πιο απλά μπαταρίες. Επιπλέον και για τους καταναλωτές αυτούς, τα συστήματα μπαταριών αποτελούν τον πλέον αποδοτικό τρόπο αποθήκευσης ενέργειας.

Στη βιβλιογραφία είναι γνωστά ως συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες (Battery Energy Storage – BES). Τα κύρια χαρακτηριστικά των συστημάτων αυτών αναλύονται ακριβώς παρακάτω, ενώ έχουν ιδιαίτερη σημασία για τη σωστή μοντελοποίηση ενός πραγματικού συστήματος για κάθε τύπο βελτιστοποίησης που μπορεί εν δυνάμει να εξεταστεί.

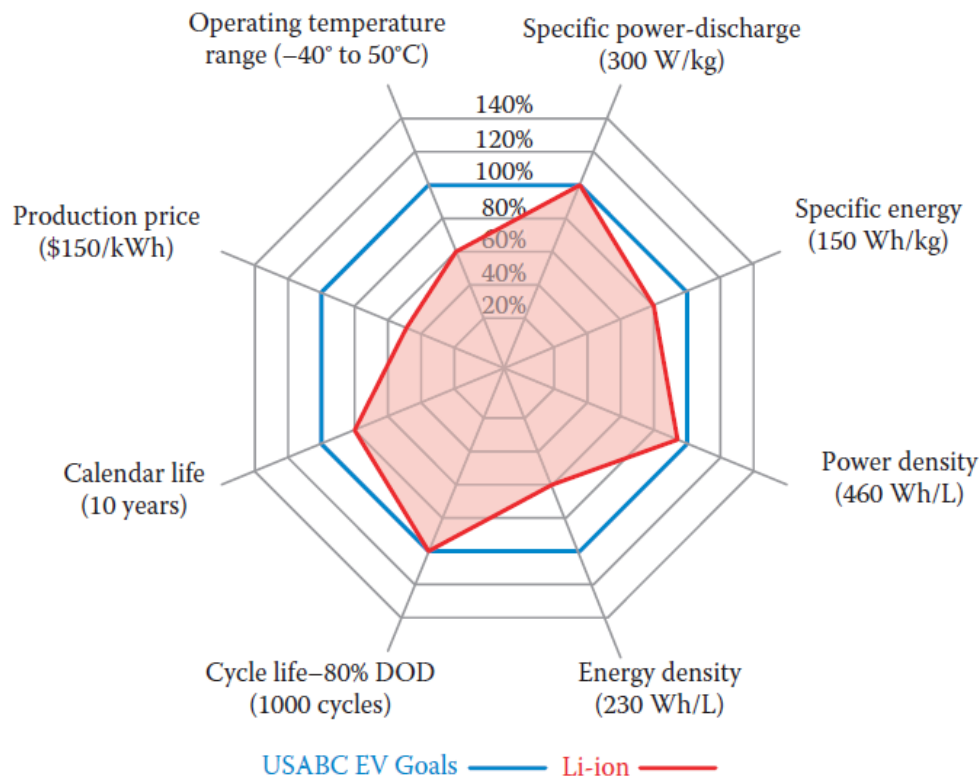
2.4.1 Πυκνότητα ενέργειας και ειδική ενέργεια

Η πυκνότητα ενέργειας εκφράζει τη μέγιστη ποσότητα ενέργειας ανά μονάδα όγκου που δύναται να αποθηκευτεί στο ESS, ενώ η ειδική ενέργεια εκφράζει την ποσότητα ενέργειας ανά μονάδα μάζας.

Οι απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις ανάλογα με τη βελτιστοποίηση που μπορεί να επιχειρείται, ενώ το σύστημα BES που χρησιμοποιείται θέτει περιορισμούς όχι μόνο στην ποσότητα ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί, αλλά και στο ρυθμό που αυτή μπορεί να διατεθεί, δηλαδή στην ισχύ, είτε πρόκειται για αποθήκευση, είτε για εκφόρτιση.

Για τη δυναμική, λοιπόν, του εκάστοτε τύπου συστήματος που θα εξεταστεί, ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει η συσχέτιση ισχύος-ενέργειας του BES.

Είναι ενδιαφέρον να παρατηρηθούν τα ειδικά χαρακτηριστικά των μπαταριών Li-ion, όπως έχουν εξελιχθεί ανά τα χρόνια και οι στόχοι που έχουν τεθεί, όπως απεικονίζονται στο Σχήμα 2.13, που προκύπτει από το [13].

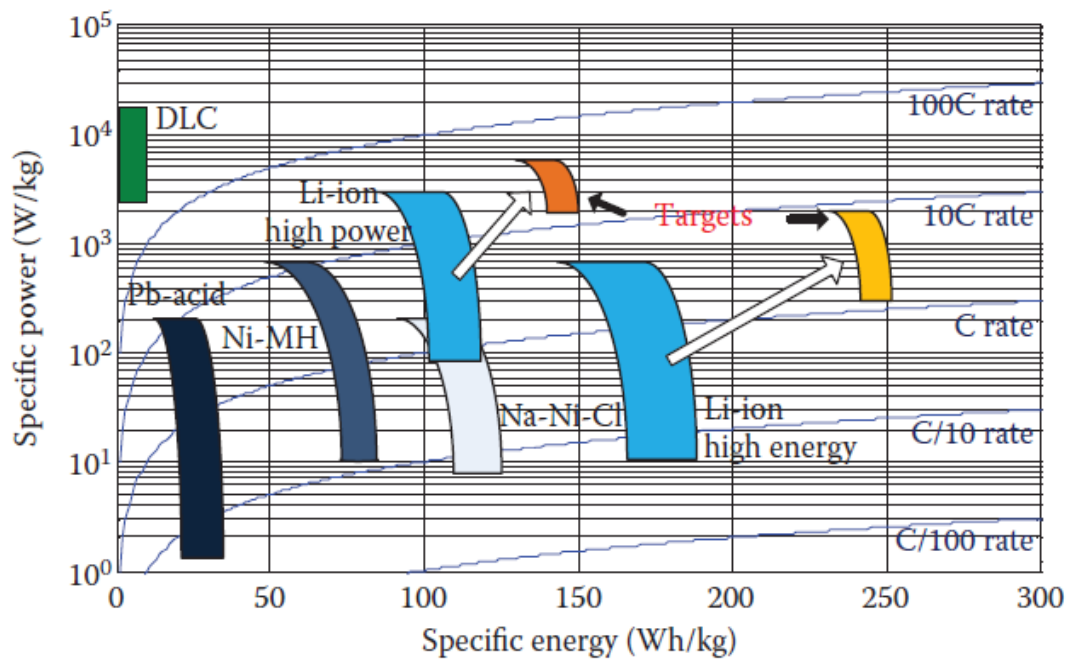


Σχήμα 2.13: Χαρακτηριστικά τυπικών μπαταριών Li-ion, όπως αυτές έχουν αναπτυχθεί έως το 2015 (κόκκινο περίγραμμα), καθώς και οι στόχοι που έχουν τεθεί (μπλε περίγραμμα) [13].

2.4.2 Πυκνότητα ισχύος

Η πυκνότητα της ισχύος εκφράζει την ποσότητα και το ρυθμό, με τον οποίο η ενέργεια μπορεί να διατεθεί ανά μονάδα όγκου του ESS, ενώ η ειδική ισχύς τα εκφράζει ανά μονάδα μάζας.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως οι απαιτήσεις στα διάφορα χαρακτηριστικά είναι ισχυρά εξαρτώμενες από το είδος της εφαρμογής. Στο Σχήμα 2.14, που προκύπτει από το [13], αποτυπώνεται η συσχέτιση μεταξύ της ειδικής ισχύος και της ειδικής ενέργειας για διάφορες τεχνολογίες ESS.



Σχήμα 2.14: Διάγραμμα ειδικής ισχύος – ειδικής ενέργειας για τις διάφορες τεχνολογίες μπαταριών [13].

Η γνώση των δύο αυτών χαρακτηριστικών (πυκνότητας ισχύος και πυκνότητας ενέργειας) είναι απαραίτητη για την ορθή μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των BES σε επίπεδο προσομοιώσεων, όπως και για τη μοντελοποίηση ενός συστήματος BES, το οποίο μπορεί να δομηθεί από συνδυασμό πολλαπλών ηλεκτροχημικών κυψελών.

2.4.3 Κύκλος ζωής και ημερολογιακή ζωή

Ο κύκλος ζωής είναι ένα μέτρο της διάρκειας ζωής ενός ESS που στηρίζεται στην απόλυτη τιμή του εκτιμώμενου αριθμού πλήρων φορτίσεων και εκφορτίσεων, που μπορεί να υποστεί μέχρι την ικανοποίηση του κριτηρίου τερματισμού της ζωής – EOL. Μαθηματικά μπορεί να εκφραστεί ως ακολούθως:

$$Cycle\ Life = \min\{N_{charges}\} \forall N_{charges} : N_{charges} \Rightarrow EOL \quad (2.5)$$

όπου τα $N_{charges}$ αντιστοιχούν στον αριθμό πλήρων φορτίσεων-εκφορτίσεων στα οποία ικανοποιείται η συνθήκη EOL. Μπορούν να υπολογιστούν από δοκιμές

επιταχυνόμενης γήρανσης από τις κατασκευάστριες εταιρείες BES. Από τα $N_{Charges}$ αυτό που έχει την ελάχιστη τιμή αντιστοιχεί στον κύκλο ζωής.

Ένα σύνηθες κριτήριο EOL είναι ένα κατώτατο όριο μέγιστης χωρητικότητας κατά κύριο λόγο σε σύγκριση με την ονομαστική χωρητικότητα στην αρχή της ζωής (Beginning of Life – BOL). Ανάλογα με την εφαρμογή, σε ένα ESS ο αριθμός των κύκλων πλήρους φορτίσεων-εκφορτίσεων εξαρτάται από μια ειδική ποσότητα που είναι γνωστή ως βάθος εκφόρτισης (Depth of Discharge – DOD).

Εκτός όμως από την υποβάθμιση των ESS λόγω των χημικών αντιδράσεων που συντελούνται κατά τη φόρτιση και εκφόρτιση, επιπλέον τέτοιες αντιδράσεις συμβαίνουν κατά τη διάρκεια αποθήκευσης της ενέργειας στις μπαταρίες. Για αυτόν το λόγο, υπάρχει και ένας διαφορετικός δείκτης που ονομάζεται ημερολογιακή ζωή που μετρά το χρόνο που ένα ESS μπορεί να παραμείνει φορτισμένο χωρίς να ικανοποιείται η συνθήκη EOL. Είναι λοιπόν ένας γενικότερος δείκτης διάρκειας ζωής και ικανότητας διατήρησης του φορτίου από ένα ESS σύστημα από τη στιγμή που αρχίζει να χρησιμοποιείται.

2.4.4 Θερμοκρασία λειτουργίας

Ένα τυπικό εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας ενός ESS τύπου BES είναι από -40°C έως 60°C . Η επίδραση θερμοκρασιακών εκτροπών από το εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας έχει ποικίλες επιπτώσεις που εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από την εφαρμογή. Για τις περισσότερες τεχνολογίες μπαταριών και ειδικά για τις μπαταρίες ιόντων-λιθίου (Li-ion), θα προκληθεί μείωση του κύκλου ζωής τους ειδικά υπό την επίδραση υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας. Από την άλλη, οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος είναι σχετικά λιγότερο ευάλωτες στην υποβάθμιση της απόδοσής τους εξαιτίας θερμοκρασιακών εκτροπών (κυρίως υπερβάσεων).

2.4.5 Ασφάλεια

Το χαρακτηριστικό αυτό σχετίζεται περισσότερο με την επιλογή του σωστού συνδυασμού συνθηκών φόρτισης, εκφόρτισης και αποθήκευσης για την εξασφάλιση

της βέλτιστης, αξιόπιστης και ασφαλούς λειτουργίας. Για παράδειγμα, πολύ υψηλές τιμές τάσης κατά την ολοκλήρωση της φόρτισης ή πολύ χαμηλές τιμές τάσης κατά την ολοκλήρωση της εκφόρτισης κατά DOD ή ρυθμοί φόρτισης/εκφόρτισης μεγαλύτεροι των μέγιστων (ονομαστικών) βάσει προδιαγραφών, δε θα έχουν επίδραση μόνο στη μείωση του κύκλου ζωής, αλλά είναι πιθανό να οδηγήσουν σε καταστροφή της μπαταρίας.

2.4.6 Τεχνολογίες BES

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σε μπαταρίες (BES) ουσιαστικά συνίστανται σε συστοιχίες ηλεκτροχημικών κυψελών. Η λειτουργία τους στηρίζεται σε αντιδράσεις οξειδοαναγωγής, μέσω των οποίων λαμβάνει χώρα η φόρτιση και η εκφόρτισή τους.

Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες ηλεκτροχημικών κυψελών είναι οι ακόλουθες:

- Οι κυψέλες μολύβδου-οξέος.
- Οι κυψέλες νικελίου-υδρογονούχου μετάλλου.
- Οι κυψέλες ιόντων-λιθίου.
- Οι κυψέλες νικελίου του νατρίου.

Μερικά από τα πιο χρήσιμα λειτουργικά χαρακτηριστικά των συστημάτων μπαταριών δίνονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Λειτουργικά χαρακτηριστικά διαφόρων τεχνολογιών μπαταριών.

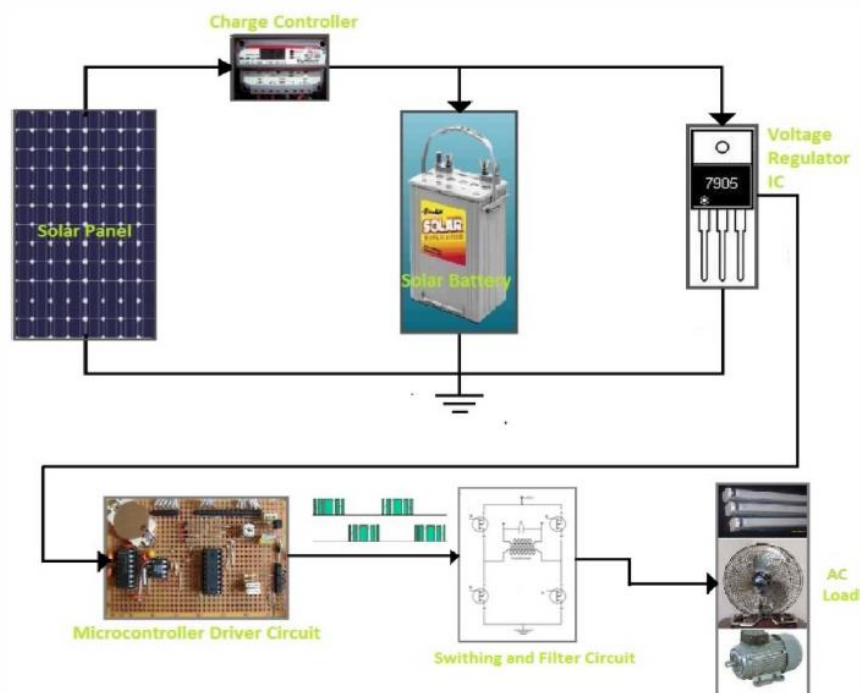
Τεχνολογία Μπαταρίας	Ονομαστική Τάση (V)	Βαρυμετρική ή Πυκνότητα (Wh/kg)	Ογκομετρική ή Πυκνότητα (Wh/l)	Απόδοση (%)	Θερμοκρασία λειτουργίας (°C)
Μόλυβδου – οξέος	2	30-40	80-100	50–85	-20 με +50
Νικελίου – Υδρογονούχου Μετάλλου	1.2	70-95	180-220	65–95	0 με +45
Ιόντων-λιθίου	3-3.7	120-150	200-400	95–99	0 με +45

Από τον πίνακα αυτόν διαπιστώνεται η βασική αιτία, για την οποία οι μπαταρίες τύπου ιόντων-λιθίου είναι οι πλέον χρησιμοποιούμενες στην πλειονότητα των εφαρμογών. Οι κύριοι λόγοι είναι η υψηλή ειδική ισχύς και βαρυμετρική πυκνότητα καθώς και η υψηλή απόδοση, που καθιστούν την τεχνολογία αυτή ως την πλέον κατάλληλη για την αποθήκευση ενέργειας που παράγεται από φωτοβολταϊκά συστήματα οικιακών καταναλωτών.

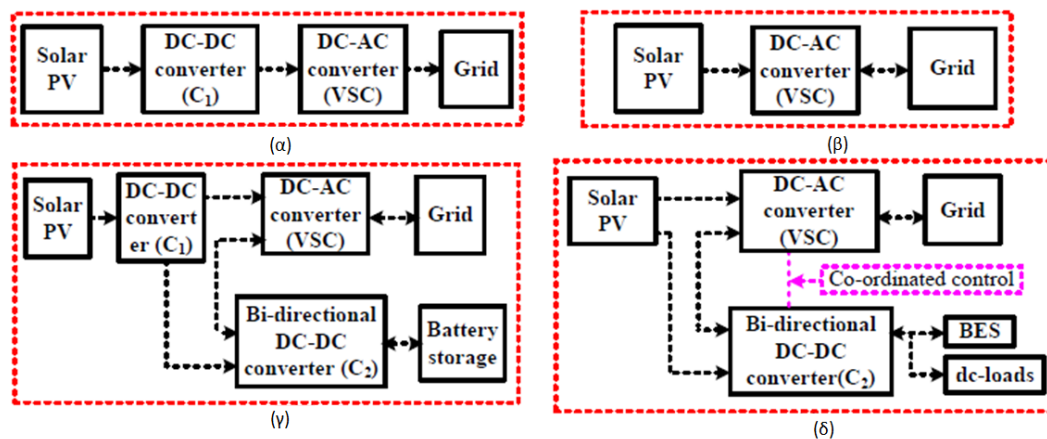
2.5 Συστήματα διαχείρισης ενέργειας κτηρίων με χρήση συστοιχιών μπαταριών και Φ/Β διατάξεων σε οικιακές εγκαταστάσεις

Τα συστήματα μπαταριών όπως και τα Φ/Β συστήματα για τη διασύνδεσή τους με το δίκτυο απαιτούν τη χρήση ενός αντιστροφέα. Μια ενδεικτική απεικόνιση ενός τέτοιου συστήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.15, που προκύπτει από το [14], όπου η φόρτιση του BES επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός ελεγκτή φόρτισης πριν τον αντιστροφέα, ο οποίος στο σχήμα αναγράφεται ως “Switching and Filter Circuit”, ενώ μεσολαβεί ένας ρυθμιστής τάσης. Αυτό το σύστημα διασύνδεσης, όπως προαναφέρθηκε είναι ενδεικτικό, ενώ η πιο συνήθης διάταξη είναι η διασύνδεση της Φ/Β διάταξης και του BES μεταξύ τους, καθώς και του κάθε ενός με το δίκτυο.

Ο κάθε μετατροπέας ισχύος, είτε πρόκειται για DC/AC είτε για DC/DC, συνεισφέρει στις συνολικές απώλειες ενέργειας του συστήματος.



Σχήμα 2.15: Διάγραμμα Φ/Β συστοιχίας με τη χρήση BES για την τροφοδότηση εναλλασσόμενου (AC) ηλεκτρικού φορτίου [14].



Σχήμα 2.16: Συστήματα διασύνδεσης Φ/Β συστοιχιών με το ηλεκτρικό δίκτυο [15].

Στο [15] αναφέρονται τέσσερις βασικές κατηγορίες, με τις οποίες μπορεί να επιτευχθεί η διασύνδεση ενός Φ/Β συστήματος με το ηλεκτρικό δίκτυο, δύο εκ των οποίων αφορούν στη χρήση συστημάτων μπαταριών και οι οποίες απεικονίζονται στο Σχήμα 2.16.

Στην περίπτωση του Σχήματος 2.16(α) η διασύνδεση με το δίκτυο συντελείται με τη χρήση δύο μετατροπέων και επομένως γίνεται σε δύο στάδια. Ο πρώτος μετατροπέας συνίσταται σε ένα μετατροπέα ΣΡ-ΣΡ (DC-DC). Ο σκοπός του μετατροπέα αυτού είναι να προσαρμόζει το επίπεδο της τάσης της Φ/Β συστοιχίας και στην έξοδό του να αποδίδει μια τάση τέτοιας τιμής που θα αυξάνει την απόδοση της επόμενης βαθμίδας και επομένως την απόδοση ολόκληρου του συστήματος. Επιπλέον, ο μετατροπέας ΣΡ-ΣΡ αναλαμβάνει τη διαδικασία εντοπισμού του σημείου μέγιστης ισχύος (MPP tracking – MPPT). Ο μετατροπέας αυτός μπορεί να είναι ένας μετατροπέας ανύψωσης της τάσης (Boost DC-DC converter) ή μικτός (Buck-Boost converter) ή ένας μετατροπέας Cuk. Μπορεί όμως να είναι και ένας μετατροπέας με απομόνωση, όπως πχ. ένας Flyback μετατροπέας ΣΡ-ΣΡ.

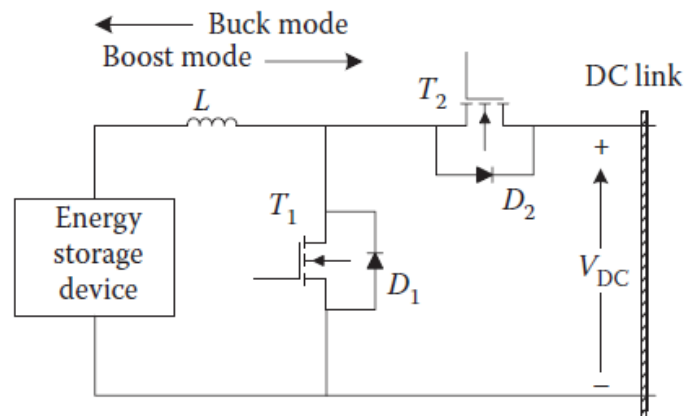
Η επόμενη βαθμίδα συνίσταται σε έναν αντιστροφέα, δηλαδή έναν μετατροπέα ΣΡ-ΕΡ (DC-AC), μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η διασύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο. Πέραν της μετατροπής του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο, στη βαθμίδα αυτή πραγματοποιείται και ο συγχρονισμός με το ηλεκτρικό δίκτυο, συνήθως με τη χρήση ενός PLL (Phase-Locked Loop). Ο αντιστροφέας λειτουργεί ως πηγή τάσης (Voltage Source Control – VSC) και επομένως η λειτουργία του εξαρτάται

από την DC τάση αναφοράς στην είσοδό του. Επειδή ο αντιστροφέας δεν είναι επιφορτισμένος με το MPPT η απόδοση του συστήματος αυξάνεται σημαντικά, τόσο λόγω της υψηλότερης ακρίβειας εντοπισμού του εκάστοτε MPP όσο και της υψηλότερης DC τάσης στην είσοδο του αντιστροφέα που συνεπάγεται μικρότερες απώλειες ενέργειας.

Η διάταξη του Σχήματος 2.16(β) αποτελεί την κλασική περίπτωση διασύνδεσης χαμηλής ισχύος Φ/Β συστοιχιών με το δίκτυο (όπως είναι η περίπτωση οικιακών παραγωγών). Η διαδικασία MPPT μαζί με τη διασύνδεση με το δίκτυο λαμβάνουν χώρα στη βαθμίδα του αντιστροφέα.

Οι διατάξεις των Σχημάτων 2.16(γ) και (δ) στηριζόμενες στις τοπολογίες διασύνδεσης των Σχημάτων 2.16(α) και (β), αντίστοιχα, τροποποιούνται κατάλληλα, ώστε να συμπεριλάβουν συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και πιο συγκεκριμένα συστοιχίες μπαταριών – BES. Και στα δύο συστήματα η σύνδεση με το BES επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός δι-κατευθυντήριου DC-DC μετατροπέα. Ο λόγος της χρήσης τέτοιων μετατροπέων διαπιστώνεται με ευκολία, καθώς σχετίζεται με τη χαμηλή συνήθως τάση των BES. Φυσικά, η τάση λειτουργίας των BES καθορίζεται από την τοπολογία διασύνδεσης μεταξύ των επιμέρους μονάδων μπαταριών, οι οποίες τελικά συνθέτουν τη συστοιχία μπαταριών. Ωστόσο, στη γενική περίπτωση είναι επιθυμητή η διατήρηση της ονομαστικής τάσης λειτουργίας ενός BES κάτω από ένα ορισμένο επίπεδο για πληθώρα αιτιών, όπως είναι η ασφάλεια καθώς και η ευκολία ελέγχου.

Σημαντικό είναι επίσης ότι για την αποθήκευση της ενέργειας στο BES απαιτείται συνήθως ο υποβιβασμός της τάσης του συστήματος σε μια άλλη χαμηλότερης τιμής. Έτσι, ο δι-κατευθυντήριος μετατροπέας ισχύος θα πρέπει να λειτουργεί ως μετατροπέας υποβιβασμού της τάσης στην κατεύθυνση φόρτισης. Κατά την εκφόρτιση όμως της συστοιχίας ο μετατροπέας αυτός θα πρέπει να λειτουργεί ως ανυψωτής της τάσης, ώστε να ανυψώσει την τάση του BES στην τάση του συστήματος, στο οποίο συνδέεται. Το σημείο αυτό αναφέρεται ως DC link, το οποίο μαζί με τα υπόλοιπα στοιχεία του δι-κατευθυντήριου μετατροπέα απεικονίζονται στο Σχήμα 2.17, που προκύπτει από το [13].



Σχήμα 2.17: Ένας τυπικός δικατευθυντήριος DC-DC μετατροπέας. Στην κατεύθυνση εκφόρτισης λειτουργεί ως μετατροπέας ανύψωσης της τάσης (Boost DC-DC converter), ενώ στην κατεύθυνση φόρτισης λειτουργεί ως μετατροπέας υποβίθασμού της τάσης (Buck DC-DC converter) [13].

2.6 Τεχνικές διαχείρισης ενέργειας και τύποι φορτίου σε οικιακούς καταναλωτές

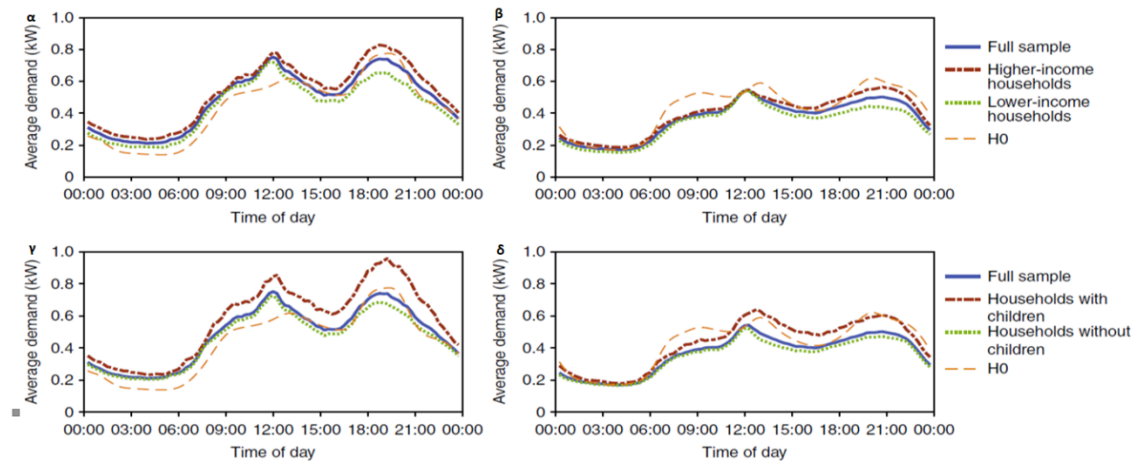
Για την υλοποίηση των μεθόδων βελτιστοποίησης ο σωστός προσδιορισμός του οικιακού φορτίου είναι ιδιαίτερης σημασίας [16]. Γενικότερα, για την περιγραφή του φορτίου οποιουδήποτε τύπου καταναλωτή χρησιμοποιείται το λεγόμενο προφίλ φορτίου. Αυτό συνίσταται σε ωριαίες τιμές του φορτίου στο χρονικό διάστημα που μελετάται [17]. Μια άλλη προσέγγιση, που αποτελεί προσθήκη στο προηγούμενο είναι η ανάλυση του φορτίου σε συστάδες (clusters), όπου με τη βοήθεια μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης τα ημερήσια προφίλ φορτίου (δηλαδή οι κάθε είκοσι τέσσερις ωριαίες τιμές) ομαδοποιούνται σε συστάδες που συνίστανται σε ημερήσια προφίλ ωριαίων καταναλώσεων. Αυτή η προσέγγιση διευκολύνει σημαντικά την εφαρμογή μεθόδων μηχανικής μάθησης, που έχουν ως στόχο να βελτιστοποιήσουν το προφίλ κατανάλωσης. Ωστόσο, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας θα αξιοποιηθούν απλές ωριαίες τιμές φορτίου που θα δίνονται σε μορφή συνόλου δεδομένων, όπως θα εξηγηθεί αναλυτικά στην αντίστοιχη ενότητα ακολουθώντας αξιοποιώντας παράλληλα πηγές όπως το [18].

Μια σημαντική παράμετρος της διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι η μεταβολή των ωριαίων τιμών αγοράς και πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι

αλγόριθμοι που θα εφαρμοστούν εκπαιδεύονται με τρόπο τέτοιο ώστε να βελτιώνονται στη λήψη αποφάσεων. Κάτι τέτοιο έχει σχέση με τη διαδικασία πρόβλεψης του προφίλ φορτίου στη μελέτη των ηλεκτρικών δικτύων με έμφαση σε μικρο-δίκτυα διανομής. Δηλαδή η ανάλυση του προφίλ φορτίου μπορεί να συμβάλει στην ανάπτυξη αποτελεσματικότερων αλγορίθμων. Οι βασικές συνιστώσες – εφαρμογές στην ανάπτυξη κατάλληλων αλγορίθμων είναι η ενέργεια που διατίθεται από διεσπαρμένη παραγωγή, η διαχείριση της ενεργειακής ζήτησης, καθώς και οι ανταλλαγές ισχύος που πραγματοποιούνται στα συστήματα που εξετάζονται στην παρούσα εργασία.

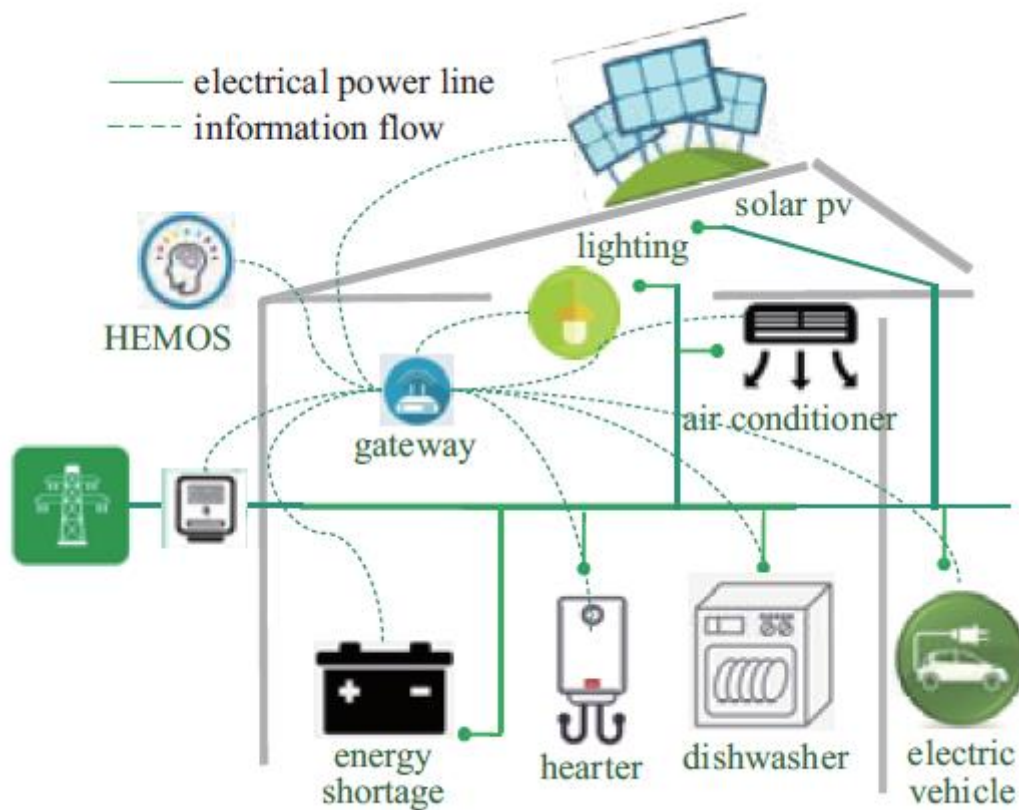
Δύο αρκετά εδραιωμένες τεχνικές που αξιοποιούνται στη μοντελοποίηση του προφίλ φορτίου είναι η μέθοδος από κάτω προς τα πάνω (bottom-up method), καθώς και η στατιστική μέθοδος. Στην πρώτη προσέγγιση, η τελική κατανάλωση αποτελεί το αντικείμενο μελέτης, οπότε και δίνεται έμφαση στο καταναλωτικό μοτίβο του εκάστοτε καταναλωτή. Η στατιστική προσέγγιση μοιάζει περισσότερο με την ανάλυση σε συστάδες, που εξηγήθηκε προηγουμένως, όπου το αντικείμενο της μελέτης είναι η περιγραφή των χαρακτηριστικών των δεδομένων εισόδου.

Πέραν των προαναφερθέντων, ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που σχετίζεται με το φορτίο των οικιακών καταναλωτών, σύμφωνα με το [19], είναι ότι η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας που προορίζεται για τους καταναλωτές εξαρτάται από ένα σύνολο συνιστωσών που περιλαμβάνουν τους δασμούς του δικτύου, τους φόρους και τις προσαυξήσεις, όπως πχ. είναι οι προσαυξήσεις για τις ανανεώσιμες πηγές και οι προσαυξήσεις χρησιμοποίησης. Τέλος, σε όλα τα προηγούμενα προστίθενται οι χρεώσεις για την καταναλωθείσα ενέργεια. Τόσο το προφίλ φορτίου καθ' αυτό όσο και το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο βελτιστοποίησης στην εφαρμοζόμενη μέθοδο. Σε κάθε όμως περίπτωση, τα δεδομένα που αξιοποιούνται στην εκτέλεση των αλγορίθμων που εξετάζονται στην παρούσα εργασία θα πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικά για κάθε είδους οικιακό καταναλωτή. Ενδεικτικό παράδειγμα για το προφίλ φορτίου οικιακών καταναλωτών απεικονίζεται στο Σχήμα 2.18, που προκύπτει από το [19].



Σχήμα 2.18: Συγκριτική παράθεση των προφίλ φορτίου διαφορετικών τύπων οικιακών καταναλωτών κατ' αντιστοιχία με το τυποποιημένο προφίλ φορτίου (H0) που χρησιμοποιείται από τους παρόχους ρεύματος της Αυστρίας για την πρόβλεψη και τον υπολογισμό της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας όταν δεν είναι διαθέσιμα άλλα δεδομένα φορτίου. Το (α) αντιστοιχεί στο μέσο προφίλ της Κυριακής τον Χειμώνα, το (β) στο μέσο ημερήσιο προφίλ των εργάσιμων ημερών του Καλοκαιριού, το (γ) στο μέσο ετήσιο ημερήσιο προφίλ του Σαββάτου και το (δ) στο μέσο ημερήσιο προφίλ των εργάσιμων ημερών του Καλοκαιριού. Τα διαγράμματα αυτά προέκυψαν από δεδομένα των παρόχων ηλεκτρικής ενέργειας της Αυστρίας. Σε κάθε επιμέρους διάγραμμα απεικονίζονται τα προφίλ των νοικοκυριών υψηλού εισοδήματος, χαμηλού εισοδήματος, ο μέσος όρος των δύο προηγούμενων, καθώς και το τυποποιημένο προφίλ [19].

Στο Σχήμα 2.19, που προκύπτει από το [20], παρουσιάζεται η ενδεικτική μορφή ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας κατοικιών. Αυτή η σχηματική απεικόνιση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην κατασκευή-διαμόρφωση του εκάστοτε αλγορίθμου που θα υλοποιεί στρατηγικές βελτιστοποίησης.



Σχήμα 2.19: Δομή των συστημάτων ενεργειακής διαχείρισης κατοικιών (Home Energy Management Systems – HEMS) [20].

Αναφορικά με τις στρατηγικές βελτιστοποίησης με βάση το προφίλ φορτίου (πέραν δηλαδή των στρατηγικών βελτιστοποίησης της αξιοποίησης της παραγόμενης ενέργειας από τις Φ/Β συστοιχίες και της αποθήκευσης/κατανάλωσης ενέργειας από το BES) επιπλέον βελτιστοποίηση μπορεί να επιτευχθεί μέσω του χρονοπρογραμματισμού του φορτίου.

Βασιζόμενοι στην ανάλυση της φυσικής δομής του συστήματος, καθώς και των συνηθειών χρησιμοποίησης των εκάστοτε φορτίων-συσκευών των κατοικιών, οι ηλεκτρικές καταναλώσεις των τελευταίων μπορούν να τοποθετηθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες.

- Βασικό φορτίο, στο οποίο δεν υπάρχει η ευχέρεια μείωσής του ή μετακίνησής του σε άλλη χρονική περίοδο μέσα στην ημέρα (ή εβδομάδα αναλόγως της

στρατηγικής βελτιστοποίησης που εφαρμόζεται) και το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ως μία σταθερή ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.

- Χρονικά μετακινούμενο φορτίο (time-shifted load), το οποίο συμπεριλαμβάνει συσκευές, όπως είναι το πλυντήριο και το οποίο μπορεί να λάβει δύο καταστάσεις, ανοιχτό ή κλειστό. Έτσι, η χρονική περίοδος στην οποία ενεργοποιείται μπορεί να μεταβληθεί, ενώ η διάρκεια ενεργοποίησης των συσκευών αυτών θα παραμείνει ανεπηρέαστη.
- Φορτίο χρονικά μετακινούμενης ισχύος (power-shifted load), το οποίο μπορεί να είναι ευέλικτο, δηλαδή η ισχύς του να μπορεί να προσαρμόζεται σε δοθέντα χρονικά διαστήματα. Η διαφορά με την προηγούμενη κατηγορία είναι ότι στην περίπτωση των φορτίων αυτών, αυτό που αλλάζει είναι η ισχύς την οποία καταναλώνουν σε κάθε χρονικό διάστημα χρησιμοποίησής τους. Παράδειγμα τέτοιου τύπου φορτίου αποτελεί το κλιματιστικό, το οποίο μπορεί να προγραμματιστεί ώστε να καταναλώνει χαμηλή ή υψηλή ισχύ, έτσι ώστε να ικανοποιείται η στρατηγική βελτιστοποίησης της χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας.

Κεφάλαιο 3 : Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΤΗΡΙΩΝ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ

3.1 Περιγραφή του συστήματος βελτιστοποίησης

3.1.1 Περιγραφή του συστήματος

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στις προηγούμενες ενότητες οι αλγόριθμοι που εφαρμόζονται για τις στρατηγικές βελτιστοποίησης και υλοποιούν το σύστημα της ενεργειακής διαχείρισης ενός έξυπνου κτηρίου έχουν ως περιβάλλον την ηλεκτρική διασύνδεση ενός κτηρίου ή κατοικίας με το ηλεκτρικό δίκτυο. Σε αυτή, λοιπόν, την ενότητα περιγράφεται το σύστημα αναφοράς, δηλαδή το έξυπνο κτήριο, καθώς και όλες οι φυσικές παράμετροι που το χαρακτηρίζουν. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από κάποιο Φ/Β σύστημα, μια μονάδα αποθήκευσης ενέργειας, καθώς και έναν οικιακό καταναλωτή, δηλαδή το φορτίο μιας οποιασδήποτε κτηριακής μονάδας. Η βασική δομή από ηλεκτρικής άποψης ενός ενεργειακά έξυπνου κτηρίου απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1, που προκύπτει από το [21].

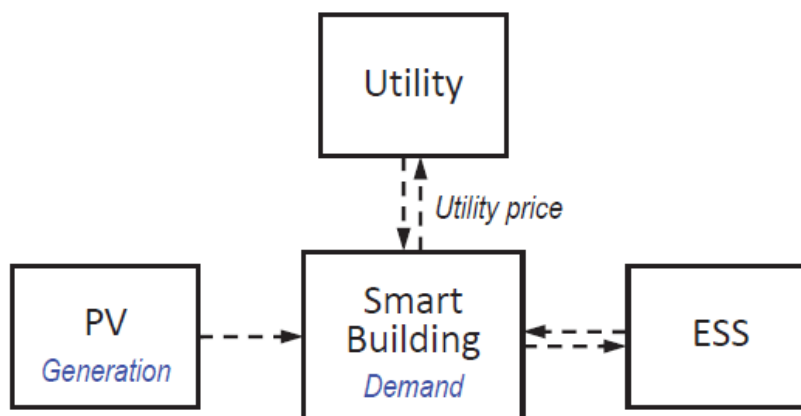
Πιο αναλυτικά, τα επιμέρους υποσυστήματα που απαρτίζουν το έξυπνο κτήριο είναι τα εξής:

- **Ηλεκτρικό δίκτυο (Utility):** αντιπροσωπεύει την εταιρεία που παρέχει ηλεκτρική ενέργεια σε πραγματικό χρόνο. Γίνεται η παραδοχή ότι τα ενεργειακά έξυπνα κτήρια είναι σε θέση να εμπορεύονται (να αγοράζουν και να πωλούν) ενέργεια με την εταιρεία ηλεκτρικής ενέργειας σε οποιοδήποτε χρόνο και σε τιμές που καθορίζονται από αυτήν.
- **Φ/Β σύστημα:** είναι το σύστημα παροχής ισχύος/ενέργειας, όπως έχει περιγραφεί σε προηγούμενη ενότητα. Η παραγόμενη ισχύς από τις Φ/Β συστοιχίες μεταβάλλει την καθαρή ενεργειακή κατανάλωση του κτηρίου αντισταθμίζοντας ή και

υπερκαλύπτοντας τη ζήτηση του τελευταίου, ενώ σε κάθε περίπτωση συμβάλει στην ικανοποίηση των απαιτήσεων σε ισχύ από το ενεργειακά έξυπνο κτήριο.

- Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (ESS): αντιπροσωπεύει τη δυνατότητα του κτηρίου να αποθηκεύει και να απελευθερώνει ηλεκτρική ισχύ, όποτε αυτό απαιτηθεί με τη χρήση ενός BES, του οποίου η λειτουργία και τα χαρακτηριστικά έχουν περιγραφεί σε προηγούμενη ενότητα.

