



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**‘Συγκριτική μελέτη τεχνικών και αλγορίθμων βέλτιστης  
διαχείρισης ελαστικών φορτίων σε επίπεδο μικροδικτύου  
και ανάπτυξη συστήματος αποφάσεων επιλογής’**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**του**

**Σαμαρά Κωνσταντίνου**

**Επιβλέπων: Ευάγγελος Μαρινάκης**

**Καθηγητής Ε.Μ.Π.**





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**‘Συγκριτική μελέτη τεχνικών και αλγορίθμων βέλτιστης  
διαχείρισης ελαστικών φορτίων σε επίπεδο μικροδικτύου  
και ανάπτυξη συστήματος αποφάσεων επιλογής’**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

του

**Σαμαρά Κωνσταντίνου**

**Επιβλέπων: Ευάγγελος Μαρινάκης**

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 01/03/2024

.....

**Ιωάννης Ψαρράς**

Δημήτριος Ασκούνης

.....

**Ιωάννης Ψαρράς**

Καθηγητής ΕΜΠ

.....

**Ευάγγελος Μαρινάκης**

Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος, 2024



.....

Σαμαράς Κωνσταντίνος

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

Copyright © Κωνσταντίνος Σαμαράς 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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



## Περίληψη

Σε μια εποχή όπου οι ενεργειακές απαιτήσεις μεγαλώνουν παράλληλα με τη μείωση των πόρων, η ανάγκη για αποτελεσματική διαχείριση της ενέργειας δεν ήταν ποτέ πιο σημαντική. Η παρούσα εργασία αντιμετωπίζει την ανάγκη για βιώσιμες ενεργειακές λύσεις, εστιάζοντας στη διαχείριση των ευέλικτων φορτίων εντός μικροδικτύου.

Στο επίκεντρο της μελέτης βρίσκεται ένα σύστημα που συνδυάζει την καθορισμένη κατανάλωση ενέργειας λόγω των σταθερών φορτίων, την παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ενώ παράλληλα χρησιμοποιούνται ευέλικτα φορτία και ενσωματώνεται ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρία). Ο σκοπός της έρευνας είναι ο προσδιορισμός της βέλτιστης τοποθέτησης των ευέλικτων φορτίων κατά την διάρκεια της ημέρας, συμβάλλοντας έτσι στην αποτελεσματικότερη αξιοποίηση της ενέργειας και στη ταυτόχρονη μείωση του κόστους που αποτελεί το κύριο στόχο.

Μετά από λεπτομερή επισκόπηση της θεωρίας αλλά και μελέτη διατριβών με αντίστοιχες προκλήσεις, επιλέχθηκε ο αλγόριθμος Particle Swarm Optimization (PSO). Η ικανότητά του να ψάχνει και να βρίσκει αποτελεσματικές λύσεις σε πολύπλοκους, πολυδιάστατους χώρους αναζήτησης, αποτελεί ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του, επηρέασε στην απόφαση επιλογής του. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Δυναμικού Προγραμματισμού (DP) για το προσδιορισμό της στάθμης της μπαταρίας κάθε χρονική στιγμή, αξιοποιώντας την αποτελεσματικότητα της στη λήψη αποφάσεων σε προβλήματα πολλαπλών σταδίων.

Το πειραματικό τμήμα της εργασίας διευκρινίζει τα αποτελέσματα των διαφορετικών εκδοχών του κώδικα που υλοποιήθηκαν και εκτελέστηκαν σε ένα συγκεκριμένο σενάριο, παρέχοντας επίσης και μια συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων αυτών. Διερευνήθηκε, επιπλέον η επίδραση διαφόρων παραμέτρων, όπως ο αριθμός των σωματιδίων ( $n\_particles$ ), ο αριθμός των επαναλήψεων ( $n\_iterations$ ) και η μέγιστη χωρητικότητα της μπαταρίας ( $B\_max$ ) στην αποτελεσματικότητα των λύσεων. Επιπρόσθετα, εξετάστηκε ο τρόπος με τον οποίο οι εποχιακές διακυμάνσεις επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος.

Τέλος, αναλύθηκαν τα συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν από την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας, καθώς και προτάσεις για περαιτέρω εξέλιξη.

**Λέξεις κλειδιά:** Particle Swarm Optimization, Δυναμικός Προγραμματισμός, Ευέλικτα φορτία, Μικροδουκτια, Μείωση κόστους, Μπαταρία, Κατανάλωση ενέργειας, Παραγωγή ενέργειας



## Abstract

In an era of increasing energy demand and decreasing resources, the need for efficient energy management has never been more critical. This paper addresses the need for sustainable energy solutions by focusing on the management of flexible loads within the microgrid.

The focus of the study is on a system that combines fixed energy consumption due to fixed loads, the generation of renewable energy, the parallel use of flexible loads and the integration of an energy storage system (battery). The aim of the research is to determine the optimal placement of the flexible loads during the day, thus contributing to a more efficient use of energy while reducing costs, which is the main objective.

After a detailed review of theory and a study of work with similar challenges, the Particle Swarm Optimisation (PSO) algorithm was selected. Its ability to search and find efficient solutions in complex, multi-dimensional search spaces is one of its key features that influenced the selection decision. Furthermore, the Dynamic Programming (DP) method was used to determine the battery level at each point in time, exploiting its effectiveness in decision making in multi-stage problems.

The experimental part of the paper specifies the results of the different versions of the code implemented and executed in a given scenario, and also provides a comparative analysis of these results. In addition, the influence of different parameters such as the number of particles ( $n_{particles}$ ), the number of iterations ( $n_{iterations}$ ) and the maximum battery capacity ( $B_{max}$ ) on the effectiveness of the solutions has been studied. The effect of seasonal variations on the performance of the system was also studied.

Finally, the conclusions drawn from the work were analysed and suggestions for further development were discussed.

Keywords: Particle Swarm Optimization, Dynamic Programming, Flexible Loads, Microgrids, Cost Reduction, Battery, Energy Consumption, Energy Production

## Πρόλογος

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο ολοκλήρωσης του προπτυχιακού κύκλου σπουδών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η εργασία ανατέθηκε από το Εργαστήριο Συστημάτων Αποφάσεων και Διοίκησης και έχει ως θέμα τη Συγκριτική μελέτη τεχνικών και αλγορίθμων βέλτιστης διαχείρισης ελαστικών φορτίων σε επίπεδο μικροδικτύου και ανάπτυξη συστήματος αποφάσεων επιλογής.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην κατασκευή μιας ολοκληρωμένης προσέγγισης για τη διαχείριση μικροδικτύων που όχι μόνο μειώνει το κόστος για τους καταναλωτές αλλά και ενισχύει τη βιωσιμότητα και την αξιοπιστία της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.



## Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>17</b>
1.1	Αντικείμενο και Σκοπός.....	17
1.2	Φάσεις Υλοποίησης .....	18
1.3	Οργάνωση του Τόμου .....	19
<b>2</b>	<b>ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ</b> .....	<b>21</b>
2.1	Εισαγωγή στα Μικροδίκτυα.....	21
2.1.1	Πλεονεκτήματα Μικροδικτύων .....	21
2.1.2	Δομή ενός Μικροδικτύου .....	22
2.1.3	Ζητήματα Μικροδικτύων.....	23
2.2	Προκλήσεις Διαχείρισης Φορτίου στα Μικροδίκτυα .....	23
2.2.1	Ο Ρόλος των Μικροδικτύων στην Ενεργειακή Διαχείριση .....	23
2.2.2	Στρατηγικές και Τεχνολογίες Διαχείρισης Ενέργειας στα Μικροδίκτυα.....	24
2.2.3	Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας .....	24
2.3	Κίνητρα για την Διαχείριση Φορτίων στα Μικροδίκτυα.....	25
2.3.1	Βέλτιστη Διαχείριση Φορτίου στα Μικροδίκτυα.....	25
2.3.2	Οφέλη της Διαχείρισης Φορτίου .....	26
2.3.3	Η Συμβολή της Τεχνητής Νοημοσύνης και των Αναδυόμενων Τεχνολογιών στη Διαχείριση Φορτίου .....	26
<b>3</b>	<b>ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ</b> .....	<b>28</b>
3.1	Σύγχρονες Μελέτες.....	28
3.2	Συμβολή της Διπλωματικής Εργασίας .....	28
<b>4</b>	<b>ΥΛΙΚΟ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ</b> .....	<b>30</b>
4.1	Περιγραφή προβλήματος-Αλγορίθμου .....	30
4.1.1	Στόχος του Προβλήματος .....	30
4.1.2	Προσδιορισμός των Ευέλικτων Φορτίων .....	31
4.1.3	Διαδικασία Αλληλεπίδρασης Χρήστη και Συστήματος.....	31
4.1.4	Αντικειμενική Συνάρτηση .....	36
4.2	Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Διαχείρισης Ευέλικτων φορτίων.....	37
4.2.1	Εισαγωγή στον Αλγόριθμο Particle Swarm Optimazation .....	37
4.2.2	Χαρακτηριστικά και λειτουργία PSO.....	38
4.2.3	Παράμετροι και πλεονεκτήματα PSO .....	38
4.2.4	Διαχείριση Ευέλικτων Φορτίων μέσω της ενσωμάτωσης συστήματος Αποθήκευσης Ενέργειας.....	39
4.2.5	Εισαγωγή στον Δυναμικό Προγραμματισμό .....	40

4.2.6	Βασικές Αρχές και Συστατικά του Δυναμικού Προγραμματισμού .....	41
4.3	Υλοποίηση προσαρμοσμένου Particle Swarm Optimazation και Δυναμικού Προγραμματισμού (DP) για την διαχείριση Ευέλικτων φορτίων .....	42
4.3.1	Υλοποίηση Αλγορίθμου Particle Swarm Optiminization(PSO) .....	42
4.3.2	Εφαρμογή του Δυναμικού Προγραμματισμού στη Διαχείριση λειτουργίας της Μπαταρίας.....	47
4.3.3	Κρίσιμα σημεία του κώδικα για την υλοποίηση του Δυναμικού Προγραμματισμού (DP).....	48
<b>5</b>	<b>ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>50</b>
5.1	Προσδιορισμός Διαφορετικών Εκδοχών Κώδικα για Εκτέλεση και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων .....	50
5.2	Προσδιορισμός Βασικού Σεναρίου Χρήσης Ευέλικτων Φορτίων.....	51
5.3	Αποτελέσματα από την Εκτέλεση Διαφορετικών Εκδοχών του κώδικα .....	52
5.3.1	‘Basic’ Version .....	52
5.3.2	‘PV-Optimized Swarm’ Version .....	55
5.3.3	‘Ready algorithm with battery’ Version .....	60
5.3.4	‘Matched algorithm with battery’ Version .....	67
5.4	Ανάλυση και Συγκριτική Αξιολόγηση της Επίδρασης Διαφορετικών παραμέτρων n_particles και n_iterations στις Διαφορετικές Εκδοχές κώδικα .....	72
5.5	Συγκριτική Ανάλυση Διαφορετικών Μεγίστων Χωρητικοτήτων Μπαταρίας (B_max) 74	
5.6	Συγκριτική Αξιολόγηση Εποχιακής Επίδρασης στην Απόδοση του Συστήματος ....	76
<b>6</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ .....</b>	<b>80</b>
6.1	Συμπεράσματα .....	80
6.2	Προτάσεις Εξέλιξης.....	81
<b>7</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>83</b>

## Πίνακας Εκθεμάτων

Εικόνα 1-Δομή ενός Μικροδικτύου [14] .....	22
Εικόνα 2-Ψευδοκώδικας για τις συναρτήσεις 'get_flexible_load_identifiers' και τη 'get_flexible_load_input'.....	32
Εικόνα 3-Ψευδοκώδικας για τον περιορισμό των ωρών λειτουργίας κάθε Ευέλικτου Φορτίου .....	33
Εικόνα 4-Ψευδοκώδικας για τον περιορισμό του επιτρεπόμενου χρονικού εύρους λειτουργίας του κάθε Ευέλικτου Φορτίου .....	33
Εικόνα 5-Παράδειγμα διαδικασίας αλληλεπίδρασης μεταξύ του χρήστη και του συστήματος .....	34
Εικόνα 6-Ψευδοκώδικας για την δημιουργία particle ( πιθανές λύσεις του προβλήματος) ..	42

Εικόνα 7-Ψευδοκώδικας για την επανάληψη κάθε particle στο σμήνος .....	43
Εικόνα 8-Ψευδοκώδικας για τον τρόπο ενημέρωσης των ταχυτήτων κάθε particle .....	43
Εικόνα 9-Ψευδοκώδικας για τον τρόπο ενημέρωσης των θέσεων κάθε particle .....	44
Εικόνα 10-Ψευδοκώδικας για την διαδικασία που πραγματοποιείται για την εύρεση της καλύτερης θέσης ενός particle .....	45
Εικόνα 11-Ψευδοκώδικας για αρχικοποίηση των p_best, g_best και g_best_cost στα πλαίσια υλοποίησης του προσαρμοσμένου Particle Swarm Optimization .....	46
Εικόνα 12-Ψευδοκώδικας για την διαδικασία που πραγματοποιείται για την εύρεση της παγκόσμιας καλύτερης θέσης μεταξύ των particle .....	46
Εικόνα 13-Ψευδοκώδικας για την υλοποίηση της συνάρτησης calculated_table που χρησιμοποιείται στον Δυναμικό Προγραμματισμό (DP) .....	48
Εικόνα 14-Δεδομένα Εισόδου για την εκτέλεση της 'Basic' Version .....	53
Εικόνα 15-Διαγράμματα αποτελεσμάτων για τις μεταβλητές Daily Costs , Energy Consumption, Energy Sell μετά την εκτέλεση της 'Basic' Version .....	53
Εικόνα 16-Διαγράμματα για τις μέσες τιμές των μεταβλητών Daily Costs , Energy Consumption, Energy Sell μετά την εκτέλεση της 'Basic' Version .....	54
Εικόνα 17-Δεδομένα Εισόδου για την εκτέλεση της 'PV-Optimized Swarm' Version .....	56
Εικόνα 18-Προτεινόμενη λύση του σεναρίου που εξετάζουμε για την 'PV-Optimized Swarm' Version.....	57
Εικόνα 19-Διαγράμματα αποτελεσμάτων για τις μεταβλητές Daily Costs, Energy Consumption, Energy Sell μετά την εκτέλεση της 'PV-Optimized Swarm' Version .....	57
Εικόνα 20-Διαγράμματα για τις μέσες τιμές των μεταβλητών Daily Costs , Energy Consumption, Energy Sell μετά την εκτέλεση της 'PV-Optimized Swarm' Version .....	58
Εικόνα 21-Διάγραμμα για τους, Energy Efficiency και Sell-Back, δείκτες στην 'PV-Optimized Swarm' Version .....	59
Εικόνα 22-Προτεινόμενη λύση για το σενάριο που εξετάζουμε όταν εκτελούμε τον κώδικα της 'Ready Algorithm with Battery' Version .....	61
Εικόνα 23-Διαγράμματα αποτελεσμάτων για τις μεταβλητές Daily Costs, Energy Consumption, Energy Sell μετά την εκτέλεση της 'Ready Algorithm with Battery' Version ...	61
Εικόνα 24-Διαγράμματα για τις μέσες τιμές των μεταβλητών Daily Costs, Energy Consumption, Energy Sell μετά την εκτέλεση της 'Ready Algorithm with Battery' Version ...	62
Εικόνα 25-Διάγραμμα για τους, Energy Efficiency και Sell-Back, δείκτες στην 'Ready Algorithm with Battery' Version .....	63
Εικόνα 26-Προτεινόμενος ωριαίος προσδιορισμός της στάθμης της μπαταρίας , για διάστημα 30 ημερών, όταν εκτελούμε τον κώδικα της 'Ready Algorithm with Battery' Version.....	64
Εικόνα 27-Συνεχές γράφημα για την στάθμη της μπαταρίας, για το 1 <sup>ο</sup> 10ήμερο των 30 ημερών, όταν εκτελούμε τον κώδικα της 'Ready Algorithm with Battery' Version .....	65
Εικόνα 28-Συνεχές γράφημα για την στάθμη της μπαταρίας, για το 2ο 10ήμερο των 30 ημερών, όταν εκτελούμε τον κώδικα της 'Ready Algorithm with Battery' Version .....	65
Εικόνα 29-Συνεχές γράφημα για την στάθμη της μπαταρίας, για το 3ο 10ήμερο των 30 ημερών, όταν εκτελούμε τον κώδικα της 'Ready Algorithm with Battery' Version .....	65
Εικόνα 30-Απομόνωση των διακυμάνσεων της στάθμης της μπαταρίας για 2 τυχαίες ημέρες για την κατανόηση του 1ου μοτίβου που εντοπίστηκε .....	66
Εικόνα 31-Απομόνωση των διακυμάνσεων της στάθμης της μπαταρίας για 2 τυχαίες ημέρες για την κατανόηση του 2ου μοτίβου που εντοπίστηκε .....	67