Και τα τρία αυτά επιμέρους υποσυστήματα διασυνδέονται στο έξυπνο κτήριο (Smart Building). Στο Σχήμα 3.1 απεικονίζονται με βέλη οι ροές ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, μεταξύ της μονάδας αποθήκευσης και της κτηριακής εγκατάστασης υπάρχει αμφίδρομη ροή ισχύος. Έτσι, όταν αποθηκεύεται ενέργεια στη μονάδα αποθήκευσης, τότε η ροή ισχύος είναι προς τη μονάδα αποθήκευσης, ενώ όταν η μονάδα αποθήκευσης εκφορτίζεται, τότε η ροή ισχύος είναι από τη μονάδα αποθήκευσης προς το έξυπνο σπίτι. Αντίστοιχα, για τη ροή ισχύος της Φ/Β συστοιχίας η τελευταία έχει μόνο μία κατεύθυνση, καθώς πρόκειται για μονάδα παραγωγής ενέργειας. Ωστόσο, στο Σχήμα 3.1 δεν απεικονίζονται τα συστήματα της ενεργειακής διασύνδεσης, δηλαδή οι μετατροπείς ισχύος που αναλαμβάνουν το συγχρονισμό και τη μετατροπή της ισχύος στην κατάλληλη κάθε φορά μορφή.



Σχήμα 3.1: Απεικόνιση ενός ενεργειακά έξυπνου κτηρίου που συνδέεται με το ηλεκτρικό δίκτυο, ενώ περιλαμβάνει παραγωγή από Φ/Β σύστημα και υποστηρίζεται από ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (ESS – συνήθως BES) [21].

3.1.2 Εναλλακτικές τοπολογίες διασύνδεσης και ανάλυση των ροών ισχύος

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται δύο διαφορετικές μεταξύ τους τοπολογίες διασύνδεσης των επιμέρους υποσυστημάτων.

Στο Σχήμα 3.2 απεικονίζεται η τοπολογία διασύνδεσης των επιμέρους υποσυστημάτων που αξιοποιείται για την εκτέλεση των προσομοιώσεων της παρούσας εργασίας. Στην παρούσα εργασία ως ΕΡ ορίζεται το εναλλασσόμενο ρεύμα και ως ΣΡ ορίζεται το συνεχές ρεύμα. Σε αυτήν την τοπολογία υπάρχει μία κοινή σύνδεση ΕΡ (AC link), όπου συνδέονται τα επιμέρους υποσυστήματα και η ανταλλαγή ισχύος με το ηλεκτρικό δίκτυο γίνεται μέσω της κοινής αυτής σύνδεσης. Το κάθε επιμέρους υποσύστημα περιλαμβάνει μία ξεχωριστή βαθμίδα διασύνδεσης, δηλαδή ένα μετατροπέα ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, για τη Φ/Β συστοιχία γίνεται χρήση ενός αντιστροφέα (μετατροπέας ΣΡ/ΕΡ ή DC/AC). Η διαδικασία εντοπισμού του σημείου μέγιστης ισχύος γίνεται στην πρώτη βαθμίδα του αντιστροφέα (όπου εφαρμόζεται ο ΣΡ-ΣΡ ή DC/DC μετατροπέας) και για αυτόν το λόγο μια ρεαλιστική απόδοση του αντιστροφέα αυτού (μετατροπέας ΣΡ/ΕΡ ή DC/AC) είναι στο εύρος 84-90% της μέγιστης δυνατής στιγμιαίας ισχύος που μπορεί να δώσει το Φ/Β σύστημα και το οποίο αντιστοιχεί στο σημείο μέγιστης ισχύος MPP. Επιπλέον, ο μετατροπέας αυτός είναι μονο-κατευθυντήριος (αντιστροφέας), καθώς η Φ/Β συστοιχία λειτουργεί αποκλειστικά ως παραγωγός ισχύος, ενώ δεν καταναλώνει ισχύ. Έτσι, η ροή ισχύος είναι προς τη σύνδεση ΕΡ (AC link).

Επίσης, για τη μονάδα αποθήκευσης ισχύος, όπου και πάλι χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας ΣΡ/ΕΡ ή DC/AC για τη διασύνδεση ΕΡ, ο μετατροπέας αυτός πρέπει να είναι δι-κατευθυντήριος, ώστε να υποστηρίζει τόσο την αποθήκευση ισχύος στη μονάδα (φόρτιση), όσο και τη μεταφορά ισχύος προς το υπόλοιπο σύστημα (εκφόρτιση). Πιο συγκεκριμένα, ο μετατροπέας ΣΡ/ΕΡ θα πρέπει να λειτουργεί ως αντιστροφέας κατά την εκφόρτιση, ενώ ως ανορθωτής κατά τη φόρτιση της μονάδας αποθήκευσης. Τελικά, το κτήριο συνδέεται με το ηλεκτρικό δίκτυο μέσω της σύνδεσης ΕΡ (AC link).

Σχετικά με τις ροές ισχύος, ένα σενάριο είναι η ενέργεια από τη Φ/Β συστοιχία και τη μονάδα αποθήκευσης να κατευθύνεται προς τη σύνδεση ΕΡ, η οποία αν

υπερβαίνει σε τιμή το φορτίο του κτηρίου, τότε η ροή ισχύος θα είναι από τη σύνδεση ΕΡ προς το ηλεκτρικό δίκτυο. Με αντίστοιχο τρόπο και γνωρίζοντας για κάθε χρονική στιγμή τις ροές ισχύος από το Φ/Β σύστημα, το κτήριο και τη μπαταρία θα βρεθεί αν θα αγοραστεί ή θα πωληθεί ηλεκτρική ενέργεια από ή προς το ηλεκτρικό δίκτυο. Στο σύστημα που εξετάζεται οι ροές ισχύος, που είναι πάντοτε γνωστές για κάθε χρονικό βήμα, είναι οι ακόλουθες:

- Μεταξύ της μονάδας αποθήκευσης και της σύνδεσης ΕΡ.
- Μεταξύ της Φ/Β συστοιχίας και της σύνδεσης ΕΡ.
- Μεταξύ της σύνδεσης ΕΡ και του κτηρίου.

Έτσι τελικά προκύπτει η ενέργεια που ανταλλάσσεται μεταξύ της σύνδεσης ΕΡ και του ηλεκτρικού δικτύου.

Αναφορικά με τις βαθμίδες διασύνδεσης οι μετατροπείς ισχύος θα πρέπει να πληρούν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Για τη Φ/Β συστοιχία:

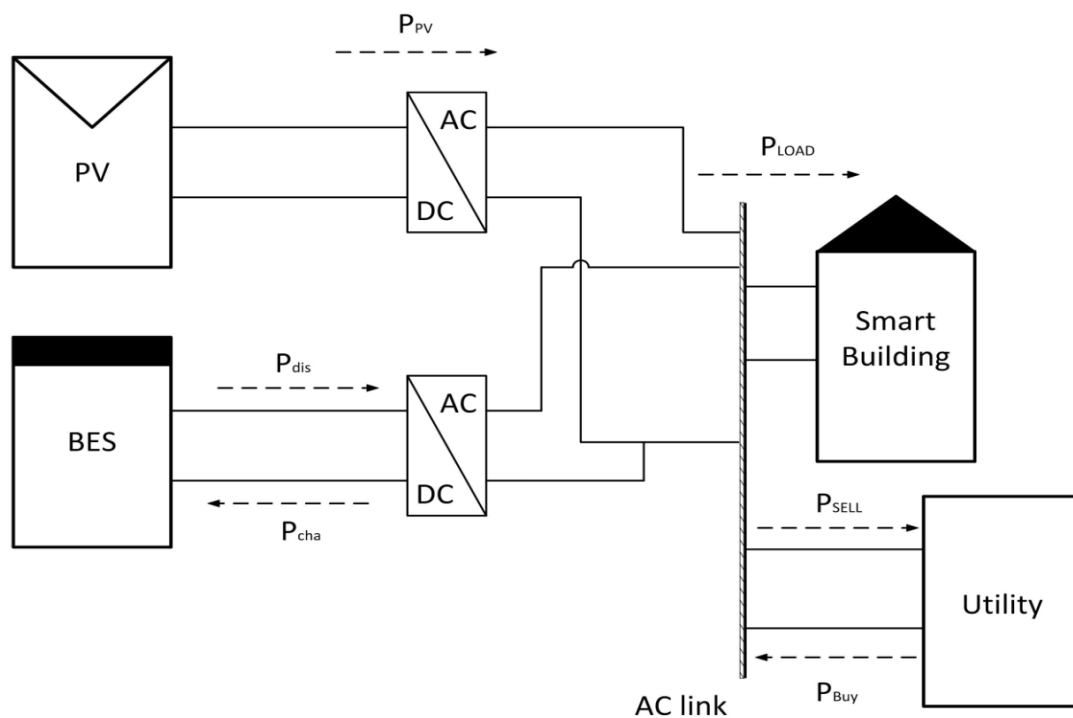
Ο αντιστροφέας θα πρέπει να έχει ονομαστική ισχύ ίση ή μεγαλύτερη της μέγιστης παραγωγής από τη Φ/Β συστοιχία. Με βάση τα δεδομένα που έχουν επιλεγεί και θα παρατεθούν σε κατάλληλη επόμενη ενότητα, η ισχύς του μετατροπέα θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση των 20kW. Αναφορικά με τις απώλειες που εισάγονται από το μετατροπέα ισχύος, αυτές έχουν ληφθεί υπόψιν απευθείας στα δεδομένα, όπως θα εξηγηθεί σε επόμενη ενότητα.

- Για την μονάδα αποθήκευσης ενέργειας:

Χαρακτηριστικά της μονάδας αυτής είναι η αποθηκευτική ικανότητα (χωρητικότητα ανά μονάδα μάζας ή ανά μονάδα όγκου) της μονάδας αποθήκευσης. Ωστόσο, πλέον θα γίνεται αναφορά μόνο στη χωρητικότητα της μονάδας αποθήκευσης, που πρόκειται για συστοιχία μπαταριών και μετριέται σε Ah (Ampere·hour) δοθείσας της τάσης της συστοιχίας, από όπου τελικά με τον πολλαπλασιασμό της με τα Ah προκύπτει η χωρητικότητα σε Wh ή kWh. Για λόγους απλοποίησης του προβλήματος και με βάση την ανάλυση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες που έχει εξηγηθεί σε προηγούμενη ενότητα, η χωρητικότητα θα εκφράζεται απευθείας σε μονάδες ενέργειας (kWh). Η χωρητικότητα που επιλέγεται σε κάθε προσομοίωση

μεταβάλλεται, καθώς η χωρητικότητα καθ' εαυτή αποτελεί παράμετρο προς βελτιστοποίηση. Περισσότερες λεπτομέρειες θα αναφερθούν στη συνέχεια. Όσον αφορά την ισχύ της συστοιχίας μπαταριών, αυτή μπορεί να προκύψει από το διάγραμμα του Σχήματος 2.15. Έτσι, για συστοιχία μπαταριών ιόντων-λιθίου χωρητικότητας 100Wh η ισχύς τους είναι τουλάχιστον 100W. Για το λόγο αυτό, σε κάθε περίπτωση η ελάχιστη χωρητικότητα που θα επιλεγεί θα μπορεί να ικανοποιεί και τη μέγιστη απαιτούμενη ισχύ (ρυθμός φόρτισης/εκφόρτισης).

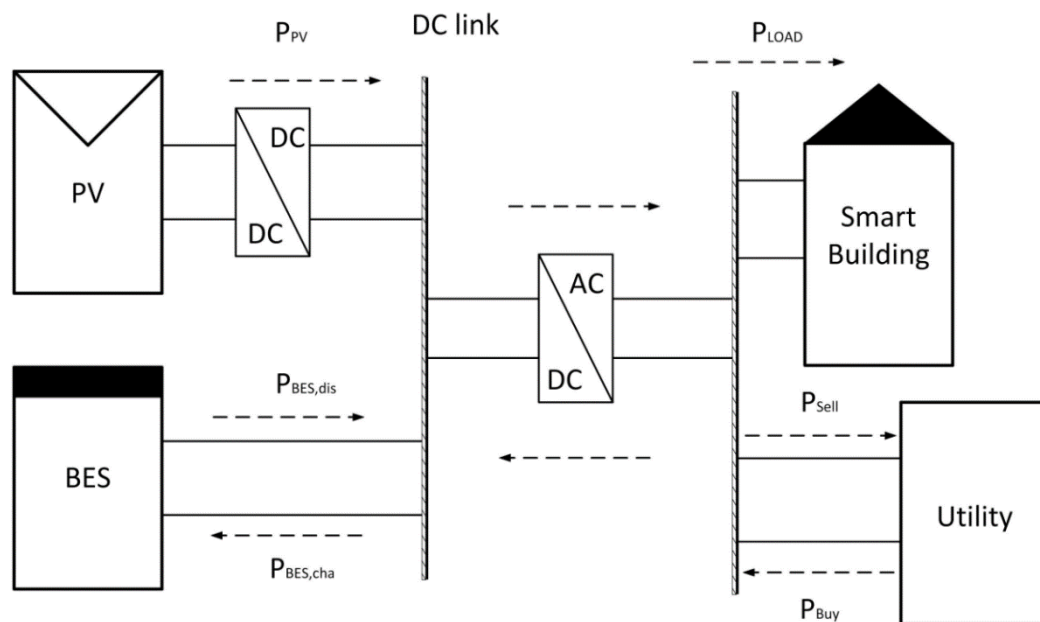
Η απόδοση φόρτισης/εκφόρτισης θεωρήθηκε ότι είναι 0.96 ή 96% σύμφωνα με την βιβλιογραφία, ενώ η απόδοση του μετατροπέα λήφθηκε ως 95% με την τελική απόδοση φόρτισης/εκφόρτισης να διαμορφώνεται στο 91.2%.



Σχήμα 3.2: Πρώτη τοπολογία διασύνδεσης έξυπνου κτηρίου (Smart Building), μονάδας αποθήκευσης (BES), Φ/Β συστοιχίας και ηλεκτρικού δικτύου (Utility) και αποτύπωση των ροών ισχύος.

Επιπρόσθετα, στο Σχήμα 3.3 απεικονίζεται η δεύτερη τοπολογία διασύνδεσης, η οποία δεν υλοποιείται σε αυτή την εργασία, αλλά αναφέρεται ως εναλλακτικός τρόπος διασύνδεσης. Στην εν λόγω τοπολογία, γίνεται χρήση ενός δικατευθυντήριου μετατροπέα ΣΡ/ΕΡ, που λειτουργεί ως αντιστροφέας όταν η ροή της ισχύος είναι από

τη σύνδεση ΣΡ (DC link) προς τη σύνδεση ΕΡ (AC link), ενώ λειτουργεί ως ανορθωτής όταν η ροή της ισχύος είναι από τη σύνδεση ΕΡ προς τη σύνδεση ΣΡ και παρεμβάλλεται μεταξύ της σύνδεσης ΕΡ (AC) και της σύνδεσης ΣΡ (DC). Στη σύνδεση συνεχούς ρεύματος (ΣΡ – DC link) συνδέεται, τόσο η Φ/Β συστοιχία, όσο και η συστοιχία μπαταριών. Έτσι, όταν για παράδειγμα η ενέργεια που παράγει το Φ/Β σύστημα επιλέγεται να αποθηκεύεται στη συστοιχία μπαταριών δε μεσολαβεί πλέον ο μετατροπέας ΣΡ/ΕΡ. Υπό αυτό το πρίσμα επιτυγχάνεται αύξηση της απόδοσης του συστήματος σε ορισμένες καταστάσεις λειτουργίας. Ομοίως, στη σύνδεση εναλλασσόμενου ρεύματος (ΕΡ – AC link) συνδέεται, τόσο το κτήριο, όσο και το ηλεκτρικό δίκτυο.



Σχήμα 3.3: Δεύτερη τοπολογία διασύνδεσης έξυπνου κτηρίου (Smart Building), μονάδας αποθήκευσης (BES), Φ/Β συστοιχίας (PV), ηλεκτρικού δικτύου (Utility) και αποτύπωση των ροών ισχύος.

Οι ροές ισχύος σε όλες τις τοπολογίες εξαρτώνται από τις καταστάσεις του κάθε επιμέρους υποσυστήματος.

Για την τοπολογία του Σχήματος 3.2 (η οποία αξιοποιείται για την εκτέλεση των προσομοιώσεων της παρούσας εργασίας), λαμβάνονται υπόψη οι συντελεστές απωλειών των μετατροπέων ισχύος και ο συντελεστής απωλειών φόρτισης/εκφόρτισης της συστοιχίας μπαταριών και συνοψίζονται στους τελικούς

συντελεστές απόδοσης η_{BES} , η_{PV} της συστοιχίας μπαταριών και του Φ/Β συστήματος, αντίστοιχα.

Έτσι και για την τοπολογία του Σχημάτος 3.2 οι ροές ισχύος στην επιτρεπτή για τη συστοιχία μπαταριών περιοχή λειτουργίας δίνονται ως εξής:

- Αν η ισχύς του φορτίου του κτηρίου (P_{Load}) μείον την ισχύ από την παραγωγή των Φ/Β με τις απώλειες ($\eta_{PV} \cdot P_{PV}$) είναι θετική ($P_{Load} - \eta_{PV} \cdot P_{PV} > 0$), δηλαδή αν υπάρχει ανάγκη κάλυψης φορτίου, τότε αν έχει επιλεγεί η δράση/απόφαση της εκφόρτισης και η ισχύς της μπαταρίας δεν επαρκεί για να καλύψει το φορτίο, τότε δεν εκφορτίζεται η μπαταρία και αγοράζεται ισχύς, P_{Buy} , από το ηλεκτρικό δίκτυο για να καλύψει το φορτίο του κτηρίου.
- Αν η ισχύς του φορτίου του κτηρίου (P_{Load}) μείον την ισχύ από την παραγωγή των Φ/Β με τις απώλειες ($\eta_{PV} \cdot P_{PV}$) είναι θετική ($P_{Load} - \eta_{PV} \cdot P_{PV} > 0$), δηλαδή αν υπάρχει ανάγκη κάλυψης φορτίου, τότε αν έχει επιλεγεί η δράση/απόφαση της εκφόρτισης και η ισχύς της μπαταρίας επαρκεί για να καλύψει το φορτίο, τότε εκφορτίζεται η μπαταρία για να καλύψει το φορτίο του κτηρίου και η επιπλέον ισχύς (αν υπάρχει) πωλείται, P_{Sell} , στο ηλεκτρικό δίκτυο.
- Αν η ισχύς του φορτίου του κτηρίου (P_{Load}) μείον την ισχύ από την παραγωγή των Φ/Β με τις απώλειες ($\eta_{PV} \cdot P_{PV}$) είναι θετική ($P_{Load} - \eta_{PV} \cdot P_{PV} > 0$), δηλαδή αν υπάρχει ανάγκη κάλυψης φορτίου και έχει επιλεγεί η δράση/απόφαση της φόρτισης της μπαταρίας, τότε πρέπει να αγοραστεί ισχύς, P_{Buy} , από το ηλεκτρικό δίκτυο για να καλύψει το φορτίο και τη φόρτιση της μπαταρίας.
- Αν η ισχύς του φορτίου του κτηρίου (P_{Load}) μείον την ισχύ από την παραγωγή των Φ/Β με τις απώλειες ($\eta_{PV} \cdot P_{PV}$) είναι αρνητική ($P_{Load} - \eta_{PV} \cdot P_{PV} < 0$), δηλαδή αν υπάρχει περίσσειμα ενέργειας και έχει επιλεγεί η δράση/απόφαση εκφόρτισης της μπαταρίας, τότε πωλείται η συνολική ισχύς, P_{Sell} , στο ηλεκτρικό δίκτυο.
- Αν η ισχύς του φορτίου του κτηρίου (P_{Load}) μείον την ισχύ από την παραγωγή των Φ/Β με τις απώλειες ($\eta_{PV} \cdot P_{PV}$) είναι αρνητική ($P_{Load} - \eta_{PV} \cdot P_{PV} < 0$), δηλαδή

αν υπάρχει περίσσειμα ενέργειας, τότε αν έχει επιλεγεί η δράση/απόφαση της φόρτισης και το ποσό της ισχύος που χρειάζεται για να φορτιστεί η μπαταρία είναι μεγαλύτερο από το περίσσειμα του φορτίου, τότε πρέπει να αγοραστεί η επιπλέον ισχύς, P_{Buy} , από το ηλεκτρικό δίκτυο για να φορτιστεί η μπαταρία στο ποσό που απαιτείται.

- Αν η ισχύς του φορτίου του κτηρίου (P_{Load}) μείον την ισχύ από την παραγωγή των Φ/Β με τις απώλειες ($\eta_{PV} \cdot P_{PV}$) είναι αρνητική ($P_{Load} - \eta_{PV} \cdot P_{PV} < 0$), δηλαδή αν υπάρχει περίσσειμα ενέργειας, τότε αν έχει επιλεγεί η δράση/απόφαση της φόρτισης και το ποσό της ισχύος που χρειάζεται για να φορτιστεί η μπαταρία είναι μικρότερο ή ίσο από το περίσσειμα ενέργειας, τότε η φόρτιση καλύπτεται από το περίσσειμα ενέργειας και η επιπλέον ισχύς (αν υπάρχει), P_{Sell} , πωλείται στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Μια σημαντική επισήμανση είναι ότι το BES έχει επιλεγεί να φορτίζεται ή να εκφορτίζεται (κατά την πώληση) με συγκεκριμένη (σταθερή) ενέργεια Δe σε κάθε χρονικό βήμα. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται σταδιακή φόρτιση/εκφόρτιση με στόχο την καλύτερη εφαρμογή της πολιτικής που υλοποιείται στο σύστημα (μπαταρίες, κτήριο, Φ/Β, ηλεκτρικό δίκτυο). Αν για παράδειγμα το BES ήταν πλήρως φορτισμένο στις ώρες αιχμής και μπορούσε να επιλέξει να πωλήσει όλη τη διαθέσιμη ενέργεια στο δίκτυο, τότε δε θα είχε διαθέσιμη ενέργεια για να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες των υπόλοιπων ωρών αιχμής, ενδεχόμενο που δεν εξυπηρετεί τη φιλοσοφία της πολιτικής του αλγορίθμου και πιστοποιεί την απαγόρευση τέτοιας δυνατότητας του αλγορίθμου. Επίσης, η επιλογή του Δe εξαρτάται άρρηκτα από τη χωρητικότητα του BES και πρέπει να οριστεί σταθερή για να μπορεί να βρεθεί μετέπειτα η βέλτιστη χωρητικότητά του. Ταυτόχρονα λαμβάνεται υπόψιν η βιωσιμότητά του, αφού έτσι επιτυγχάνεται μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του. Όπως παρατηρήθηκε από δοκιμές, ένα ικανοποιητικό σταθερό βήμα Δe για τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν αντιστοιχεί σε 10kWh, το οποίο και έχει άμεση σχέση και με το

φορτίο που καταναλώνεται από το κτήριο. Αν δηλαδή η ζήτηση του φορτίου ήταν μεγαλύτερη ένα αντίστοιχο βέλτιστο βήμα θα αυξανόταν.

Σε κάθε ώρα, η κατάσταση φόρτισης των μπαταριών ικανοποιεί τους εξής περιορισμούς:

$$E_{BES,nom} \cdot SoC_{BES,min} \leq E_{BES,nom} \cdot SoC_{BES} \text{ και } E_{BES,nom} \cdot SoC_{BES} < E_{BES,nom} \quad (3.1)$$

όπου το $E_{BES,nom}$ είναι η ονομαστική χωρητικότητα της συστοιχίας των μπαταριών, $SoC_{BES,min}$ είναι η ελάχιστη τιμή της κατάστασης φόρτισης, η οποία στην εργασία αυτή λαμβάνεται ως $SoC_{BES,min} = 0.2$ ή 20%, και το SoC_{BES} εκφράζει την ενδιάμεση κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας, δηλαδή $SoC_{BES} \in [SoC_{BES,min}, 1]$.

Για τη σωστή όμως περιγραφή των μεταβολών στην αποθηκευτική κατάσταση του BES πρέπει να ληφθεί υπόψιν ένα χρονικό διάστημα Δt . Η μεταβολή της αποθηκευτικής κατάστασης του BES ή του φορτίου που είναι αποθηκευμένο στο BES, C_{BES} , κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση του, αντίστοιχα, περιγράφεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\text{Φόρτιση: } C_{BES}(t) = C_{BES}(t-1) + \frac{\eta_{BES} \cdot P_{BES,cha}}{V_{bat} \cdot n_{BS}} \cdot \Delta t \quad (3.2)$$

$$\text{Εκφόρτιση: } C_{BES}(t) = C_{BES}(t-1) - \frac{P_{BES,dis}}{V_{bat} \cdot n_{BS} \cdot \eta_{BES}} \cdot \Delta t$$

όπου η_{BES} είναι ο βαθμός απόδοσης κατά τη φόρτιση/εκφόρτιση, όπως έχει περιγραφεί παραπάνω, V_{bat} είναι η τάση μιας μπαταρίας, n_{BS} είναι το πλήθος των μπαταριών που συνδέονται σε σειρά στη συστοιχία μπαταριών και Δt είναι το χρονικό βήμα που μεσολαβεί για τη μετάβαση από το $C_{BES}(t-1)$ στο $C_{BES}(t)$. Το C_{BES} εκφράζει την αποθηκευτική κατάσταση σε Ah. Επιπλέον, στις εξισώσεις της σχέσης 3.2 γίνεται η παραδοχή ότι τόσο η ισχύς φόρτισης ή εκφόρτισης, όσο και η τάση V_{bat} έχουν σταθερή τιμή σε όλο το χρονικό διάστημα Δt . Όσο το Δt γίνεται μικρότερο τόσο πιο ακριβείς είναι οι εξισώσεις αυτές. Στην παρούσα εργασία, όμως, η ανάλυση γίνεται εκφράζοντας την αποθηκευτική κατάσταση του BES σε kWh. Οπότε οι εξισώσεις της σχέσης 3.2 μετατρέπονται ως εξής:

$$\text{Φόρτιση:} \quad E_{\text{BES}}(t) = E_{\text{BES}}(t-1) + \eta_{\text{BES}} \cdot \overbrace{P_{\text{BES,cha}} \cdot \Delta t}^{\Delta e} \quad (3.3)$$

$$\text{Εκφόρτιση:} \quad E_{\text{BES}}(t) = E_{\text{BES}}(t-1) - \frac{1}{\eta_{\text{BES}}} \cdot \overbrace{P_{\text{BES,dis}} \cdot \Delta t}^{\Delta e}$$

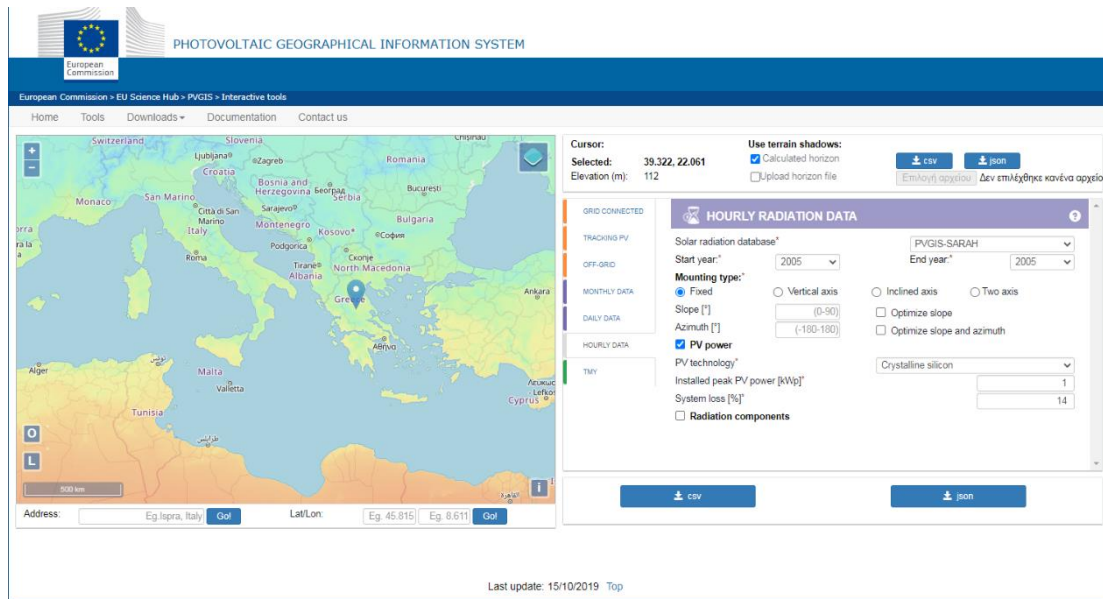
Το Δe εκφράζει την ηλεκτρική ενέργεια (σε kWh) που διοχετεύεται προς ή από το BES στη φόρτιση και στην εκφόρτισή του, αντίστοιχα, ενώ η νέα αποθηκευτική κατάσταση του BES, $E_{\text{BES}}(t)$, προκύπτει από την προηγούμενη, $E_{\text{BES}}(t-1)$, το Δe και το βαθμό απόδοσης του BES, η_{BES} , όπως φαίνεται στη σχέση 3.3.

Τέλος, η κατάσταση φόρτισης του BES την χρονική στιγμή t , προκύπτει ως $\text{SoC}(t) = E_{\text{BES}}(t)/E_{\text{BES,nom}}$.

3.1.3 Επιλογή δεδομένων για την παραγωγή από τη Φ/Β συστοιχία

Για τον προσδιορισμό της ωριαίας παραγωγής ισχύος από Φ/Β συστοιχίες θεωρήθηκε πως η εγκατάσταση έχει γίνει σε στέγη υπό κλίση. Για την εύρεση των δεδομένων της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από Φ/Β συστοιχίες αξιοποιήθηκε η πηγή [22]. Όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 3.4 μέσω της πλατφόρμας αυτής, που παρέχεται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή μπορούν να εξαχθούν τα δεδομένα παραγωγής από Φ/Β συστοιχίες. Οι διαθέσιμες παράμετροι είναι οι ακόλουθες:

- Θέση στο χάρτη.
- Η βάση δεδομένων.
- Κλίση των Φ/Β πλαισίων [slope (°)].
- Αζιμούθιο [προσανατολισμός ως προς τα σημεία του ορίζοντα (°)].
- Ονομαστική ισχύς της Φ/Β συστοιχίας.
- Ημερολογιακή περίοδος ως προς την οποία θα εξαχθούν τα δεδομένα.
- Το χρονικό διάστημα στο οποίο αναφέρεται η κάθε τιμή χωριστά (π.χ. ωριαίες τιμές, ημερήσιες τιμές κλπ).
- Τις απώλειες διασύνδεσης των μετατροπέων με τη σύνδεση EP (AC link).



Σχήμα 3.4: Σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών φωτοβολταϊκών συστημάτων από όπου εξαγονται οι πληροφορίες ωριαίων τιμών παραγωγής από Φ/Β συστοιχίες δοθέντων των παραμέτρων του, όπως είναι το αζιμούθιο, η κλίση, η ονομαστική ισχύς της Φ/Β συστοιχίας καθώς και οι συνολικές απώλειες του συστήματος διασύνδεσης της Φ/Β συστοιχίας με το υπόλοιπο σύστημα [22].

3.2 Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκε

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που εξετάζεται, μπορεί να περιγραφεί βάσει μιας αντικειμενικής συνάρτησης, $L(n_t)$, η οποία εκφράζει τη μέση τιμή των χρηματικών μονάδων (€) ανά μονάδα ενέργειας (€/kWh), δηλαδή το μέσο όρο του κόστους της kWh σε Ευρώ. Αυτό προκύπτει από το άθροισμα του συνολικού κόστους της ενέργειας που χρησιμοποίησε το σύστημα για κάθε ώρα, t , (υπολογίζεται καθαρά σε χρηματικές μονάδες σε €) για την αγορά/πώληση ηλεκτρικής ισχύος από/προς το ηλεκτρικό δίκτυο, προς το άθροισμα των ποσοτήτων ενέργειας που ανταλλάχθηκαν μεταξύ του κτηρίου και του υπόλοιπου συστήματος (υπολογίζεται καθαρά σε kWh). Έτσι, όταν μειώνεται η μέση τιμή του κόστους ανά kWh (σε €/kWh), μειώνεται και το συνολικό κόστος για τον καταναλωτή με το αντίστοιχο ποσοστό.

Τελικά, προκύπτει ο παρακάτω γενικός τύπος που καθορίζεται κάθε φορά από τη δράση διαχείρισης ενέργειας (action) που επιλέχθηκε τη συγκεκριμένη ώρα t

(δράσεις αγοράς/φόρτισης/εκφόρτισης/πώλησης) και εξαρτάται από την πραγματική κατάσταση του συστήματος:

$$L(n_t) = \frac{1}{\sum_{n_1=1, t=1}^{n_{MAX}} ((e_{Bui,t} - e_{PV,t}) + e_{BES,t})} \sum_{n_1=1, t=1}^{n_{MAX}} (((e_{Bui,t} - e_{PV,t}) + e_{BES,t}) \cdot C(t)) \quad (3.4)$$

όπου ο όρος $(e_{Bui,t} - e_{PV,t}) + e_{BES,t}$ στον αριθμητή και στον παρονομαστή είναι η ίδια ποσότητα ενέργειας που ανταλλάχθηκε, n_{MAX} είναι ο αριθμός των συνολικών χρονικών βημάτων και το n_t αυξάνεται ταυτόχρονα με το χρονικό βήμα t κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου ($n_1=1, n_2=2, \dots, n_{MAX}=\max_time\text{-steps}$), $C(t)$ είναι η τιμή σε χρηματικές μονάδες ανά μονάδα ανταλλάξιμης με το ηλεκτρικό δίκτυο ενέργειας κατά το χρονικό βήμα t , $e_{PV,t}$ είναι η παραγωγή ενέργειας από τη Φ/Β συστοιχία το χρονικό βήμα t , το $e_{Bui,t}$ η συνολική κατανάλωση ενέργειας από τα φορτία του κτηρίου κατά το χρονικό βήμα t , ενώ το $e_{BES,t}$ είναι η ενέργεια της μονάδας αποθήκευσης με την οποία φορτίζεται/εκφορτίζεται κατά το χρονικό βήμα t (πχ. αν επιλεγεί να φορτιστεί η μπαταρία αγοράζοντας ενέργεια από το δίκτυο, το $e_{BES,t}$ θα πάρει την αντίστοιχη θετική τιμή της ενέργειας, με την οποία φορτίζεται):

$$e_{BES,t} \rightarrow \begin{cases} e_{BES,t} > 0 & \leftrightarrow \text{charging} \\ e_{BES,t} < 0 & \leftrightarrow \text{discharging} \\ 0 & \leftrightarrow \text{noaction} \end{cases} \quad (3.5)$$

Η παραπάνω εξίσωση για τις δράσεις της αγοράς/φόρτισης/πώλησης προκύπτει (αλληλεπίδραση) αγορά/πώληση ηλεκτρικής ενέργειας του κτηρίου με το ηλεκτρικό δίκτυο. Αντίθετα, στη δράση της εκφόρτισης η “αλληλεπίδραση” γίνεται μεταξύ του κτηρίου και της μπαταρίας, αφού η λογική αυτής της δράσης είναι η ενέργεια που απαιτείται, $e_{Bui,t} - e_{PV,t}$, να καλυφθεί από την ενέργεια της μπαταρίας, $e_{BES,t}$, τη χρονική περίοδο t , οπότε περισσότερες εκφορτίσεις (discharges) επιτυγχάνουν μικρότερο ολικό μέσο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας ανά kWh.

Ο σκοπός είναι η εύρεση των βέλτιστων τιμών του $e_{BES,t}$ για την επίτευξη $L(n_b) < L(n_a) \quad \forall \quad n_a < n_b$, δηλαδή ο σκοπός είναι η σύγκλιση της αντικειμενικής

συνάρτησης, ή συνάρτησης κόστους, σε μια κάτω οριακή τιμή, $L(n_b)$, όσο ο αριθμός των χρονικών βημάτων, n_t , αυξάνεται.

Αναφορικά με την τιμή αγοράς και πώλησης ενέργειας που μετρίεται σε χρηματικές μονάδες ανά ποσότητα ενέργειας, $C(t)$, αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως συνεχώς μεταβαλλόμενο μέγεθος με διαφορετικές κάθε φορά τιμές. Ωστόσο, για την εκπαίδευση της μεθόδου που θα αναλαμβάνει την πραγματοποίηση της διαδικασίας βελτιστοποίησης θα μπορεί να θεωρηθεί ότι η $C(t)$ λαμβάνει διακριτές τιμές με βάση την περίοδο φόρτισης του ηλεκτρικού δικτύου, όπου η μέγιστη τιμή θα λαμβάνει χώρα τις περιόδους αιχμής.

Επιπλέον και λαμβάνοντας υπόψιν την τιμή αγοράς και πώλησης ενέργειας για κάθε χρονική στιγμή t , η ελαχιστοποίηση του $L(n_t)$ επιτυγχάνεται μέσω της διαχείρισης της μονάδας αποθήκευσης ενέργειας. Έτσι, όπως φαίνεται και στη σχέση 3.5 οι αποφάσεις που μπορούν να ληφθούν αναφορικά με τη μονάδα αποθήκευσης είναι αυτές της φόρτισης, εκφόρτισης και αδράνειας. Οπότε, οι μέθοδοι μηχανικής μάθησης που θα εφαρμοστούν θα στοχεύουν στη διαμόρφωση ενός μοτίβου επιλογής της συμπεριφοράς της μονάδας αποθήκευσης που θα συναρτάται τόσο από τη $C(t)$ όσο και από τις ενεργειακές απαιτήσεις του κτηρίου και θα δειχθούν σε επόμενη ενότητα.

Παράλληλα, όπως αναφέρθηκε, με την ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης $L(n_t)$, συντελείται και η επιλογή συγκεκριμένων ωρών λειτουργίας για ορισμένα φορτία, όπως περιγράφονται και στην ενότητα 2.6, με τη διαδικασία αυτή να ονομάζεται χρονοπρογραμματισμός. Το κάθε φορτίο αντιστοιχεί σε τιμές κατανάλωσης μιας συσκευής του κτηρίου για ένα σύνολο χρονικών βημάτων. Για μια συσκευή, η οποία έχει οριστεί με τη μεταβλητή AP ορίζεται ως $AP = \{AP_1, AP_2, \dots, AP_m\}$, με $m \leq T$, όπου $AP_{1...m}$ είναι τα φορτία (σε kWh) της συσκευής που απαιτεί ο χρήστης να καταναλώσει σε διάστημα 1 ώρας (αυτά μπορούν να λειτουργούν για οποιοδήποτε χρονικό διάστημα μεταξύ 0 – 1 ώρας, πχ. για λειτουργία συσκευής των 3.5 kW για 30 λεπτά, στον αλγόριθμο θα εισαχθεί $AP = \{1.75\}$), m είναι ο αριθμός των ωρών που εισάγει ο χρήστης να λειτουργεί η συσκευή και T είναι ο αριθμός των ωρών της ημέρας που μπορεί να τοποθετηθεί η λειτουργία της συσκευής (ορίζοντας

χρονοπρογραμματισμού 24 ώρες), ενώ το m δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερο από το T . Έτσι, εάν ο χρονοπρογραμματισμός επιλέγεται σε ημερήσια βάση για πέντε (5) ωριαίες τιμές λειτουργίας μιας συσκευής, τότε το T αντιστοιχεί σε 24 ώρες, ενώ το m σε 5 ώρες. Η συνάρτηση του χρονοπρογραμματισμού καθορίζει τις τιμές του $e_{Bui,t}$ στην (3.4) που χρησιμοποιεί στην συνέχεια ο εκάστοτε αλγόριθμος μηχανικής μάθησης (QL, SARSA, DQL) για να υπολογίσει τις βέλτιστες ώρες λειτουργίας ξεκινώντας από τον εκπαιδευμένο πίνακα Q . Η αλγοριθμική μοντελοποίηση αυτής της συνάρτησης θα αναλυθεί λεπτομερώς στην ενότητα 3.6.

Όπως προηγουμένως, η επίδραση του χρονοπρογραμματισμού μειώνει το μέσο κόστος (€) της ηλεκτρικής ενέργειας ανά μονάδα ενέργειας (kWh), πράγμα το οποίο σημαίνει και μείωση του συνολικού κόστους με το αντίστοιχο ποσοστό. Έτσι, ο γενικός τύπος για την εύρεση του μέσου κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας σε €/kWh συνυπολογίζοντας και τις βέλτιστες ώρες λειτουργίας γίνεται ως εξής:

$$L_{ts}(AP(j), t) = \frac{1}{\sum_{h=t}^{h+23} (e_{Bu2Ut,t})} \sum_{h=t}^{h+23} ((e_{Bu2Ut,t} + AP(j)) \cdot C(t)) \quad (3.6)$$

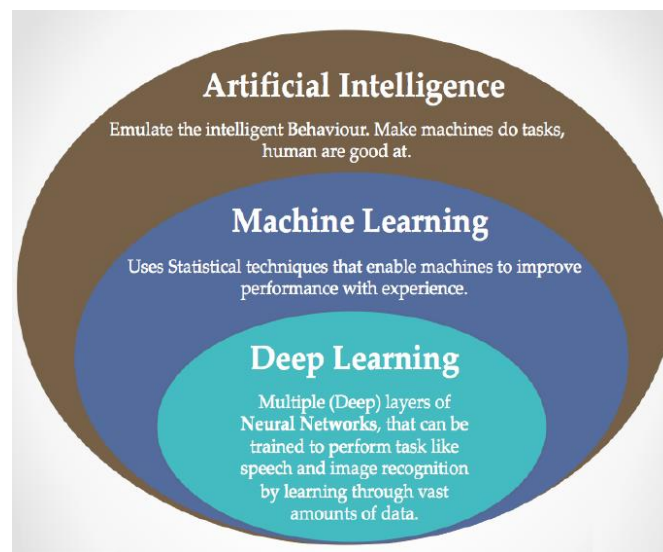
όπου $e_{Bu2Ut,t} = (e_{Bui,t} - e_{PV,t}) + e_{BES,t}$ και $C(t)$ όπως περιγράφηκαν στη σχέση 3.4, $AP(j)$ είναι ο πίνακας με τα φορτία της συσκευής που δηλώνει ως είσοδο ο χρήστης, j είναι ο μετρητής της εκάστοτε ώρας (δηλαδή για $j=1$, από το $AP(1)$ προκύπτει το φορτίο σε kWh που έχει εισάγει ο χρήστης για την 1^η ώρα), t είναι το χρονικό βήμα του αλγορίθμου μηχανικής μάθησης, ενώ h είναι το χρονικό βήμα της συνάρτησης του χρονοπρογραμματισμού που φτάνει έως το χρονικό ορίζοντα $T = 24$ ώρες όπως περιγράφηκε παραπάνω.