Εικόνα 32-Προτεινόμενη λύση για το σενάριο που εξετάζουμε όταν εκτελούμε τον κώδικα της 'Matched Algorithm with Battery' Version.....	68
Εικόνα 33-Διαγράμματα αποτελεσμάτων για τις μεταβλητές Daily Costs, Energy Consumption, Energy Sell μετά την εκτέλεση της 'Matched Algorithm with Battery' Version .....	68
Εικόνα 34-Διαγράμματα για τις μέσες τιμές των μεταβλητών Daily Costs, Energy Consumption, Energy Sell μετά την εκτέλεση της 'Matched Algorithm with Battery' Version .....	69
Εικόνα 35-Διάγραμμα για τους, Energy Efficiency και Sell-Back, δείκτες στην 'Matched Algorithm with Battery' Version .....	70
Εικόνα 36-Προτεινόμενος ωριαίος προσδιορισμός της στάθμης της μπαταρίας , για διάστημα 30 ημερών, όταν εκτελούμε τον κώδικα της 'Matched Algorithm with Battery' Version.....	71
Εικόνα 37-Συνεχές γράφημα για την στάθμη της μπαταρίας, για το 1 <sup>ο</sup> 10ήμερο των 30 ημερών, όταν εκτελούμε τον κώδικα της 'Matched Algorithm with Battery' Version.....	71
Εικόνα 38-Συνεχές γράφημα για την στάθμη της μπαταρίας, για το 2 <sup>ο</sup> 10ήμερο των 30 ημερών, όταν εκτελούμε τον κώδικα της 'Matched Algorithm with Battery' Version.....	72
Εικόνα 39-Συνεχές γράφημα για την στάθμη της μπαταρίας, για το 3 <sup>ο</sup> 10ήμερο των 30 ημερών, όταν εκτελούμε τον κώδικα της 'Matched Algorithm with Battery' Version.....	72
Εικόνα 40-Συγκριτική ανάλυση αποτελεσμάτων για τις μεταβλητές Daily Costs, Energy Consumption και Energy Sell όταν η μέγιστη χωρητικότητα της μπαταρίας είναι 100 και 200 .....	75
Εικόνα 41-Συγκριτική ανάλυση για τους χρόνους εκτέλεσης όταν η μέγιστη χωρητικότητα της μπαταρίας είναι 100 και 200 .....	75
Εικόνα 42-Συγκριτικό γράφημα για την μεταβλητή Daily Costs κατά την καλοκαιρινή και χειμερινή περίοδο.....	77
Εικόνα 43-Συγκριτικό γράφημα για την μεταβλητή Energy Consumption κατά την καλοκαιρινή και χειμερινή περίοδο .....	77
Εικόνα 44-Συγκριτικό γράφημα για την μεταβλητή Energy Sell κατά την καλοκαιρινή και χειμερινή περίοδο.....	78

## Πίνακες Αποτελεσμάτων

Πίνακας 1-Παρουσίαση Ευέλικτων Φορτίων .....	31
Πίνακας 2-Συγκριτική αριθμητική ανάλυση μεταξύ της 'Basic' Version και της 'PV-Optimized Swarm' Version .....	59
Πίνακας 3-Συγκριτική αριθμητική ανάλυση μεταξύ της 'PV-Optimized Swarm' Version και της 'Ready Algorithm with Battery' Version.....	63
Πίνακας 4-Συγκριτική αριθμητική ανάλυση μεταξύ της 'Ready Algorithm with Battery' Version και της 'Matched Algorithm with Battery' Version .....	69
Πίνακας 5-Συγκριτική αριθμητική ανάλυση της 'PV-Optimized Swarm' Version για μεγαλύτερες τιμές των n_particles και n_iterations .....	73
Πίνακας 6-Συγκριτική αριθμητική ανάλυση της 'Ready Algorithm with Battery' Version για μεγαλύτερες τιμές των n_particles και n_iterations .....	73
Πίνακας 7-Συγκριτική αριθμητική ανάλυση της 'Matched Algorithm with Battery' Version για μεγαλύτερες τιμές των n_particles και n_iterations .....	74



# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Αντικείμενο και Σκοπός

Η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί θεμέλιο λίθο της σύγχρονης κοινωνίας καθώς αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της καθημερινής ζωής, της τεχνολογικής προόδου και της οικονομικής ευημερίας (1). Στα τέλη του 19ου και στις αρχές του 20ού αιώνα, ο ηλεκτρισμός χρησιμοποιήθηκε κυρίως για την παροχή ενέργειας σε θεμελιώδεις-βασικές υπηρεσίες. Την εποχή εκείνη, η αποδοτικότητα δεν ήταν η προτεραιότητα καθώς η ζήτηση ήταν σχετικά χαμηλή και η ενέργεια θεωρούνταν πολυτέλεια. Η παραγωγή ενέργειας γινόταν κυρίως από ορυκτά καύσιμα (2). Ωστόσο, αυτός ο τρόπος παραγωγής ενέργειας σύντομα δημιούργησε κάποιες ανησυχίες, όχι μόνο λόγω της περιορισμένης ποσότητας των ορυκτών πόρων στην φύση αλλά και λόγω των σημαντικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, όπως η ρύπανση και οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (3).

Αυτή η αυξανόμενη περιβαλλοντική ανησυχία υπογράμμισε την ανάγκη για πιο αποδοτικές μεθόδους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η πορεία προς τη βελτίωση της αποδοτικότητας ξεκίνησε με τη μετάβαση από τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα στην υιοθέτηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (4). Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η υδροηλεκτρική, η ηλιακή και η αιολική, αποτελούν σημαντικό βήμα προς την επίτευξη βιώσιμων ενεργειακών λύσεων (4).

Με την πάροδο του χρόνου, η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας αυξήθηκε δραματικά λόγω της αυξανόμενης κοινωνικής ανάπτυξης, η οποία συνεπάγεται αυξημένο όγκο φορτίων που πρέπει να εξυπηρετηθούν (5). Τα φορτία αυτά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες, τα ευέλικτα και τα σταθερά. Το παρόν έργο επικεντρώνεται ιδιαίτερα στα ευέλικτα φορτία λόγω της σημαντικής επίδρασής τους στις διακυμάνσεις του κόστους. Σε αυτό το πλαίσιο τόσο οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, που δεν ξεχωρίζουν μόνο για τα περιβαλλοντικά τους οφέλη, όσο και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας αναδεικνύονται καθοριστικά στην προσπάθεια να περιοριστεί το κόστος.