Πιο συγκεκριμένα, με βάση τις δράσεις απόφασης (actions), όπως έχουν διαμορφωθεί στο χρονικό βήμα h υπολογίζονται οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης $L_{ts}(AP(j), t) \forall t \in [1, T]$ και επιλέγεται το χρονικό βήμα $t_j = t$ στο οποίο η συνάρτηση λαμβάνει την ελάχιστη τιμή, ώστε να προστεθεί σε αυτό η ωριαία τιμή j του AP . Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται $\forall j \in [1, m]$ υπό τη συνθήκη ότι $t_1 \neq t_2 \dots \neq t_m$.

Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε διαφορετική συσκευή που επιδέχεται χρονοπρογραμματισμό λειτουργίας της. Ένα επιπλέον χρήσιμο δεδομένο είναι ότι οι ωριαίες τιμές του κάθε φορτίου δεν προϋποθέτουν και ωριαία διαστήματα λειτουργίας. Αντιθέτως, το διάστημα λειτουργίας μια συσκευής μπορεί να είναι οποιοδήποτε, ακόμη και μεταξύ του 0 και της μίας ώρας. Για παράδειγμα εάν μια συσκευή λειτουργεί για 20 λεπτά της ώρας τρεις φορές την ημέρα με ισχύ 5kW τότε το φορτίο της προκύπτει να έχει την ακόλουθη διαμόρφωση: $AP = [1.667 \ 1.667 \ 1.667]$ όπου η κάθε τιμή αντιστοιχεί σε kWh κατανάλωσης για την κάθε ώρα λειτουργίας.

3.3 Αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης που χρησιμοποιήθηκαν για τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης ενέργειας

Οι αλγόριθμοι που θα αξιοποιηθούν στην παρούσα διπλωματική εργασία εντάσσονται στη γενικότερη κατηγορία της μηχανικής μάθησης (Machine Learning – ML). Η μηχανική μάθηση εντάσσεται στην ακόμη πιο γενική κατηγορία της τεχνητής νοημοσύνης (Artificial Intelligence - AI), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.5, που προκύπτει από το [23]. Η μηχανική μάθηση, ως παρακλάδι του AI βασίζεται στην ιδέα ότι τα συστήματα είναι σε θέση να εκπαιδευτούν από τα δεδομένα, να αναγνωρίσουν μοτίβα και να λάβουν αποφάσεις με ελάχιστη παρέμβαση από τον άνθρωπο.

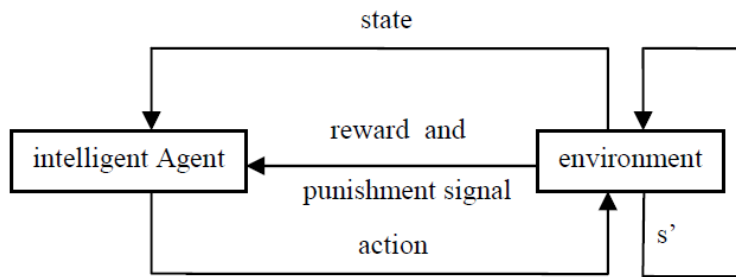


Σχήμα 3.5: Συσχέτιση μεταξύ της Τεχνητής Νοημοσύνης (AI), της Μηχανικής Μάθησης (ML) και της Βαθιάς Μάθησης (Deep Learning – DL), όπου παρατηρείται πως η κάθε επόμενη κατηγορία αποτελεί υποσύνολο της προηγούμενης [23].

Οι αλγόριθμοι που θα αξιοποιηθούν στην παρούσα διπλωματική εργασία και θα αξιολογηθούν εντάσσονται αμιγώς στην κατηγορία ML και ειδικότερα στην κατηγορία της ενισχυτικής μάθησης (Reinforcement Learning – RL) [21]-[25], ενώ δεν αποτελούν τμήμα της βαθιάς μάθησης (Deep Learning – DL), η οποία συνδυάζει τις εκδοχές των αλγορίθμων RL με τα νευρωνικά δίκτυα [26]. Αυτοί που υλοποιούνται στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι ο Q-Learning, ο SARSA και ο Double-Q-Learning, αλλά στη βιβλιογραφία υπάρχουν και άλλες μέθοδοι όπως παρουσιάζει το [20] και το [27].

Στη συνέχεια θα γίνει μια σύντομη αναφορά στους αλγορίθμους RL, καθώς και μια επιγραμματική περιγραφή του τρόπου λειτουργίας τους, δηλαδή της λογικής που κρύβεται πίσω από τη λειτουργία τους, καθώς και του μαθηματικού τους υποβάθρου. Η ενισχυτική μάθηση – RL απορρέει από τη θεωρία μάθησης των ζώων (animal learning theory), σύμφωνα με την οποία το ζώο μαθαίνει να συσχετίζει τη συμπεριφορά του με βάση ένα συγκεκριμένο αποτέλεσμα. Το RL δεν απαιτεί κάποια προηγούμενη γνώση, ενώ μπορεί να επιτύχει αυτόνομα την επιλεγμένη πολιτική με τη γνώση που αποκτά, σύμφωνα με την ανάδραση που λαμβάνει βάσει της ακριβώς προηγούμενης απόφασης που έλαβε. Πρόκειται λοιπόν για μια διαδικασία δοκιμής

και σφάλματος (trial-and-error) με τη συνεχή του αλληλεπίδραση με το δυναμικό περιβάλλον που συσχετίζεται. Τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι η δυνατότητα αυτό-βελτίωσης και η μάθηση σε πραγματικό χρόνο, ενώ πιο σύνθετες προσεγγίσεις [28] ενισχύουν τη δυναμική του. Το βασικό RL μοντέλο δίνεται στο Σχήμα 3.6, που προκύπτει από το [24].



Σχήμα 3.6: Η βασική δομή ενός RL μοντέλου [24].

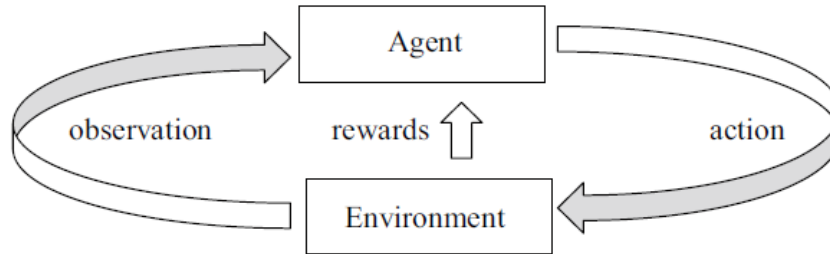
3.4 Περιγραφή εφαρμογής του αλγορίθμου Q-Learning

Ο αλγόριθμος που εφαρμόζεται είναι ο Q-Learning (QL) [29]. Ο αλγόριθμος αυτός εντάσσεται στην κατηγορία των αλγορίθμων RL. Ο τρόπος που ενεργεί απεικονίζεται στο Σχήμα 3.7 που προκύπτει από το [20]. Το περιβάλλον έχει ήδη αναλυθεί και ουσιαστικά συνίσταται στη διασύνδεση ενός κτηρίου με τις Φ/Β συστοιχίες, με το BES και με το ηλεκτρικό δίκτυο. Ο αλγόριθμος QL είναι ένας αλγόριθμος RL που δεν περιλαμβάνει κάποιο μοντέλο, αλλά η εκάστοτε πολιτική ικανοποιείται από έναν κύκλο αλληλεπιδράσεων με το περιβάλλον. Ο “Πράκτορας” (Agent) λαμβάνει μια απόφαση (Action) και δέχεται μια ανάδραση από το σύστημα υπό τη μορφή της παρατήρησης του τελευταίου (Observation), ενώ ο “Πράκτορας” ανανεώνεται βάσει κάποιας αμοιβής/ποινής (Reward) που διαμορφώνεται από τις αποφάσεις που λαμβάνει.

Ο αλγόριθμος QL λειτουργεί βάσει ενός πίνακα Q, ο οποίος φαίνεται στον Πίνακα 3.2 όπως αυτός διαμορφώνεται στον αλγόριθμο της παρούσας εργασίας. Το μέγεθος του πίνακα Q διαμορφώνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$Q=S \times A \rightarrow \mathbb{R} \quad (3.7)$$

όπου S είναι το σύνολο των διαφορετικών καταστάσεων του συστήματος, ενώ A είναι το σύνολο των διαφορετικών δράσεων/αποφάσεων που λαμβάνονται από τον αλγόριθμο για το περιβάλλον.



Σχήμα 3.7: Πράκτορας (Agent) και το Περιβάλλον (Environment) στο RL [20].

Για την εύρεση των καταστάσεων του συστήματος πρέπει να οριστούν οι καταστάσεις του κάθε επιμέρους τμήματός του. Τα επιμέρους αυτά τμήματα είναι η καθαρή ενεργειακή κατανάλωση του κτηρίου για την κάθε χρονική στιγμή που δίνεται ακολούθως:

$$e_{\text{tot},t} = e_{\text{Bui},t} - e_{\text{PV},t} \quad (3.8)$$

όπου $e_{\text{tot},t}$ αποτελεί την ολική καθαρή ενέργεια του κτηρίου τη χρονική περίοδο t και διαμορφώνεται από την ενεργειακή ζήτηση του κτηρίου (όπως περιγράφηκε στην ενότητα 3.2), $e_{\text{Bui},t}$, μείον την παραγωγή από τη Φ/Β συστοιχία (όπως περιγράφηκε στην ενότητα 3.2), $e_{\text{PV},t}$.

Η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο BES σε κάθε χρονικό βήμα t και μετριέται σε kWh δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$a \cdot E_{\text{BES},\text{nom}} \leq E_{\text{BES},t} \leq E_{\text{BES},\text{nom}} \quad (3.9)$$

όπου το $E_{\text{BES},\text{nom}}$ εκφράζει την ονομαστική χωρητικότητα του BES, το a ένα συντελεστή ασφαλείας εκφόρτισης (πχ. $a = 0.2$ ή 20%), ώστε να μην οδηγείται το BES σε επικίνδυνες λειτουργικές καταστάσεις (κάτω από 20% κατάσταση φόρτισης) ώστε να αυξάνεται η διάρκεια ζωής της μπαταρίας και τέλος το $E_{\text{BES},t}$ που εκφράζει την ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο BES τη χρονική περίοδο t . Το χρονικό βήμα ή η χρονική περίοδος, η οποία δηλώθηκε προηγουμένως ως t , αντιστοιχεί στο χρονικό

διάστημα για το οποίο λαμβάνει χώρα μια δράση που αποφασίστηκε από τον αλγόριθμο QL.

Στον αλγόριθμο υλοποίησης γίνονται υπολογισμοί με βάση τη διαθέσιμη ενέργεια της συστοιχίας μπαταριών σε kWh, $\Delta E_{BES,t}$, η οποία προκύπτει από την εξής εξίσωση:

$$0 \leq \Delta E_{BES,t} \leq \Delta E_{BES,nom} \quad (3.10)$$

όπου $\Delta E_{BES,nom} = E_{BES,nom} - a \cdot E_{BES,nom}$.

Χρησιμοποιώντας τα προηγούμενα, ο χώρος των καταστάσεων διαμορφώνεται από κάθε κατάσταση s_t η κάθε μία εκ των οποίων προκύπτει από το σύνολο των συνδυασμών της καθαρής ενέργειας και της κατάστασης φόρτισης του BES τη χρονική περίοδο t ως ακολούθως:

$$s_t = [\Delta E_{BES,t} \quad e_{tot,t} \quad t] \in S \quad (3.11)$$

όπου S είναι το σύνολο όλων των δυνατών καταστάσεων.

Το χρονικό βήμα t μπορεί να διαμορφωθεί από τις διαφορετικές περιόδους τιμολόγησης που εφαρμόζει το ηλεκτρικό δίκτυο. Ωστόσο, προς το παρόν θα οριστεί για την κάθε ώρα της ημέρας ξεχωριστά, ώστε να επιτραπεί διαφορετική τιμολόγηση για την κάθε ώρα.

Η τιμή αγοράς ή πώλησης που αναφέρεται ως τιμή εκκαθάρισης της αγοράς (TEA) επιδρά έμμεσα στη διαμόρφωση του πίνακα Q , καθώς επηρεάζει την αμοιβή/ποινή σε κάθε βήμα λειτουργίας. Εναλλακτικά, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η τιμή TEA καθ' αυτή αντί για το χρονικό διάστημα t , που όπως ήδη έχει αναφερθεί χρησιμοποιείται για να περιγράψει την κάθε ώρα ξεχωριστά.

Ο πίνακας Q (ενδεικτική μορφή του οποίου παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.2, όπου αποτυπώνεται η πραγματική διαμόρφωση στον αλγόριθμο της παρούσας εργασίας) διαμορφώνεται με βάση την ακόλουθη εξίσωση:

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow (1 - \alpha) \cdot Q(s_t, a_t) + \alpha [r(s_t, a_t) + \gamma \cdot \min_{a \in A_{t+\tau}} Q(s_{t+\tau}, a)] \quad (3.12)$$

όπου α είναι ο συντελεστής μάθησης (Learning Rate), το $r(s_t, a_t)$ είναι η αμοιβή/ποινή για την κατάσταση s_t και τη δράση a_t και το γ είναι ο εκπτώτικος παράγοντας (Discount Factor). Η εξίσωση 3.12 ονομάζεται εξίσωση Bellman και αποτελεί τη βασική εξίσωση, στην οποία στηρίζεται ο QL αλγόριθμος.

Επιπλέον, σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί πως η εξίσωση αυτή υποδεικνύει πως η διαδικασία εκμάθησης, που στηρίζεται στην ανανέωση του πίνακα Q κατά τη μετάβαση από τη μια κατάσταση λειτουργίας, s_t , σε μια επόμενη κατάσταση, $s_{t+\tau}$, διαμορφώνεται από τη συμβολή της τιμής εκείνης της απόφασης/δράσης, a , στην κάθε επόμενη κατάσταση, που ελαχιστοποιεί τον πίνακα Q . Στην εξίσωση 3.12 ο όρος που ελαχιστοποιεί τον πίνακα Q είναι ο $\gamma \cdot \min Q(s_{t+\tau}, a)$. Ο παράγοντας γ ονομάζεται εκπτώτικος παράγοντας (Discount Factor), ενώ ο δεύτερος όρος είναι η τιμή του πίνακα Q που αντιστοιχεί στην άπληστη απόφαση της επόμενης κατάστασης. Επεξηγηματικά, η άπληστη απόφαση είναι αυτή που καθορίζει αν ο αλγόριθμος θα επιλέξει μια ενέργεια με βάση την ελάχιστη – βέλτιστη τιμή του (exploitation) ή αν θα επιλέξει μία τυχαία ενέργεια (exploration), η οποία θα βοηθήσει τον αλγόριθμο να εξερευνήσει και άλλα μονοπάτια πέρα από τα βέλτιστα. Έτσι, επιτυγχάνεται μία ισορροπία στην επιλογή βέλτιστων και τυχαίων ενεργειών, με απώτερο στόχο την αποτελεσματικότερη εκπαίδευση του αλγορίθμου.

Σε μερικές εφαρμογές του αλγορίθμου ο όρος $\gamma \cdot \min Q(s_{t+\tau}, a)$ προκύπτει από τη μέγιστη τιμή, αλλά στην περίπτωση του αλγορίθμου όπως αυτός εφαρμόζεται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, διαμορφώνεται από την ελάχιστη τιμή. Κάτι τέτοιο δε συμβαίνει τυχαία, καθώς η επίδραση της πολιτικής (Policy), μέσω του παράγοντα r (Reward) είναι τέτοια, ώστε η εκάστοτε απόφαση/δράση που μεγιστοποιεί το οικονομικό όφελος για την κάθε δεδομένη χρονική στιγμή να είναι αυτή που ελαχιστοποιεί την άπληστη απόφαση.

Στο Σχήμα 3.9 παρουσιάζεται το γενικό διάγραμμα ροής που εφαρμόζεται για την υλοποίηση όλων των διαφορετικών εκδοχών της μεθόδου βελτιστοποίησης μέσω του αλγορίθμου QL, του οποίου η λογική εκτέλεσης έχει περιγραφεί παραπάνω.

Ακολούθως περιγράφονται οι διαφορετικές διαμορφώσεις που προκύπτουν από τη μελέτη του συστήματος που μελετάται στην παρούσα εργασία, δηλαδή του συστήματος Φ/Β – κτήριο – μπαταρία – ηλεκτρικό δίκτυο [28],[30].

3.5 Η εφαρμογή του αλγορίθμου σε πραγματικό σύστημα

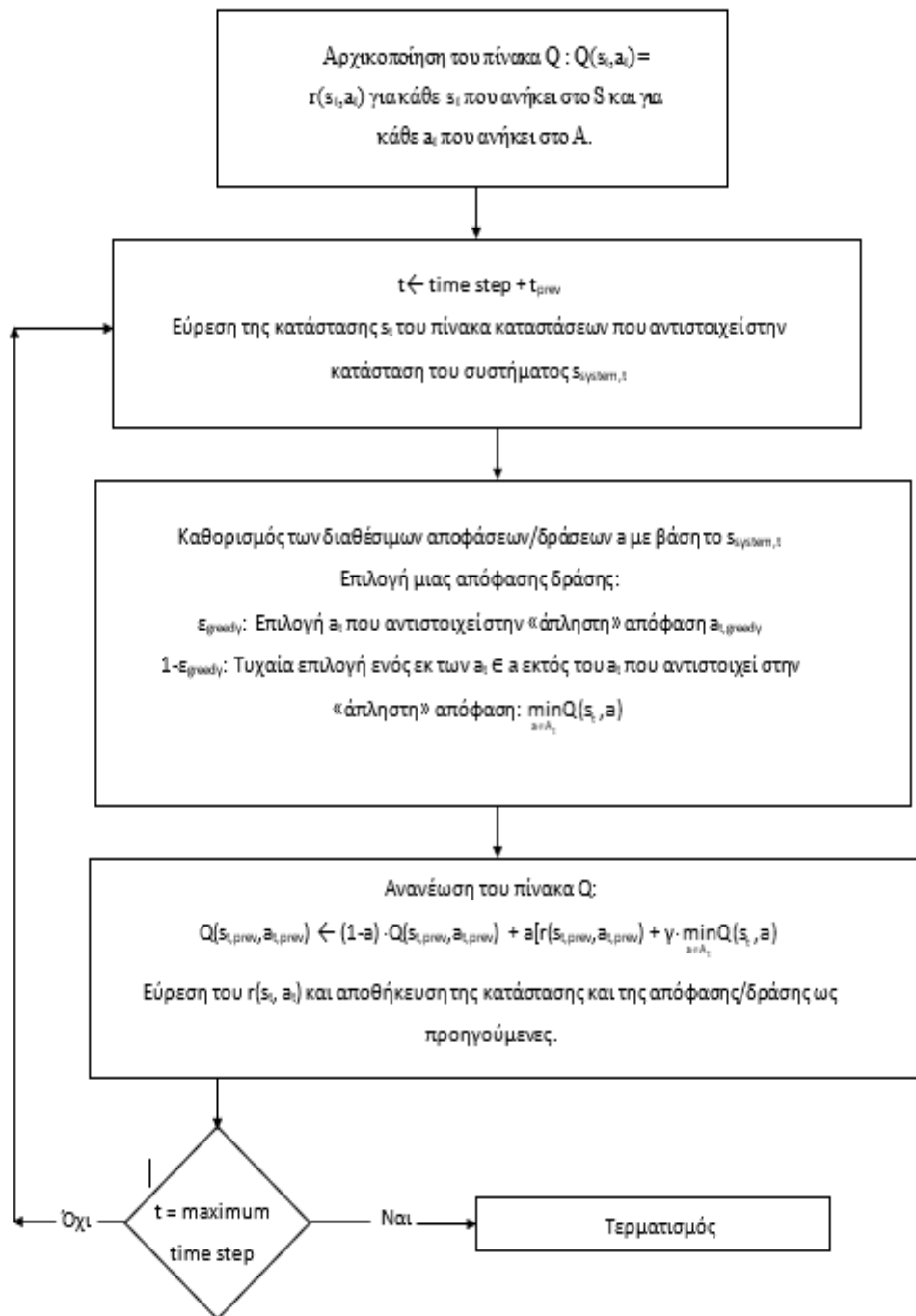
Ο στόχος του αλγορίθμου βελτιστοποίησης είναι να ελαχιστοποιήσει το συνολικό κόστος (μείωση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης) της ενέργειας για τον καταναλωτή και παράλληλα πραγματοποιεί βέλτιστο χρονοπρογραμματισμό για την κάθε ημέρα, για μεγαλύτερη εξοικονόμηση χρημάτων. Για την εκπαίδευση του αλγορίθμου λαμβάνονται ετήσια δεδομένα (για 2 έτη) στην 3^η και τελική προσομοίωση του Q-Learning, στον Sarsa και στον Double-Q-Learning, διότι ο σκοπός του αλγορίθμου είναι να εκπαιδευτεί με όσο το δυνατό μεγαλύτερη ακρίβεια και συνεπακόλουθα να παραχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια στον Πίνακα Q. Στο πραγματικό σύστημα θα εφαρμοστεί ο εκπαιδευμένος αλγόριθμος, ο οποίος για να εκπαιδευτεί εξαρχής λαμβάνονται υπόψιν οι πραγματικές συνήθειες του εκάστοτε καταναλωτή, δηλαδή οι ώρες της ημέρας που καταναλώνει ενέργεια. Με αυτόν τον τρόπο ο καταναλωτής έχει οικονομικό όφελος από την πρώτη στιγμή εφαρμογής του αλγορίθμου, αφού ο Πίνακας Q θα έχει προεκπαιδευτεί και θα δοθεί ένα εύλογο χρονικό διάστημα (πχ. 10 ημερών) για επιπλέον προσαρμογή του αλγορίθμου στις συνήθειες του καταναλωτή, με στόχο τη βέλτιστη εξοικονόμηση χρημάτων. Έτσι, ο αλγόριθμος κατά τη λειτουργία του προσαρμόζεται εκ νέου στις συνήθειες του καταναλωτή, οι οποίες μπορούν να αλλάζουν στοχαστικά. Αυτό σημαίνει ότι, όσο περισσότερο ευμετάβλητες οριστούν οι παράμετροι του αλγορίθμου για εισαγωγή καινούργιων δεδομένων (επιλογή τιμής Learning Rate), τόσο πιο γρήγορα ή αργά θα επηρεάζεται από τις μεταβολές που εξαρτώνται από τις συνήθειες του καταναλωτή. Επομένως, αφού εκπαιδευτεί ο αλγόριθμος θα μπορούν να οριστούν εκ νέου οι παράμετροι για την προσαρμογή του σε ενδεχόμενες καινούργιες συνθήκες, κάτι που όμως δεν εξετάζεται στην παρούσα εργασία.

3.5.1 Πρώτη διαμόρφωση

Η διαμόρφωση αυτή λήφθηκε με σκοπό να αξιολογηθεί ο τρόπος λειτουργίας του αλγορίθμου και η επίδοση του αλγορίθμου, καθώς και να εξεταστούν οι προοπτικές βελτίωσης που δε σχετίζονται με τη μεταβολή των παραμέτρων, αλλά με την ίδια τη λογική του και με την πολιτική που εφαρμόζεται, δηλαδή με τα χαρακτηριστικά που σχετίζονται περισσότερο με το δομικό του σκέλος.

Το φορτίο θεωρείται πως λαμβάνει σταθερές ωριαίες τιμές. Επομένως, το χρονικό βήμα, t , κατά το οποίο λαμβάνεται μία απόφαση από τον πράκτορα και δίνεται η αντίστοιχη αμοιβή/ποινή καθορίζεται στη μία ώρα.

Στο Σχήμα 3.8 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου QL.



Σχήμα 3.8: Γενικό διάγραμμα ροής αλγορίθμου QL, που εφαρμόζεται στις διάφορες εκδοχές της μεθόδου βελτιστοποίησης της παρούσας εργασίας.

3.5.1.1 Διαμόρφωση των ανταμοιβών/ποινών

Για κάθε απόφαση/δράση η αντίστοιχη τιμή του πίνακα Q διαμορφώνεται με βάση την ανταμοιβή/ποινή, η οποία υπολογίζεται από τη σχέση 3.13 ανάλογα με την απόφαση/δράση που έχει ληφθεί. Το c_t αντιστοιχεί στην τιμή αγοράς/πώλησης ηλεκτρικής ισχύος τη χρονική στιγμή t . Στις παρακάτω σχέσεις το Δe συμβολίζει το βήμα, δηλαδή την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που ο αλγόριθμος αποφασίζει να ανταλλάξει όταν επιλέγονται τα actions της φόρτισης και της πώλησης.

$$r(s_t, a_t) = \begin{cases} e_{\text{tot},t} \cdot c_t & , \text{buying} \\ (e_{\text{tot},t} + \Delta e) \cdot c_t & , \text{charging} \\ 0 & , \text{discharging} \\ -\Delta e \cdot c_t & , \text{selling} \end{cases} \quad (3.13)$$

3.5.1.2 Διαμόρφωση του πίνακα των καταστάσεων

Οι καταστάσεις διαμορφώνονται ως εξής:

$$\Delta E_{\text{BES},t} \in \{0, p \cdot \Delta E_{\text{BES},\text{nom}}, 2 \cdot p \cdot \Delta E_{\text{BES},\text{nom}}, \dots, m \cdot \Delta E_{\text{BES},\text{nom}}\} \triangleq \Delta E_{\text{BES},\text{states}} \quad (3.14)$$

όπου $p < 1: m \cdot p = 1, m \in \mathbb{N}^+$, δηλαδή το p εκφράζει ένα διακριτό βήμα της ενέργειας φόρτισης του BES. Έτσι, οι καταστάσεις της αποθηκευμένης ενέργειας στο BES χωρίζονται σε ισόποσα διαστήματα ενέργειας.

Η παρακάτω εξίσωση δηλώνει πως οι καταστάσεις της ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος - αλγορίθμου (που προκύπτει από το φορτίο του κτηρίου μείον την ενέργεια της Φ/Β συστοιχίας) χωρίζονται σε ισόποσα διαστήματα μεταξύ μιας μέγιστης και μιας ελάχιστης τιμής.

$$e_{\text{tot},t} \in \{E_{\text{tot},\text{min}}, n \cdot (E_{\text{tot},\text{max}} - E_{\text{tot},\text{min}}), \dots, k \cdot n \cdot (E_{\text{tot},\text{max}} - E_{\text{tot},\text{min}})\} \triangleq E_{\text{tot},\text{states}} \quad (3.15)$$

όπου $n < 1: k \cdot n \cdot (E_{\text{tot},\text{max}} - E_{\text{tot},\text{min}}) = E_{\text{tot},\text{max}}, k \in \mathbb{N}^+$

Τέλος, αναφορικά με την τιμή αγοράς/πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας αυτή διαμορφώνεται σε τρία διαφορετικά επίπεδα:

$$c_t \in \{\text{Mid}, \text{High}, \text{Low}\} \triangleq C \quad (3.16)$$

Τα επίπεδα αυτά που αντιστοιχίζονται σε περιόδους μέσα στην ημέρα που το ηλεκτρικό δίκτυο προσαρμόζει την τιμή αγοράς/πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας (καθορίζεται γενικότερα από το συνολικό φορτίο, που καλείται να καλυφθεί και επηρεάζει την τιμή εκκαθάρισης αγοράς), η οποία διαμορφώνεται από τον τρόπο που καλύπτεται η ζήτηση και μπορεί να εμπλέκει ΑΠΕ καθώς και άλλες πηγές. Για λόγους απλούστευσης στην εκτέλεση του αλγορίθμου κάθε περίοδος αντιστοιχίζεται σε συγκεκριμένες ώρες μέσα στην ημέρα, καθώς και σε μία ορισμένη τιμή. Ωστόσο, κάτι τέτοιο δεν είναι δεσμευτικό, καθώς οι τιμές αγοράς/πώλησης του κάθε χρονικού βήματος μπορεί να διαμορφώνονται σε οποιαδήποτε ενδιάμεση τιμή από τις χρησιμοποιούμενες στις λαμβανόμενες καταστάσεις του αλγορίθμου.

Όπως παρατηρείται λοιπόν, η διακριτοποίηση των διαφόρων καταστάσεων που λαμβάνουν η κατάσταση φόρτισης του BES, το φορτίο και η τιμολόγηση περιορίζουν τον αριθμό των συνολικών καταστάσεων, που τελικά διαμορφώνεται στον ακόλουθο:

$$S_{\text{Total}} \equiv \Delta E_{\text{BES,states}} \cdot E_{\text{tot,states}} \cdot C \quad (3.17)$$

Η κάθε πραγματική κατάσταση του συστήματος αντιστοιχίζεται σε μια υπάρχουσα διακριτή κατάσταση του αλγορίθμου που ταιριάζει περισσότερο σε αυτήν.

Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζεται μια ενδεικτική μορφή του πίνακα των καταστάσεων. Φαίνεται λοιπόν πως οι καταστάσεις που λαμβάνονται βάσει του αλγορίθμου είναι διακριτές, σε αντίθεση με τις πραγματικές καταστάσεις του συστήματος ενέργειας του Σχήματος 3.2, που μπορούν να πάρουν οποιαδήποτε ενδιάμεση - πραγματική τιμή. Έτσι, η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας, το φορτίο που μαζί με την παραγωγή ισχύος από τη Φ/Β συστοιχία συνιστούν τη συνολική καθαρή ζήτηση ενέργειας, καθώς και οι τιμές εκκαθάρισης αγοράς μπορούν να λάβουν ενδιάμεσες - πραγματικές τιμές, μεταξύ των αναμενόμενων ορίων των τιμών του χώρου καταστάσεων. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι τιμές εκκαθάρισης αγοράς που αντιστοιχίζονται σε συγκεκριμένες τιμές κατά τη δημιουργία του χώρου

καταστάσεων είναι μία λογική που συμπίπτει περισσότερο με την πραγματικότητα της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε επίπεδο οικιακού καταναλωτή (π.χ. νυχτερινό τιμολόγιο, τιμολόγιο σε ώρες αιχμής). Έτσι, προκύπτει η ανάγκη ταυτοποίησης των καταστάσεων του αλγορίθμου, οι οποίες ουσιαστικά συνιστούν το περιβάλλον της μεθόδου QL, με την αντιστοίχιση των πραγματικών καταστάσεων του συστήματος.

Πίνακας 3.1: Ενδεικτική μορφή του πίνακα των καταστάσεων που λαμβάνονται κατά την υλοποίηση και εκτέλεση του αλγορίθμου QL.

1	10	Mid
1	10	High
1	10	Low
⋮	⋮	⋮
15	45	Mid
15	45	High
15	45	Low

3.5.1.3 Αποφάσεις/Δράσεις

Ο αλγόριθμος QL λειτουργεί παρατηρώντας την κατάσταση του συστήματος και λαμβάνοντας μια απόφαση.

Όλες οι αποφάσεις/δράσεις δίνονται στην παρακάτω εξίσωση:

$$A_t = \{\text{buying, charging, discharging, selling}\} \quad (3.18)$$

Όπως θα φανεί καλύτερα και στη συνέχεια οι αποφάσεις/δράσεις που δίνονται από τη Σχέση 3.18 δεν είναι διαθέσιμες σε κάθε κατάσταση του πίνακα καταστάσεων. Δηλαδή, ενώ ορίζεται η τιμή που αντιστοιχεί σε αυτές στον πίνακα Q δεν είναι δυνατή η προσπέλασή τους, δηλαδή το σύστημα δεν θα βρεθεί ποτέ σε αυτές τις καταστάσεις. Για παράδειγμα, για την κατάσταση στην οποία η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη, στον πίνακα Q δε θα προσπελαστεί ποτέ το κελί που

αντιστοιχεί για charging, γιατί πολύ απλά δε μπορεί να γίνει αυτή η ενέργεια για τη δεδομένη κατάσταση.

Επιπρόσθετα, είναι σημαντικό να εξηγηθεί πως πραγματοποιούνται οι αποφάσεις/δράσεις όταν επιλέγονται. Πρώτον, ο αλγόριθμος όταν επιλέγει να κάνει αγορά ηλεκτρικής ενέργειας το κάνει για να καλύψει την απαίτηση ενέργειας $e_{tot,t}$. Δεύτερον, όταν επιλέγεται η φόρτιση των μπαταριών, τότε αν η ενέργεια $e_{tot,t}$ είναι θετική αγοράζεται ενέργεια για να καλύψει το φορτίο και αγοράζεται ενέργεια Δe για να φορτιστούν οι μπαταρίες. Αντίθετα, αν η ενέργεια $e_{tot,t}$ είναι αρνητική υπάρχει περίσσεια ενέργειας, οπότε θα αγοραστεί από το ηλεκτρικό δίκτυο όση ενέργεια υπολείπεται για φόρτιση των μπαταριών κατά Δe . Τρίτον, όταν επιλέγεται η εκφόρτιση των μπαταριών, τότε απλώς καλύπτεται η ενέργεια $e_{tot,t}$ με την ενέργεια των μπαταριών. Τέταρτον, όταν επιλέγεται η πώληση ηλεκτρικής ενέργειας, αν η ενέργεια $e_{tot,t}$ είναι θετική, τότε η ενέργεια $e_{tot,t}$ καλύπτεται από την ενέργεια των μπαταριών και πωλείται ενέργεια Δe στο ηλεκτρικό δίκτυο εκφορτίζοντας τις μπαταρίες. Αντίθετα, αν η ενέργεια $e_{tot,t}$ είναι αρνητική, τότε από τις μπαταρίες πωλείται ενέργεια μόνο Δe στο ηλεκτρικό δίκτυο και το περίσσειμα ενέργειας $e_{tot,t}$ πωλείται και αυτό στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Στη συνέχεια, η λογική με την οποία επιλέγονται οι αποφάσεις/δράσεις είναι η εξής:

- Buying υπάρχει σαν επιλογή όταν η ενέργεια $e_{tot,t}$ είναι θετική.
- Charging υπάρχει σαν επιλογή όταν η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στις μπαταρίες είναι λιγότερη από τη μέγιστη διαθέσιμη ενέργεια των μπαταριών μείον την ενέργεια που θα αποθηκευτεί στις μπαταρίες.
- Discharging υπάρχει σαν επιλογή όταν οι μπαταρίες έχουν αρκετή ενέργεια για να καλύψουν την ενέργεια $e_{tot,t}$ και τις απώλειες.
- Selling υπάρχει σαν επιλογή όταν οι μπαταρίες έχουν αρκετή ενέργεια για να καλύψουν την ενέργεια $e_{tot,t}$ με τις απώλειες συν το βήμα πώλησης Δe με τις απώλειές του.

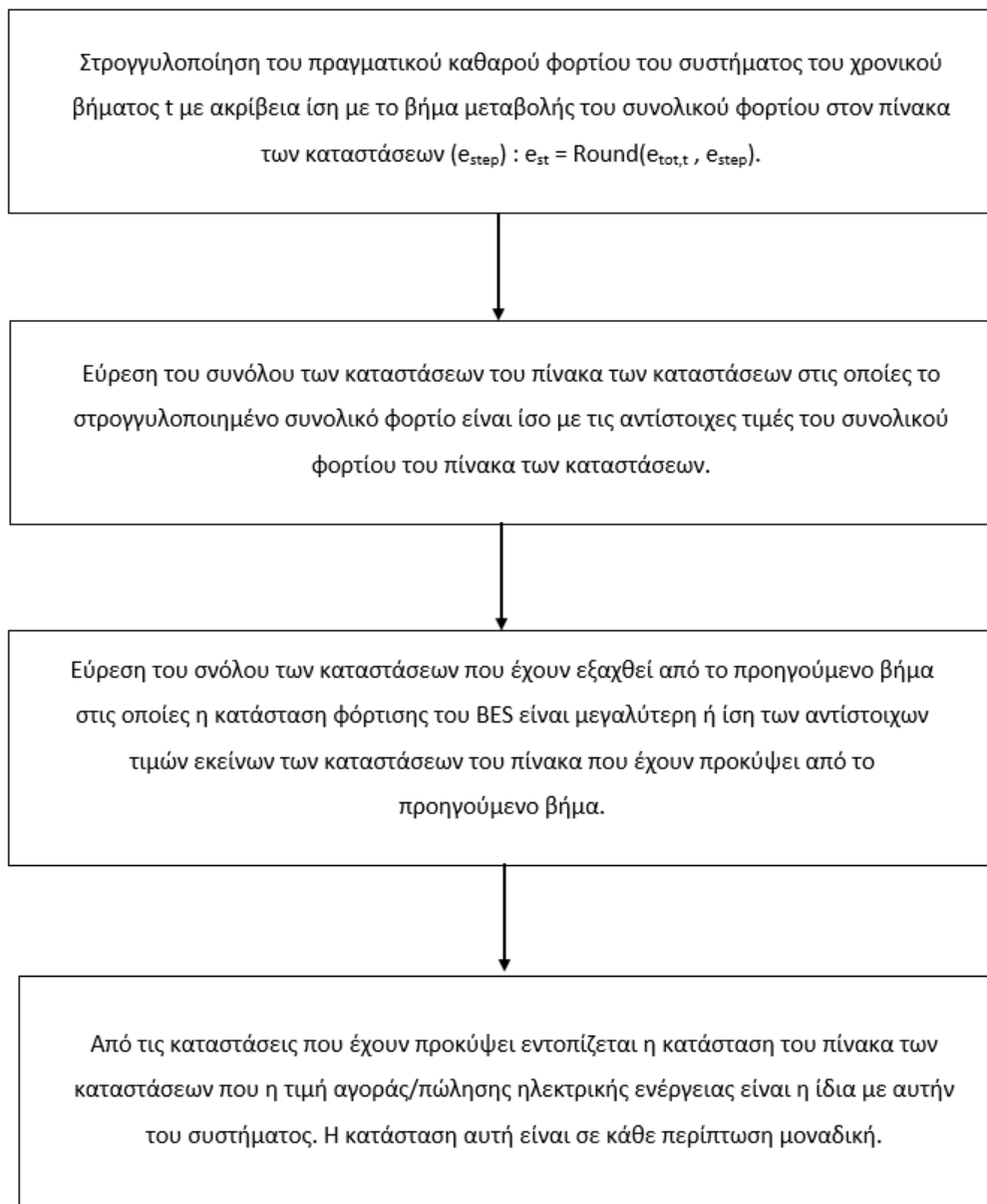
Οι διαθέσιμες αποφάσεις/δράσεις $a_t \in A_t: a \subseteq A$ για κάθε timestep, οι οποίες πρέπει να καθοριστούν πριν γίνει η επιλογή κάποιας εξ' αυτών από την πιθανότητα επιλογής μέσω του $\varepsilon_{\text{greedy}}$, δίνονται ακολούθως:

- Αν η ενέργεια $e_{\text{tot},t}$ είναι θετική και η διαθέσιμη ενέργεια $\Delta E_{\text{BES},t}$ των μπαταριών είναι μικρότερη από την ενέργεια $e_{\text{tot},t}$ με τις απώλειες, τότε οι διαθέσιμες αποφάσεις/δράσεις που προκύπτουν είναι το buying και charging.
- Αν η ενέργεια $e_{\text{tot},t}$ είναι θετική και η διαθέσιμη ενέργεια $\Delta E_{\text{BES},t}$ των μπαταριών είναι μεγαλύτερη ή ίση από την ενέργεια $e_{\text{tot},t}$ με τις απώλειες και μικρότερη από την ενέργεια $e_{\text{tot},t}$ με τις απώλειες συν το βήμα Δe με τις απώλειές του, τότε οι διαθέσιμες αποφάσεις/δράσεις που προκύπτουν είναι το buying, charging και discharging, αφού οι μπαταρίες έχουν ενέργεια για discharging αλλά όχι για selling.
- Αν η ενέργεια $e_{\text{tot},t}$ είναι θετική και η διαθέσιμη ενέργεια $\Delta E_{\text{BES},t}$ των μπαταριών είναι μεγαλύτερη ή ίση από την ενέργεια $e_{\text{tot},t}$ με τις απώλειες συν το βήμα Δe με τις απώλειές του και η διαθέσιμη ενέργεια των μπαταριών είναι μικρότερη ή ίση από τη μέγιστη διαθέσιμη ενέργεια των μπαταριών μείον την ενέργεια που θα αποθηκευτεί στη μπαταρία (συνθήκη για να μπορεί να γίνει charging), τότε οι διαθέσιμες αποφάσεις/δράσεις που προκύπτουν είναι το buying, charging, discharging και selling.
- Αν η ενέργεια $e_{\text{tot},t}$ είναι θετική και η διαθέσιμη ενέργεια $\Delta E_{\text{BES},t}$ των μπαταριών είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια $e_{\text{tot},t}$ με τις απώλειες συν το βήμα Δe με τις απώλειές του και η διαθέσιμη ενέργεια των μπαταριών είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη διαθέσιμη ενέργεια των μπαταριών μείον την ενέργεια που θα αποθηκευτεί στη μπαταρία (συνθήκη με την οποία δεν μπορεί να γίνει charging), τότε οι διαθέσιμες αποφάσεις/δράσεις που προκύπτουν είναι το buying, discharging και selling.
- Αν η ενέργεια $e_{\text{tot},t}$ είναι αρνητική και η διαθέσιμη ενέργεια $\Delta E_{\text{BES},t}$ των μπαταριών είναι μεγαλύτερη ή ίση από το βήμα Δe με τις απώλειές του και μικρότερη ή ίση από τη μέγιστη διαθέσιμη ενέργεια των μπαταριών μείον την ενέργεια που θα αποθηκευτεί στην μπαταρία (συνθήκη για να μπορεί να γίνει

charging), τότε οι διαθέσιμες αποφάσεις/δράσεις που προκύπτουν είναι το charging και selling.

- Αν η ενέργεια $e_{tot,t}$ είναι αρνητική και η διαθέσιμη ενέργεια $\Delta E_{BES,t}$ των μπαταριών είναι μεγαλύτερη ή ίση από το βήμα Δe με τις απώλειές του και μεγαλύτερη από τη μέγιστη διαθέσιμη ενέργεια των μπαταριών μείον την ενέργεια που θα αποθηκευτεί στη μπαταρία (συνθήκη με την οποία δεν μπορεί να γίνει charging), τότε η διαθέσιμη απόφαση/δράση που προκύπτει είναι το selling.
- Αν η ενέργεια $e_{tot,t}$ είναι αρνητική και η διαθέσιμη ενέργεια $\Delta E_{BES,t}$ των μπαταριών είναι μικρότερη από το βήμα Δe με τις απώλειές του, τότε η διαθέσιμη απόφαση/δράση που προκύπτει είναι το charging.