Στην παρούσα μελέτη, πρωταρχικός στόχος είναι η μείωση του κόστους σε συστήματα με υψηλή κατανάλωση ενέργειας. Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιήθηκαν θεμελιώδεις γνώσεις αλγορίθμων (π.χ. Particle Swarm Optimization- PSO) που αποκτήθηκαν στα πρώτα ακαδημαϊκά εξάμηνα στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών (ΣΗΜΜΥ) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ) αλλά και μέθοδοι όπως ο Δυναμικός Προγραμματισμός (DP), που εισάγονται στο μάθημα επιλογής Συστήματα Αποφάσεων της ροής Διοίκησης και Απόφασης (Ροή Ο) ίδιας σχολής. Οπότε, επιδιώκεται η ανάπτυξη κώδικα που με βάση τις απαιτήσεις του χρήστη θα συντελεί στη πολυπόθητη μείωση του κόστους. Επιπλέον, ο άρτιος τρόπος της υλοποίησης του κώδικα εξασφαλίζει ότι μελλοντικοί ερευνητές μπορούν εύκολα μέσω του επαναδιορισμού της αντικειμενικής συνάρτησης να διερευνήσει διαφορετικές μεταβλητές, πέραν του κόστους, σε παρόμοια συστήματα καθιστώντας τον ουσιαστικά ένα εργαλείο για τρέχουσες και μελλοντικές ερευνητικές

προσπάθειες. Αυτή η ευελιξία του παρόντος έργου ανοίγει το δρόμο όχι μόνο για την αντιμετώπιση του άμεσου στόχου της μείωσης του κόστους, αλλά και για να θέσει τις βάσεις για μεταγενέστερες μελέτες, συμβάλλοντας ενδεχομένως σε περαιτέρω εξέλιξη στον τομέα.

## 1.2 Φάσεις Υλοποίησης

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε κατά την περίοδο Ιούνιος 2023-Φεβρουάριος 2024 σύμφωνα με την διαδικασία που αναλύεται παρακάτω και περιλαμβάνει 8 φάσεις:

Φάση 1: Κατά την διάρκεια της πρώτης φάσης, έγινε μία ενδελεχής μελέτη του συνόλου δεδομένων που δόθηκαν από τον επιβλέπων καθηγητή με σκοπό την κατανόηση της δομής τους, του περιεχομένου τους αλλά και των πιθανών εφαρμογών τους. Αφού καθορίστηκε ο σκοπός της έρευνας και προσδιορίστηκε ο βέλτιστος τρόπος αξιοποίησης των παρεχόμενων δεδομένων, το επόμενο βήμα ήταν να καθοριστεί η αντικειμενική συνάρτηση. Η αντικειμενική συνάρτηση καθίστανται ο θεμελιώδης στόχος που καθοδηγεί ολόκληρη την διπλωματική εργασία.

Φάση 2: Με την αντικειμενική συνάρτηση σαφώς καθορισμένη, το επόμενο βήμα περιλάμβανε μια εκτεταμένη ανασκόπηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας για τον εντοπισμό των καταλληλότερων αλγορίθμων και μεθόδων την εύρεση λύσης που να προσεγγίζει όσο το δυνατόν περισσότερο τη βέλτιστη. Μελετήθηκε ένα ευρύ φάσμα πηγών, συμπεριλαμβανομένων ακαδημαϊκών εργασιών (paper), οδηγώντας στην επιλογή του αλγορίθμου Particle Swarm Optimization (PSO) και της μεθόδου του Δυναμικού Προγραμματισμού (DP). Οι επιλογές αυτές έγιναν με βάση την αποτελεσματικότητα και την αποδεδειγμένη επιτυχία τους σε παρόμοια προβλήματα.

Φάση 3: Σε αυτή την φάση, κατέστη απαραίτητο να οριστούν τα φορτία που θα εξεταστούν στη μελέτη. Η διαδικασία αυτή δεν περιλάμβανε μόνο τον προσδιορισμό των φορτίων (π.χ. Water heater), αλλά και της ποσότητας ενέργειας που απαιτείται για τη λειτουργία του καθενός (μέση ωριαία κατανάλωση). Επιπλέον, ο καθορισμός των τιμών τόσο για την αγορά όσο και για την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας ήταν ύψιστης σημασίας για τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης. Αυτά τα δεδομένα συγκεντρώθηκαν και μετατράπηκαν σε αρχεία δεδομένων, τα οποία αποτέλεσαν την είσοδο για τη αλγοριθμική υλοποίηση.

Φάση 4: Η τέταρτη φάση σηματοδότησε την υλοποίηση του θεμελιώδους μοντέλου του προβλήματος, η οποία εστιάζει αποκλειστικά στη ζήτηση ενέργειας χωρίς να ενσωματώνει πηγές παραγωγής ενέργειας αλλά ούτε συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Στην εκδοχή αυτή, η λειτουργία των φορτίων καθορίζεται σύμφωνα με τις προτιμήσεις των καταναλωτών χωρίς την εφαρμογή του αλγορίθμου Particle Swarm Optimization (PSO) ή του Δυναμικού Προγραμματισμού (DP).

Φάση 5: Αρχική πρόθεση ήταν να χρησιμοποιηθεί μια έτοιμη υλοποίηση του PSO προσβάσιμη μέσω βιβλιοθήκης της Python, αλλά αντ' αυτού επιλέχθηκε να αναπτυχθεί επιπλέον μια ειδικά σχεδιασμένη υλοποίηση προσαρμοσμένη στις ειδικές ανάγκες της

μελέτης. Αυτή η προσαρμογή διατήρησε τις βασικές αρχές του PSO, αλλά τροποποιήθηκε ελαφρά ώστε να ενσωματώσει τα μοναδικά χαρακτηριστικά του προβλήματος. Ταυτόχρονα, υλοποιήθηκε και η μέθοδος του Δυναμικού Προγραμματισμού.

Φάση 6: Στην αλγοριθμική υλοποίηση ενσωματώθηκε τόσο ο προσαρμοσμένος αλγόριθμος PSO, που αναφέρθηκε νωρίτερα, όσο και η έτοιμη υλοποίηση του PSO μέσω της βιβλιοθήκης της Python. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε και η υλοποίηση του Δυναμικού Προγραμματισμού που είναι υπεύθυνος για την διαχείριση λειτουργίας του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρία). Αυτή η φάση της υλοποίησης ήταν ζωτικής σημασίας καθώς ο σωστός προσδιορισμός των προδιαγραφών του κώδικα καθώς και η ενσωμάτωση περιορισμών είναι απαραίτητη ώστε να υπάρξει μια πιο ολοκληρωμένη συγκριτική ανάλυση.

Φάση 7: Η εκτέλεση των διαφορετικών εκδοχών κώδικα στο πλαίσιο ενός καθορισμένου σεναρίου επέτρεψε να συγκεντρωθούν δεδομένα για βασικές μεταβλητές του προβλήματος, τα οποία στη συνέχεια αναλύθηκαν και παρουσιάστηκαν με τη μορφή πινάκων και διαγραμμάτων. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν ποικίλες προσαρμογές σε σταθερές της υλοποίησης ( $n\_particles$ ,  $n\_iterations$ ,  $B\_max$ ) με σκοπό να εξεταστεί η επίδρασή τους στα αποτελέσματα, τα οποία και αυτά αναλύθηκαν και παρουσιάστηκαν με τη μορφή πινάκων και διαγραμμάτων. Η οπτική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην επεξήγηση των αποτελεσμάτων, στην ανάδειξη μοτίβων και στην εξαγωγή ουσιαστικών συμπερασμάτων από τη μελέτη.

Φάση 8: Στην τελευταία φάση έγινε εξαγωγή ορισμένων βασικών συμπερασμάτων που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της μελέτης, αλλά και διαπίστωση των προοπτικών που διαφαίνονται από την περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων της.