Το διάγραμμα ροής για την εύρεση της κατάστασης του συστήματος απεικονίζεται στο Σχήμα 3.9. Στον Πίνακα 3.1 παρατηρείται πως οι τιμές του συστήματος χωρίζονται σε διακριτά βήματα, όπου για κάθε βήμα της συνολικής ενεργειακής ζήτησης του φορτίου (εάν από αυτό αφαιρεθεί προηγουμένως η παραγωγή από τη Φ/Β συστοιχία) αντιστοιχίζονται όλες οι καταστάσεις φόρτισης του BES. Αντίθετα, για κάθε κατάσταση που προκύπτει δημιουργείται το τελικό σύνολο καταστάσεων, όπου υπάρχει ένας μοναδικός συνδυασμός κατάστασης για συνολική ζήτηση του φορτίου (φορτίο κτηρίου μείον παραγωγή από τη Φ/Β συστοιχία), για κατάσταση φόρτισης του BES και για διαφορετική περίοδο τιμολόγησης (περίοδοι αιχμής, μέσης φόρτισης και ελάχιστης φόρτισης του ηλεκτρικού δικτύου). Το βήμα με το οποίο περιγράφεται η κάθε ξεχωριστή κατάσταση (π.χ. του φορτίου) μπορεί να έχει ακέραια ή δεκαδική τιμή. Όσο μειώνεται το βήμα αυτό, τόσο αυξάνεται η ακρίβεια με την οποία οι καταστάσεις του αλγορίθμου συμπίπτουν με τις πραγματικές πιθανές καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί το σύστημα. Με τον τρόπο αυτό, όμως, αυξάνεται και ο συνολικός αριθμός καταστάσεων στις οποίες καλείται να εκπαιδευτεί ο αλγόριθμος, δυσχεραίνοντας την ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου ή οδηγώντας σε ύπαρξη πληθώρας καταστάσεων, στις οποίες το σύστημα δεν πρόκειται να βρεθεί ποτέ, αυξάνοντας το υπολογιστικό κόστος του αλγορίθμου.



Σχήμα 3.9: Διάγραμμα ροής της αλγοριθμικής διαδικασίας αντιστοίχισης της πραγματικής κατάστασης του συστήματος με μία κατάσταση του πίνακα καταστάσεων.

3.5.1.4 Πίνακας Q

Ο πίνακας των καταστάσεων αποτελεί δομικό συστατικό του πίνακα Q. Πιο συγκεκριμένα, κάθε κατάσταση αντιστοιχίζεται σε μια γραμμή του πίνακα Q, η οποία έχει τόσα στοιχεία όσα και οι δυνατές αποφάσεις/δράσεις, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.2. Οι τιμές που παρουσιάζονται στον πίνακα αυτόν και οι καταστάσεις είναι ενδεικτικές, αλλά παραπλήσιες αυτών που εμφανίζονται στον πίνακα Q, όπως αυτός διαμορφώνεται στον αλγόριθμο, αλλά και στη διαδικασία εκπαίδευσης.

Πίνακας 3.2: Πίνακας Q.

States \ Actions	Buying	Charging	Discharging	Selling
1/10/Mid	2.45	3.47	-1.23	3.44
1/10/High	2.13	2.67	-0.49	-1.16
1/10/Low	1.76	1.53	-0.02	1.45
⋮				
15/45/Mid	3.27	-0.34	-0.83	-1.34
15/45/High	3.45	-0.54	-1.45	-2.32
15/45/Low	3.28	-2.38	1.23	3.98

3.5.1.5 Οι παράμετροι του αλγορίθμου

Οι παράμετροι του αλγορίθμου παρατίθενται ως εξής:

- Ρυθμός μάθησης (Learning Rate) α .
- Εκπτώτικός Παράγοντας (Discount Factor) γ .
- Χρονικό βήμα (Timestep) t .
- Παράγοντας απληστίας ϵ_{greedy} , που αντιστοιχεί στην πιθανότητα επιλογής της δράσης εκείνης που έχει την μικρότερη τιμή στον πίνακα $Q(s_t, a_t)$, δηλαδή:

$$a_t \leftarrow \min_{a \in A_t} Q(s_t, a) \quad (3.19)$$

3.5.2 Δεύτερη διαμόρφωση

Η πρώτη διαμόρφωση παρουσιάζει ελλείψεις, που σχετίζονται αμιγώς με το πεδίο ορισμού του υπό διερεύνηση προβλήματος. Ο λόγος που έγινε είναι για να διερευνηθεί ο τρόπος λειτουργίας του αλγορίθμου με την εφαρμογή παρόμοιων διαμορφώσεων (σε παρόμοιου τύπου βελτιστοποιήσεις με αυτήν που εξετάζεται σε αυτήν την εργασία) που εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφία. Οι ελλείψεις διαπιστώνονται στο αλγοριθμικό σκέλος και αντιμετωπίζονται με την κατάλληλη αναπροσαρμογή του τελευταίου. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται προσαρμογή της ανταμοιβής/ποινής για την ορθότερη εφαρμογή της πολιτικής, όπως εξηγήθηκε στα συμπεράσματα της προηγούμενης δοκιμαστικής εκτέλεσης. Το αλγοριθμικό σκέλος δε μεταβάλλεται στη λογική του, αλλά τροποποιείται ο πίνακας καταστάσεων, καθώς και οι παράμετροι μάθησης. Σε αυτό το κεφάλαιο θα δειχθεί η επίδραση του συνόλου των παραμέτρων και της δομής του αλγορίθμου στην επίτευξη επιθυμητών αποτελεσμάτων.

Ενδεικτικά, οι στόχοι σε σχέση με την επίδραση της μεταβολής της αλλαγής της πιθανότητας επιλογής του $action$, a_{greedy} , με βάση την πιθανότητα ϵ_{greedy} παρατίθενται κατά περίπτωση:

1^η περίπτωση:

- $\epsilon_{greedy} = \text{random}(0.25, 0.4)$ για όλη τη διαδικασία εκπαίδευσης.
- $\epsilon_{greedy} = 1$ αφού εξασφαλιστεί ότι ο αλγόριθμος έχει εκπαιδευτεί σε όλες τις καταστάσεις.

2^η περίπτωση:

- $\epsilon_{greedy} = \epsilon_{greedy, \max} (1 - e^{-\text{time_step}/\text{time_constant}})$ για την επίτευξη της βαθμιαίας σύγκλισης του ϵ_{greedy} σε μια άνω οριακή τιμή < 1 κατά τη διάρκεια εκτέλεσης.
- $\epsilon_{greedy} = 1$ αφού εξασφαλιστεί ότι ο αλγόριθμος έχει εκπαιδευτεί σε όλες τις καταστάσεις.

3^η περίπτωση:

- $\varepsilon_{\text{greedy}} = \text{random}(0.25, 0.4)$ για όλη τη διαδικασία εκπαίδευσης
- $\varepsilon_{\text{greedy}} = \varepsilon_{\text{greedy, max}} (1 - e^{-\text{time_step}/\text{time_constant}})$ για την επίτευξη της βαθμιαίας σύγκλισης του $\varepsilon_{\text{greedy}}$ σε μια άνω οριακή τιμή < 1 κατά τη διάρκεια εκτέλεσης.
- $\varepsilon_{\text{greedy}} = 1$ αφού εξασφαλιστεί ότι ο αλγόριθμος έχει εκπαιδευτεί σε όλες τις καταστάσεις.

3.5.2.1 Διαμόρφωση των ανταμοιβών/ποινών

Το σημαντικότερο στοιχείο, το οποίο προσαρμόζεται για την επίτευξη της επιθυμητής βελτιστοποίησης αποτελεί η πολιτική που εφαρμόζεται. Η πολιτική σε επίπεδο αλγορίθμου μεταφράζεται στην ανταμοιβή/ποινή που επιλέγεται σε κάθε περίπτωση. Οι τιμές, λοιπόν, που λαμβάνει η ανταμοιβή/ποινή τροποποιούνται με γνώμονα τα ακόλουθα:

- Αύξηση του αριθμού αποφάσεων/δράσεων εκφόρτισης/πώλησης ηλεκτρικής ισχύος (κατά προτίμηση πώλησης) τις χρονικές περιόδους που η τιμή αγοράς/πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλή.
- Αύξηση του αριθμού των αποφάσεων/δράσεων φόρτισης του BES τις χρονικές περιόδους που η τιμή αγοράς/πώλησης ηλεκτρικής ισχύος είναι χαμηλή.

Κάτι τέτοιο αποτυπώνεται στις ανταμοιβές/ποινές που εφαρμόζονται, όπως παρουσιάζεται ακολούθως. Να σημειωθεί ότι η “άπληστη” απόφαση αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή του πίνακα Q της εκάστοτε κατάστασης του πίνακα των καταστάσεων, που αντιστοιχεί στην κατάσταση του συστήματος.

$$r(s_t, a_t) = \begin{cases} e_{\text{tot},t} \cdot c_t & , \text{buying} \\ (e_{\text{tot},t} + \Delta e) \cdot (c_t - \max(C)) - \delta_1 \cdot \Delta e \cdot (\text{mean}(C) - c_t) & , \text{charging} \\ e_{\text{tot},t} \cdot (\delta_2 \cdot \min(C) - c_t) & , \text{discharging} \\ -\delta_1 \cdot \Delta e \cdot (c_t - \delta_2 \cdot \min(C) + e_{\text{tot},t} \cdot (\min(C) - c_t)) & , \text{selling} \end{cases} \quad (3.20)$$

όπου δ_1 είναι μια τιμή μεταξύ 5 και 15 και δ_2 είναι μια τιμή μεταξύ 1 και $\max(C)/\min(C)$, όπου $\max(C)$ και $\min(C)$ είναι η μέγιστη και ελάχιστη τιμολόγηση της

kWh, ενώ c_t είναι η τιμολόγηση της kWh τη χρονική περίοδο t και Δe η ενέργεια που ανταλλάσσεται μεταξύ δικτύου και BES.

3.5.2.2 Διαμόρφωση του πίνακα των καταστάσεων

Οι καταστάσεις που συνιστούν τον πίνακα των καταστάσεων έχουν τροποποιηθεί συγκριτικά με την πρώτη διαμόρφωση. Ο σκοπός των αλλαγών αυτών είναι να εκπαιδευτεί ο αλγόριθμος με τρόπο τέτοιο ώστε οι αποφάσεις που λαμβάνονται από αυτόν να επιτυγχάνουν καλύτερη βελτιστοποίηση, κάτι που υπολογίζεται εύκολα από τη σύγκριση της τιμής του $L(n_t)$ των δύο διαμορφώσεων για ίδιο αριθμό n . Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και παρακάτω πλέον η κατάσταση φόρτισης του BES αποδίδεται ως σχετική τιμή και πιο συγκεκριμένα από τρεις διαφορετικές τιμές:

$$\Delta E_{BES,t} \in \{0, 1, 2\} \triangleq \Delta E_{BES,states} \quad (3.21)$$

όπου:

οι καταστάσεις 0, 1, 2 λήφθηκαν ως προς το κατά πόσο φορτισμένη είναι η μπαταρία και:

- η κατάσταση 0 προκύπτει όταν η μπαταρία δε μπορεί να καλύψει τη συνολική ενέργεια $e_{tot,t}$ ή όταν δεν υπάρχει φορτίο για να καλύψει λόγω περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας ($e_{tot,t} < 0$), οπότε και δεν ενδείκνυται να χρησιμοποιηθεί η μπαταρία.
- η κατάσταση 1 προκύπτει όταν η μπαταρία μπορεί να καλύψει το φορτίο, αλλά όχι να πωλήσει ενέργεια Δe στο ηλεκτρικό δίκτυο.
- η κατάσταση 2 προκύπτει όταν η μπαταρία έχει αρκετή ενέργεια, ώστε να μπορεί και να καλύψει το φορτίο και να πωλήσει ενέργεια Δe στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Επομένως η ενέργεια του BES δεν περιγράφεται πλέον ως μια τιμή σε kWh αλλά με μια τιμή που περιγράφει τη σχέση της με την καθαρή ενέργεια του συστήματος. Κάτι τέτοιο περιορίζει σημαντικά το συνολικό αριθμό των καταστάσεων επιταχύνοντας

παράλληλα τη διαδικασία εκπαίδευσης. Τα υπόλοιπα στοιχεία, τόσο του πίνακα καταστάσεων, όσο και των αποφάσεων δε μεταβλήθηκαν συγκριτικά με την πρώτη προσομοίωση.

Υπενθυμίζεται ότι το Δe εκφράζει μια σταθερή ποσότητα ενέργειας, η οποία ανταλλάσσεται με το ηλεκτρικό δίκτυο (αγοράζεται ή πωλείται) κατά τις αποφάσεις/δράσεις της αποθήκευσης και πώλησης ενέργειας.

3.5.3 Τρίτη διαμόρφωση

Η σχέση 3.20, δηλαδή η πολιτική της ανταμοιβής/ποινής τροποποιείται στην ακόλουθη:

$$r(s_t, a_t) = \begin{cases} e_{\text{tot},t} \cdot c_t & , \text{buying} \\ (e_{\text{tot},t} + \Delta e) \cdot (c_t - \text{mean}(C)) - \delta_1 \cdot \Delta e \cdot (\text{mean}(C) - c_t) & , \text{charging} \\ \delta_1 \cdot e_{\text{tot},t} \cdot (\delta_2 \cdot \min(C) - c_t) & , \text{discharging} \\ -\delta_1 \cdot \Delta e \cdot (c_t - \delta_2 \cdot \min(C)) + e_{\text{tot},t} \cdot (\min(C) - c_t) & , \text{selling} \end{cases} \quad (3.22)$$

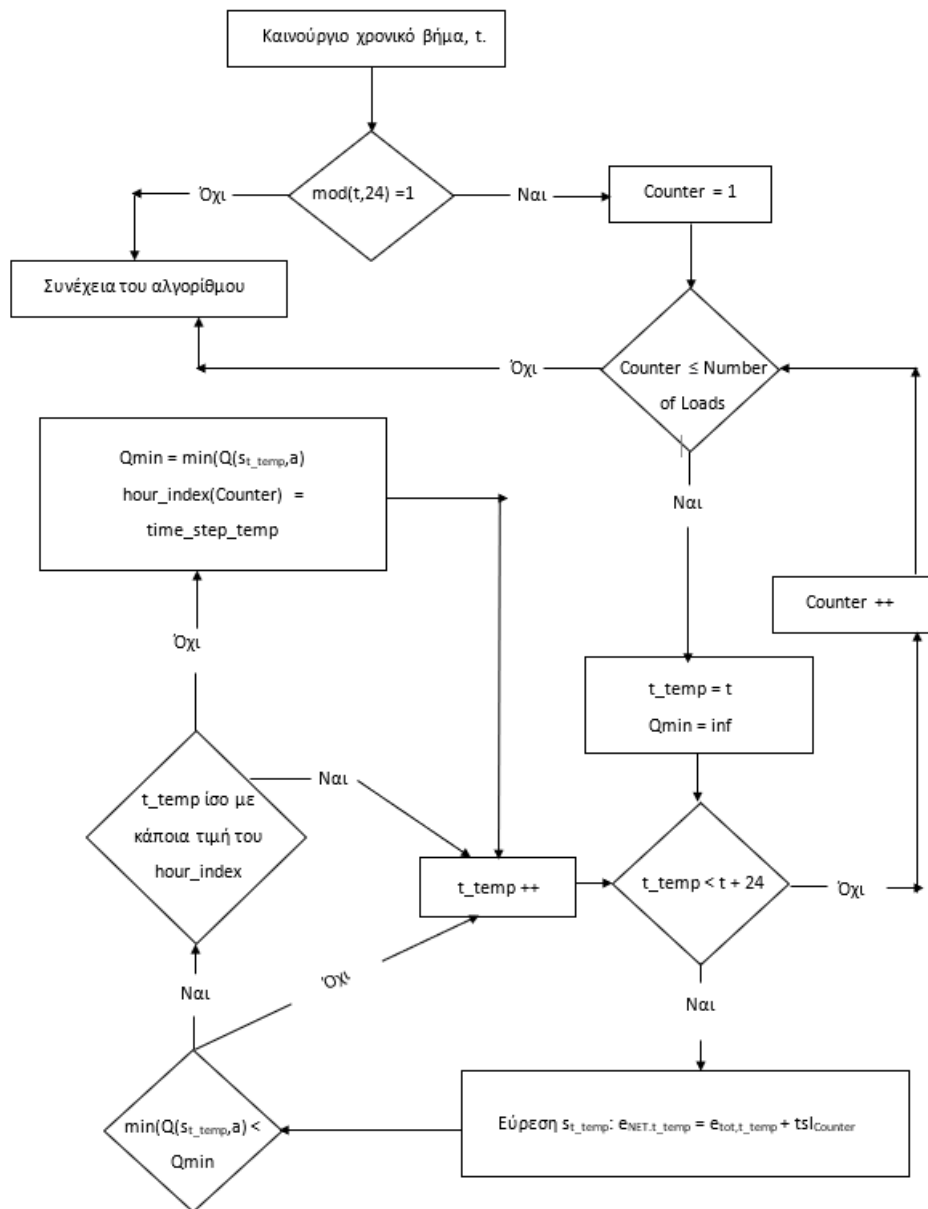
όπου δ_1 μια τιμή μεταξύ 5 και 15 και δ_2 μια τιμή μεταξύ 1 και $\max(C)/\min(C)$, όπως στη σχέση 3.20. Ο στόχος είναι να βελτιωθεί η απόδοση του συστήματος μέσω της ενίσχυσης ή αποτροπής λήψης αποφάσεων/δράσεων, που συναρτώνται από την απόκλιση από τις ωριαίες τιμές αγοράς/πώλησης ενέργειας.

3.6 Χρονοπρογραμματισμός του φορτίου με τη χρήση του αλγορίθμου Q-Learning

Στις προηγούμενες ενότητες, εάν και δεν έγινε συγκεκριμένη αναφορά, μαζί με τη βελτιστοποίηση - ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας για τον καταναλωτή εφαρμόζεται σε παράλληλο χρόνο και η βελτιστοποίηση χρονοπρογραμματισμού λειτουργίας του φορτίου του κτηρίου.

Η εκτέλεση του αλγορίθμου του χρονοπρογραμματισμού γίνεται στην αρχή (1^η ώρα) της κάθε ημέρας και με χρονικό ορίζοντα 24 ωρών για όλα τα χρονοπρογραμματιζόμενα φορτία της ημέρας αυτής. Κατά την εκτέλεσή του λαμβάνονται επιπλέον αποφάσεις που καθορίζουν τις ώρες (χρονικές περιόδους) που θα λαμβάνει χώρα η χρήση μιας ηλεκτρικής συσκευής. Η χρήση αυτή αντιστοιχεί σε ένα φορτίο, του οποίου τόσο η ισχύς του, όσο και οι ώρες που μπορεί να χρησιμοποιείται αποτελούν μεταβλητές, που μπορούν να ορίζονται αυτοτελώς και ανεξάρτητα από το προφίλ φορτίου. Επιπλέον, οι ωριαίες τιμές κατανάλωσης του εκάστοτε φορτίου δεν προϋποθέτουν και τη λειτουργία της συσκευής αυτής σε ολόκληρη την ώρα αυτή. Αντιθέτως, όπως περιγράφεται και στην ενότητα 3.2, οι ωριαίες τιμές του φορτίου μπορεί να αντιστοιχούν σε χρόνους λειτουργίας σε οποιοδήποτε χρονικό διάστημα μικρότερο ή ίσο της μίας ώρας.

Η βασική λογική με την οποία χρησιμοποιείται είναι κάνοντας χρήση του υπάρχοντος αλγορίθμου μηχανικής μάθησης που χρησιμοποιείται. Δηλαδή ο αλγόριθμος του χρονοπρογραμματισμού λειτουργεί παράλληλα με τον εκάστοτε αλγόριθμο QL και φυσικά παράλληλα με τον κάθε αλγόριθμο (SARSA, DQL) που υλοποιούνται στην παρούσα εργασία. Ωστόσο, όπως θα δειχθεί στο τέλος της εργασίας τα αποτελέσματα και για τους 3 είναι παρόμοια, οπότε και επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί κυρίως η χρήση του QL για τη μελέτη του χρονοπρογραμματισμού. Το βασικό του στοιχείο είναι ότι η απόδοσή του εξαρτάται από την απόδοση του εκάστοτε αλγορίθμου, δηλαδή από το βαθμό που ο τελευταίος έχει εκπαιδευτεί. Επιπλέον, η χρήση του αλγορίθμου του χρονοπρογραμματισμού θα επηρεάσει το προφίλ φορτίου, οπότε ο αλγόριθμος θα εκπαιδευτεί σε καταστάσεις που πιθανόν να μην είχε εκπαιδευτεί προηγουμένως. Έτσι, είναι χρήσιμο να γίνουν επιπλέον βήματα εκπαίδευσης, πέραν της μίας μέρας, για να προκύψει ακόμα μεγαλύτερη εξοικονόμηση χρημάτων. Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού απεικονίζεται στο Σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.10: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού.

Όπως αναφέρθηκε, ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού εφαρμόζεται παράλληλα με τον εκάστοτε αλγόριθμο βελτιστοποίησης και επιτυγχάνεται μεγαλύτερο οικονομικό όφελος από τη χρήση του αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού. Έτσι, για την επίδειξη της επίδρασης του χρονοπρογραμματισμού απαιτούνται μεμονωμένες προσομοιώσεις, που θα παρουσιαστούν στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων, οι οποίες αποδεικνύουν μέσω

συγκεκριμένων αποτελεσμάτων τη βελτιστοποίηση που επιτυγχάνεται μόνο μέσω αυτού [31].

Έτσι, σε κάθε χρονικό βήμα που αντιστοιχεί στην αρχή ($1^{\text{η}}$ ώρα) της κάθε ημέρας $[\text{mod}(24,1)$: ακέραιο πολλαπλάσιο του 24 εάν σε αυτό προστεθεί το 1] εκτελείται ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού, όπου για κάθε ωριαία τιμή του φορτίου της συσκευής εντοπίζεται εκείνο το χρονικό βήμα, στο οποίο εάν στο συγκεκριμένο φορτίο της ώρας εκείνης προστεθεί το φορτίο αυτό επιτυγχάνεται το ελάχιστο κόστος συγκριτικά με το να είχε προστεθεί σε άλλες ώρες της ημέρας. Το ελάχιστο κόστος προκύπτει από την εύρεση της ελάχιστης τιμής του πίνακα Q. Η ίδια ακριβώς διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τις υπόλοιπες ωριαίες τιμές του φορτίου, υπό τη συνθήκη ότι δε θα επιλεγεί κάποια ώρα που έχει ήδη επιλεγεί, καθώς οι ωριαίες τιμές του φορτίου της συσκευής συνιστούν διαφορετικές ώρες λειτουργίας της συσκευής.

Τέλος, όπως παρατηρείται ο αλγόριθμος του χρονοπρογραμματισμού δεν ανανεώνει τις τιμές του πίνακα Q. Ως εκ τούτου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά με κάθε αλγόριθμο ενισχυτικής μάθησης που εφαρμόζεται στην παρούσα εργασία.

3.7 Περιγραφή εφαρμογής του αλγορίθμου SARSA

Ο αλγόριθμος SARSA προκύπτει από το ακρωνύμιο κατάσταση-απόφαση-επιβράβευση-κατάσταση-απόφαση (state – action – reward – state – action). Η ανανέωση του πίνακα Q προκύπτει πλέον όχι από τη βέλτιστη τιμή (ελάχιστη στην περίπτωση της παρούσας εργασίας) ανάμεσα στις τιμές του πίνακα Q των επιτρεπτών αποφάσεων/δράσεων της επόμενης κατάστασης, αλλά και από την τιμή που αντιστοιχεί στην τιμή του πίνακα Q της επόμενης κατάστασης και της επιλεγμένης απόφασης/δράσης στην κατάσταση αυτή.

Ο αλγόριθμος αυτός λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο με τον QL διότι με $\epsilon_{\text{greedy}} = 1$ η απόφαση/δράση της κάθε κατάστασης συμπίπτει με τη βέλτιστη τιμή. Σε κάθε περίπτωση η ανανέωση του πίνακα Q δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow (1 - \alpha) \cdot Q(s_t, a_t) + \alpha [r(s_t, a_t) + \gamma \cdot Q(s_{t+\tau}, a)] \quad (3.23)$$

Κατά τα υπόλοιπα ο αλγόριθμος αυτός δε διαφέρει από τον αλγόριθμο Q-Learning, παρά μόνο στον τρόπο ανανέωσης του πίνακα Q, ο οποίος και έχει περιγραφεί.

3.8 Περιγραφή εφαρμογής του αλγορίθμου Double-Q-Learning

Το διάγραμμα του αλγορίθμου αυτού προκύπτει βάσει του [32] και απεικονίζεται στο Σχήμα 3.11.

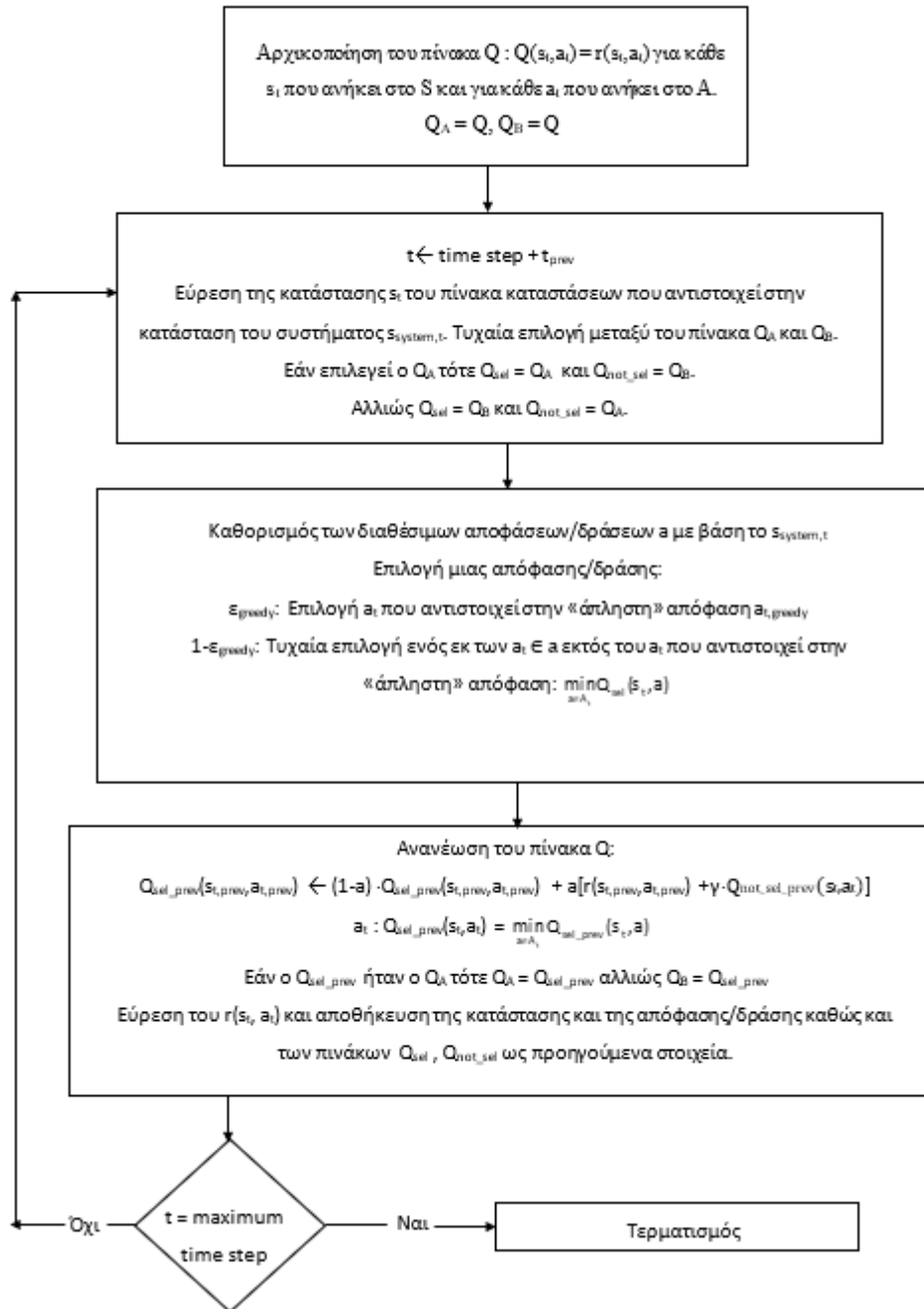
Στον αλγόριθμο DQL υπάρχουν δύο πίνακες Q , δηλαδή ο Q_A και ο Q_B . Στην αρχή του κάθε χρονικού βήματος επιλέγεται ισοπίθανα ένας εκ των δύο και οι τιμές του τίθενται στον ενεργό πίνακα Q_{sel} , ενώ οι τιμές του μη-επιλεχθέντος πίνακα αποθηκεύονται στον ανενεργό πίνακα Q_{not_sel} . Η ανανέωση του πίνακα Q συνδυάζει χαρακτηριστικά του αλγορίθμου Q-learning και του αλγορίθμου SARSA. Πιο συγκεκριμένα, η ανανέωση του πίνακα γίνεται με βάση την τιμή που λαμβάνει ο επιλεχθέν στο προηγούμενο χρονικό βήμα πίνακας Q , $Q_{sel,prev}$, για την κατάσταση στο προηγούμενο βήμα, $s_{t,prev}$, για την επιλεχθείσα απόφαση/δράση στο προηγούμενο βήμα, $a_{t,prev}$, και με βάση την ανταμοιβή/ποινή στο προηγούμενο βήμα, $r(s_{t,prev}, a_{t,prev})$. Ωστόσο, ο όρος του γινομένου με τον εκπτωτικό παράγοντα, γ , περιλαμβάνει την τιμή του μη-επιλεχθέντα πίνακα στο προηγούμενο χρονικό βήμα, $Q_{not_sel_prev}$, και μάλιστα την τιμή που προκύπτει από την απόφαση/δράση, a_t , που ελαχιστοποιεί την τιμή του πίνακα Q_{sel_prev} στην παρούσα κατάσταση του συστήματος, s_t .

Το παραπάνω αποτελεί και το σημαντικότερο στοιχείο του αλγορίθμου αυτού, καθώς και την ειδοποιό διαφορά του με τον αλγόριθμο Q-Learning, ενώ η εξίσωση ανανέωσης των πινάκων Q , όπως και στον Q-Learning προκύπτει από την εξίσωση του Bellman και δίνεται στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 3.11.

Συνοπτικά, στον αλγόριθμο αυτόν, δύο διαφορετικοί πίνακες λειτουργούν παράλληλα, ενώ η ανανέωση του καθενός γίνεται με τις τιμές του άλλου πίνακα. Φυσικά, η πολιτική που εφαρμόζεται είναι η τελική διαμόρφωση των τιμών της ανταμοιβής/ποινής που έχει υπολογιστεί μετά από πολλές δοκιμές, όπως έχει περιγραφεί.

Ομοίως με τον QL, η ανανέωση του πίνακα Q δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$Q_{sel_pr}(s_{t,pr}, a_{t,pr}) \leftarrow (1 - \alpha) \cdot Q_{sel_pr}(s_{t,pr}, a_{t,pr}) + \alpha [r(s_{t,pr}, a_{t,pr}) + \gamma \cdot \min_{a \in A_t} Q_{not_sel_pr}(s_t, a)] \quad (3.24)$$



Σχήμα 3.11: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου DQL.

Κεφάλαιο 4 : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

4.1 Ανακεφαλαίωση

Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα από την εκτέλεση των αλγορίθμων που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Πιο συγκεκριμένα, εκτελείται μια σειρά από δοκιμαστικές προσομοιώσεις με όλες τις διαμορφώσεις πολιτικής που παρατίθενται στην ενότητα 3.5 ώστε με λογική συνέπεια και συγκεκριμένα αποτελέσματα να επιλεχθεί η καταλληλότερη από αυτές για την εκτέλεση των υπολοίπων προσομοιώσεων. Στις τελευταίες διερευνώνται διεξοδικά όλοι οι τρόποι και οι βελτιώσεις στο σύστημα που εξετάζεται για την επίτευξη του μέγιστου οικονομικού οφέλους (μεγαλύτερης εξοικονόμησης). Η υλοποίηση του κώδικα έγινε με τη χρήση της Matlab και εκτελέστηκε σε υπολογιστή με επεξεργαστή Ryzen 2600. Τέλος, ο χρόνος που διαρκεί η κάθε εκτέλεση είναι μερικά δευτερόλεπτα.

4.2 Αποτελέσματα με τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης Q-Learning

4.2.1 Μελέτη παραμέτρων και συμπεριφοράς αλγορίθμου (πρώτη προσομοίωση)

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε αυτή την παράγραφο προκύπτουν από την πρώτη διαμόρφωση όπως περιγράφεται στην ενότητα 3.5.1. Οι παράμετροι εκπαίδευσης είναι : $a = 0.1$, $\gamma = 0.1$ και το βήμα ενέργειας φόρτισης/εκφόρτισης είναι $\Delta e = 5\text{kWh}$.

Ο στόχος της πρώτης προσομοίωσης είναι η κατανόηση των παραμέτρων και η διερεύνηση της συμπεριφοράς του αλγορίθμου, ενώ όπως θα δειχθεί στην ενότητα 4.3, όπου υλοποιείται η τρίτη προσομοίωση λαμβάνονται υπόψιν πραγματικά δεδομένα. Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται το προφίλ φορτίου. Παρατηρείται λοιπόν πως στην παρούσα προσομοίωση έχει επιλεγεί η χρήση ενός προκαθορισμένου προφίλ φορτίου και μιας προκαθορισμένης παραγωγής ενέργειας από τη Φ/Β συστοιχία.

Αξίζει να σημειωθεί επίσης ότι αξιοποιείται ένα τμήμα των συνολικών καταστάσεων λειτουργίας που έχουν ορισθεί, διότι δεν μπορεί να είναι διαθέσιμες όλες οι ενέργειες για κάθε κατάσταση. Για παράδειγμα, δεν μπορεί στην κατάσταση όπου η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη να υπάρχει διαθέσιμη η ενέργεια της φόρτισης. Έτσι, μόνο οι αντίστοιχες τιμές του πίνακα Q προσπελαύνονται και τροποποιούνται. Ωστόσο, επειδή όλες αυτές οι καταστάσεις θα προσπελαστούν και επομένως ο αλγόριθμος θα εκπαιδευτεί, μπορούν να εξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητά του στη λήψη των κατάλληλων αποφάσεων.

Το προφίλ του φορτίου απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1. Το προφίλ αυτό επιλέχθηκε ώστε να μοιάζει ποιοτικά με τα προφίλ φορτίου που αναλύονται στη βιβλιογραφία (ενότητα 2.6). Η επιλογή του προφίλ πρέπει να στοχεύει στην εκπαίδευση του αλγορίθμου σε όλες τις καταστάσεις λειτουργίας και επομένως πρέπει να έχει τις κατάλληλες ημερήσιες διακυμάνσεις. Όσο πιο απότομες και τυχαίες είναι οι ημερήσιες διακυμάνσεις τόσο το καλύτερο, ώστε να εντοπιστούν οι κατάλληλες παράμετροι και οι απαραίτητες προσαρμογές στην πολιτική του αλγορίθμου για τη βέλτιστη εκπαίδευσή του. Έτσι, σε ένα πραγματικό σύστημα, με πραγματικά δεδομένα κατανάλωσης για τα φορτία του κτηρίου, τα αποτελέσματα θα ήταν τα ίδια ή καλύτερα ως προς το οικονομικό όφελος που θα επιτυγχανόταν.

Στη συγκεκριμένη προσομοίωση το προφίλ φορτίου που επιλέχθηκε είναι σταθερό, καθώς ο στόχος της είναι να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας του αλγορίθμου.

Όσον αφορά την παραγωγή από τη Φ/Β συστοιχία αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2, η οποία επιλέχθηκε επίσης να είναι προκαθορισμένη για τους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν, ενώ οι ωριαίες τιμές παραγωγής προέκυψαν από τα δεδομένα που αντλήθηκαν από αξιόπιστη πηγή που αναφέρεται λεπτομερέστερα σε επόμενη ενότητα.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί πως λόγω του σταθερού αζιμούθιου των Φ/Β πλαισίων που τοποθετούνται σε στέγες κτηρίων και που δε δύνανται να προσανατολίζονται στην κατεύθυνση του ηλίου, η παραγωγή περιορίζεται. Ωστόσο, ο

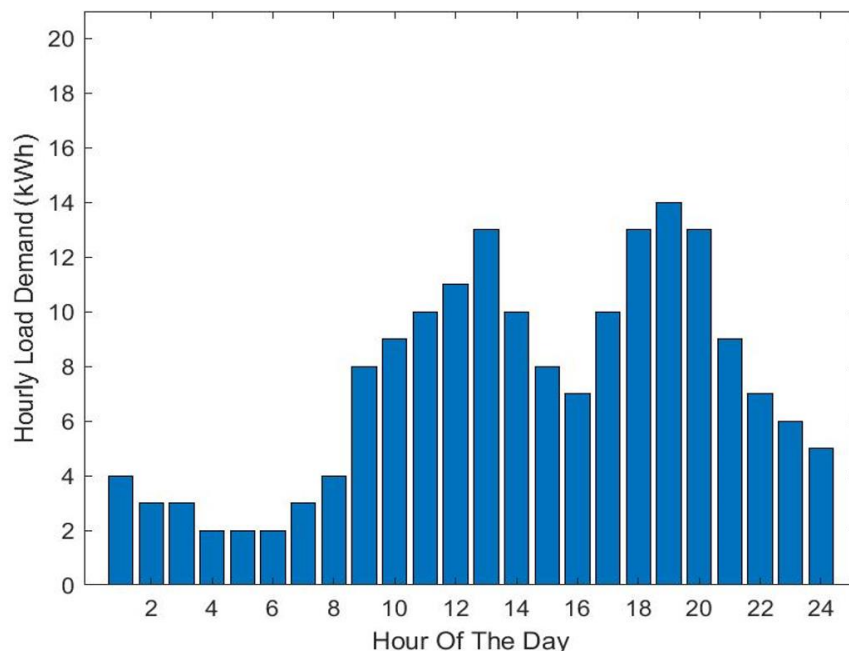
σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η διερεύνηση της λειτουργίας των αλγορίθμων λαμβάνοντας υπόψιν Φ/Β συστήματα που τοποθετούνται σταθερά σε στέγες κτηρίων.

Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου βελτιστοποίησης υπολογίζεται το μέσο κόστος ανά μονάδα ενέργειας που προκύπτει στην περίπτωση όπου δεν εφαρμόζεται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης, δηλαδή γίνεται με ίση πιθανότητα η επιλογή των αποφάσεων/δράσεων και συνάμα των ανταλλαγών ροών ισχύος μεταξύ των επιμέρους μονάδων του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν 4 αποφάσεις και η ισοπίθανη επιλογή της κάθε μίας είναι 25%, οπότε και ο αλγόριθμος υλοποιείται ορίζοντας το $\epsilon_{greedy}=0.25$. Έτσι, η σύγκριση γίνεται μεταξύ αυτής και των άλλων περιπτώσεων για τις διαφορετικές τιμές του ϵ_{greedy} , όπου οι δράσεις προκύπτουν με βάση την κατευθυνόμενη πολιτική που εφαρμόζεται.

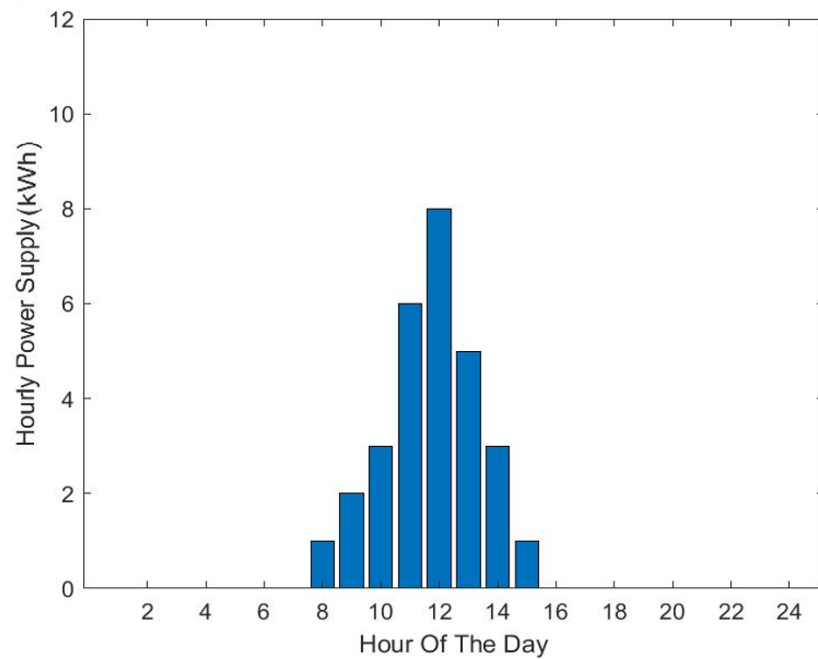
Στο Σχήμα 4.3 δίνονται οι ωριαίες τιμές της αποθηκευμένης ενέργειας στο BES, που είναι ιδιαιτέρως χρήσιμες για την παρατήρηση των μεταβολών των παραμέτρων, όπως η ποσότητα ενέργειας που θα πωλείται προς το δίκτυο, εφόσον το BES μπορεί να την υποστηρίξει, αλλά κυρίως για τον προσδιορισμό της μέγιστης χωρητικότητας (σε kWh) που απαιτείται. Η κατάσταση φόρτισης του BES επηρεάζεται από τις αποφάσεις/δράσεις της αποθήκευσης, εκφόρτισης και πώλησης ενέργειας, ενώ δεν επηρεάζεται από την απόφαση/δράση αγοράς ενέργειας. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι σε κάθε απόφαση/δράση αποθήκευσης ή πώλησης ενέργειας η ποσότητα ενέργειας που διοχετεύεται από το δίκτυο προς το BES και από το BES προς το δίκτυο αντίστοιχα είναι σταθερό. Πιο συγκεκριμένα, εάν Δε είναι αυτή η ποσότητα ενέργειας, τότε σε κάθε απόφαση/δράση αποθήκευσης στο BES αποθηκεύεται τελικά ποσότητα ενέργειας ίση με $\Delta e \cdot \eta_{BES}$, ενώ σε κάθε απόφαση/δράση πώλησης ενέργειας στο δίκτυο διοχετεύεται ενέργεια ίση με Δε με το BES να χάνει ενέργεια προς το σκοπό αυτό ίση με $\Delta e / \eta_{BES}$. Η επιλογή αυτή στηρίζεται στη λογική της μείωσης των καταστάσεων του αλγορίθμου και επομένως στην αύξηση της ταχύτητας εκπαίδευσης και στη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος. Επιπλέον, όπως θα δειχθεί και σε επόμενες προσομοιώσεις από ένα σημείο και μετά η αύξηση της χωρητικότητας του BES δε συμβάλει στην περαιτέρω μείωση του μέσου κόστους ανά μονάδα ενέργειας, ενώ εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το βήμα Δε. Ωστόσο σε ένα ρεαλιστικό σύστημα

η χωρητικότητα του BES πρέπει να κυμαίνεται σε ανάλογες προς το μέγεθος του τιμές οπότε και για ακριβώς αυτόν το λόγο και η τιμή του Δe κρίνεται σκόπιμο να είναι σταθερή και σχετική με το μέγεθος του συστήματος από ενεργειακή άποψη. Γι' αυτό, στην παρούσα προσομοίωση η τιμή του Δe έχει επιλεγεί να είναι ίση με 5kWh. Επίσης, εντοπίστηκε ότι η μεταβολή των παραμέτρων $\alpha = 0.1$, $\gamma = 0.1$ δε συμβάλει στη βελτίωση των αποτελεσμάτων, δηλαδή στη μείωση του μέσου κόστους ανά μονάδα ενέργειας, κάτι που συνέβαλε στην κατανόηση του πως το πρόβλημα της βελτιστοποίησης του συστήματος που εξετάζεται προσανατολίζεται γύρω από την πολιτική που εφαρμόζεται και φυσικά την εκπαίδευση του αλγορίθμου σε όσο το δυνατόν περισσότερες καταστάσεις. Αυτό επιτυγχάνεται με τη σωστή επιλογή των προφίλ του φορτίου αλλά και τη μείωση των καταστάσεων του αλγορίθμου.

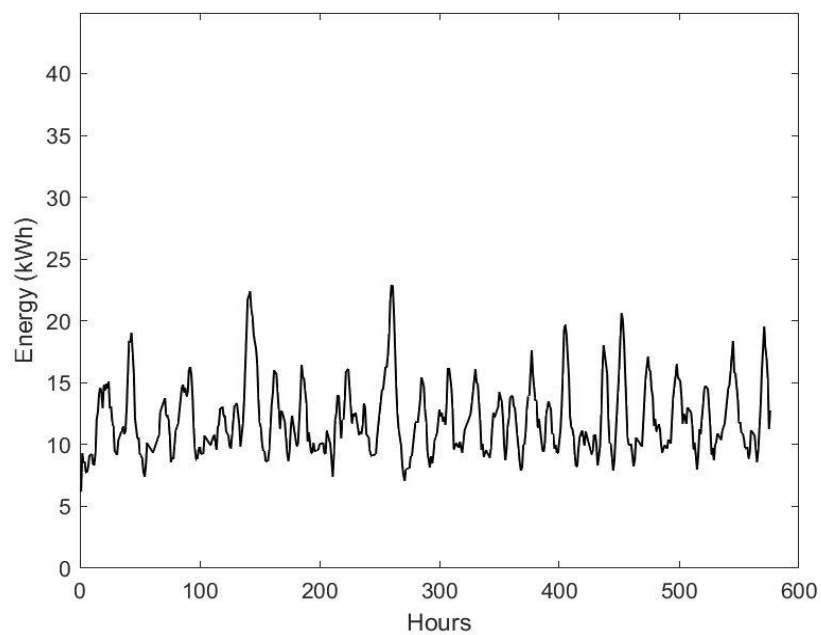
Αντίστοιχα, στο Σχήμα 4.4 απεικονίζεται η κατάσταση φόρτισης. Η αρχική κατάσταση φόρτισης είναι η ελάχιστη επιτρεπτή και ισούται με 20%. Η κατάσταση φόρτισης δε μειώνεται κάτω από την ελάχιστη επιτρεπτή τιμή του 20%, οπότε και η τελική κατάσταση φόρτισης είναι μεγαλύτερη ή ίση της αρχικής.



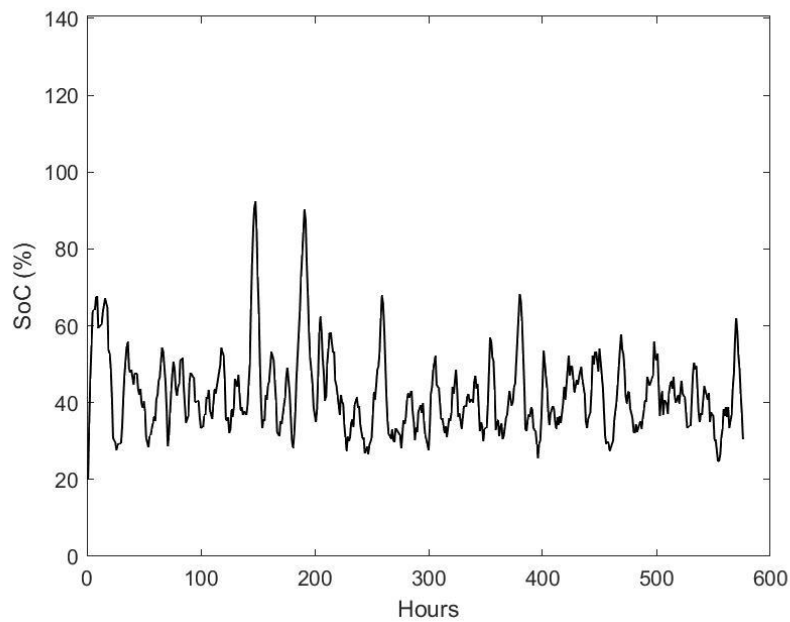
Σχήμα 4.1: Προφίλ φορτίου για την εκτέλεση της προσομοίωσης.



Σχήμα 4.2: Προφίλ παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από τη Φ/Β συστοιχία.



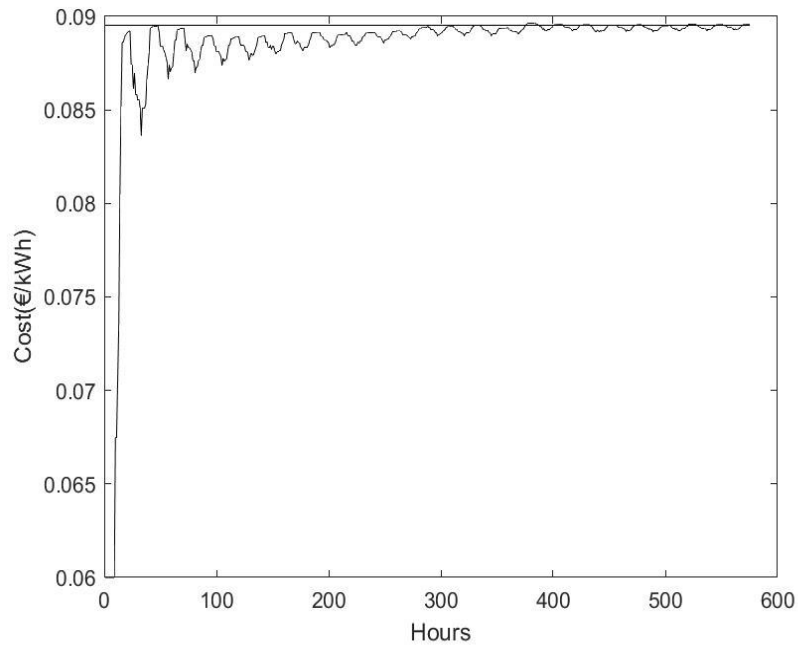
Σχήμα 4.3: Ωριαίες τιμές της αποθηκευμένης ενέργειας στο BES.



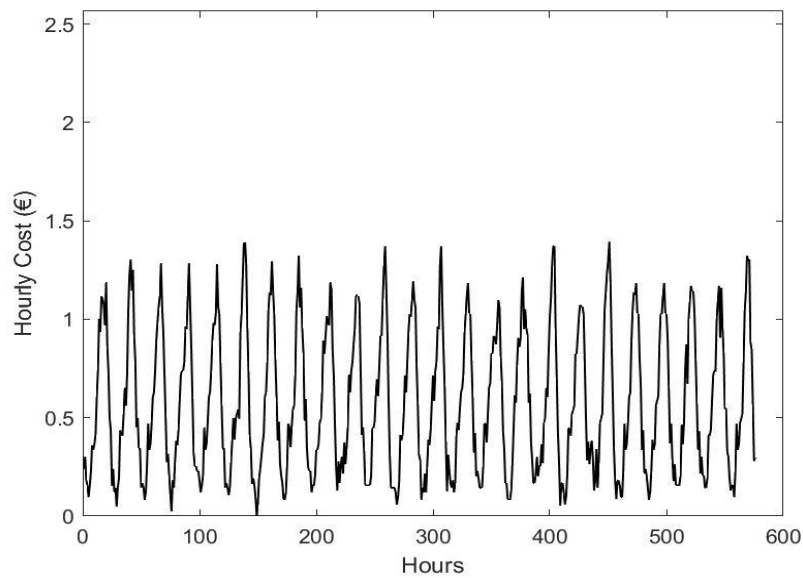
Σχήμα 4.4: Ωριαίες τιμές της κατάστασης φόρτισης – SoC του BES.

Στο Σχήμα 4.5 απεικονίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης σε κάθε χρονικό βήμα, όπου δεν εφαρμόζεται η βελτιστοποίηση, δηλαδή ορίζεται $\epsilon_{greedy}=0.25$, όπως αναφέρθηκε. Παρατηρείται ότι η τιμή αυτή συγκλίνει στην τελική τιμή $L(n_{max})$ όπου η τιμή αυτή αντιστοιχεί στη μέση τιμή του κόστους ανά μονάδα ενέργειας σε €/kWh. Σε αυτήν την προσομοίωση το μέσο κόστος διαμορφώνεται στα 0.0893€/kWh. Με την εφαρμογή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης το μέσο κόστος προκύπτει να είναι ίσο με 0.0895 €/kWh. Κάτι τέτοιο συνεπάγεται αστοχία του αλγορίθμου και της πολιτικής που εφαρμόζεται που βοηθά ωστόσο στην υιοθέτηση νέων πολιτικών που αντιμετωπίζουν το πρόβλημα, όπως αναλύεται λεπτομερώς στην ενότητα 3.4.1 με τα αποτελέσματα να απεικονίζονται και να εξηγούνται στο κεφάλαιο αυτό, σε προσομοιώσεις που δείχνονται στη συνέχεια.

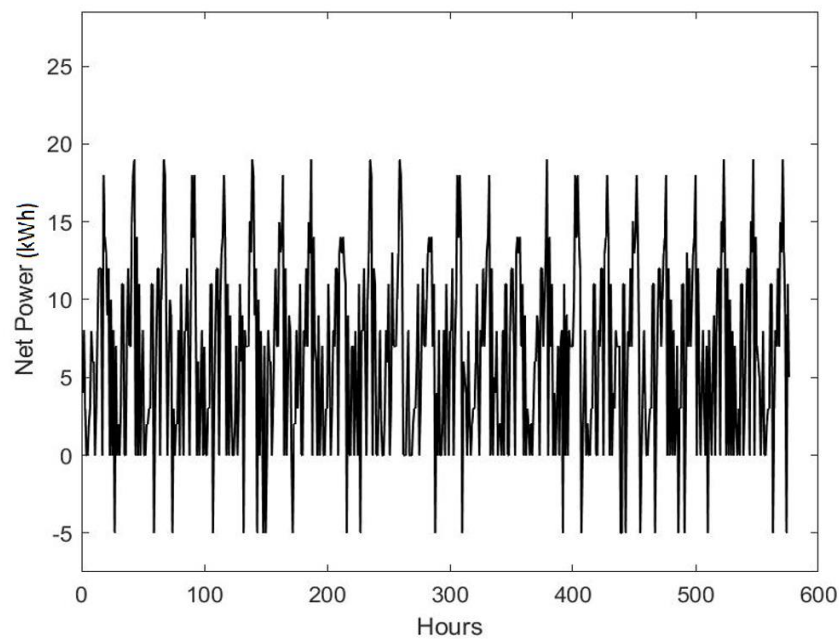
Στο Σχήμα 4.6 απεικονίζεται το ωριαίο κόστος για την κάλυψη των αναγκών του κτηρίου σε ηλεκτρική ενέργεια. Στο Σχήμα 4.7 απεικονίζεται η συνολική ενέργεια που ανταλλάσσεται με το ηλεκτρικό δίκτυο σε κάθε χρονικό βήμα/ώρα. Οι αρνητικές τιμές αντιστοιχούν στη δράση της πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας από το BES προς το ηλεκτρικό δίκτυο, όπου το BES καλύπτει τη ζήτηση του φορτίου, εάν από το τελευταίο αφαιρεθεί προηγουμένως η παραγωγή από τη Φ/Β συστοιχία.



Σχήμα 4.5: Μέσο κόστος ($L(n_i)$) ανά μονάδα ενέργειας σε €/kWh για την κάθε ώρα λειτουργίας καθώς και η ολική μέση τιμή (τελική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης).



Σχήμα 4.6: Ωριαίες τιμές κόστους για την κάλυψη των αναγκών του κτηρίου σε ηλεκτρική ενέργεια.



Σχήμα 4.7: Συνολική ενέργεια που ανταλλάσσεται με το ηλεκτρικό δίκτυο σε κάθε χρονικό βήμα/ώρα.

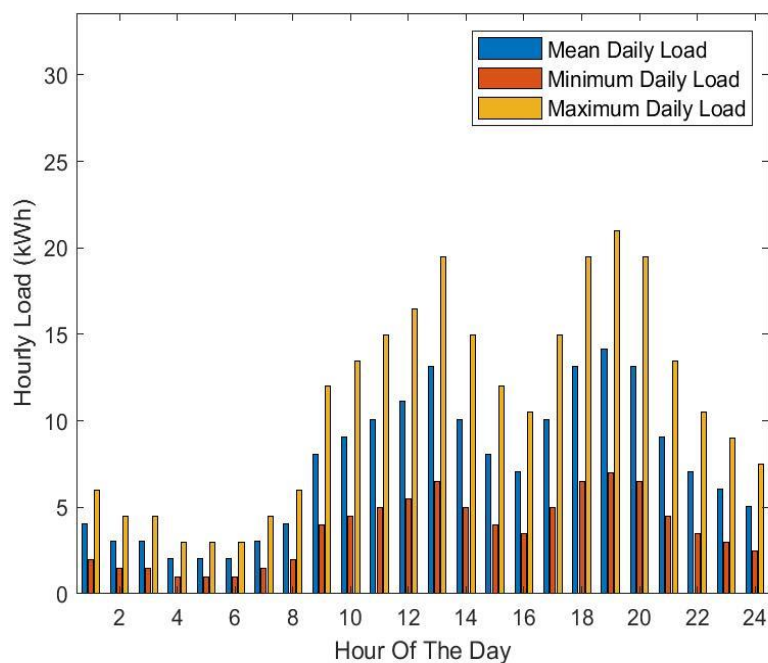
4.2.2 Αναδιαμόρφωση καταστάσεων και πολιτικής (δεύτερη προσομοίωση)

Ο κώδικας για την εκτέλεση της προσομοίωσης αυτής διαμορφώθηκε βάσει της δεύτερης διαμόρφωσης που παρατίθεται στην ενότητα 3.5.2. Οι παράμετροι εκπαίδευσης είναι : $\alpha = 0.1$, $\gamma = 0.01$ και το βήμα ενέργειας φόρτισης/εκφόρτισης είναι $\Delta e = 10\text{kWh}$.

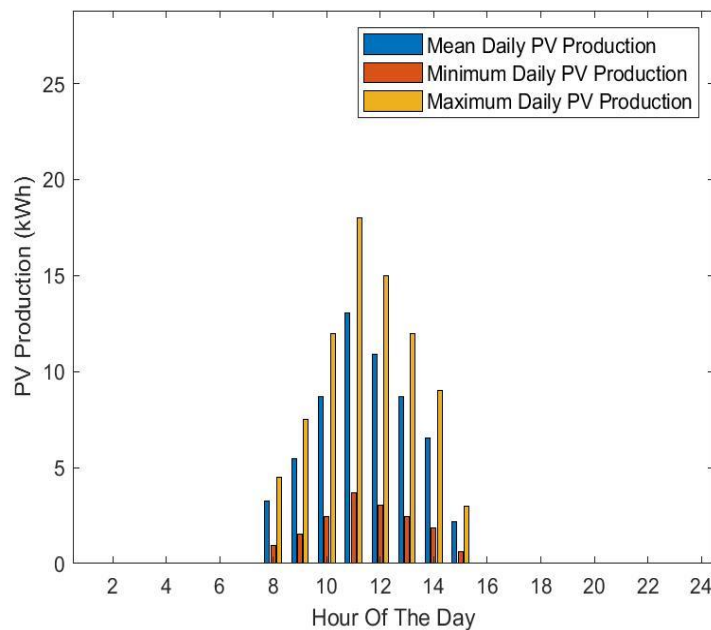
Αναφορικά με το φορτίο η μέση τιμή του διαμορφώνεται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8. Η καμπύλη φορτίου προέκυψε κατ' ανάλογο τρόπο με το προφίλ φορτίου της πρώτης προσομοίωσης. Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζονται επιπλέον το μέγιστο και το ελάχιστο προφίλ φορτίου. Επιπλέον, έχουν επιλεγεί διακυμάνσεις στην ημερήσια καμπύλη φορτίου. Πιο συγκεκριμένα, το προφίλ φορτίου της κάθε ημέρας προκύπτει από προσαρμογή του μέσου προφίλ φορτίου, με τον συντελεστή προσαρμογής να λαμβάνει οποιαδήποτε τιμή μεταξύ του 0,5 και του 1,5. Οι διακυμάνσεις στην

ημερήσια καμπύλη φορτίου είναι τέτοιες, που τελικά επιτρέπουν την εκπαίδευση του αλγορίθμου σε όλες τις καταστάσεις του πίνακα των καταστάσεων, S.

Αντίστοιχα με το προφίλ φορτίου, η μέση, μέγιστη και ελάχιστη παραγωγή ενέργειας από τη Φ/Β συστοιχία παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.9. Οι όποιες διακυμάνσεις μεταξύ των ημερήσιων καμπυλών παραγωγής ενέργειας οφείλονται στις καιρικές συνθήκες και κυρίως στην ύπαρξη νεφώσεων που έχουν άμεση επίπτωση στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στις επιφάνειες των Φ/Β πλαισίων.



Σχήμα 4.8: Μέσο, μέγιστο και ελάχιστο προφίλ φορτίου από τα δεδομένα που αξιοποιήθηκαν στην 2^η προσομοίωση.



Σχήμα 4.9: Μέση, μέγιστη και ελάχιστη παραγωγή από τη Φ/Β συστοιχία από τα δεδομένα που αξιοποιήθηκαν στην 2^η προσομοίωση.

Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου σε σχέση με τις αποφάσεις/δράσεις που λαμβάνονται παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.10 για την πρώτη φάση της εκπαίδευσης όπου το ϵ_{greedy} διαμορφώνεται στην τιμή 0.4. Κάτι τέτοιο επιτρέπει την προσπέλαση όλων των καταστάσεων και ως εκ τούτου τη σωστή εκπαίδευση του πίνακα Q που αντικατοπτρίζεται στην προσαρμογή των τιμών του.

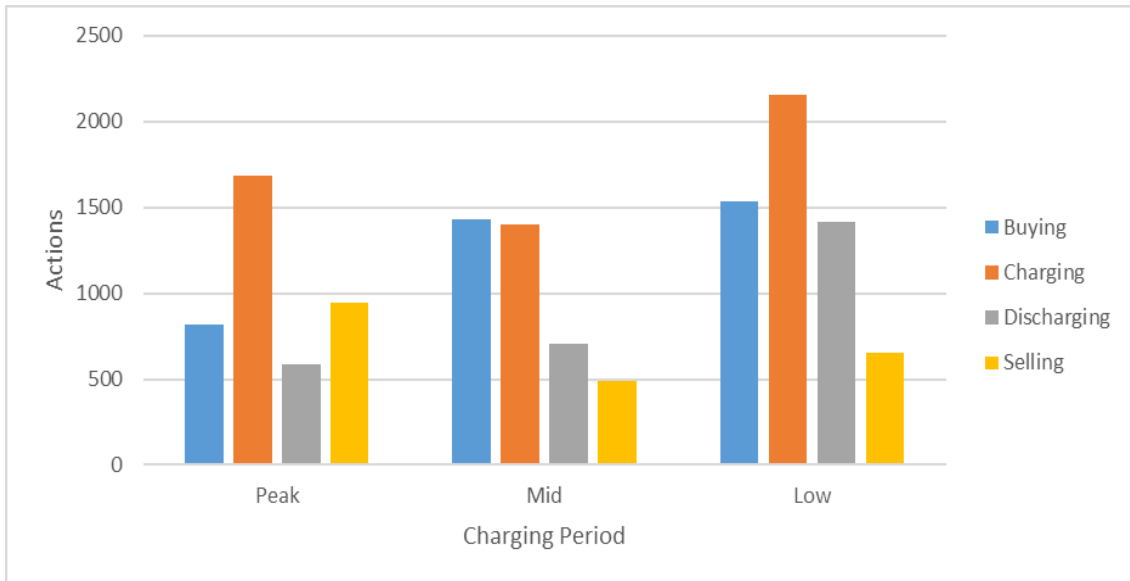
Παρατηρείται ότι οι αποφάσεις/δράσεις που λαμβάνονται ανάλογα με τις περιόδους χρέωσης δεν έχουν σημαντική προσαρμογή κάτι που ήταν αναμενόμενο δεδομένου της τυχαιότητας στην επιλογή αποφάσεων/δράσεων, καθώς με $\epsilon_{\text{greedy}} = 0.4$ η πιθανότητα επιλογής της «άπληστης» απόφασης είναι λίγο μεγαλύτερη από την πιθανότητα επιλογής μιας οποιασδήποτε άλλης απόφασης.

Στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζονται οι αποφάσεις/δράσεις που ελήφθησαν στον ίδιο αριθμό χρονικών βημάτων και με τις ίδιες παραμέτρους εκπαίδευσης του αλγορίθμου με αυτές του Σχήματος 4.11 με τη διαφορά πλέον ότι εφόσον ο αλγόριθμος έχει εκπαιδευτεί, πλέον λαμβάνονται μόνο οι “άπληστες” αποφάσεις, δηλαδή το $\epsilon\text{-greedy}$ διαμορφώνεται στην τιμή 1.

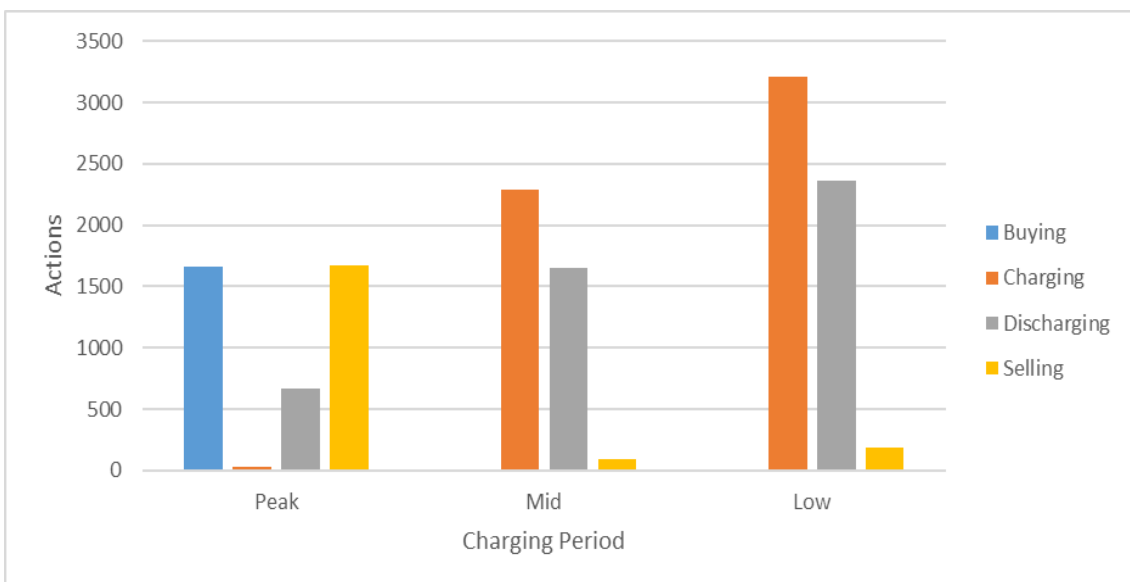
Πριν την ανάλυση των αποτελεσμάτων, ήδη διαπιστώνεται μια ανάγκη εκ νέου προσαρμογής της πολιτικής, καθώς ο αριθμός των αποφάσεων/δράσεων εκφόρτισης στις περιόδους χαμηλής χρέωσης είναι αρκετά μεγάλος. Η αναπροσαρμογή και τα αποτελέσματα παρατίθενται αμέσως μετά την ανάλυση όλων των αποτελεσμάτων της παραπάνω προσομοίωσης.

Σε σχέση με το κόστος ανά μονάδα ενέργειας η μέση του τιμή διαμορφώνεται στα 0.08587€/kWh στην περίπτωση όπου δεν εφαρμόζεται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης, δηλαδή επιλέγονται ισοπίθانا οι αποφάσεις/δράσεις (για $\epsilon_{greedy} = 0.25$). Επίσης, το μέσο κόστος διαμορφώνεται στα 0.08352€/kWh για $\epsilon_{greedy} = 0.4$ (Σχήμα 4.12) και στο 0.07215€/kWh για $\epsilon_{greedy} = 1$ (Σχήμα 4.13). Διαπιστώνεται λοιπόν μια εξοικονόμηση της τάξης των 0.01372€/kWh σε απόλυτες τιμές ή 15.978% σε σχέση με την περίπτωση που δεν εφαρμόζεται ο αλγόριθμος. Το οικονομικό όμως όφελος μπορεί να συγκριθεί και σε σχέση με την περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 0.4$ στην οποία αφενός εφαρμόζεται ο αλγόριθμος, αλλά αφετέρου βρίσκεται στη διαδικασία της εκπαίδευσης ενώ ακόμη και εάν εκπαιδευτεί στο μεσοδιάστημα, η πιθανότητα λήψης της βέλτιστης (από οικονομικής άποψης) απόφασης είναι μικρή. Έτσι, το οικονομικό όφελος μεταξύ των περιπτώσεων όπου το $\epsilon_{greedy} = 0.4$ και το $\epsilon_{greedy} = 1$ διαμορφώνεται στα 0.01137€/kWh σε απόλυτες τιμές ή 13.614%.

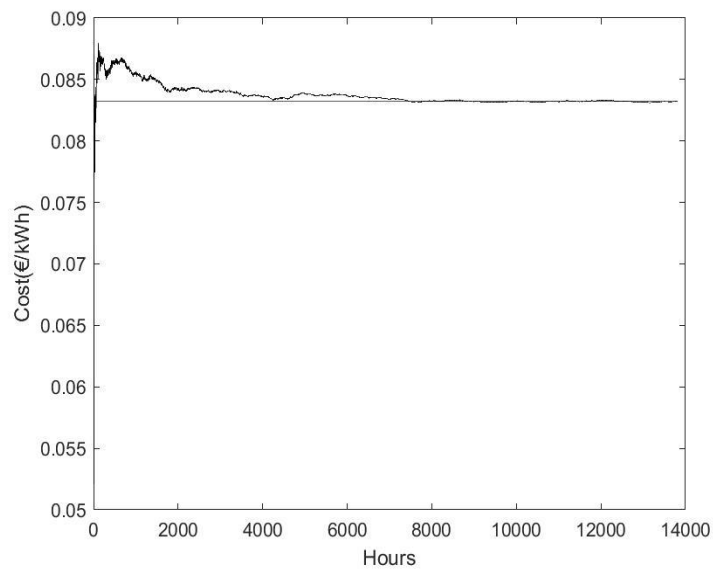
Επιπλέον, δεν παρατηρείται σημαντική βελτίωση στο μέγεθος της εξοικονόμησης για τα υπόλοιπα μοτίβα μεταβολής του ϵ_{greedy} που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.4.2. Για το λόγο αυτό, δεν παρατίθενται και τα αντίστοιχα αποτελέσματα.



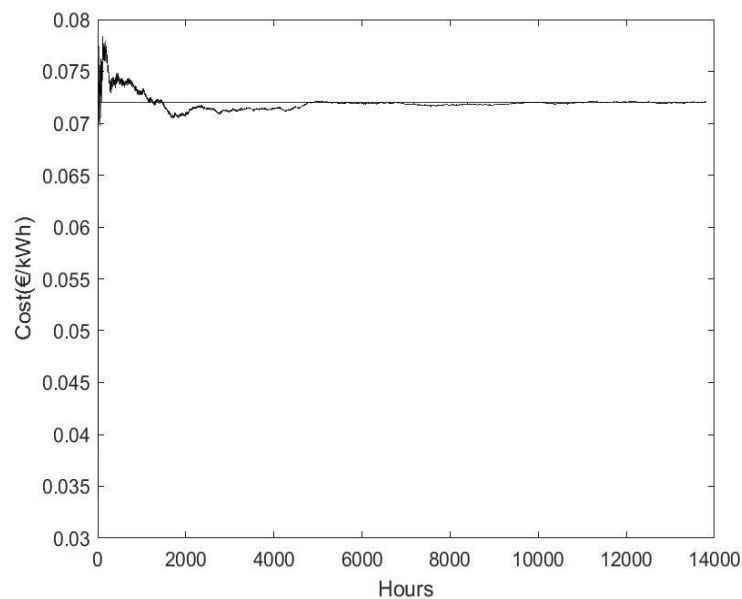
Σχήμα 4.10: Αποφάσεις/δράσεις ανά περίοδο χρέωσης με $\epsilon_{greedy} = 0.4$.



Σχήμα 4.11: Αποφάσεις/δράσεις ανά περίοδο χρέωσης με $\epsilon_{greedy} = 1$.



Σχήμα 4.12: Μέσο κόστος ($L(n_t)$) ανά μονάδα ενέργειας σε €/kWh μέχρι την κάθε ώρα λειτουργίας καθώς και η ολική μέση τιμή (τελική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης) στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 0.4$.



Σχήμα 4.13: Μέσος κόστος ($L(n_t)$) ανά μονάδα ενέργειας σε €/kWh μέχρι την κάθε ώρα λειτουργίας καθώς και η ολική μέση τιμή (τελική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης) στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 1$.

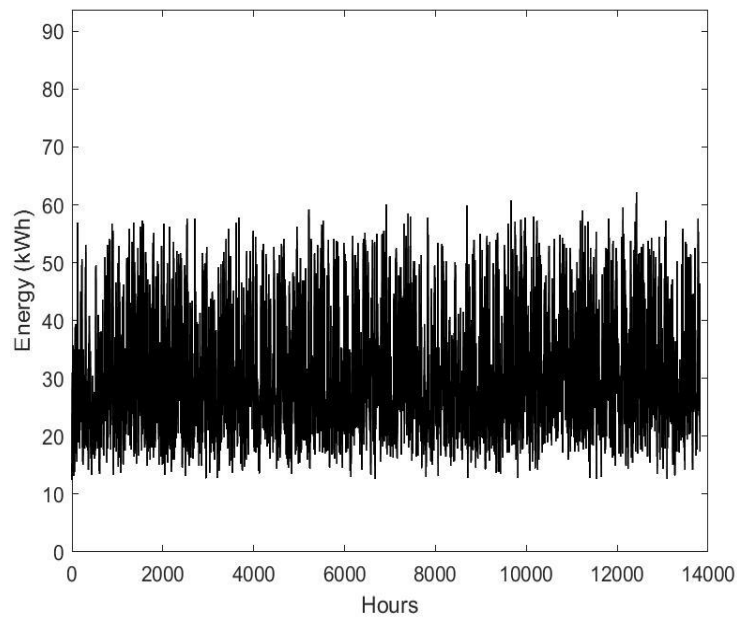
Στο Σχήμα 4.14 παρουσιάζονται οι ωριαίες τιμές της αποθηκευμένης ενέργειας του BES. Η χωρητικότητα του BES έχει ορισθεί στις 62.5kWh, ενώ η ελάχιστη κατάσταση φόρτισης στο 20%. Έτσι, η τελική διαθέσιμη ενέργεια είναι 50kWh, αφού

το BES λειτουργεί μεταξύ 12.5kWh και 62.5kWh. Στο Σχήμα 4.14 και 4.15 παρατηρείται ότι η ενέργεια που είναι αποθηκεύεται στο BES κυμαίνεται μεταξύ 12.5kWh και 62.5kWh, οπότε και η κατάσταση φόρτισης κυμαίνεται μεταξύ 20% και 100%, που αντιστοιχεί στην επιτρεπτή περιοχή λειτουργίας.

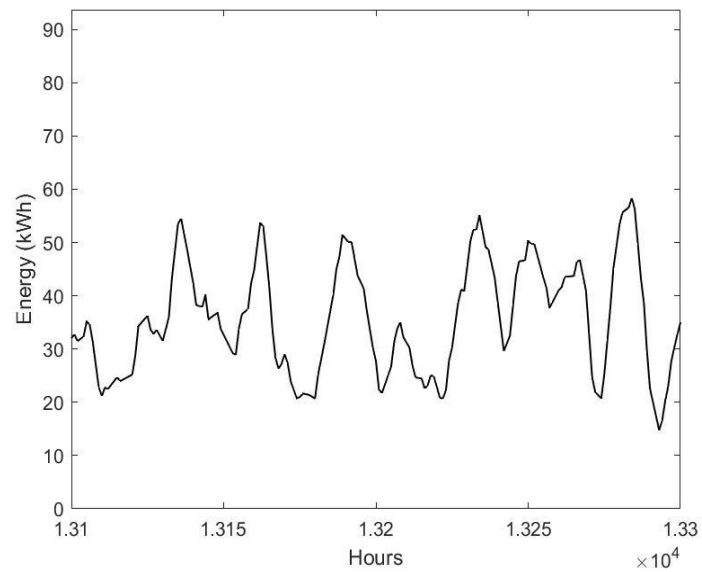
Στο Σχήμα 4.15 παρουσιάζεται η καμπύλη της αποθηκευμένης ενέργειας στο BES σε κάθε χρονικό βήμα/ώρα λειτουργίας για ένα επιλεγμένο διαδοχικό αριθμό χρονικών βημάτων/ωρών. Η επιλογή έγινε ώστε να απεικονίζεται η αποθηκευμένη ενέργεια στην αρχή μιας ημέρας που στο συγκεκριμένο γράφημα είναι η ώρα 1.32×10^4 που αντιστοιχεί στο τέλος της 550^{ης} ημέρας. Έτσι μπορεί να μελετηθεί η ποιοτική μεταβολή της αποθηκευμένης ενέργειας στο BES κατά τη διάρκεια μιας ημέρας, αλλά και σε σύγκριση με αυτήν άλλων ημερών. Παρατηρείται πως μέχρι την ώρα 1.325×10^4 όπου έχουν μεσολαβήσει δύο ημέρες από την αρχής της 551^{ης} ημέρας δεν παρατηρείται κάποιο συγκεκριμένο μοτίβο (περιοδικότητα) στις ημερήσιες μεταβολές στην αποθηκευμένη ενέργεια του BES.

Στο Σχήμα 4.16 παρουσιάζονται οι τιμές του ωριαίου κόστους λειτουργίας για $\epsilon_{\text{greedy}} = 0.4$, όπου και εδώ δε φαίνεται κάποιο μοτίβο, δηλαδή κάποια περιοδικότητα σε ημερήσια βάση στα αποτελέσματα με βάση την ημερήσια καμπύλη. Αντιθέτως, διαπιστώνεται η τυχαιότητα στην επιλογή αποφάσεων/δράσεων, δηλαδή δεν λαμβάνονται ακόμη οι βέλτιστες αποφάσεις/δράσεις αλλά τυχαίες αποφάσεις, ώστε να γίνει διερεύνηση των καταστάσεων που τελικά συμβάλουν στην εκπαίδευση του αλγορίθμου. Οι αρνητικές τιμές που παρατηρούνται οφείλονται στις αποφάσεις/δράσεις πώλησης ενέργειας (στο δίκτυο).

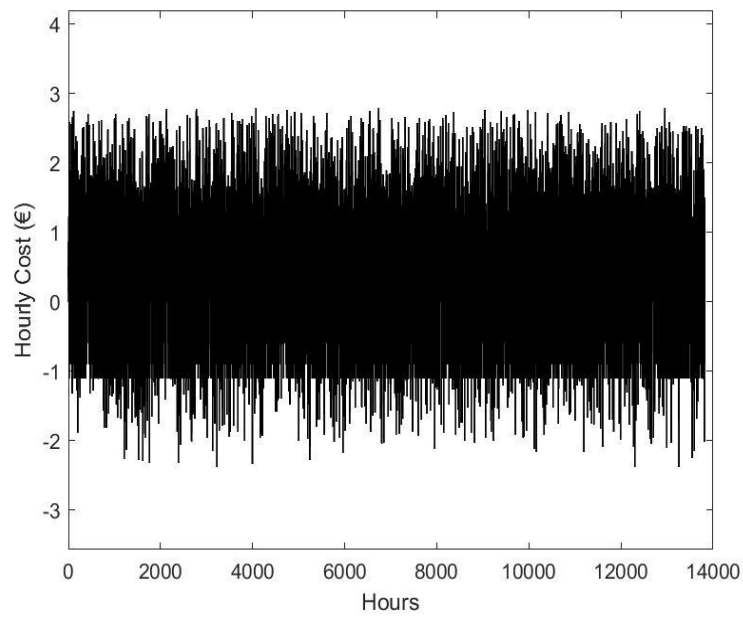
Στο Σχήμα 4.17 παρουσιάζονται οι ωριαίες τιμές της ενέργειας που ανταλλάσσεται με το δίκτυο για ένα ορισμένο αριθμό διαδοχικών χρονικών βημάτων/ωρών λειτουργίας, ώστε να απεικονίζονται οι τιμές που αντιστοιχούν στην 550^η ημέρα και μετά. Κατά παρόμοιο τρόπο με το Σχήμα 4.15 και στα αποτελέσματα αυτά δεν παρατηρείται κάποια περιοδικότητα στη μεταβολή της ενέργειας που ανταλλάσσεται ανά ημέρα λειτουργίας, λόγω της στοχαστικότητας που εισάγεται στη λήψη των αποφάσεων/δράσεων από το $\epsilon_{\text{greedy}} = 0.4$.



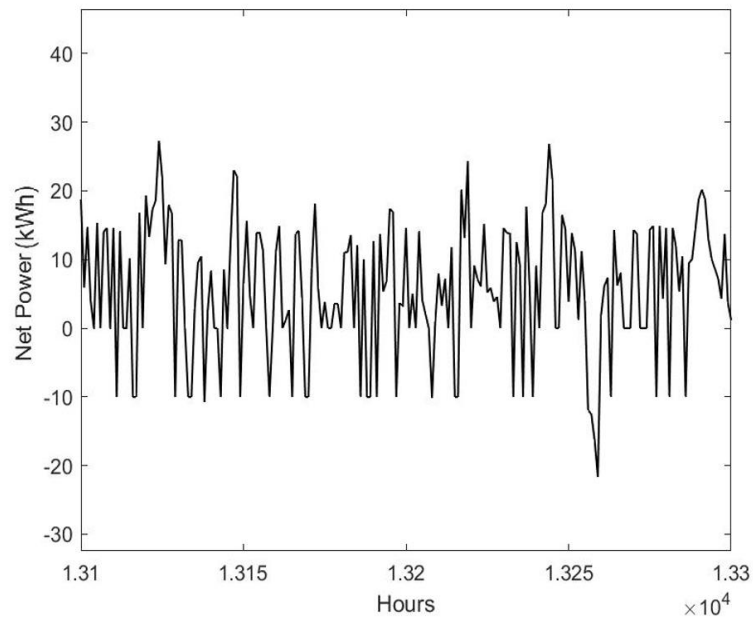
Σχήμα 4.14: Αποθηκευμένη ενέργεια του BES σε κάθε χρονικό βήμα/ώρα λειτουργίας στην περίπτωση $\varepsilon_{greedy} = 0.4$.



Σχήμα 4.15: Αποθηκευμένη ενέργεια στο BES σε ένα τμήμα διαδοχικών χρονικών βημάτων/ωρών λειτουργίας στην περίπτωση $\varepsilon_{greedy} = 0.4$.



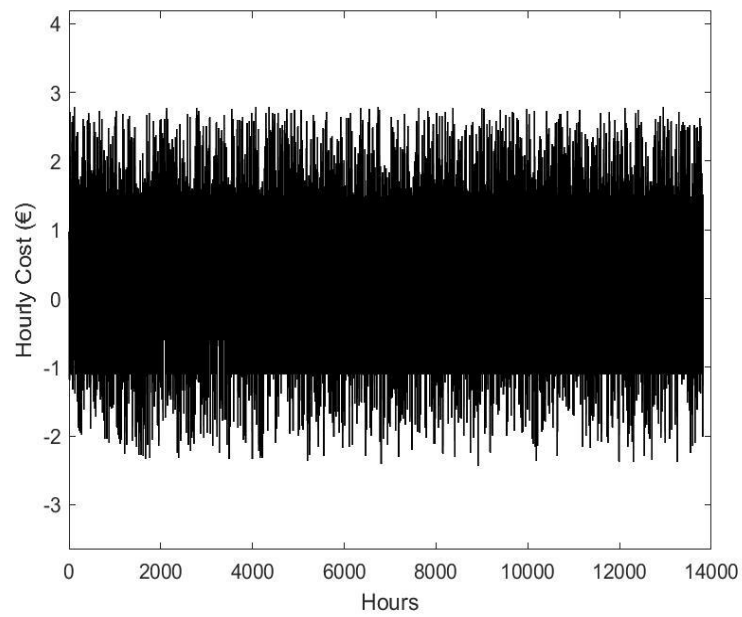
Σχήμα 4.16: Κόστος λειτουργίας σε € σε κάθε χρονικό βήμα/ώρα λειτουργίας στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 0.4$.



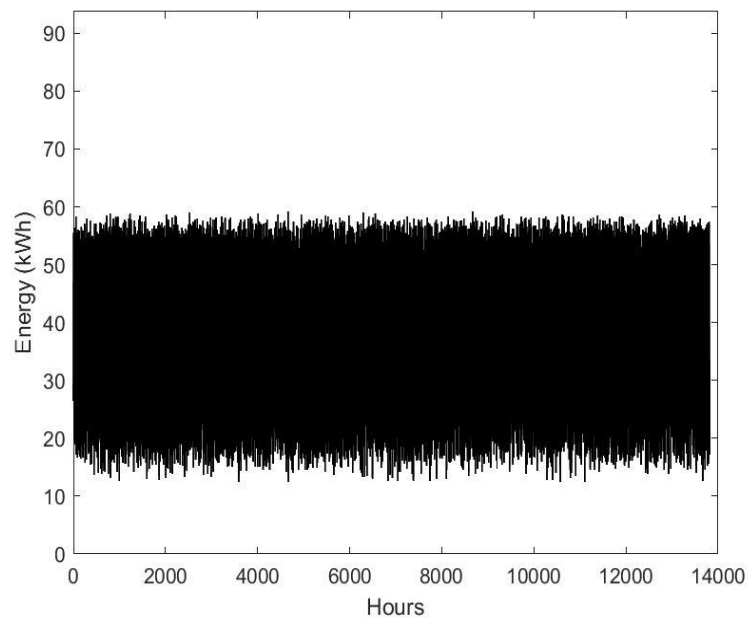
Σχήμα 4.17: Η ενέργεια που ανταλλάσσεται με το ηλεκτρικό δίκτυο σε ένα τμήμα διαδοχικών χρονικών βημάτων/ωρών λειτουργίας στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 0.4$.