### 1.3 Οργάνωση του Τόμου

Αρχικά, υπάρχει μία σύντομη περίληψη της διπλωματικής εργασίας, στην οποία παρουσιάζονται συνοπτικά τα κύρια σημεία της. Η περίληψη αυτή υπάρχει και στην Αγγλική γλώσσα. Στην συνέχεια ακολουθούν οι πίνακες περιεχομένων και, τέλος, ακολουθεί το κύριο σώμα της διπλωματικής εργασίας, που αποτελείται από 6 κεφάλαια.

Παρακάτω περιγράφεται συνοπτικά το περιεχόμενο κάθε κεφαλαίου.

- Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται το αντικείμενο, ο σκοπός, αλλά και οι φάσεις υλοποίησης της εργασίας.
- Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στη θεωρία των μικροδικτύων, και αναφέρονται οι προκλήσεις και τα κίνητρα για τη διαχείριση φορτίων σε αυτά.
- Το τρίτο κεφάλαιο χρησιμεύει ως συνοπτική επισκόπηση των βασικών διατριβών που επηρέασαν σημαντικά την εργασία. Στη συνέχεια, επεξηγείται η συμβολή της διπλωματικής εργασίας στην διαχείριση ενέργειας.

- Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά της προσέγγισης που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση των διαφορετικών εκδοχών κώδικα που θα δώσουν λύση στο πρόβλημα.
- Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των διαφορετικών εκδοχών που υλοποιήθηκαν για ένα βασικό σενάριο.
- Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα κυριότερα συμπεράσματα και οι προοπτικές που προέκυψαν από την παρούσα μελέτη.

## 2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

### 2.1 Εισαγωγή στα Μικροδίκτυα

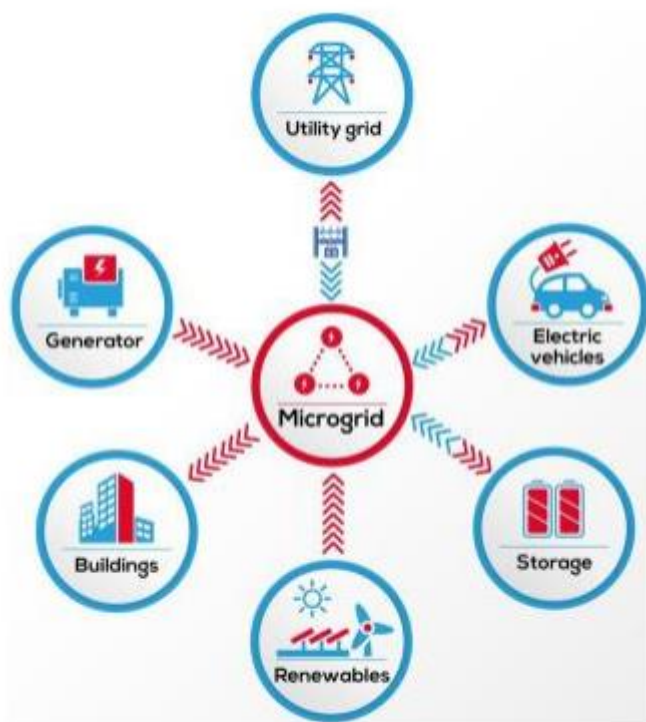
Η καθημερινότητα των ανθρώπων εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την ενέργεια. Η διαθεσιμότητα επαρκούς ενέργειας, ιδίως ηλεκτρικής ενέργειας, είναι απαραίτητη για την κοινωνική ευημερία και την πρόοδο (6). Η ποσότητα ενέργειας που καταναλώνεται αυξάνεται παράλληλα με την αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού και την τεράστια πρόοδο της βιομηχανίας και της τεχνολογίας. Οι συμβατικοί ενεργειακοί πόροι όπως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο δεν μπορούν να καλύψουν τις απαιτήσεις για ενέργεια (7). Κατά συνέπεια, η διαχείριση ενέργειας και η βιωσιμότητα αποτελούν ένα φλέγων ζήτημα στο οποίο πρέπει να βρεθεί λύση άμεσα.

#### 2.1.1 Πλεονεκτήματα Μικροδικτύων

Τα μικροδίκτυα, τα οποία έχουν προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον, προσφέρουν μια πιθανή επιλογή καθώς η ανθρωπότητα παλεύει καθημερινά με ζητήματα που σχετίζονται με την ενεργειακή ασφάλεια, την κλιματική αλλαγή και την ανάγκη για καινοτομία στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα μικροδίκτυα (microgrids) είναι αυτόνομα ηλεκτρικά συστήματα που παράγουν, αποθηκεύουν και διανέμουν ηλεκτρική ενέργεια για να καλύψουν τις ανάγκες των τοπικών κοινοτήτων (8). Αποτελούν φάρο καινοτομίας στα τοπικά ενεργειακά συστήματα, ενισχύοντας την αξιοπιστία, την αποδοτικότητα, τη βιωσιμότητα και, κυρίως, προσφέροντας δυνατότητες μείωσης του κόστους. Με την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τα μικροδίκτυα όχι μόνο μειώνουν τις απώλειες μετάδοσης και γίνονται οικολογικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας, αλλά βελτιστοποιούν επίσης τη χρήση των τοπικών ενεργειακών πόρων, οδηγώντας σε χαμηλότερο λειτουργικό κόστος και μειωμένες δαπάνες για ενεργειακές υποδομές (9).

Κατά τη διάρκεια απρόβλεπτων γεγονότων όπως οι φυσικές καταστροφές, τα μικροδίκτυα παραμένουν ανθεκτικά, προστατεύοντας κρίσιμες υπηρεσίες και ελαχιστοποιώντας τις λειτουργικές διακοπές τόσο για τις επιχειρήσεις όσο και για τα νοικοκυριά. Επιπλέον, συμβάλλουν στην ευρωστία του γενικού ηλεκτρικού δικτύου, προσφέροντας βασικές υπηρεσίες για τη διατήρηση της τάσης και της συχνότητας (10). Τα μικροδίκτυα συντελούν καθοριστικό ρόλο στην ενεργοποίηση αγροτικών και απομονωμένων τοποθεσιών, παρέχοντας σταθερή ηλεκτρική ενέργεια όπου η επέκταση του κύριου δικτύου δεν είναι οικονομικά αποδοτική, συμβάλλοντας στην πορεία προς την ενεργειακή αυτονομία και ανθεκτικότητα. Τα μικροδίκτυα, επίσης έχουν διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στην υποστήριξη και την ενίσχυση των δυνατοτήτων των ενεργειακών κοινοτήτων δημιουργώντας ένα "ευνοϊκό πλαίσιο" που προωθεί και διευκολύνει σημαντικά την ανάπτυξη καθαρών ενεργειακών πόρων (11). Οι κοινότητες αυτές έχουν αποκαλύψει σημαντικές δυνατότητες για την ενεργειακή μετάβαση, προσφέροντας αυξημένη ευελιξία, διασυνδεσιμότητα, αμφίδρομες ενεργειακές ροές και συνεργατικές σχέσεις μεταξύ διαφορετικών πηγών ενέργειας. Η

ανάλυση ενός συνόλου δεδομένων που περιλαμβάνει 67 υποδειγματικές περιπτώσεις σε 18 χώρες καταδεικνύει έμπρακτα τον καθοριστικό ρόλο και τα οφέλη των ενεργειακών κοινοτήτων στη διαμόρφωση ενός βιώσιμου παγκόσμιου ενεργειακού τοπίου (12). Μέσω της υποστήριξης και της ενίσχυσης αυτών των κοινοτήτων, τα μικροδίκτυα έχουν συμβάλει καθοριστικά στην προώθηση ενός πιο αποδοτικού και βιώσιμου ενεργειακού οικοσυστήματος παγκοσμίως. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, τα μικροδίκτυα κερδίζουν έδαφος τόσο στις ανεπτυγμένες όσο και στις αναπτυσσόμενες χώρες (13).



Εικόνα 1-Δομή ενός Μικροδικτύου (14)

### 2.1.2 Δομή ενός Μικροδικτύου

Ένα τυπικό μικροδίκτυο, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1 αποτελείται από πηγές παραγωγής ενέργειας, συμπεριλαμβάνοντας τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (π.χ. ηλιακά πάνελ, ανεμογεννήτριες κ.λπ.). Προκειμένου να διατηρηθεί η αποτελεσματικότητα και η σταθερότητα στη ροή και τη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας, διαθέτουν εξελιγμένους μηχανισμούς ελέγχου και συστήματα αποθήκευσης. Τα μικροδίκτυα είναι αρκετά ευέλικτα ώστε να λειτουργούν ανεξάρτητα ή σε συνδυασμό με ένα μεγαλύτερο δίκτυο, ανάλογα με τις ανάγκες και τους στόχους (15).

### 2.1.3 Ζητήματα Μικροδικτύων

Τα μικροδίκτυα βρίσκονται στο προσκήνιο προσφέροντας μια σειρά από πλεονεκτήματα, τα οποία αναφέρθηκαν και παραπάνω, ωστόσο αντιμετωπίζουν και μια σειρά προκλήσεων που μετριάζουν την ευρεία υιοθέτησή τους. Μία από τις πρωταρχικές προκλήσεις είναι η ενσωμάτωση ετερογενών πηγών ενέργειας. Τα μικροδίκτυα συνδυάζουν διάφορες μορφές κατανεμημένων ενεργειακών πόρων (Distributed Energy Resources - DERs) όπως ηλιακή, αιολική κ.λπ. με συμβατική παραγωγή (γεννήτριες). Είναι επιτακτική ανάγκη να υπάρχουν εξελιγμένοι μηχανισμοί ελέγχου που να μπορούν να εναρμονίσουν αυτές τις ανόμοιες πηγές χωρίς να θέσουν σε κίνδυνο τη σταθερότητα του ηλεκτρικού συστήματος και του συστήματος ελέγχου του μικροδικτύου (15). Αναζητούνται ακόμα λύσεις για ζητήματα όπως η διαχείριση σφαλμάτων, ο συγχρονισμός φάσεων και η ποιότητα ισχύος.

Επιπλέον, ξεχωριστό ενδιαφέρον έχει η αποτίμηση επιπτώσεων των μικροδικτύων στο περιβάλλον, η οποία καθίστανται ιδιαίτερα σημαντική όταν τα μικροδίκτυα ενσωματώνουν μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τα μικροδίκτυα έχουν την δυνατότητα να μειώσουν σημαντικά τις εκπομπές βλαβερών αερίων μόνο μέσω των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, για να το πετύχουν, όμως, αυτό προϋποθέτει ότι η ανάπτυξη των μικροδικτύων λαμβάνει υπόψη τον πλήρη περιβαλλοντικό αντίκτυπο του κύκλου ζωής αλλά και τα χαρακτηριστικά καθενός από τα εξαρτήματα του συστήματος, όπως μπαταρίες, ηλιακά πάνελ κ.λπ. (16).

Συμπερασματικά, τα μικροδίκτυα αντιπροσωπεύουν μια σημαντική αλλαγή στον τρόπο με τον οποίο αντιλαμβάνεται κάποιος την παραγωγή και τη διανομή ενέργειας. Το μέλλον των μικροδικτύων φαίνεται πολλά υποσχόμενο με τις συνεχείς εξελίξεις στο τομέα της τεχνολογίας, τη μείωση του κόστους των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την αυξανόμενη ευαισθητοποίηση σε θέματα βιωσιμότητας (17). Τα μικροδίκτυα είναι έτοιμα να διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στην ενεργειακή μετάβαση προς ένα πιο αξιόπιστο και βιώσιμο σύστημα. Η πολυπλοκότητα ενός συνεχώς εξελισσόμενου ενεργειακού τοπίου απαιτεί τη πλήρη κατανόηση των μικροδικτύων και των δυνατοτήτων τους. Το ταξίδι προς ένα πιο αξιόπιστο και βιώσιμο ενεργειακό σύστημα βρίσκεται σε εξέλιξη.

## 2.2 Προκλήσεις Διαχείρισης Φορτίου στα Μικροδίκτυα

### 2.2.1 Ο Ρόλος των Μικροδικτύων στην Ενεργειακή Διαχείριση

Η βασική διαφορά μεταξύ του κύριου δικτύου και του μικροδικτύου είναι ότι στο κύριο δίκτυο, το φορτίο είναι ανεξέλεγκτο και ο βέλτιστος προγραμματισμός μπορεί να εξεταστεί μόνο για την πλευρά της παραγωγής ώστε να ικανοποιεί αυτή τη μεταβλητή ζήτηση, ενώ στο μικροδίκτυο οι μονάδες παραγωγής και το φορτίο μπορούν να θεωρηθούν ως μία ενιαία οντότητα, δηλαδή μπορούν να διαχειρίζονται τόσο την παραγωγή όσο και την κατανάλωση ενέργειας πιο διαδραστικά και ολοκληρωμένα,

επιτρέποντας το βέλτιστο οικονομικό προγραμματισμό (18). Εύκολα συμπεραίνεται ότι η αποτελεσματική διαχείριση των φορτίων είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχημένη λειτουργία των μικροδικτύων.

Τα συστήματα αυτά γίνονται ολοένα και πιο πολύπλοκα. Οι προκλήσεις σχετικά με την εξισορρόπηση προσφοράς-ζήτησης και βελτιστοποίησης της αποθήκευσης ενέργειας γίνονται ακόμα μεγαλύτερες. Σε αντίθεση με τους συμβατικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες, έχοντας ως αποτέλεσμα τις διακυμάνσεις στην παραγωγή ενέργειας που πρέπει να προβλεφθούν και να διαχειριστούν (19). Αυτή η μεταβλητότητα εισάγει ένα επίπεδο αβεβαιότητας που δεν αντιμετωπίζουν τα παραδοσιακά συστήματα ισχύος, με τη σταθερή και προβλέψιμη παραγωγή τους.

### 2.2.2 Στρατηγικές και Τεχνολογίες Διαχείρισης Ενέργειας στα Μικροδίκτυα

Η δυναμική εξισορρόπηση της προσφοράς και της ζήτησης περιλαμβάνει όχι μόνο την πρόβλεψη των προτύπων κατανάλωσης αλλά και την πρόβλεψη των αλλαγών στην παραγωγή λόγω της μεταβλητότητας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (19). Ως αποτέλεσμα, κρίνεται αναγκαίο τα μικροδίκτυα να χρησιμοποιούν εξελιγμένες στρατηγικές για να είναι ικανά να προβλέψουν και να ανταποκριθούν σε αυτές τις διακυμάνσεις, διασφαλίζοντας μια ισορροπία μεταξύ της ενέργειας που καταναλώνουν οι χρήστες της ενέργειας που λαμβάνεται τόσο από ανανεώσιμες όσο και από συμβατικές πηγές.

Το ζητούμενο είναι να διατηρηθεί μια σταθερή και αξιόπιστη παροχή ενέργειας, διασφαλίζοντας ότι το μικροδίκτυο μπορεί να ικανοποιεί τις απαιτήσεις των χρηστών του ανά πάσα στιγμή, ανεξάρτητα από τις συνθήκες που υπάρχουν. Οι προηγμένοι αλγόριθμοι πρόβλεψης και τα συστήματα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο είναι ζωτικής σημασίας σε αυτή την προσπάθεια, επιτρέποντας στα μικροδίκτυα να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις σχετικά με το πότε να αποθηκεύουν ενέργεια, πότε να την απελευθερώνουν και πώς να την κατανέμουν πιο αποτελεσματικά μεταξύ των καταναλωτών. Για παράδειγμα, σε περιόδους υπερβολικής παραγωγής, η ενέργεια μπορεί να εκτραπεί σε συστήματα αποθήκευσης, όπως μπαταρίες, για μελλοντική χρήση. Αντίθετα, σε περιόδους υψηλής ζήτησης ή χαμηλής παραγωγής, η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να απελευθερωθεί για να διατηρήσει μια σταθερή προσφορά.