Τα αποτελέσματα όμως αλλάζουν σημαντικά όταν επιλέγεται $\epsilon_{\text{greedy}} = 1$. Όπως μπορεί να διαπιστωθεί και στην καμπύλη του ωριαίου κόστους ανά χρονικό βήμα/ώρα του Σχήματος 4.18, όπου παρατηρείται μια περιοδικότητα στις ημερήσιες ανταλλαγές ηλεκτρικής ενέργειας με το ηλεκτρικό δίκτυο (περισσότερες αρνητικές τιμές πωλήσεις ενέργειας σε σχέση με το Σχήμα 4.16). Τυχόν ημερήσιες διακυμάνσεις οφείλονται κατά κύριο λόγο στις διακυμάνσεις της ημερήσιας καμπύλης φορτίου. Αντίστοιχη περιοδικότητα παρατηρείται στα Σχήματα 4.19 – 4.21, όπου σε αντίθεση με τα 4.14 – 4.15, η καμπύλη της ωριαίας ενέργειας που αποθηκεύεται στο BES είναι κατευθυνόμενη, δηλαδή αποκτά το μοτίβο που του προσδίδει η πολιτική που εφαρμόζεται. Αυτό είναι λογικό, αφού ο αλγόριθμος έχει εκπαιδευτεί με $\epsilon_{\text{greedy}} = 0.4$ και με $\epsilon_{\text{greedy}} = 1$ επιλέγονται οι βέλτιστες αποφάσεις/δράσεις.

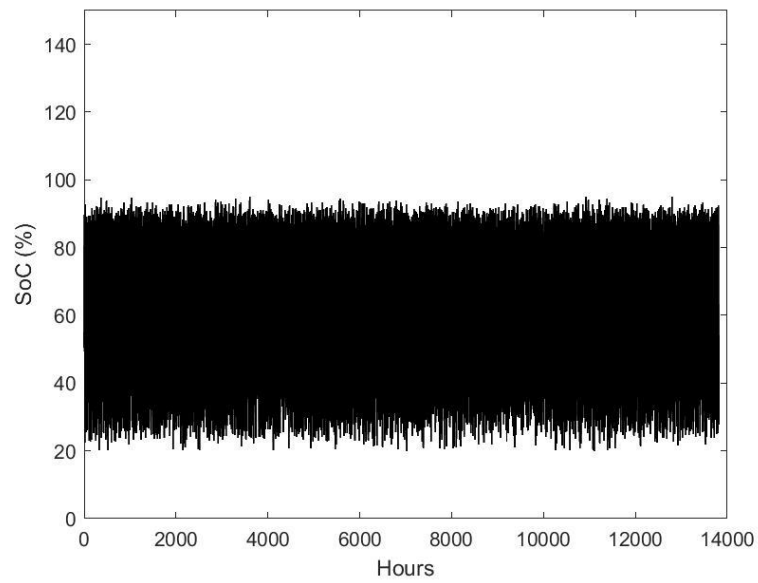
Στο Σχήμα 4.21 παρατηρείται με μεγαλύτερη ευκολία το μοτίβο αυτό. Στον οριζόντιο άξονα δίνεται ο αριθμός των χρονικών βημάτων. Έτσι, στο βήμα 1.32×10^4 που αντιστοιχεί στην αρχή μιας ημέρας παρατηρείται ότι οι αποφάσεις/δράσεις φόρτισης του BES λαμβάνουν χώρα κυρίως από τα μεσάνυχτα και μετά, μέχρι τις πρωινές ώρες, όπου αντιστοιχεί και στην περίοδο ελάχιστης χρέωσης, ενώ οι αποφάσεις/δράσεις εκφόρτισης/πώλησης λαμβάνουν χώρα όταν το BES δεν μπορεί να φορτιστεί περεταίρω. Υπενθυμίζεται ότι το βήμα ενέργειας φόρτισης/εκφόρτισης, Δe , είναι σταθερό και ως εκ τούτου ακόμη και εάν το BES δεν έχει φορτιστεί στη μέγιστη επιτρεπτή τιμή του, το βήμα Δe είναι μεγαλύτερο της απομένουσας ενέργειας για πλήρη φόρτιση. Έτσι, δεν μπορεί να ληφθεί απόφαση για περαιτέρω φόρτισης. Ωστόσο, παρατηρείται το πρόβλημα της λήψης αποφάσεων/δράσεων εκφόρτισης σε ώρες χαμηλής χρέωσης. Για το λόγο αυτό γίνεται προσαρμογή της πολιτικής, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Τέλος, ένα σαφές μοτίβο απαντάται και στην καμπύλη των ωριαίων τιμών της τελικής κατανάλωσης ενέργειας του Σχήματος 4.22, όπου η ίδια ποιοτική καμπύλη μεταβολής παρατηρείται σε κάθε ημέρα λειτουργίας.



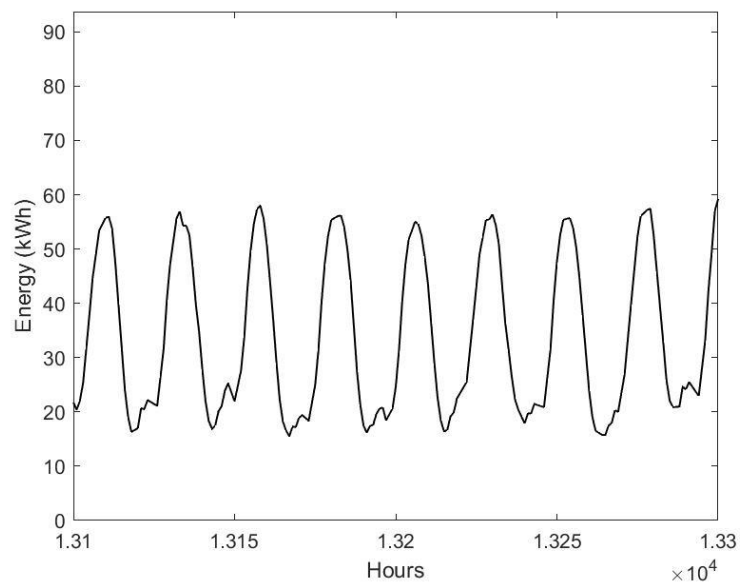
Σχήμα 4.18: Κόστος λειτουργίας σε € σε κάθε χρονικό βήμα/ώρα λειτουργίας στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 1$.



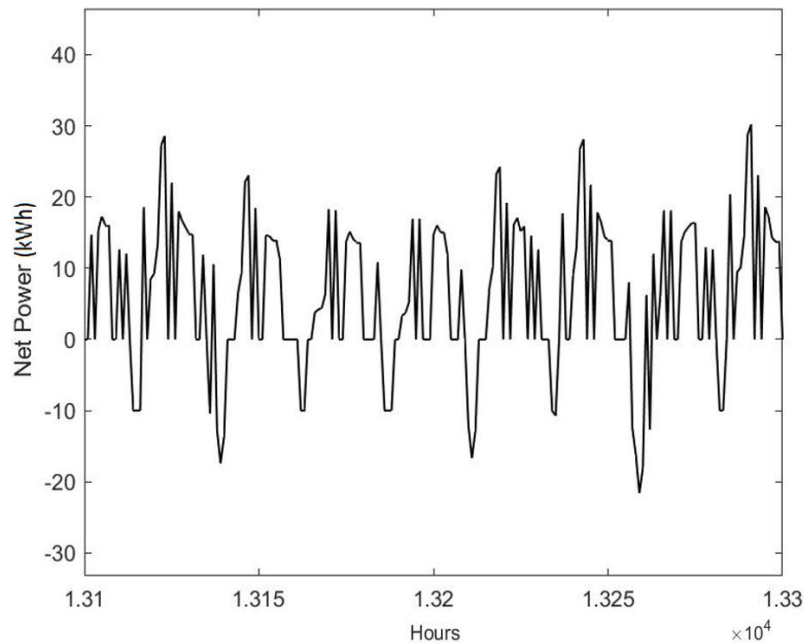
Σχήμα 4.19: Η ενέργεια που αποθηκεύεται στο BES σε κάθε χρονικό βήμα/ώρα λειτουργίας στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 1$.



Σχήμα 4.20: Κατάσταση φόρτισης του BES σε κάθε χρονικό βήμα/ώρα λειτουργίας στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 1$.



Σχήμα 4.21: Η ενέργεια που αποθηκεύεται στο BES ανά χρονικό βήμα/ώρα λειτουργίας σε ένα τμήμα διαδοχικών χρονικών βημάτων/ωρών λειτουργίας στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 1$.



Σχήμα 4.22: Η ενέργεια που ανταλλάσσεται με το ηλεκτρικό δίκτυο ανά χρονικό βήμα/ώρα λειτουργίας σε ένα τμήμα διαδοχικών χρονικών βημάτων/ωρών λειτουργίας στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 1$.

4.2.3 Προσαρμογή πολιτικής για καλύτερη εκπαίδευση (δεύτερη προσομοίωση)

Ο κώδικας για την εκτέλεση της προσομοίωσης αυτής διαμορφώθηκε βάσει της τρίτης διαμόρφωσης της πολιτικής που παρουσιάζεται στην ενότητα 3.5.3.

Οι παράμετροι εκπαίδευσης είναι : $\alpha = 0.1$, $\gamma = 0.01$ και το βήμα ενέργειας φόρτισης/εκφόρτισης είναι $\Delta e = 10\text{kWh}$.

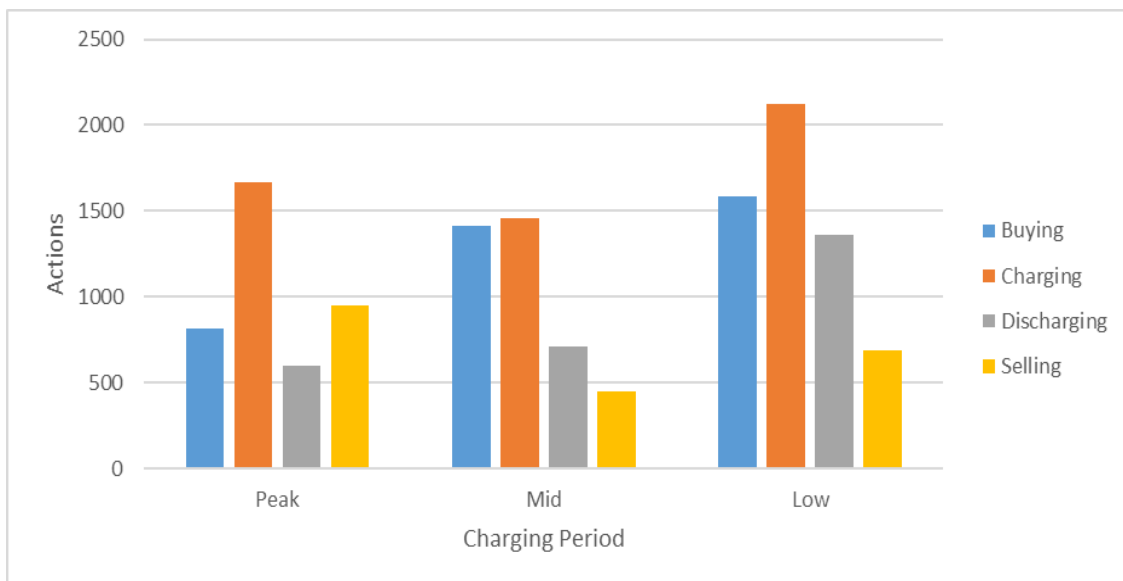
Τα αποτελέσματα των αποφάσεων/δράσεων ανά περίοδο χρέωσης παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.23 και 4.24. Στα σχήματα αυτά παρατηρείται ότι οι αποφάσεις/δράσεις εκφόρτισης στις χρονικές περιόδους χαμηλής χρέωσης έχουν σχεδόν μηδενιστεί στην περίπτωση όπου $\epsilon_{greedy} = 1$.

Σε σχέση με το κόστος ανά μονάδα ενέργειας η μέση του τιμή διαμορφώνεται στα 0.08587€/kWh στην περίπτωση όπου δεν εφαρμόζεται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης, αφού λαμβάνονται ισοπίθانا οι αποφάσεις/δράσεις, στα 0.0833€/kWh για $\epsilon_{greedy} = 0.4$ (Σχήμα 4.25) και στο 0.0709€/kWh για $\epsilon_{greedy} = 1$ (Σχήμα

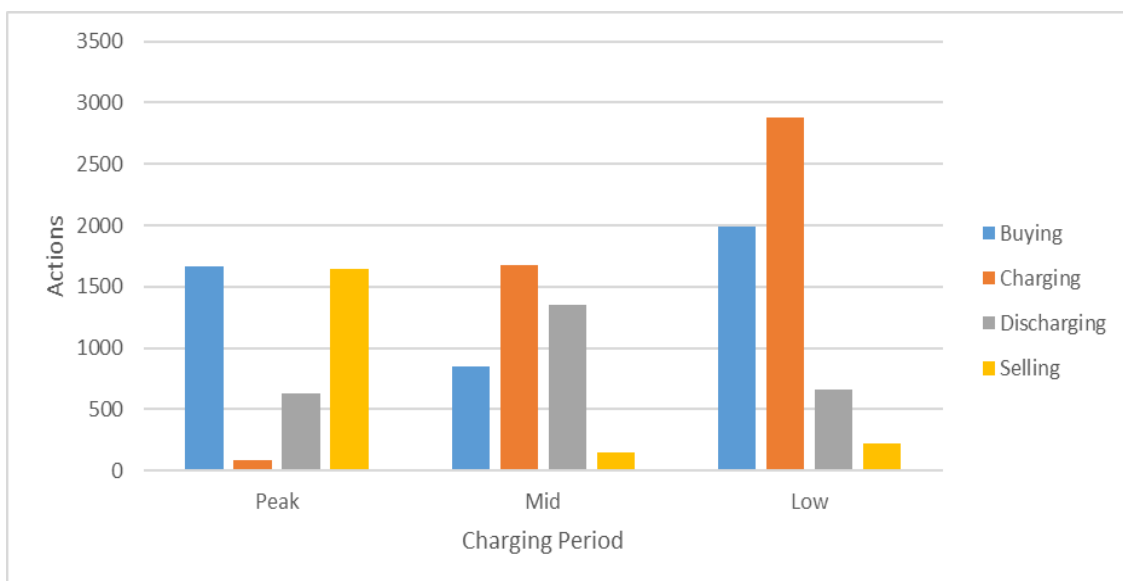
4.26). Το οικονομικό όφελος διαμορφώνεται στα 0.01497€/kWh ή στο 17.43% σε σχέση με την περίπτωση όπου δεν εφαρμόζεται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης, αφού λαμβάνονται ισοπίθانا οι αποφάσεις/δράσεις, ενώ διαμορφώνεται στα 0.0124€/kWh ή στο 14.89% σε σχέση με την περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 0.4$. Σε σύγκριση με την πολιτική της προηγούμενης προσομοίωσης το επιπλέον όφελος που προκύπτει μέσω της παρούσας πολιτικής είναι ίσο με 0.00125(€/kWh) ή 1.45% του οφέλους με την προηγούμενη πολιτική.

Στο Σχήμα 4.27 παρατηρείται η στοχαστικότητα στη λήψη αποφάσεων δράσεων λόγω του $\epsilon_{greedy} = 0.4$, αφού οι πωλήσεις ηλεκτρικής ενέργειας γίνονται σχεδόν τυχαία. Κάτι παρόμοιο παρατηρείται και στα Σχήματα 4.28 και 4.29 όπου απεικονίζεται η κατάσταση φόρτισης και η αποθηκευμένη ενέργεια στο BES στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 0.4$. Σε κανένα χρονικό βήμα/ώρα λειτουργίας δεν εμφανίζεται εκτροπή από τα επιτρεπτά όρια, ενώ η κατάσταση φόρτισης στο τελευταίο βήμα είναι ίση ή μεγαλύτερη της αρχικής κατάστασης φόρτισης, η οποία είναι ίση με την ελάχιστη επιτρεπτή. Στο Σχήμα 4.30 παρατηρείται πως στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 0.4$ δεν υπάρχει κάποια περιοδικότητα στην ημερήσια καμπύλη φόρτισης του BES. Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και με την ενέργεια που ανταλλάσσεται με το δίκτυο (Σχήμα 4.31).

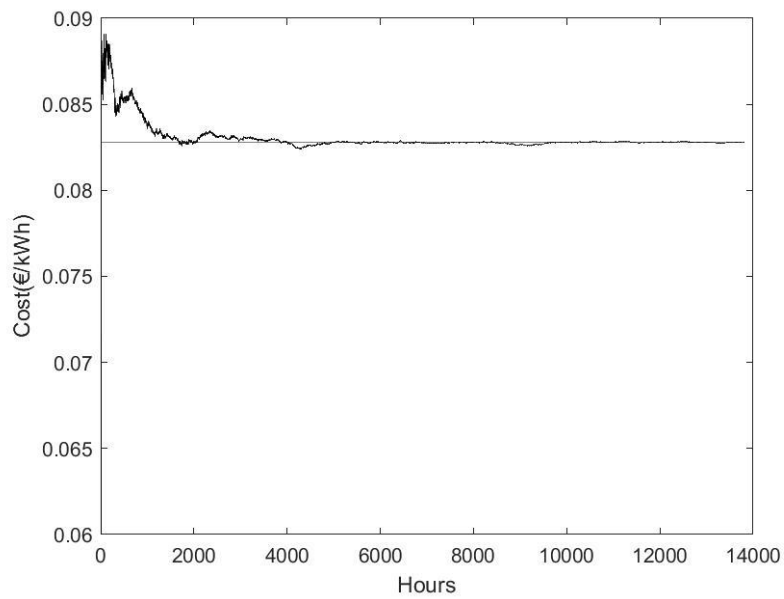
Τα αποτελέσματα της περίπτωσης για $\epsilon_{greedy} = 1$ παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.32, όπου απεικονίζεται το ωριαίο κόστος (hourly cost) της ηλεκτρικής ενέργειας που ανταλλάσσεται με το ηλεκτρικό δίκτυο. Σε αυτό παρατηρείται ότι αυξάνεται ο αριθμός των πωλήσεων ενέργειας προς το ηλεκτρικό δίκτυο, όταν η παραγωγή από τη Φ/Β συστοιχία υπερβαίνει τη ζήτηση από το φορτίο του κτηρίου, δηλαδή υπάρχει περίσσειμα ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό διαπιστώνεται από τον μεγαλύτερο αριθμό ωρών στις οποίες το ωριαίο κόστος (hourly cost) είναι μικρότερο του -1 € σε σχέση με το Σχήμα 4.27. Στο Σχήμα 4.33 παρατηρείται μια περιοδικότητα στην ημερήσια μεταβολή της κατάστασης φόρτισης του BES, ενώ στο Σχήμα 4.34 παρατηρείται ότι ο βαθμός χρησιμοποίησης του BES αυξάνεται (πιο πυκνή καμπύλη σε όλο το εύρος). Περιοδικότητα παρατηρείται και στις ημερήσιες διακυμάνσεις της ενέργειας που ανταλλάσσεται με το δίκτυο (Σχήμα 4.35).



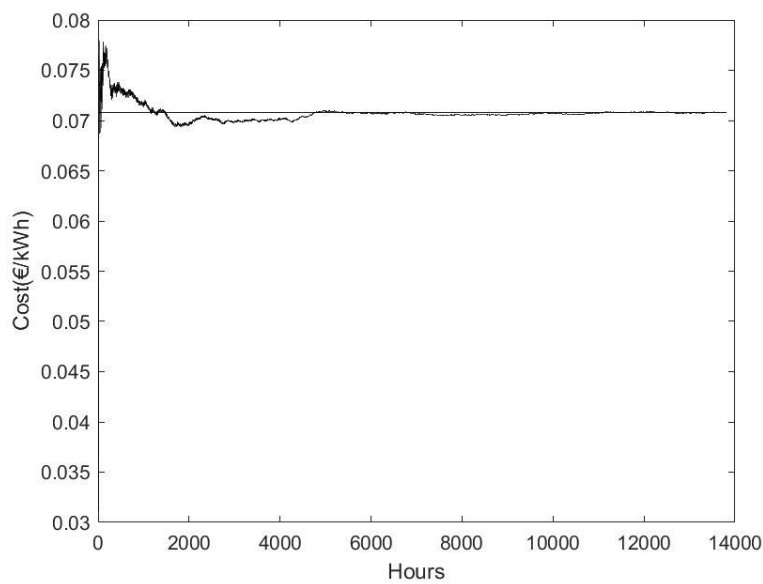
Σχήμα 4.23: Αποφάσεις/δράσεις ανά περίοδο χρέωσης στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 0.4$.



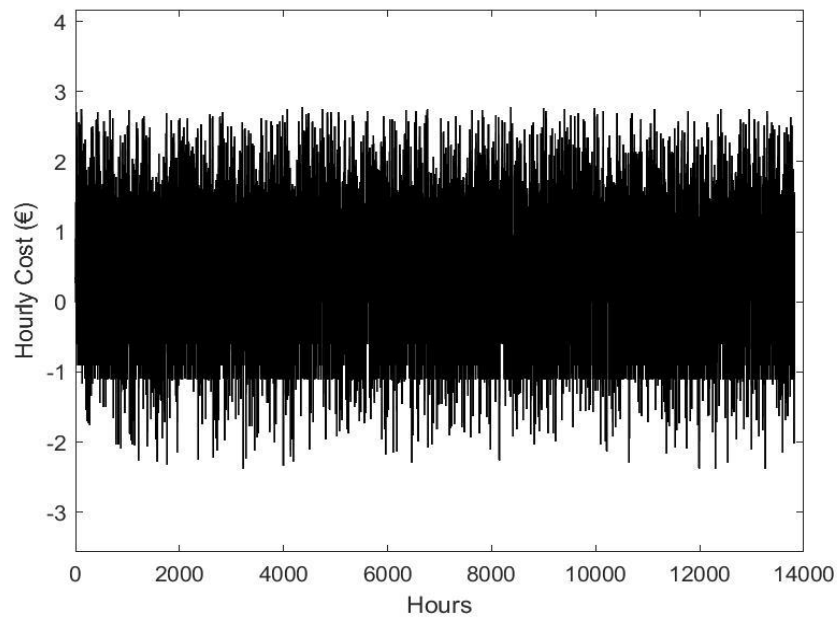
Σχήμα 4.24: Αποφάσεις/δράσεις ανά περίοδο χρέωσης στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 1$.



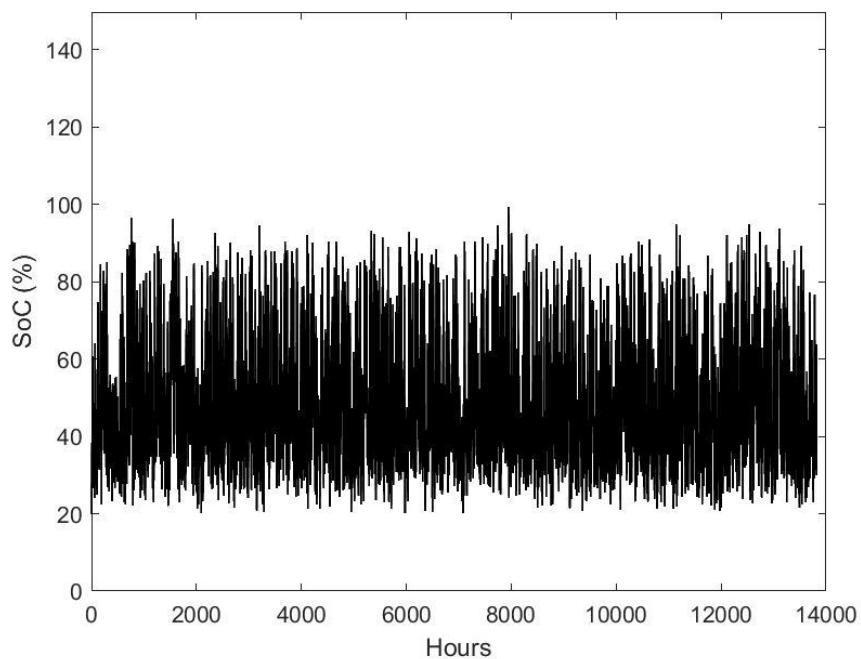
Σχήμα 4.25: Μέσο κόστος ($L(n_t)$) ανά μονάδα ενέργειας σε €/kWh μέχρι την κάθε ώρα λειτουργίας καθώς και η ολική μέση τιμή (τελική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης) στην περίπτωση $\varepsilon_{greedy} = 0.4$.



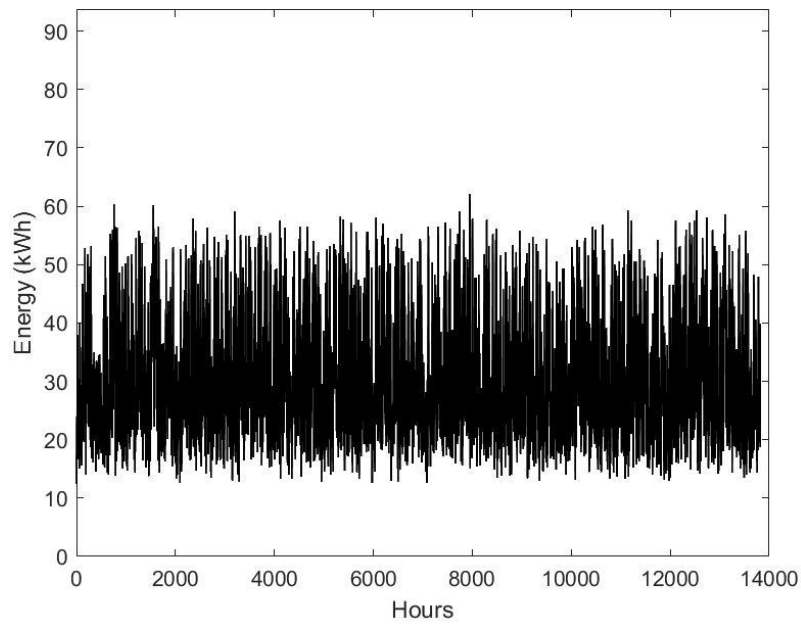
Σχήμα 4.26: Μέσο κόστος ($L(n_t)$) ανά μονάδα ενέργειας σε €/kWh μέχρι την κάθε ώρα λειτουργίας καθώς και η ολική μέση τιμή (τελική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης) στην περίπτωση $\varepsilon_{greedy} = 1$.



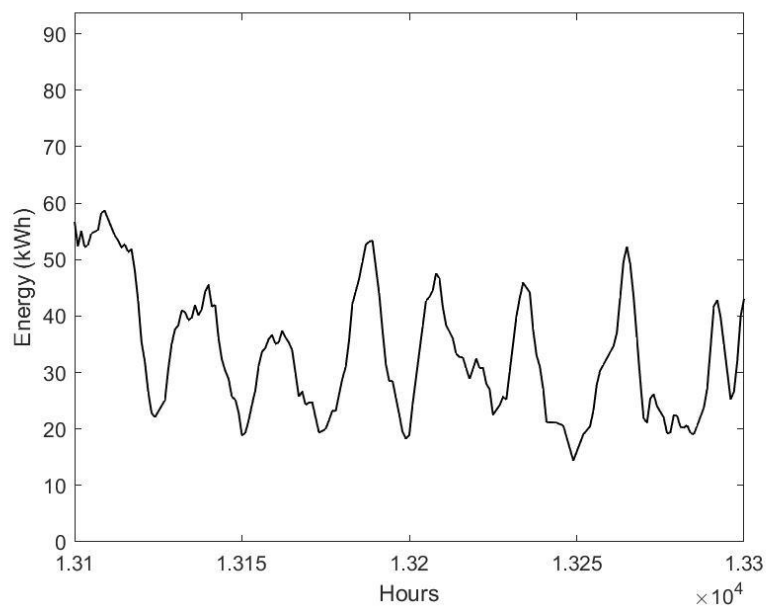
Σχήμα 4.27: Κόστος λειτουργίας σε € σε κάθε χρονικό βήμα/ώρα λειτουργίας στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 0.4$.



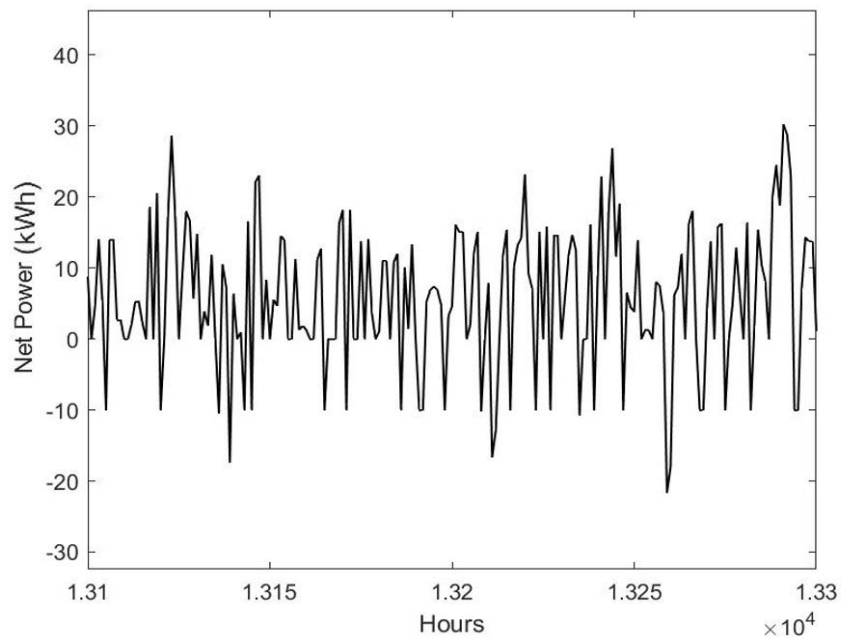
Σχήμα 4.28: Κατάσταση φόρτισης του BES ανά χρονικό βήμα/ώρα λειτουργίας για όλα τα χρονικά βήματα/ώρες λειτουργίας στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 0.4$.



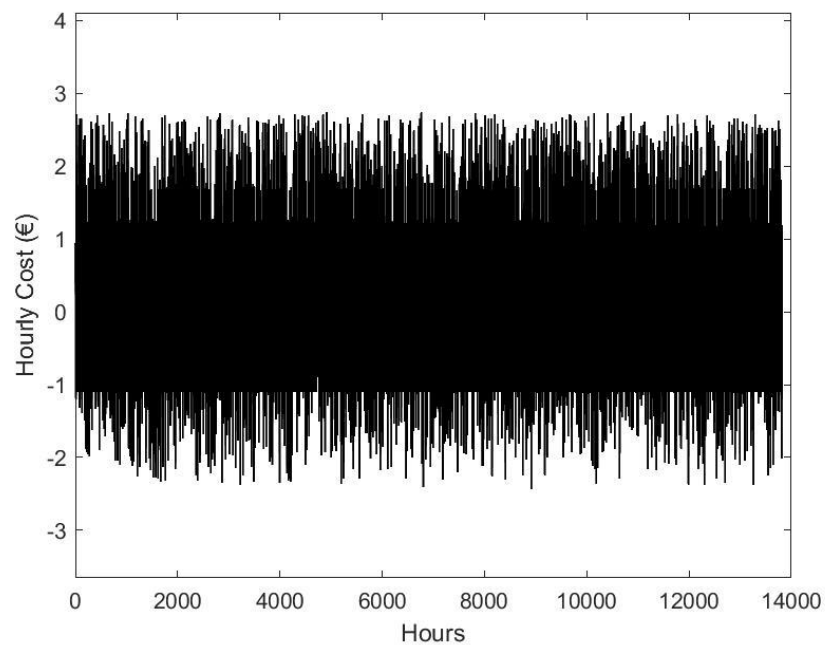
Σχήμα 4.29: Ωριαίες τιμές της ενέργειας που αποθηκεύεται στο BES ανά χρονικό βήμα/ώρα λειτουργίας για όλα τα χρονικά βήματα/ώρες λειτουργίας στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 0.4$.



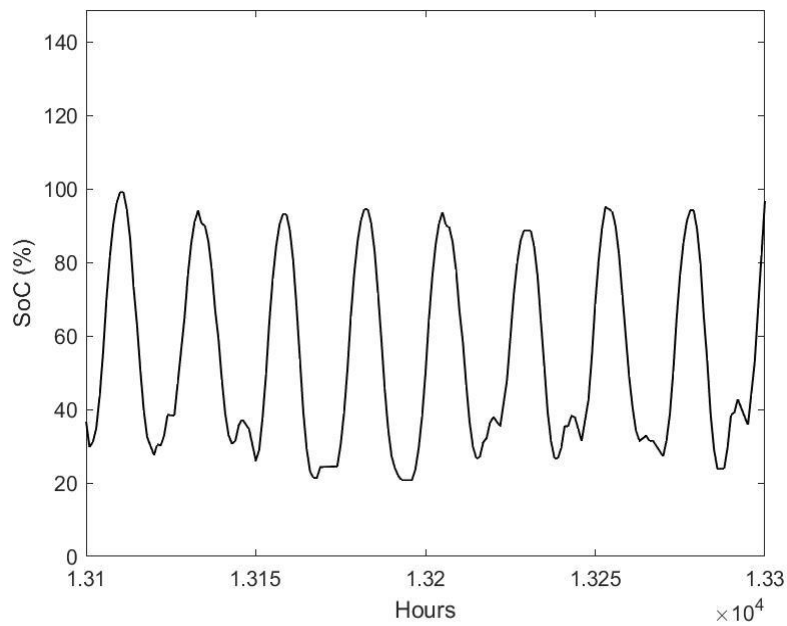
Σχήμα 4.30: Η ενέργεια που αποθηκεύεται στο BES ανά χρονικό βήμα/ώρα λειτουργίας για ένα τμήμα διαδοχικών χρονικών βημάτων/ωρών λειτουργίας στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 0.4$.



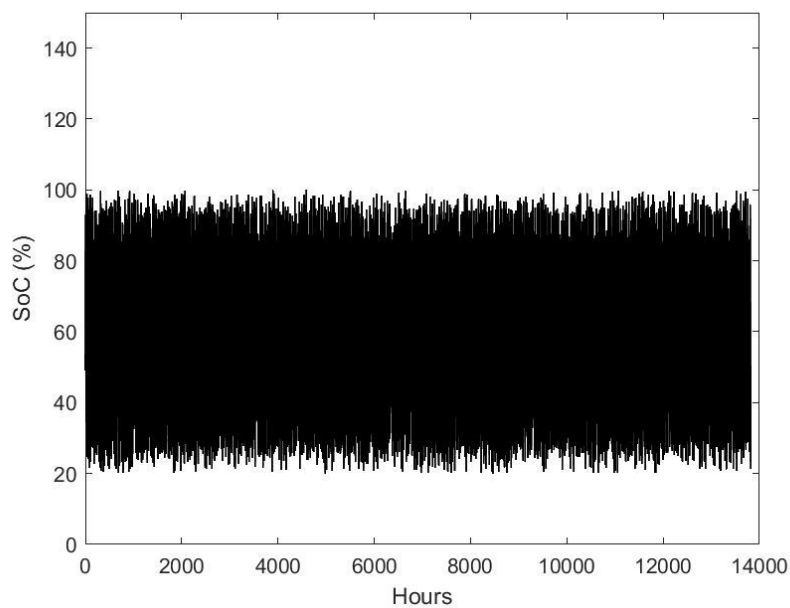
Σχήμα 4.31: Η ηλεκτρική ενέργεια που ανταλλάσσεται με το ηλεκτρικό δίκτυο ανά χρονικό βήμα/ώρα λειτουργίας για ένα τμήμα διαδοχικών βημάτων/ωρών λειτουργίας στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 0.4$.



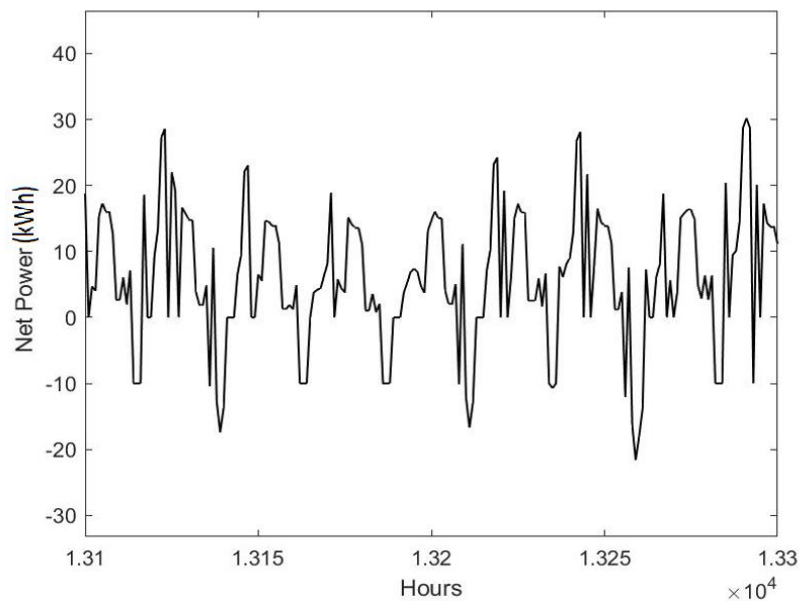
Σχήμα 4.32: Κόστος λειτουργίας σε € για ένα τμήμα διαδοχικών χρονικών βημάτων/ωρών λειτουργίας στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 1$.



Σχήμα 4.33: Κατάσταση φόρτισης του BES ανά χρονικό βήμα/ώρα λειτουργίας για ένα τμήμα χρονικών βημάτων/ωρών λειτουργίας στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 1$.



Σχήμα 4.34: Κατάσταση φόρτισης του BES ανά χρονικό βήμα/ώρα λειτουργίας για όλα τα χρονικά βήματα/ώρες λειτουργίας στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 1$.



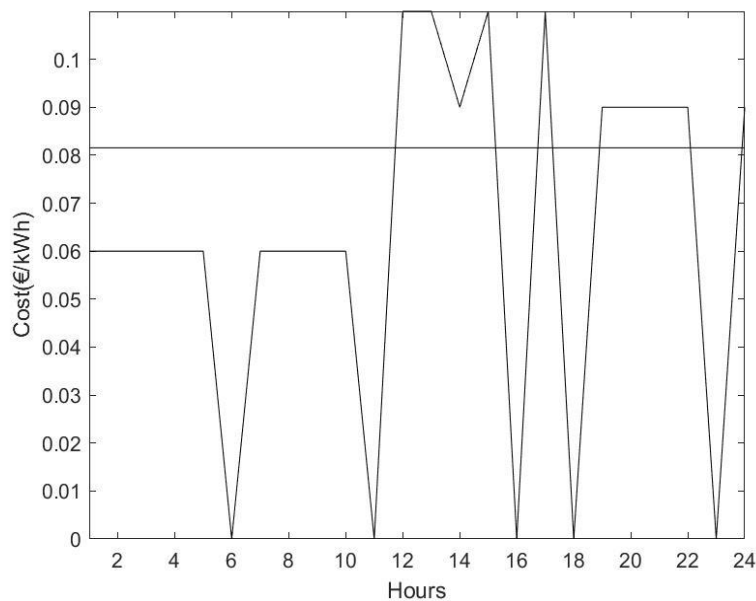
Σχήμα 4.35: Η ηλεκτρική ενέργεια που ανταλλάσσεται με το ηλεκτρικό δίκτυο ανά χρονική περίοδο για ένα τμήμα διαδοχικών χρονικών βημάτων/ωρών λειτουργίας στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 1$.

4.3 Χρονοπρογραμματιζόμενο φορτίο

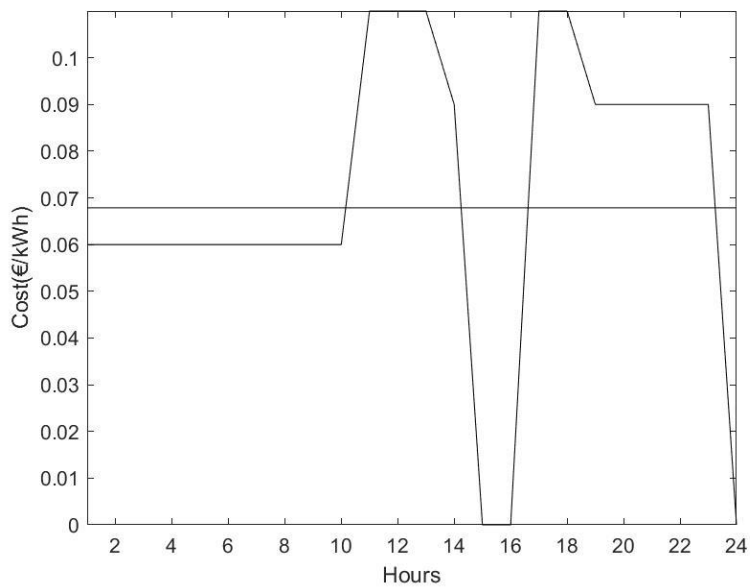
Τα χρονο-προγραμματιζόμενα φορτία που έχουν επιλεγεί είναι τα $AP_1 = [5 \ 5 \ 5 \ 5]$ και $AP_2 = [3 \ 5 \ 3 \ 2 \ 7]$ και θα μπορούσε να αντιστοιχούν σε διάφορες συσκευές όπως είναι για παράδειγμα το πλυντήριο ρούχων σε μια ημέρα, καθώς και σε διάφορες συσκευές όπως είναι το πλυντήριο πιάτων, ο θερμοσίφωνας, το στεγνωτήριο κλπ.