### 2.2.3 Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας

Η αποθήκευση ενέργειας είναι ένα κρίσιμο συστατικό της επιτυχημένης διαχείρισης φορτίου στα μικροδίκτυα, καθώς παρέχεται ως ρυθμιστής που μπορεί να εξομαλύνει τις ασυνέπειες της παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Οι μονάδες αποθήκευσης είναι συσκευές, οι οποίες υποστηρίζουν την ενεργειακή διαχείριση του συστήματος στα non-dispatchable συστήματα, αποθηκεύοντας την αχρησιμοποίητη

ενέργεια κατά την πλεονάζουσα παραγωγή, η οποία μπορεί αργότερα να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη της ζήτησης (20).

Στο πλαίσιο των συσκευών αποθήκευσης, η μπαταρία είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη λόγω της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας και του μειούμενου κόστους (20). Ωστόσο, οι μπαταρίες λόγω των δυσμενών επιπτώσεων που προκαλούν στο περιβάλλον μειονεκτούν σε σχέση με αλλά συστήματα αποθήκευσης.

Ένα άλλο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας είναι η pumped hydro storage, όπου η λειτουργία τους εξαρτάται από την εκάστοτε περιοχή (21). Στις αρχές της δεκαετίας του 2000, αυτή η τεχνολογία εμφανίστηκε ξανά ως μια οικονομικά και τεχνολογικά αποδεκτή επιλογή για το peak load shaving και την αποθήκευση αιολικής και ηλιακής ενέργειας (22). Παρόλο που παρέχει μια μεγάλης κλίμακας και αρκετά αποτελεσματική λύση αποθήκευσης, η μεταβολή των φυσικών τοπίων μπορεί να έχει σημαντικές οικολογικές επιπτώσεις και να απαιτεί σημαντικές αρχικές δαπάνες. Είναι κρίσιμο να επιλυθούν αυτά τα ζητήματα με πρωτοβουλίες που έχουν ως στόχο την περιβαλλοντική αποκατάσταση και γενικότερα μακροπρόθεσμα οφέλη.

Επίσης, σημαντικό είναι να αναφερθούν οι υπερπυκνωτές που έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος, γρήγορη φόρτιση/εκφόρτιση, μεγάλη διάρκεια ζωής και προστασία του περιβάλλοντος (23). Η ικανότητά τους να απελευθερώνουν γρήγορα ενέργεια τους καθιστά ιδανικούς για εφαρμογές που απαιτούν βραχυπρόθεσμες διακυμάνσεις ενέργειας.

Κατά τη σύγκριση των διαφόρων μεθόδων αποθήκευσης ενέργειας, καθίσταται σαφές ότι η καθεμία έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και ζητήματα. Οι υπερπυκνωτές προτιμώνται συχνά για την ενεργειακή τους πυκνότητα και τις χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αλλά η επιλογή του συστήματος αποθήκευσης εξαρτάται από την εκάστοτε περίπτωση και τις απαιτήσεις της.

## **2.3 Κίνητρα για την Διαχείριση Φορτίων στα Μικροδίκτυα**

### **2.3.1 Βέλτιστη Διαχείριση Φορτίου στα Μικροδίκτυα**

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η βέλτιστη διαχείριση φορτίου στα μικροδίκτυα είναι ζωτικής σημασίας τόσο περιβαλλοντικά όσο και οικονομικά. Περιλαμβάνει τη στρατηγική κατανομή των φορτίων και της παραγόμενης ενέργειας ώστε να βελτιώσει την αποδοτικότητα, την βιωσιμότητα και την αξιοπιστία. Η βέλτιστη διαχείριση φορτίου μειώνει τις ενεργειακές απώλειες, εξασφαλίζοντας την αποδοτικότερη κατανομή ενέργειας μεταξύ πηγών και φορτίων (24). Έτσι, βοηθά το σύστημα να λειτουργεί σχεδόν με μέγιστη αποδοτικότητα και να βελτιστοποιεί τη χρήση των πόρων, δίνοντας κατά βάση προτεραιότητα στις ανανεώσιμες πηγές. Αυτή η στρατηγική ωφελεί στη μείωση του κόστους που απαιτείται για αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Η αποδοτική χρήση ενέργειας σημαίνει χαμηλότερο λειτουργικό κόστος για το μικροδίκτυο.

### 2.3.2 Οφέλη της Διαχείρισης Φορτίου

Όσον αφορά τα οικονομικά οφέλη, η διαχείριση φορτίου συμβάλλει στην εξοικονόμηση κόστους, ελαχιστοποιώντας την ανάγκη για ‘ακριβή’ ενέργεια στις ώρες αιχμής. Συντελεί στην αναβολή της ανάγκης για νέες επενδύσεις σε υποδομές και δημιουργεί πιθανά έσοδα (π.χ. πώληση πλεονάζουσας ισχύος) (25). Αυτό σημαίνει όχι μόνο μια πιθανή μείωση του ενεργειακού κόστους αλλά και τη δυνατότητα κέρδους από μία πιθανή προσαρμογή των προτύπων κατανάλωσης ενέργειας.

Επιπρόσθετα, με την μείωση της ζήτησης σε περιόδους αιχμής και την καλύτερη διαχείριση των πόρων, η διαχείριση φορτίου ενισχύει την αξιοπιστία της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας και αυξάνει την ανθεκτικότητα των μικροδικτύων σε διαταραχές, εξασφαλίζοντας σταθερή παροχή ενέργειας (26). Η διαχείριση φορτίου έχει θετικό αντίκτυπο και στο περιβάλλον. Μειώνει σημαντικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και τους ρύπους, με τη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (27). Αυτό οδηγεί σε ένα πιο βιώσιμο και φιλικό προς το περιβάλλον ενεργειακό σύστημα.

### 2.3.3 Η Συμβολή της Τεχνητής Νοημοσύνης και των Αναδυόμενων Τεχνολογιών στη Διαχείριση Φορτίου

Η ανάλυση δεδομένων αλλά και η τεχνητή νοημοσύνη συνέβαλαν στη διαχείριση φορτίου επιτρέποντας ακριβή και αυτόνομα συστήματα. Αυτές οι τεχνολογίες μπορούν να προβλέπουν τα επίπεδα ζήτησης, να βελτιστοποιούν τη διανομή ενέργειας και να βελτιώνουν συνεχώς τις στρατηγικές που ακολουθούν, συντελώντας στην αποδοτικότερη λειτουργία των μικροδικτύων.

Ο ρόλος των αναδυόμενων τεχνολογιών, μέσω διαφόρων τεχνικών, παίζουν σημαντικό ρόλο για την διαχείριση του φορτίου. Η συνεχής εξέλιξη στους αλγόριθμους και την ανάλυση δεδομένων έχει επηρεάσει σημαντικά την αποτελεσματικότητα και την ικανότητα διαχείρισης φορτίου στα μικροδικτύα. Πιο συγκριμένα σε μία μελέτη οι ερευνητές εξέτασαν τη χρήση ευφών αλγορίθμων για τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης των πόρων εντός των μικροδικτύων (28). Εφάρμοσαν αλγόριθμους τεχνητής νοημοσύνης και ειδικότερα χρησιμοποίησαν τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης Al-Biruni earth radius (BER) με σκοπό τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και του κόστους, διασφαλίζοντας παράλληλα ότι η άνεση των χρηστών παρέμενε ανεπηρέαστη. Τα ευρήματα της μελέτης αναδεικνύουν σημαντική εξοικονόμηση κόστους, επιτυγχάνοντας έως και 48,45% μείωση των δαπανών ηλεκτρικής ενέργειας με τη στρατηγική μετατόπισης του φορτίου από τις περιόδους αιχμής σε περιόδους εκτός αιχμής.