Αναφορικά με το κόστος ανά μονάδα ενέργειας σε €/kWh στην περίπτωση εφαρμογής του αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 0.4$ διαμορφώνεται στο 0.0809€/kWh (Σχήμα 4.36), ενώ στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 1$ χωρίς χρονοπρογραμματισμό (δηλαδή με προκαθορισμένη κατανομή του χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου) και με χρονοπρογραμματισμό προέκυψαν μέσα κόστη 0.0691€/kWh (Σχήμα 4.37) και 0.0635€/kWh (Σχήμα 4.38) αντίστοιχα. Έτσι, το οικονομικό όφελος που προκύπτει στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 1$ όπου δεν εφαρμόζεται

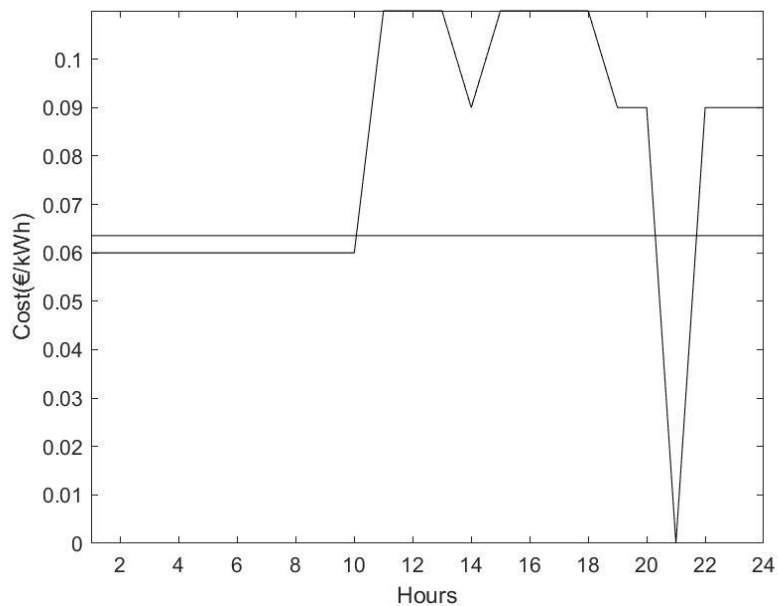
ο χρονοπρογραμματισμός σε σχέση με την περίπτωση $\varepsilon_{\text{greedy}} = 0.4$ είναι 0.0118€/kWh ή 14.59%, ενώ στην περίπτωση $\varepsilon_{\text{greedy}} = 1$ όπου εφαρμόζεται ο χρονοπρογραμματισμός το οικονομικό όφελος είναι 0.0174€/kWh ή 21.51%. Έτσι, η επιπλέον εξοικονόμηση χρημάτων που επιτυγχάνεται από τη χρήση του χρονοπρογραμματισμού είναι 0.0056€/kWh σε σχέση με την εξοικονόμηση που επιτυγχάνεται χωρίς τη χρήση του χρονο-προγραμματισμού. Σε σχέση με τα μέσα κόστη χωρίς και με χρονοπρογραμματισμό η διαφορά τους διαμορφώνεται στο 0.0056€/kWh ή στο 6.92%. Η εξοικονόμηση αυτή είναι σημαντική εάν ληφθεί υπόψη και το μικρό ποσοστό του χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου ως προς το προφίλ του συνολικού φορτίου. Τα προφίλ φορτίου που προκύπτουν στην περίπτωση της προκαθορισμένης κατανομής του χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου και στην περίπτωση όπου εφαρμόζεται ο χρονοπρογραμματισμός, παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.39 και 4.40 αντίστοιχα.



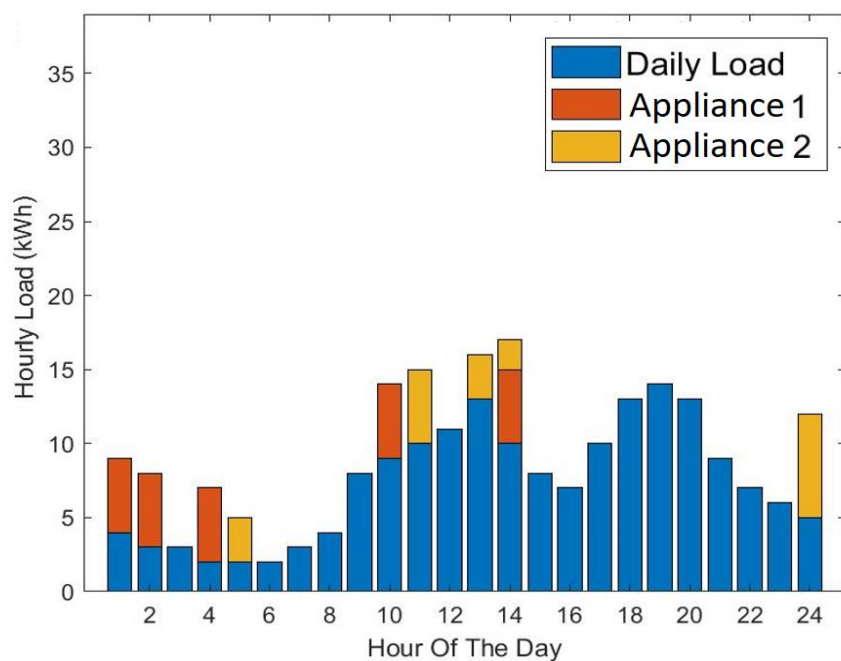
Σχήμα 4.36: Μέσο κόστος ($L(n_t)$) ανά μονάδα ενέργειας σε €/kWh σε κάθε χρονικό βήμα/ώρα λειτουργίας στη διάρκεια μιας ημέρας στην περίπτωση $\varepsilon_{\text{greedy}} = 0.4$.



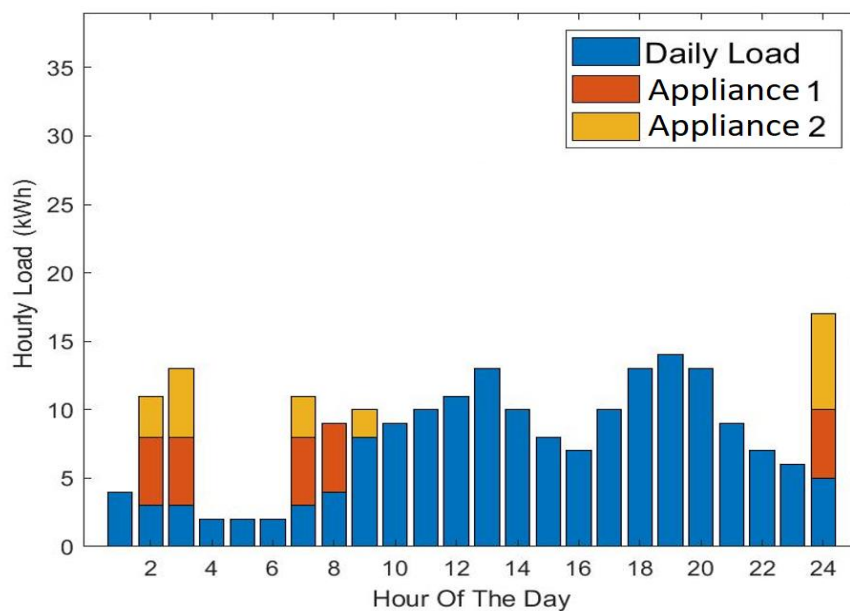
Σχήμα 4.37: Μέσο κόστος ($L(n_t)$) ανά μονάδα ενέργειας σε €/kWh σε κάθε χρονικό βήμα/ώρα λειτουργίας στη διάρκεια μιας ημέρας στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 1$ και με προκαθορισμένη επιλογή των ωρών λειτουργίας του χρονο-προγραμματιζόμενου φορτίου.



Σχήμα 4.38: Μέσο κόστος ($L(n_t)$) ανά μονάδα ενέργειας σε €/kWh σε κάθε χρονικό βήμα/ώρα λειτουργίας στη διάρκεια μιας ημέρας στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 1$, και με εφαρμογή του αλγορίθμου χρονο-προγραμματισμού.



Σχήμα 4.39: Ημερήσια καμπύλη φορτίου και κατανομή του χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου στη διάρκεια μιας ημέρας με προκαθορισμένη κατανομή του χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου στη διάρκεια μιας ημέρας.

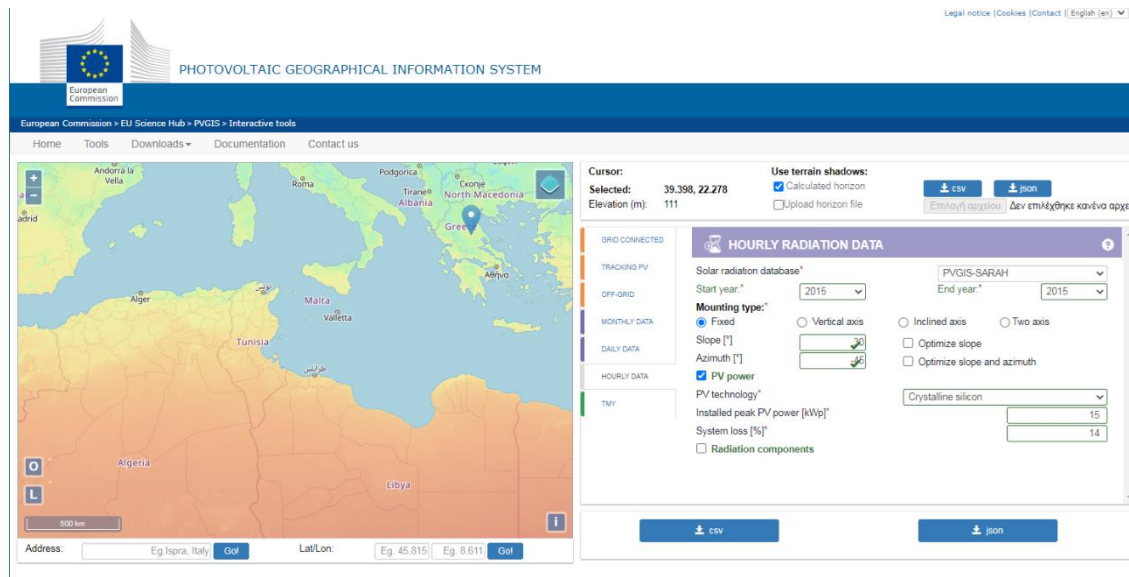


Σχήμα 4.40: Ημερήσια καμπύλη φορτίου και κατανομή του χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου στη διάρκεια μιας ημέρας με την εφαρμογή του αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού.

4.4 Τρίτη προσομοίωση με τον αλγόριθμο QL

Μέχρι στιγμής έχουν εξαχθεί σημαντικά συμπεράσματα για τη λειτουργία των αλγορίθμων. Στην ενότητα αυτή παρατίθενται τα αποτελέσματα με χρήση δεδομένων για την παραγωγή ενέργειας από τη Φ/Β συστοιχία αξιοποιώντας την εφαρμογή της πηγής [22].

Τα δεδομένα που αντλήθηκαν μέσω της εφαρμογής αυτής αφορούν τις ωριαίες τιμές ισχύος (W) και επομένως αντιστοιχίζονται πλήρως σε ενέργεια (Wh). Στο Σχήμα 4.41 απεικονίζεται η εφαρμογή καθώς και οι παράμετροι που έχουν επιλεγεί. Πιο συγκεκριμένα επιλέχθηκε μια περιοχή στην Ελλάδα, η κλίση των Φ/Β πλαισίων να είναι 30° και το αζιμούθιο -45° (ανατολικός προσανατολισμός). Η μέγιστη ισχύς της Φ/Β συστοιχίας είναι 15kW που αντιστοιχεί στην παραγωγή ισχύος από την τελευταία όταν η συνολική προσπίπτουσα στην επιφάνεια των πλαισίων ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι 1000W/m^2 . Η απόδοση διασύνδεσης του Φ/Β συστήματος με τη σύνδεση AC link (Σχήμα 3.2) είναι 86%.



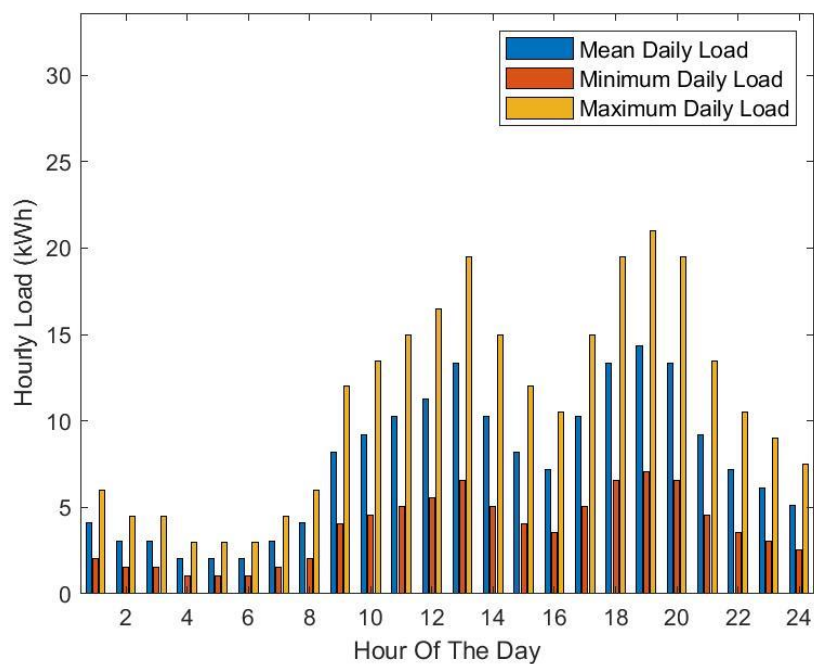
Σχήμα 4.41: Εφαρμογή υπολογισμού των ωριαίων τιμών της παραγόμενης ισχύος μιας Φ/Β συστοιχίας, όπου φαίνονται όλες οι παράμετροι και οι μεταβλητές που έχουν επιλεγεί [22].

Τα δεδομένα που αντλήθηκαν αφορούν τα έτη 2015 και 2016. Τα δεδομένα που αφορούν στην ισχύ περάστηκαν αυτούσια σε ένα καινούργιο αρχείο, το οποίο είναι τύπου “.csv” και αφορά σε 17544 ωριαίες τιμές ισχύος/ενέργειας της Φ/Β

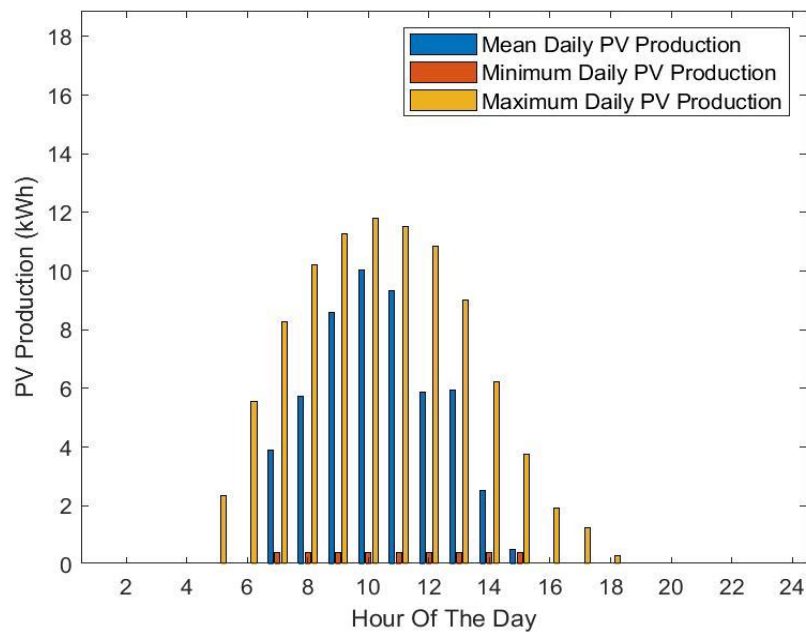
συστοιχίας. Κατόπιν, τα δεδομένα εισάγονται στην προγραμματιστική πλατφόρμα Matlab και αξιοποιούνται από τον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε σε αυτήν τη διπλωματική εργασία. Η προσομοίωση αυτή χωρίζεται σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση εξετάζεται η βελτιστοποίηση σε όρους εξοικονόμησης σε χρηματικές μονάδες ανά μονάδα ενέργειας (€/kWh) και για δύο σενάρια χωρητικότητας του BES (ή του χρησιμοποιούμενου ESS). Στο πρώτο σενάριο, η χωρητικότητα του BES διαμορφώνεται στις 62.5kWh, ενώ το αξιοποιούμενο εύρος είναι από 12.5kWh μέχρι 62.5Wh. Στο δεύτερο σενάριο που παρουσιάζεται στην ενότητα αυτή και με ακριβώς τα ίδια δεδομένα (φορτίου και παραγωγής της Φ/Β συστοιχίας) και παραμέτρους του αλγορίθμου η χωρητικότητα του BES διαμορφώνεται στις 125 kWh, οπότε και εξετάζεται η βελτιστοποίηση με την αλλαγή της χωρητικότητας του ESS. Κάτι τέτοιο μπορεί να καταδείξει την αξία του αλγορίθμου και στην εύρεση του ενδεικνυόμενου μεγέθους του ESS με βάση τα δεδομένα κατανάλωσης και παραγωγής από Φ/Β ενός οικιακού καταναλωτή.

Στο Σχήμα 4.42 απεικονίζονται τα ημερήσια προφίλ φορτίου που αντιστοιχούν στο μέγιστο, μέσο και ελάχιστο ημερήσιο φορτίο.

Στο Σχήμα 4.43 απεικονίζεται η μέγιστη, μέση και ελάχιστη ημερήσια καμπύλη της παραγόμενης ισχύος του Φ/Β συστήματος (συμπεριλαμβανομένων των απωλειών λόγω της διασύνδεσης με το AC link). Όπως απεικονίζεται το Minimum Daily PV Production έχει μηδενική παραγωγή και γι' αυτό απεικονίζεται με κόκκινες μπάρες που πλησιάζουν πάρα πολύ το 0.



Σχήμα 4.42: Μέσο, μέγιστο και ελάχιστο προφίλ φορτίου από τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν και στα δύο σενάρια χωρητικότητας του BES της παρούσας προσομοίωσης.

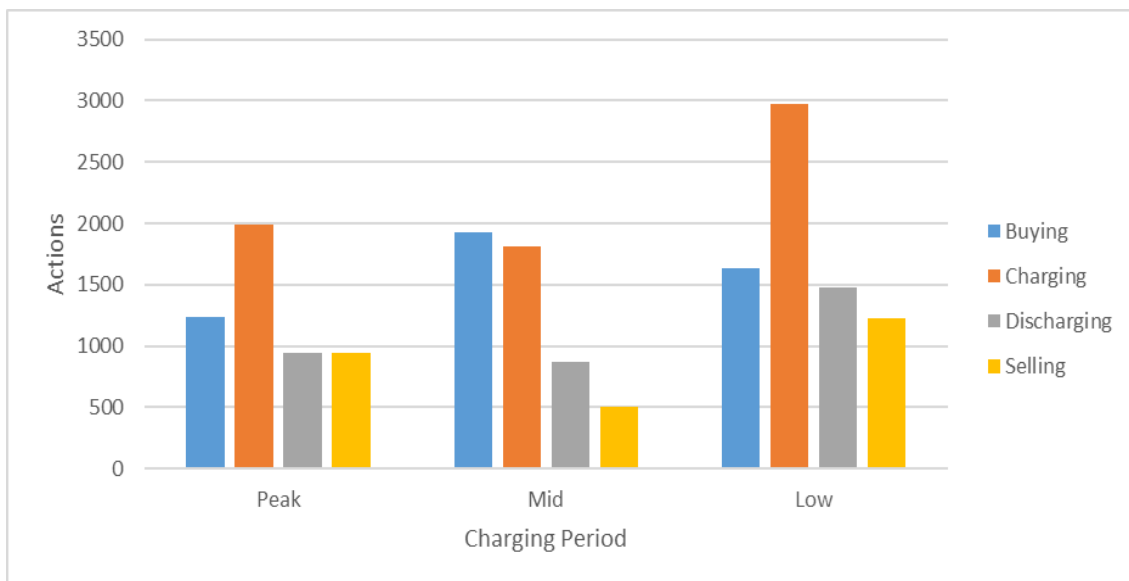


Σχήμα 4.43: Μέση, μέγιστη και ελάχιστη παραγωγή από τη Φ/Β συστοιχία που προέκυψαν από τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν και στα δύο σενάρια χωρητικότητας του BES της παρούσας προσομοίωσης (το Minimum Daily PV Production έχει μηδενική παραγωγή).

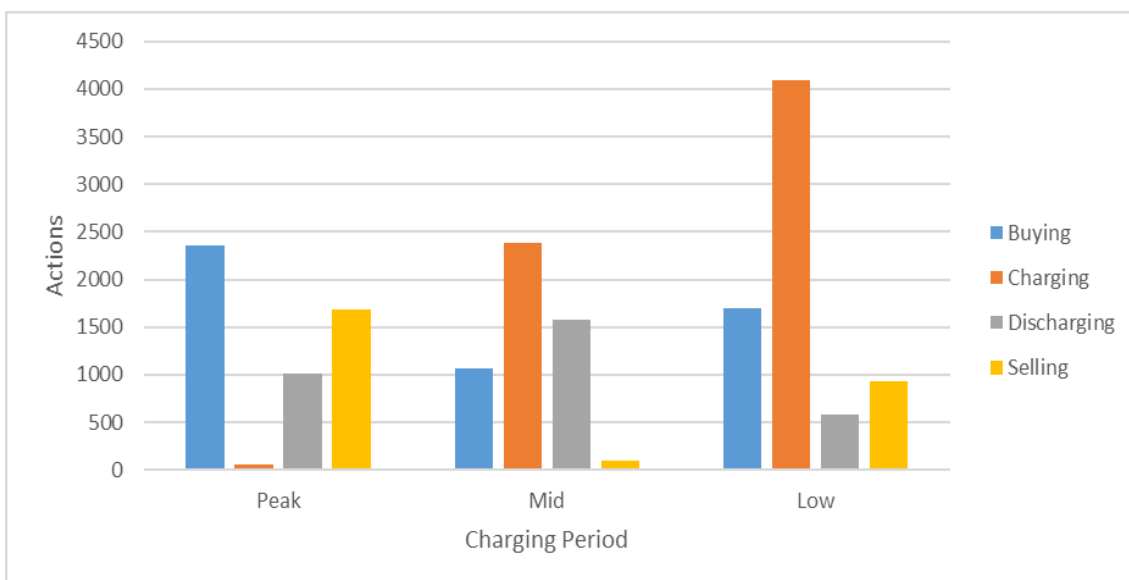
Στα Σχήματα 4.44 και 4.45 απεικονίζονται οι αποφάσεις για τις περιόδους χρέωσης. Για $\epsilon_{\text{greedy}} = 1$ παρατηρείται ότι στις περιόδους ελάχιστης χρέωσης οι αποφάσεις/δράσεις για εκφορτίσεις/πωλήσεις ενέργειας ελαχιστοποιούνται. Επίσης, στις περιόδους μέγιστης χρέωσης οι αποφάσεις/δράσεις πώλησης μεγιστοποιούνται.

Το κόστος ανά μονάδα ενέργειας διαμορφώνεται στα 0.09035€/kWh στην περίπτωση όπου δεν εφαρμόζεται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης ($\epsilon_{\text{greedy}} = 0.25$), στα 0.0868€/kWh για $\epsilon_{\text{greedy}} = 0.4$ (Σχήμα 4.46) και στο 0.0758€/kWh για $\epsilon_{\text{greedy}} = 1$ (Σχήμα 4.47). Το οικονομικό όφελος διαμορφώνεται στα 0.01455€/kWh ή στο 16.1% σε σχέση με την περίπτωση όπου δεν εφαρμόζεται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης, ενώ διαμορφώνεται στα 0.011€/kWh ή στο 12.67% σε σχέση με την περίπτωση $\epsilon_{\text{greedy}} = 0.4$.

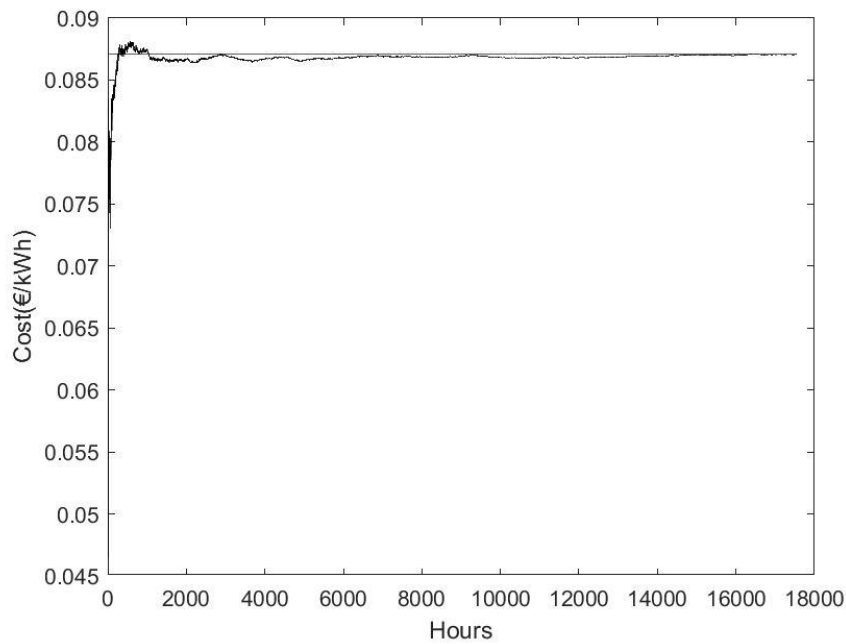
Στο Σχήμα 4.48 απεικονίζεται η μεταβολή της ενέργειας που αποθηκεύεται στο BES για $\epsilon_{\text{greedy}} = 1$. Επιπλέον παρατηρείται ότι από το χρονικό διάστημα 1.32×10^4 που αποτελεί και την πρώτη ώρα της 550^{ης} ημέρας, αποθηκεύεται ενέργεια σε αυτό (η καμπύλη έχει αυξανόμενο ρυθμό). Επομένως, τις χρονικές περιόδους που αντιστοιχούν σε περίοδο ελάχιστης χρέωσης οι αποφάσεις/δράσεις που λαμβάνονται είναι αποφάσεις φόρτισης, ενώ στις περισσότερες ημέρες που απεικονίζονται το BES φορτίζεται σε σημείο όπου το διακριτό βήμα φόρτισης Δe είναι μεγαλύτερο του ποσού ενέργειας που απομένει μέχρι την πλήρη φόρτιση του BES. Κάτι τέτοιο υποδεικνύει ότι η αύξηση της χωρητικότητας του BES θα αυξήσει την εξοικονόμηση που θα επιτευχθεί.



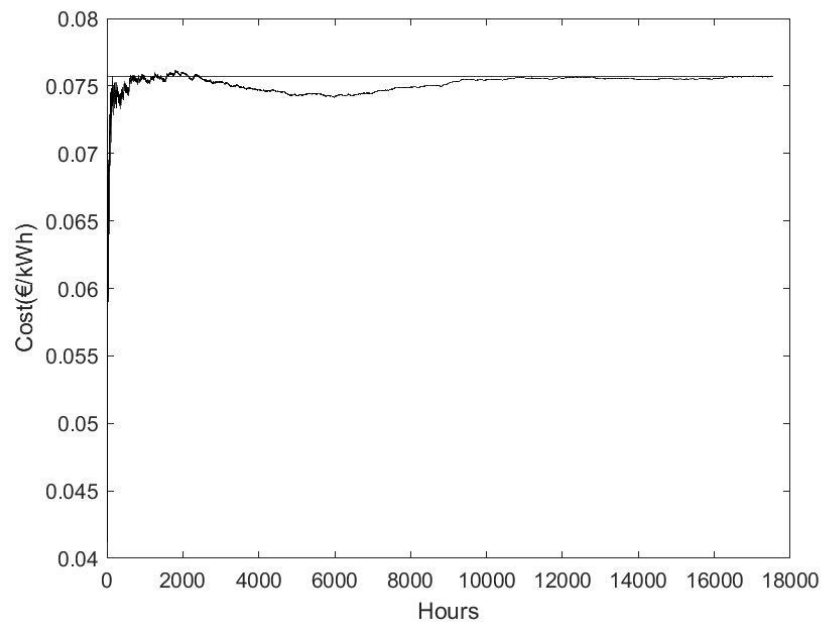
Σχήμα 4.44: Αποφάσεις/δράσεις ανά περίοδο χρέωσης με $\epsilon_{greedy} = 0.4$, $E_{BES,nom} = 62.5kWh$ και $SoC_{min} = 20\%$.



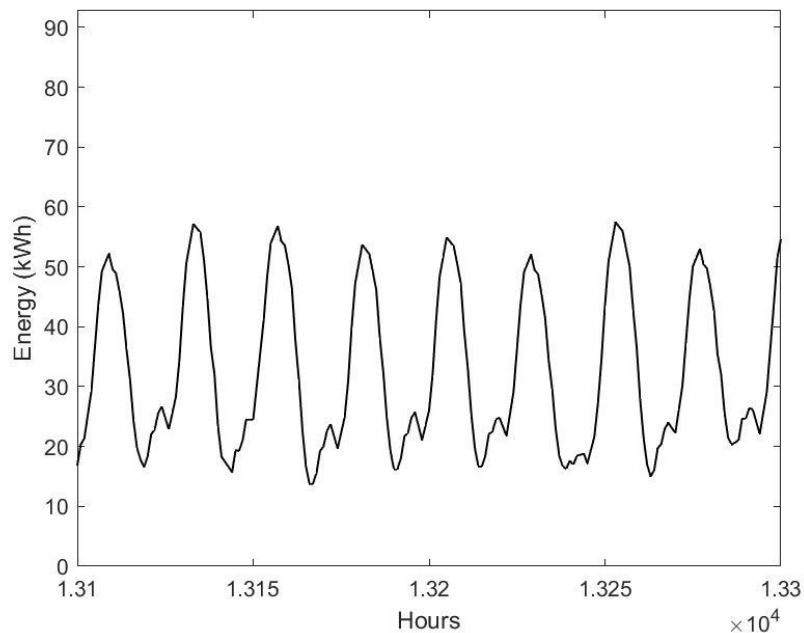
Σχήμα 4.45: Αποφάσεις/δράσεις ανά περίοδο χρέωσης με $\epsilon_{greedy} = 1$, $E_{BES,nom} = 62.5kWh$ και $SoC_{min} = 20\%$.



Σχήμα 4.46: Μέσο κόστος ($L(n_t)$) ανά μονάδα ενέργειας σε €/kWh μέχρι την κάθε ώρα λειτουργίας καθώς και η ολική μέση τιμή (τελική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης) στην περίπτωση $\varepsilon_{greedy} = 0.4$, $E_{BES,nom} = 62.5kWh$, $SoC_{min} = 20\%$.

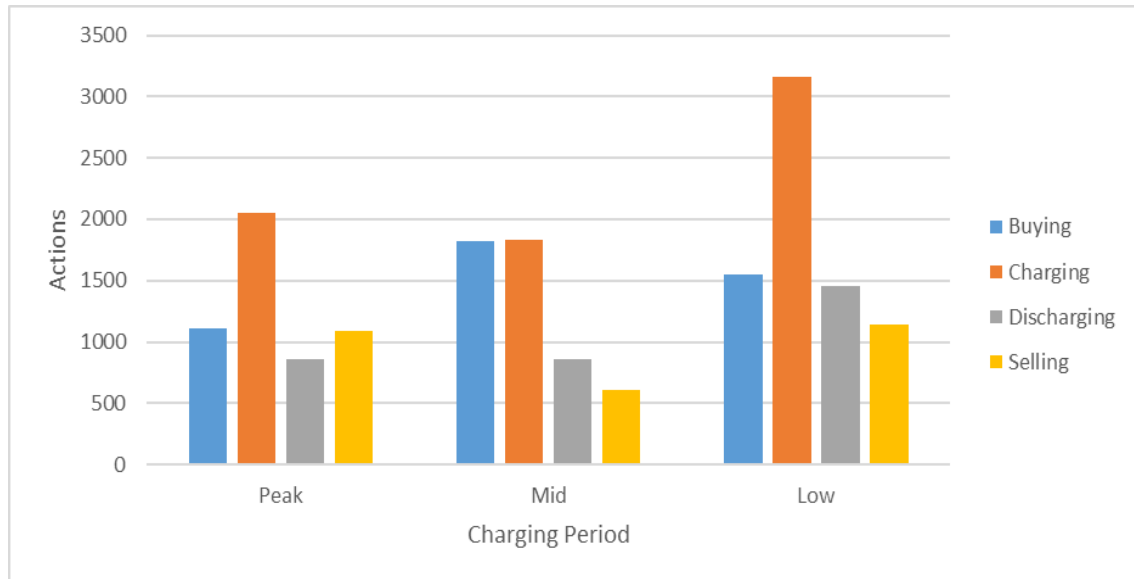


Σχήμα 4.47: Μέσο κόστος ($L(n_t)$) ανά μονάδα ενέργειας σε €/kWh μέχρι την κάθε ώρα λειτουργίας καθώς και η ολική μέση τιμή (τελική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης) στην περίπτωση $\varepsilon_{greedy} = 1$, $E_{BES,nom} = 62.5kWh$, $SoC_{min} = 20\%$.

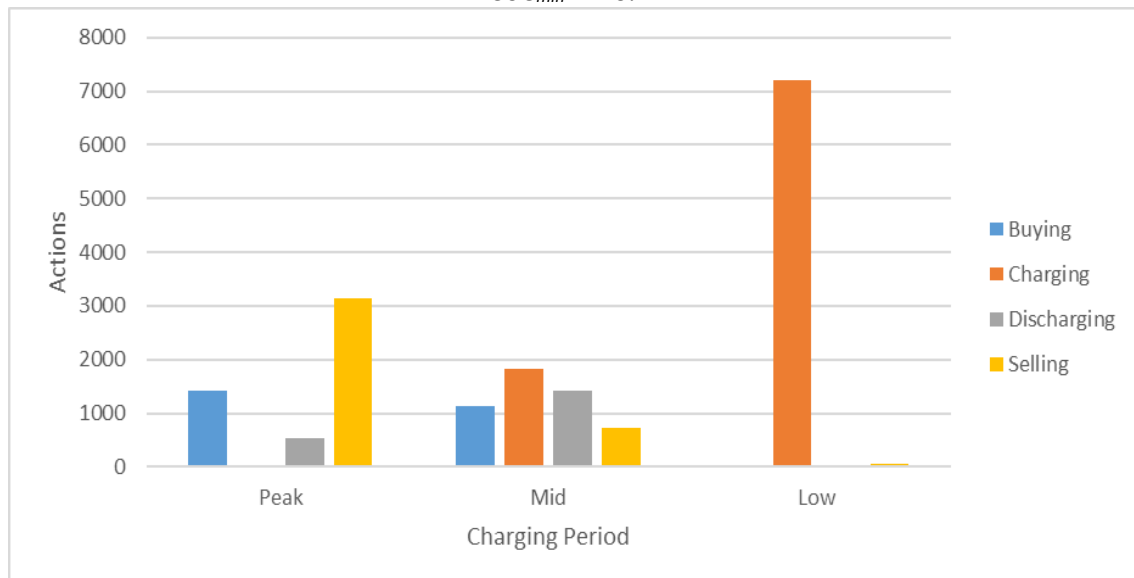


Σχήμα 4.48: Η ενέργεια που αποθηκεύεται στο BES ανά χρονικό βήμα/ώρα λειτουργίας σε ένα τμήμα διαδοχικών χρονικών βημάτων/ωρών λειτουργίας στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 1$, $E_{BES,nom} = 62.5kWh$ και $SoC_{min} = 20\%$.

Έτσι, ενώ στα Σχήματα 4.49 και 4.50 παρατηρούνται παρόμοια σύνολα αποφάσεων/δράσεων ανά περίοδο χρέωσης, το μέσο κόστος ανά μονάδα ενέργειας ελαχιστοποιείται όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.51, 4.52. Επιπροσθέτως, παρατηρείται ότι αυξάνονται οι αποφάσεις/δράσεις φόρτισης στα χρονικά διαστήματα όπου υπάρχει η ελάχιστη χρέωση, όπως επίσης αυξάνονται οι αποφάσεις/δράσεις πώλησης ενέργειας την περίοδο μέγιστης χρέωσης.



Σχήμα 4.49: Αποφάσεις/δράσεις ανά περίοδο χρέωσης με $\epsilon_{greedy} = 0.4$, $E_{BES,nom} = 125kWh$ και $SoC_{min} = 20\%$.

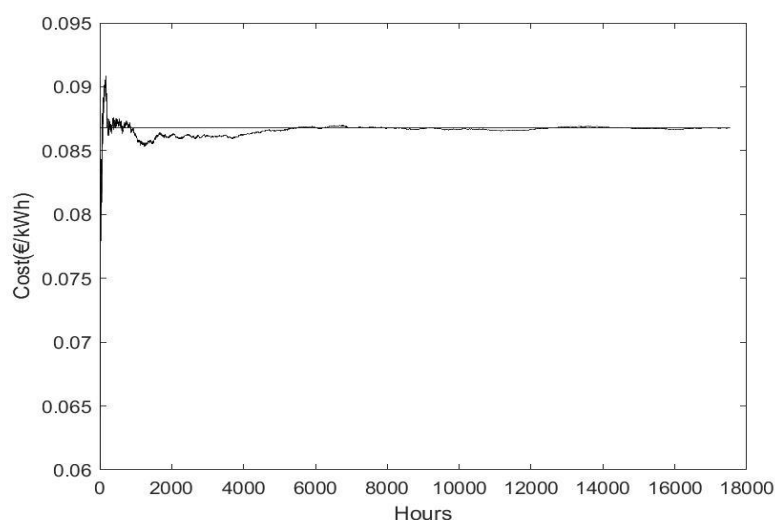


Σχήμα 4.50: Αποφάσεις/δράσεις ανά περίοδο χρέωσης με $\epsilon_{greedy} = 1$, $E_{BES,nom} = 125kWh$ και $SoC_{min} = 20\%$.

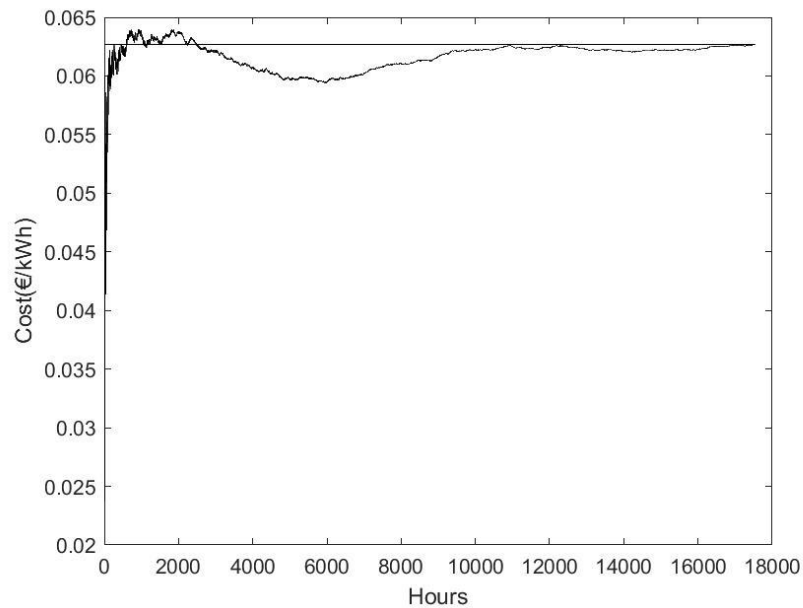
Το μέσο κόστος ανά μονάδα ενέργειας διαμορφώνεται στα 0.09035€/kWh στην περίπτωση όπου δεν εφαρμόζεται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης ($\epsilon_{greedy} = 0.25$), στα 0.0869€/kWh για $\epsilon_{greedy} = 0.4$ (Σχήμα 4.51) και στο 0.0627€/kWh για $\epsilon_{greedy} = 1$ (Σχήμα 4.52). Το οικονομικό όφελος διαμορφώνεται στα 0.02765€/kWh ή στο 30.6% σε σχέση με την περίπτωση όπου δεν εφαρμόζεται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης ενώ διαμορφώνεται στα 0.0242€/kWh ή στο 27.85% σε σχέση με την περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 0.4$. Σύμφωνα με το Σχήμα 4.53 η ενέργεια που αποθηκεύεται στο BES δεν

υπερβαίνει τις 90kWh κάτι που αφενός σημαίνει ότι δεν απαιτείται διαθέσιμη ενέργεια πέραν αυτής της τιμής και αφετέρου μπορεί να αξιοποιηθεί κατά περίπτωση για τον υπολογισμό της ωφέλειας που αποκομίζεται από τη χρήση ενός ESS. Φυσικά, θα πρέπει να δοθεί το κόστος του τελευταίου και να συγκρίνεται με μικρότερες χωρητικότητες του ίδιου ESS (προηγούμενη φάση της παρούσας ενότητας), για να επιλεγεί η μέγιστη αποθηκευτική του ικανότητα.

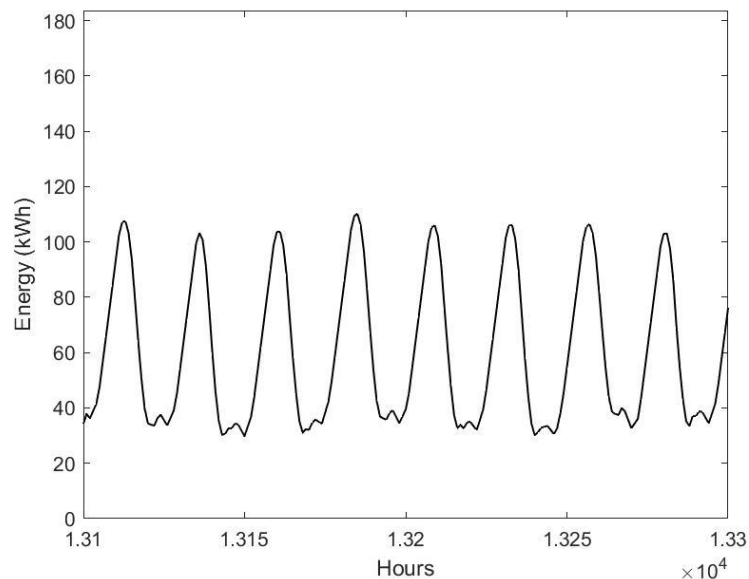
Με αφορμή λοιπόν την προηγούμενη ανάλυση έγινε δοκιμή και με χωρητικότητα 250kWh με ελάχιστη τιμή κατάστασης φόρτισης στο 20%. Έτσι η χρήσιμη χωρητικότητα λαμβάνει την τιμή των 200kWh. Το κόστος ανά μονάδα ενέργειας διαμορφώνεται στα 0.09035€/kWh στην περίπτωση όπου δεν εφαρμόζεται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης ($\epsilon_{greedy} = 0.25$), στα 0.0865€/kWh για $\epsilon_{greedy} = 0.4$ (Σχήμα 4.54) και στο 0.0627€/kWh για $\epsilon_{greedy} = 1$ (Σχήμα 4.55). Το οικονομικό όφελος διαμορφώνεται στα 0.02765€/kWh ή στο 30.6% σε σχέση με την περίπτωση όπου δεν εφαρμόζεται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης, ενώ διαμορφώνεται στα 0.0238€/kWh ή στο 27.51% σε σχέση με την περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 0.4$. Μια ακόμα σημαντική παρατήρηση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.56 είναι ότι παρόλη την αύξηση της χωρητικότητας, η ενέργεια που αποθηκεύεται στο BES δεν υπερβαίνει τις 90kWh, όπως και στο Σχήμα 4.53, κάτι που επιβεβαιώνει ότι η χωρητικότητα των 125kWh είναι η βέλτιστη.



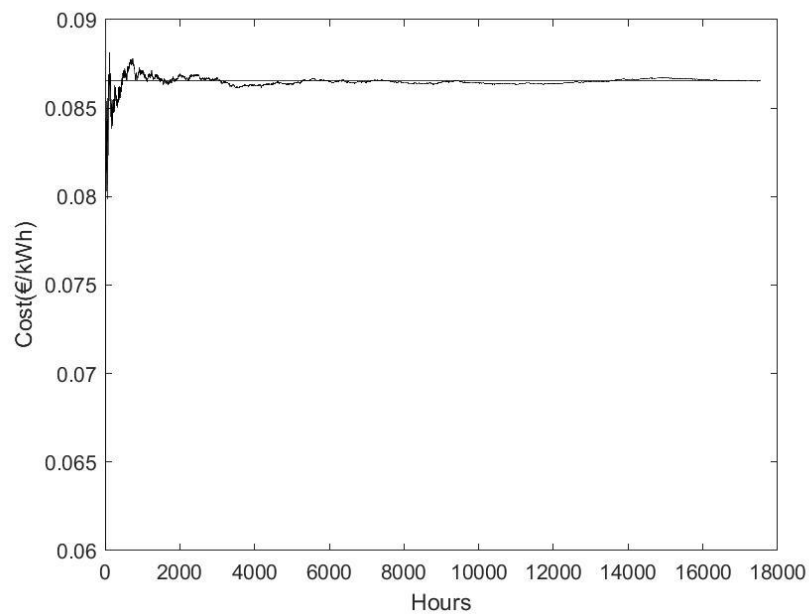
Σχήμα 4.51: Μέσο κόστος ($L(n_t)$) ανά μονάδα ενέργειας σε €/kWh μέχρι την κάθε ώρα λειτουργίας καθώς και η ολική μέση τιμή (τελική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης) στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 0.4$, $E_{BES,nom} = 125kWh$ και $SoC_{min} = 20\%$.



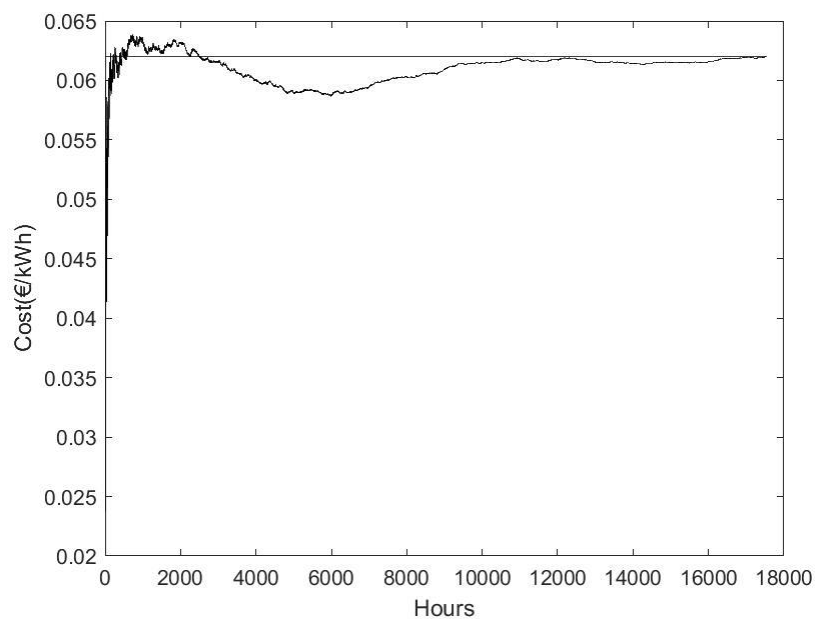
Σχήμα 4.52: Μέσο κόστος ($L(n_t)$) ανά μονάδα ενέργειας σε €/kWh μέχρι την κάθε ώρα λειτουργίας καθώς και η ολική μέση τιμή (τελική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης) στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 1$, $E_{BES,nom} = 125kWh$ και $SoC_{min} = 20\%$.



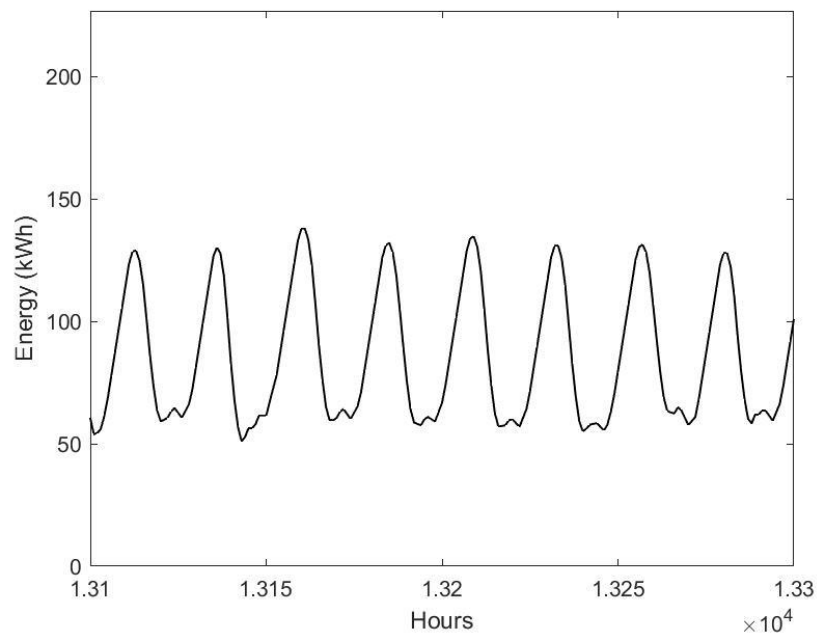
Σχήμα 4.53: Η ενέργεια που αποθηκεύεται στο BES ανά χρονικό βήμα/ώρα λειτουργίας σε ένα τμήμα διαδοχικών χρονικών βημάτων/ωρών λειτουργίας στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 1$, $E_{BES,nom} = 125kWh$ και $SoC_{min} = 20\%$.



Σχήμα 4.54: Μέσο κόστος ($L(n_t)$) ανά μονάδα ενέργειας σε €/kWh μέχρι την κάθε ώρα λειτουργίας καθώς και η ολική μέση τιμή (τελική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης) στην περίπτωση $\varepsilon_{greedy} = 0.4$, $E_{BES,nom} = 250kWh$ και $SoC_{min} = 20\%$.



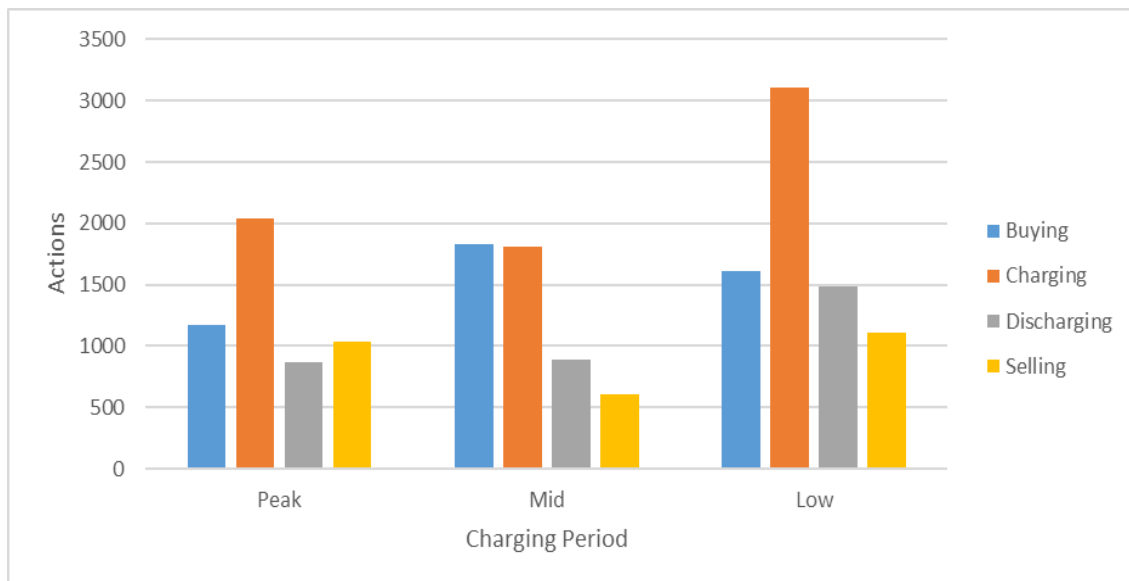
Σχήμα 4.55: Μέσο κόστος ($L(n_t)$) ανά μονάδα ενέργειας σε €/kWh μέχρι την κάθε ώρα λειτουργίας καθώς και η ολική μέση τιμή (τελική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης) στην περίπτωση $\varepsilon_{greedy} = 1$, $E_{BES,nom} = 250kWh$ και $SoC_{min} = 20\%$.



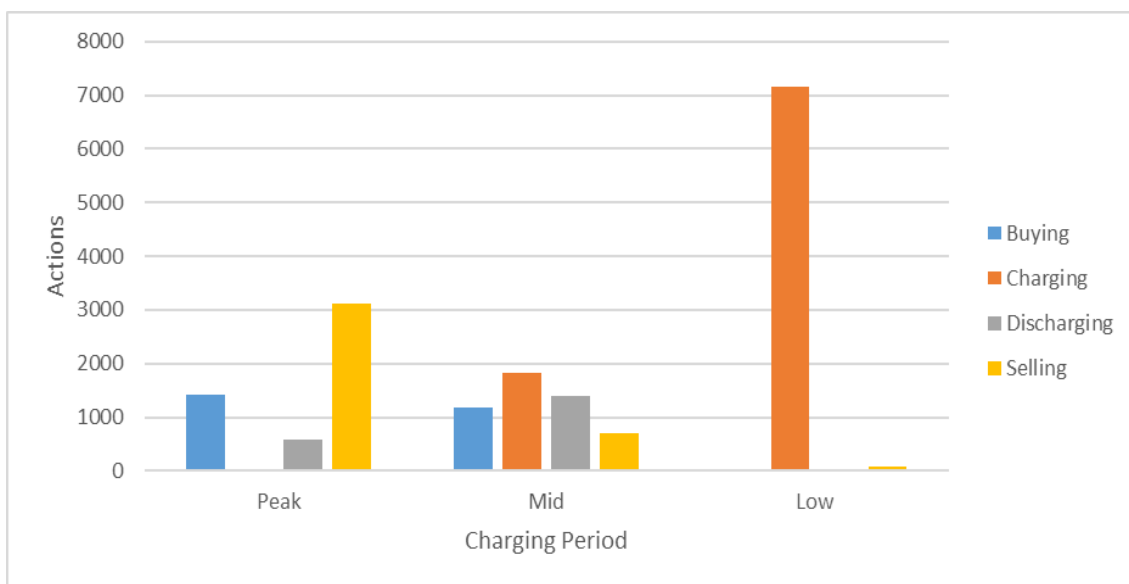
Σχήμα 4.56: Η ενέργεια που αποθηκεύεται στο BES ανά χρονικό βήμα/ώρα λειτουργίας σε ένα τμήμα διαδοχικών χρονικών βημάτων/ωρών λειτουργίας στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 1$, $E_{BES,nom} = 250\text{kWh}$ και $SoC_{min} = 20\%$.

4.5 Αποτελέσματα με τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης SARSA

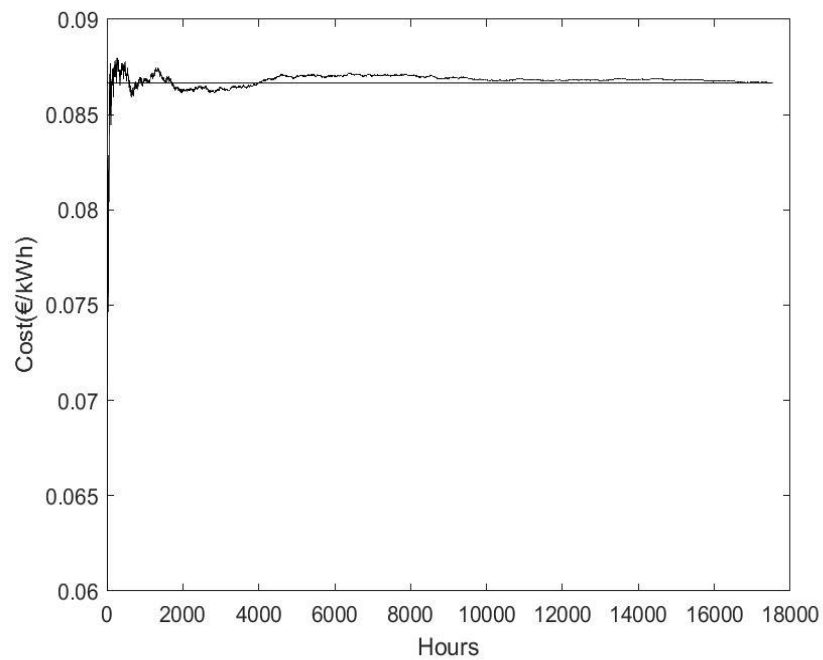
Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου αυτού απεικονίζονται στα Σχήματα 4.57-4.61 και υποδεικνύουν ότι η αποτελεσματικότητα ως προς τη βελτιστοποίηση του υπό εξέταση συστήματος, με βάση την κοινή πολιτική που εφαρμόζεται στον SARSA είναι αντίστοιχη με αυτήν του αλγορίθμου Q-Learning. Το κόστος ανά μονάδα ενέργειας διαμορφώνεται στα 0.09183€/kWh στην περίπτωση όπου δεν εφαρμόζεται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης, στα 0.0863€/kWh για $\epsilon_{greedy} = 0.4$ (Σχήμα 4.59) και στο 0.0624€/kWh για $\epsilon_{greedy} = 1$ (Σχήμα 4.60). Το οικονομικό όφελος διαμορφώνεται στα 0.02795€/kWh ή στο 30.94% σε σχέση με την περίπτωση όπου δεν εφαρμόζεται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης, ενώ διαμορφώνεται στα 0.0239€/kWh ή στο 27.69% σε σχέση με την περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 0.4$. Εξάγεται, λοιπόν, το συμπέρασμα πως η εφαρμοζόμενη πολιτική επιτελεί τον καθοριστικό παράγοντα διαμόρφωσης του πίνακα Q και επομένως του μοτίβου αποφάσεων/δράσεων.



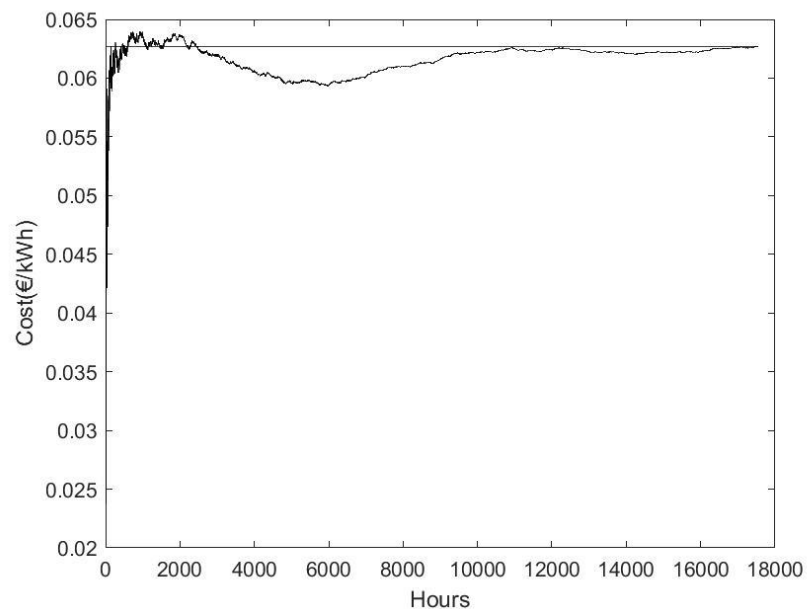
Σχήμα 4.57: Αποφάσεις/δράσεις ανά περίοδο χρέωσης με $\epsilon_{greedy} = 0.4$.



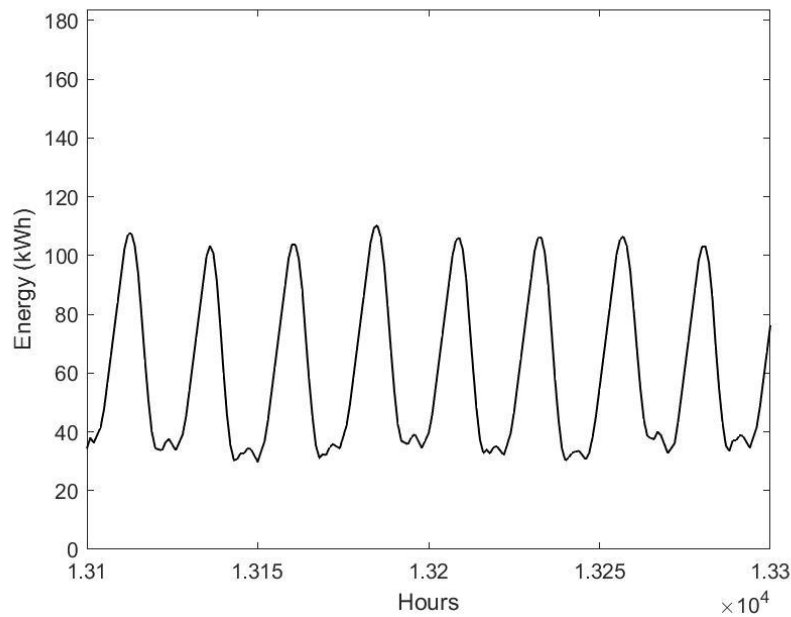
Σχήμα 4.58: Αποφάσεις/δράσεις ανά περίοδο χρέωσης με $\epsilon_{greedy} = 1$.



Σχήμα 4.59: Μέσο κόστος ($L(n_t)$) ανά μονάδα ενέργειας σε €/kWh μέχρι την κάθε ώρα λειτουργίας καθώς και η ολική μέση τιμή (τελική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης) στην περίπτωση $\varepsilon_{greedy} = 0.4$, $E_{BES,nom} = 125kWh$ και $SoC_{min} = 20\%$.



Σχήμα 4.60: Μέσο κόστος ($L(n_t)$) ανά μονάδα ενέργειας σε €/kWh μέχρι την κάθε ώρα λειτουργίας καθώς και η ολική μέση τιμή (τελική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης) στην περίπτωση $\varepsilon_{greedy} = 1$, $E_{BES,nom} = 125kWh$ και $SoC_{min} = 20\%$.

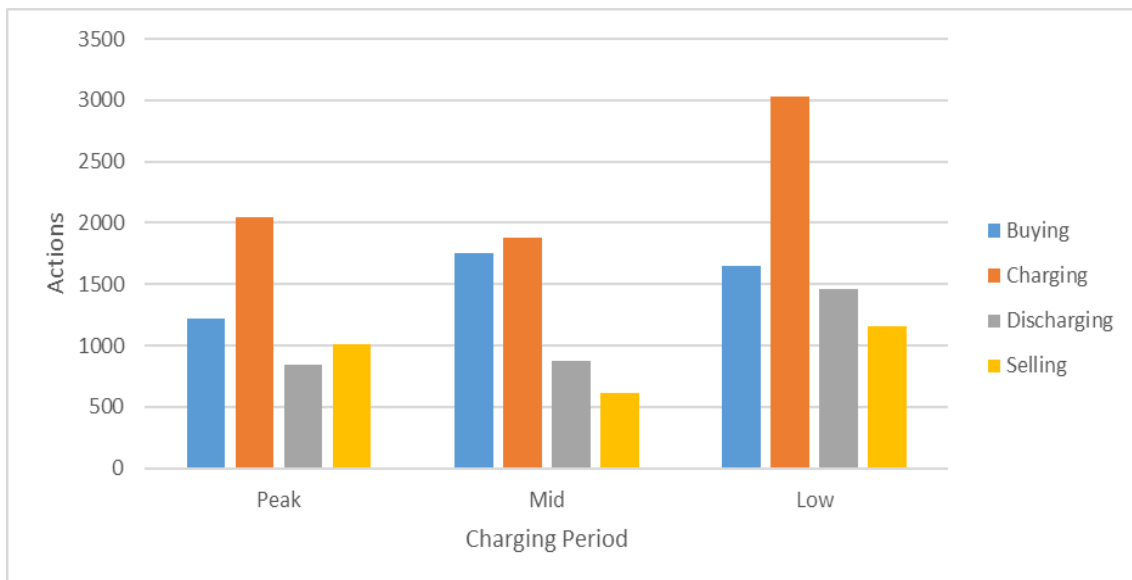


Σχήμα 4.61: Η ενέργεια που αποθηκεύεται στο BES ανά χρονικό βήμα/ώρα λειτουργίας σε ένα τμήμα διαδοχικών χρονικών βημάτων/ωρών λειτουργίας στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 1$, $E_{BES,nom} = 125\text{kWh}$ και $SoC_{min} = 20\%$.

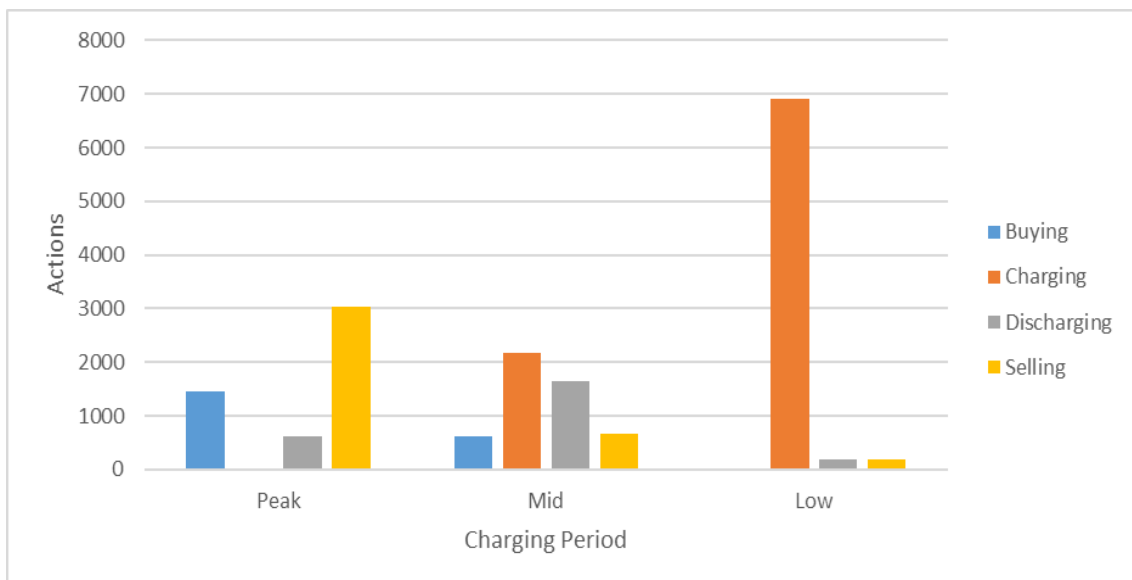
4.6 Αποτελέσματα με τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης Double-Q-Learning

Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου αυτού απεικονίζονται στα Σχήματα 4.62-4.66 και υποδεικνύουν ότι η αποτελεσματικότητα ως προς τη βελτιστοποίηση του υπό εξέταση συστήματος, με βάση την κοινή πολιτική που εφαρμόζεται σε όλους τους αλγορίθμους είναι αντίστοιχη με αυτήν του αλγορίθμου Q-Learning και επομένως και του SARSA. Το κόστος ανά μονάδα ενέργειας διαμορφώνεται στα 0.09035€/kWh στην περίπτωση όπου δεν εφαρμόζεται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης, στα 0.0864€/kWh για $\epsilon_{greedy} = 0.4$ (Σχήμα 4.64) και στο 0.0628€/kWh για $\epsilon_{greedy} = 1$ (Σχήμα 4.65). Το οικονομικό όφελος διαμορφώνεται στα 0.02755€/kWh ή στο 30.49% σε σχέση με την περίπτωση όπου δεν εφαρμόζεται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης ενώ διαμορφώνεται στα 0.0236€/kWh ή στο 27.31% σε σχέση με την περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 0.4$. Η εξοικονόμηση που επιτυγχάνεται με αυτόν τον αλγόριθμο

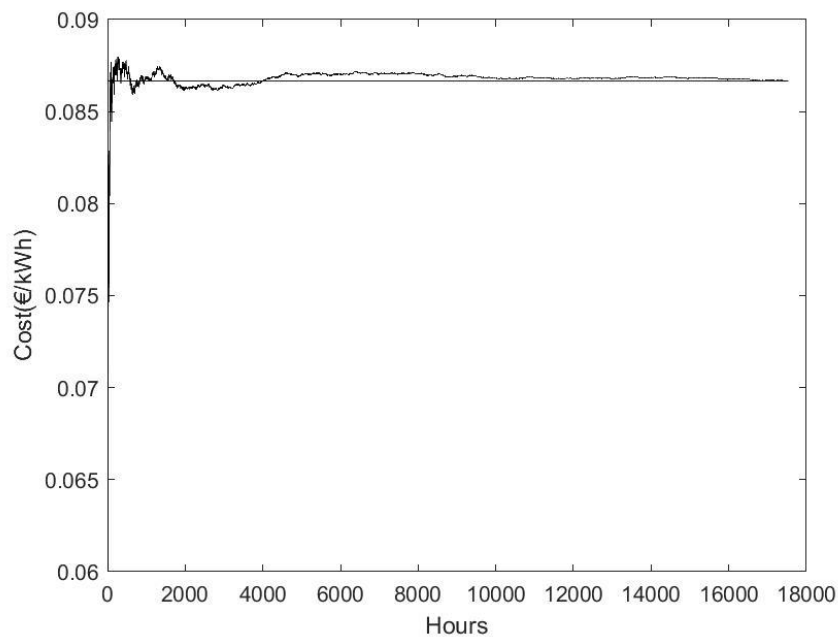
είναι ελάχιστα διαφορετική από αυτήν που επιτυγχάνουν οι προηγούμενοι δύο αλγόριθμοι, ενώ σε σχέση και με τα υπόλοιπα αποτελέσματα υπάρχει μεγάλη συνάφεια μεταξύ των αντίστοιχων των προηγούμενων αλγορίθμων που υλοποιήθηκαν.



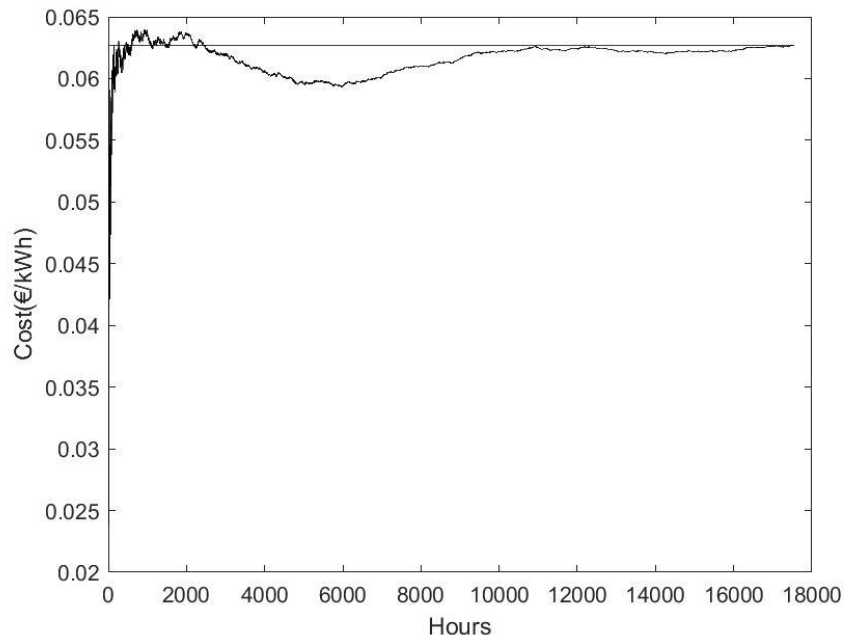
Σχήμα 4.62: Αποφάσεις/δράσεις ανά περίοδο χρέωσης με $\epsilon_{greedy} = 0.4$.



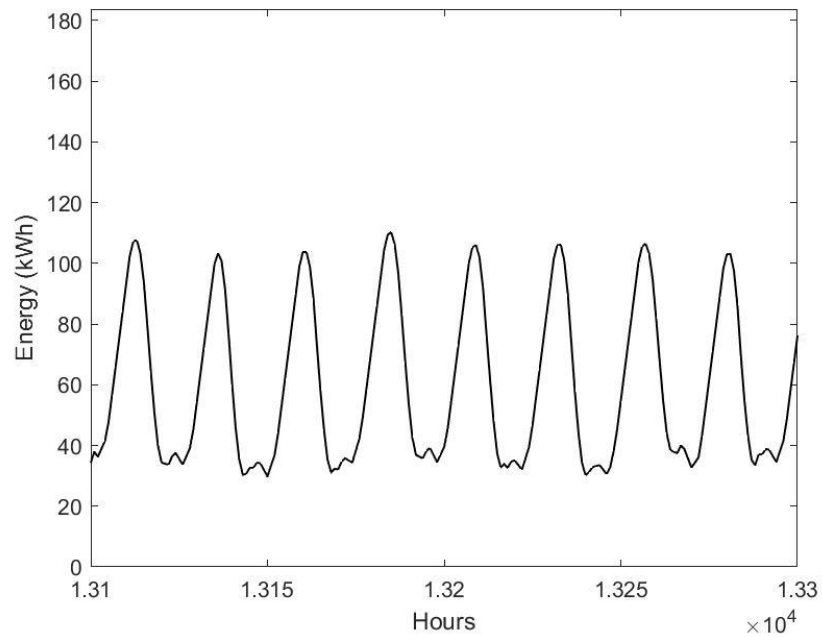
Σχήμα 4.63: Αποφάσεις/δράσεις ανά περίοδο χρέωσης με $\epsilon_{greedy} = 1$.



Σχήμα 4.64: Μέσο κόστος ($L(n_t)$) ανά μονάδα ενέργειας σε €/kWh μέχρι την κάθε ώρα λειτουργίας καθώς και η ολική μέση τιμή (τελική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης) στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 0.4$, $E_{BES,nom} = 125kWh$ και $SoC_{min} = 20\%$.



Σχήμα 4.65: Μέσο κόστος ($L(n_t)$) ανά μονάδα ενέργειας σε €/kWh μέχρι την κάθε ώρα λειτουργίας καθώς και η ολική μέση τιμή (τελική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης) στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 1$, $E_{BES,nom} = 125kWh$ και $SoC_{min} = 20\%$.



Σχήμα 4.66: Η ενέργεια που αποθηκεύεται στο BES ανά χρονικό βήμα/ώρα λειτουργίας σε ένα τμήμα διαδοχικών χρονικών βημάτων/ωρών λειτουργίας στην περίπτωση $\epsilon_{greedy} = 1$, $E_{BES,nom} = 125kWh$ και $SoC_{min} = 20\%$.

4.7 Σύγκριση των αλγορίθμων

Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι μειώσεις που επιτυγχάνονται στη μέση τιμή ανά μονάδα ενέργειας με τη χρήση των αλγορίθμων σε σχέση με την περίπτωση όπου δε χρησιμοποιούνται. Πιο συγκεκριμένα, παρατίθενται τόσο τα αποτελέσματα της εξοικονόμησης χρημάτων που επιτυγχάνεται με τη χρήση των αλγορίθμων στην τρίτη διαμόρφωση της πολιτικής, στην περίπτωση όπου η χωρητικότητα του BES δεν είναι βέλτιστη (62.5kWh) καθώς και τα αποτελέσματα των αλγορίθμων στην τρίτη διαμόρφωση όπου η χωρητικότητα του BES είναι βέλτιστη (125kWh). Ο σκοπός είναι να υπάρχει ένα μέτρο σύγκρισης της απόδοσης των αλγορίθμων στη διαδικασία βελτιστοποίησης.

Πίνακας 4.1: Σύγκριση αποτελεσμάτων εξοικονόμησης χρημάτων (μείωσης του μέσου κόστους ανά μονάδα ενέργειας) των διαφορετικών αλγορίθμων ενισχυτικής μάθησης που εφαρμόστηκαν.

<div> <div>Αλγόριθμος</div> <div>Χωρητικότητα του BES</div> </div>	Q-Learning	Sarsa	Double Q-Learning
Μη βέλτιστη τιμή χωρητικότητας του BES	16.10%	16.28%	16.17%
Βέλτιστη τιμή χωρητικότητας του BES	30.60%	30.94%	30.49%

Επιπλέον, σημειώνεται ότι σε κάθε αλγόριθμο εφαρμόζεται επιπρόσθετα και ο αλγόριθμος του χρονοπρογραμματισμού ο οποίος επιτυγχάνει επιπρόσθετη αύξηση του οικονομικού οφέλους κατά 6-10% ανάλογα με το ποσοστό του χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου επί του συνολικού προφίλ φορτίου.

Κεφάλαιο 5 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αξιοποιώντας τα πορίσματα που προκύπτουν από το κεφάλαιο των προσομοιώσεων συμπεραίνεται ότι οι τεχνικές ενισχυτικής μάθησης είναι σε θέση να συνεισφέρουν στους οικιακούς καταναλωτές, καθώς επιτυγχάνουν σημαντική μείωση του συνολικού κόστους αγοράς ενέργειας από τον καταναλωτή. Επιπλέον, μέσω της εφαρμογής των μεθόδων αυτών μπορεί να εκτιμηθεί με υψηλή ακρίβεια το απαιτούμενο μέγεθος των μονάδων αποθήκευσης.

Ένα ακόμη στοιχείο που προκύπτει σχετικά με τους αλγορίθμους είναι ότι το πρόβλημα αντιμετωπίζεται κυρίως μέσω της εφαρμογής της κατάλληλης πολιτικής, που μεταφράζεται σε κατάλληλη επιλογή της ανταμοιβής/ποινής, ενώ δεν εξαρτάται σχεδόν καθόλου από την επίδραση του εκπτώτικου παράγοντα, γ , στην ανανέωση των τιμών του πίνακα Q , κάτι που συμπεραίνεται εύκολα από τα σχεδόν παρόμοια αποτελέσματα σε όλους τους αλγορίθμους που εφαρμόστηκαν. Με απλά λόγια, η επιλογή της βέλτιστης απόφασης/δράσης σε κάθε κατάσταση δεν εξαρτάται από την προηγούμενη κατάσταση, αλλά μόνο από τον τρόπο που ορίζεται η ίδια. Κάτι τέτοιο μπορεί να προσανατολίσει τον τρόπο με τον οποίο υλοποιούνται αλγοριθμικά οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι και να αυξηθεί σε σημαντικό βαθμό ο ρυθμός σύγκλισης που εξαρτάται από τον αριθμό των χρονικών βημάτων που απαιτούνται για την εκπαίδευση του αλγορίθμου.

Επιπλέον, η επιλογή σχετικών ως προς την καθαρή ενέργεια του συστήματος τιμών για την περιγραφή της κατάστασης των μονάδων αποθήκευσης αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματική, τόσο για τον περιορισμό του συνόλου των καταστάσεων και επομένως της ταχύτητας σύγκλισης του αλγορίθμου, όσο και για την επίτευξη πολύ ικανοποιητικών αποτελεσμάτων.

Περαιτέρω διερεύνηση όπου θα λαμβάνονται υπόψη και τα κόστη εγκατάστασης και συντήρησης του συστήματος παραγωγής και διαχείρισης ενέργειας, αλλά και των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας, θα μπορούσε να εντοπίσει την εύρεση της οικονομοτεχνικά βέλτιστης επιλογής μονάδων αποθήκευσης, όπου θα λαμβάνεται υπόψιν ο κύκλος ζωής (μέγιστος αριθμός κύκλων φόρτισης) της μονάδας

αποθήκευσης ενέργειας και επομένως το συνολικό όφελος που προκύπτει σε βάθος χρόνου.

Κεφάλαιο 6 : ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] S. S. Mohammed and D. Devaraj, «Simulation and analysis of stand-alone photovoltaic system with boost converter using MATLAB/Simulink», 2014 International Conference on Circuits Power and Computing Technologies (ICCPCT-2014), pp. 814-821, 20 March 2014.
- [2] O. Singh and S. Rajput, «Mathematical modelling and simulation of solar photovoltaic array system», 2016 International Conference on Research Advances in Integrated Navigation Systems (RAINS), pp. 1-5, 1 May 2016.
- [3] T. Katopodis, I. Markantonis, N. Politi, D. Vlachogiannis and A. Sfetsos, «High-Resolution Solar Climate Atlas for Greece under Climate Change Using the Weather Research and Forecasting (WRF) Model», Atmosphere, vol. 11, no. 7, 761, 18 July 2020.
- [4] O. O. Kehinde, F. O. Ehiagwina, L. O. Afolabi and O. A. Olaoye, «Photovoltaic Cell Output Voltage Variations with Time and Inclination Angle», IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering, vol. 11, no. 4, pp. 40-47, 5 August 2016.
- [5] S. Yilmaz, H. R. Ozcalik, O. Dogmus, F. Dincer, O. Akgol and M. Karaaslan, «Design of two axes sun tracking controller with analytically solar radiation calculations», Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 43, pp. 997-1005, 1 March 2015.
- [6] P. Rajendran and H. Smith, «Modelling of solar irradiance and daylight duration for solar-powered UAV sizing», Energy Exploration and Exploitation, vol. 34, no. 2, pp. 235-243, 1 February 2016.
- [7] R. Dontikurti, A. Gurram and D. Rao, «Design of Knowledge Base for Efficient Solar Tracking», Journal of Applied Science and Computations (JASC), vol. 6, no. 4, pp. 371-388, 6 May 2019.
- [8] M. Yenen, F. Ercan and M. Fahrioglu, «Solar Thermal System Analysis of Northern Cyprus», EECS'12 - 7th International Symposium on Electrical and Computer Systems, 1 November 2012.

- [9] M. C. Firman, J. Montes-Romero, A. R. G. Mayans, L. H. Vera, E. F. Fernández and J. d. I. C. Higuera, «Low-Cost I–V Tracer for PV Modules under Real Operating Conditions», *Energies*, vol. 13, no. 17, 4320, 20 August 2020.
- [10] L. Martin, V. Poulek and P. Kouřím, «Temperature changes of I-V characteristics of photovoltaic cells as a consequence of the Fermi energy level shift», *Research in Agricultural Engineering*, vol. 63, no. 1, pp. 10-15, 12 April 2017.
- [11] M. Darwish, H. Abdulrahim, A. Hassan and A. N. Mabrouk, «PV and CSP solar technologies & desalination: economic analysis», *Desalination and Water Treatment*, vol. 57, no. 36, pp. 16679-16702, August 2016.
- [12] Y.-H. Ji, J.-G. Kim, S. Park, J.-H. Kim and C. Won, «C-language based PV array simulation technique considering effects of partial shading», 2009 IEEE International Conference on Industrial Technology, pp. 1-6, 19 May 2009.
- [13] A. Emadi, «Advanced Electric Drive Vehicles», CRC Press, 24 October 2014.
- [14] M. N. Hossain, T. K. Routh, A. H. B. Yousuf, M. M. Asasduzzaman, M. I. Hossain and U. Husnaeen, «Design and development of a grid tied solar inverter», 2012 International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV), pp. 1054-1058, 1 May 2012.
- [15] H. Myneni and G. S. Kumar, «Energy Management and Control of Single-Stage Grid Connected Solar PV and BES System», *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 11, no. 3, pp. 1739-1749, 2 September 2019.
- [16] Q. Cui, X. Wang, X. Wang and Y. Zhang, «Residential Appliances Direct Load Control in Real-Time Using Cooperative Game», *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no.1, pp. 226-233, 12 February 2015.
- [17] B. Gao, X. Liu and Z. Zhu, «A Bottom-Up Model for Household Load Profile Based on the Consumption Behavior of Residents», *Energies*, vol. 11, no. 8, 2112, 14 August 2018.
- [18] S. Shao, S. Member, M. Pipattanasomporn and S. Rahman, «Development of Physical-Based Demand Response-Enabled Residential Load Models», *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 607-614, 1 May 2013.

- [19] V. Azarova, D. Engel, C. Ferner, A. Kollmann and J. Reichl, «Exploring the impact of network tariffs on household electricity expenditures using load profiles and socio-economic characteristics», *Nature Energy*, vol. 3, no. 4, pp. 317-325, 1 April 2018.
- [20] Y. Liu, D. Zhang and H. B. Gooi, «Optimization Strategy Based on Deep Reinforcement Learning for Home Energy Management», *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 6, no. 3, pp. 572-582, September 2020.
- [21] S. Kim and H. Lim, «Reinforcement Learning Based Energy Management Algorithm for Smart Energy Buildings», *Energies*, vol. 11, no. 8, 2010, 2 August 2018.
- [22] <https://re.jrc.ec.europa.eu/>, [Πρόσβαση 07 09 2021].
- [23] A. Kapoor, «Hands-On Artificial Intelligence for IoT», Packt Publishing Ltd., January 2019.
- [24] W. Qiang and Z. Zhongli, «Reinforcement Learning Model, Algorithms and Its Application», 2011 International Conference on Mechatronic Science Electric Engineering and Computer (MEC), pp. 1143-1146, 19 August 2011.
- [25] R. Leo, R. S. Milton and S. Sibi, «Reinforcement Learning for Optimal Energy Management of a Solar Microgrid», 2014 IEEE Global Humanitarian Technology Conference - South Asia Satellite (GHTC-SAS), pp. 183-188, 26 September 2014.
- [26] H. v. Hasselt, A. Guez and D. Silver, «Deep Reinforcement Learning with Double Q-learning», *Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence*, vol. 30, no. 1, pp. 2094-2100, 2 March 2016.
- [27] Y.-H. Wang, T.-H. S. Li and C.-J. Lin, «Backward Q-learning: The combination of Sarsa algorithm and Q-learning», *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 26, no. 9, pp. 2184-2193, 1 October 2013.
- [28] E. R. Gomes and R. Kowalczyk, «Dynamic Analysis of Multiagent Q-learning with ϵ -greedy Exploration», *Proceedings of the 26th Annual International Conference on Machine Learning*, pp. 369-376, 14 June 2009.
- [29] C. J. Watkins and P. Dayan, «Technical Note: Q-Learning», *Machine Learning*, vol. 8, no. 3-4, pp. 279-292, 1 May 1992.

[30] M. Tokic, «Adaptive ϵ -Greedy Exploration in Reinforcement Learning Based on Value Differences», Annual Conference on Artificial Intelligence, vol. 6359, pp. 203-210, 21 September 2010.

[31] P. Paudyal and Z. Ni, «Smart home energy optimization with incentives compensation from inconvenience for shifting electric appliances», International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 109, pp. 652-660, 1 July 2019.

[32] H. v. Hasselt, «Double Q-learning», Advances in Neural Information Processing Systems, vol. 23, pp. 2613-2621, 2010.