Σε μια άλλη έρευνα (29), χρησιμοποιήθηκε ευρετικός αλγόριθμος βασισμένος ‘on the clustering algorithm for fuzzy c-means’ σε συνδυασμό με αλγόριθμο που αναλύει, διάφορες εισροές και συνθήκες εντός του ενεργειακού συστήματος που βασίζεται σε ανανεώσιμες πηγές, και καθορίζει τις καταλληλότερες ενέργειες για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος. Απαιτούνται, όμως, προσαρμογές σε σφάλματα τάσης

και συχνότητας. Τα αποτελέσματα δείχνουν σημαντική μείωση των περιπτώσεων που χαρακτηρίζονται είτε από έλλειμμα είτε από πλεόνασμα ενέργειας. Η εφαρμογή αυτής της προσέγγισης σε πραγματικές εγκαταστάσεις υπόσχεται να βελτιώσει την οικονομική αποδοτικότητα αυτών των συστημάτων.

Διευρύνοντας την έρευνά, παρουσιάζεται μία μελέτη που προτείνει μια υβριδική προσέγγιση που συνδυάζει τη διαχείριση της ζήτησης (DSM) και τα multi-agent systems (MAS), στα πλαίσια της διαχείρισης ενέργειας σε οικιακά, εμπορικά και βιομηχανικά μικροδίκτυα (30). Για το πρόβλημα βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης Antlion έχοντας ως στόχο τη μεγιστοποίηση του load factor και την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους των καταναλωτών. Τα αποτελέσματα υπογραμμίζουν την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης τεχνικής καθώς μειώνει τόσο το ενεργειακό κόστος όσο και τις απαιτήσεις ενέργειας στις ώρες αιχμής.

Συμπερασματικά, η βέλτιστη εξισορρόπηση φορτίου, οι προηγμένοι αλγόριθμοι και οι αναδυόμενες τεχνολογίες συμβάλλουν στη συνολική αποδοτικότητα και βιωσιμότητα λειτουργίας των μικροδικτύων. Φαנερώνουν ένα πολλά υποσχόμενο μέλλον για τη δυναμική και αποτελεσματική διαχείριση των ενεργειακών πόρων στα μικροδίκτυα. Αυτές οι καινοτομίες δεν θέτουν μόνο ως προτεραιότητα την περιβαλλοντική βιωσιμότητα, αλλά στοχεύουν στην ενίσχυση και της οικονομικής βιωσιμότητας επηρεάζοντας άμεσα το κόστος. Τέλος, η ενσωμάτωση έξυπνων τεχνολογιών στα μικροδίκτυα οδηγεί σε μειωμένη εξάρτηση από δαπανηρές μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μειώνοντας έτσι το ενεργειακό κόστος για τους καταναλωτές.

## 3 Σύγχρονες Σχετικές Μελέτες

### 3.1 Σύγχρονες Μελέτες

Εν μέσω της κλιμάκωσης του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας και της ενεργειακής κρίσης που επιδεινώνεται από τις γεωπολιτικές εντάσεις, ιδίως από τη σύγκρουση μεταξύ Ρωσίας και Ουκρανίας, η ανάγκη για εύρεση αποτελεσματικών λύσεων για τη διαχείριση της ενέργειας είναι πιο αναγκαία από ποτέ. Αυτή η κατάσταση λειτούργησε ως κίνητρο για το ξεκίνημα της έρευνας. Η αναζήτηση της βέλτιστης προσέγγισης καθορίστηκε από την λεπτομερή ανάλυση μελετών που συμβαδίζουν με τους στόχους της εργασίας. Η παρούσα έρευνα με αυτό το τρόπο κατευθύνεται προς την ανεύρεση των αλγορίθμων και τεχνικών βελτιστοποίησης που είναι οι πιο αποδοτικοί.

Στο επίκεντρο βρέθηκε μια πρωτοποριακή μελέτη που εισήγαγε ένα μοντέλο διαχείρισης ενέργειας στο πλαίσιο των έξυπνων δικτύων. Το μοντέλο αυτό είχε ως στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση που περιλαμβάνει τόσο την παραγωγή όσο και την κατανάλωση ενέργειας. Εξετάζει, επίσης διάφορα στοιχεία, όπως το δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας καθώς και οικιακές συσκευές. Η υλοποίηση του μοντέλου γίνεται με ένα μαθηματικό-ευρετικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης που βασίζεται στο Mixed Integer Linear Programming (MILP) σχεδιασμένος με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνει το στόχο του (31).

Εμπλουτίζοντας περαιτέρω το ερευνητικό φάσμα, εντοπίστηκε μια μελέτη που αναδεικνύει στρατηγική ελέγχου αποθήκευσης ενέργειας βασισμένη στην μέθοδο του Δυναμικού Προγραμματισμού (DP). Η μέθοδος αυτή συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους μέσω της στρατηγικής φόρτισης και εκφόρτισης των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Η μέθοδος του Δυναμικού Προγραμματισμού όπως αποδεικνύεται έχει την ικανότητα να διαχειρίζεται αποτελεσματικά την πολυπλοκότητα του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, προσπαθώντας ταυτόχρονα να ελαχιστοποιήσει το κόστος και να μεγιστοποιήσει το κέρδος (32).

Σημαντικό ρόλο στην έρευνα διαδραμάτισε η ανάλυση μιας εργασίας που επικεντρώνεται στη διαχείριση της ζήτησης μέσω της μετατόπισης φορτίου. Αυτή η καινοτόμος προσέγγιση, που περιλαμβάνει τη τεχνική μετατόπισης φορτίου, μοντελοποιείται μαθηματικά ως πρόβλημα ελαχιστοποίησης μιας αντικειμενικής συνάρτησης. Η επίλυση αυτής της σύνθετης πρόκλησης αξιοποιεί τον Evolutionary Algorithm (EA) που βασίζεται σε ευρετικές μεθόδους, αποδεικνύοντας την ευελιξία των ευρετικών μεθόδων σε γενικότερα θέματα διαχείρισης ενέργειας (33).

### 3.2 Συμβολή της Διπλωματικής Εργασίας

Αξιοποιώντας τις γνώσεις που έχουν συγκεντρωθεί από το τομέα της διαχείρισης της ενέργειας, η παρούσα διατριβή επιδιώκει να γεφυρώσει με καινοτόμο τρόπο τα κενά που εντοπίζονται στην υπάρχουσα βιβλιογραφία, εισάγοντας μια ολοκληρωμένη

προσέγγιση για τη διαχείριση της ενέργειας. Η λεπτομερής ανάλυση προηγούμενων εργασιών συνέβαλε καθοριστικά στη διαμόρφωση της προσέγγισης στο πολύπλευρο πρόβλημα της διαχείρισης ενέργειας, ανοίγοντας το δρόμο για μια λύση που όχι μόνο στοχεύει στη μείωση του κόστους, από την κατανάλωση ενέργειας, αλλά και στην προώθηση της βιωσιμότητας.

Ένα από τα σημαντικότερα κενά που εντοπίζονται στη βιβλιογραφία είναι η ελλιπής αξιοποίηση του αλγορίθμου Particle Swarm Optimazation(PSO) ως μία στρατηγική ενεργειακής διαχείρισης. Παρά την ευρεία εφαρμογή ευρετικών αλγορίθμων, τα μοναδικά πλεονεκτήματα του PSO δεν έχουν αξιοποιηθεί πλήρως. Η παρούσα μελέτη αναδεικνύει τα πλεονεκτήματα του PSO, ιδίως όσον αφορά την ικανότητά του να προσαρμόζει και να βελτιστοποιεί προβλήματα διαχείρισης ενέργειας. Είναι χαρακτηριστικό ότι, σε αντίθεση με τις περισσότερες διατριβές που βασίζονται σε έτοιμες υλοποιήσεις αλγορίθμων μέσω βιβλιοθηκών της εκάστοτε γλώσσα προγραμματισμού, η παρούσα εργασία αναλαμβάνει την ανάπτυξη μιας προσαρμοσμένης υλοποίησης του αλγορίθμου PSO. Αυτή η προσέγγιση όχι μόνο ενισχύει τη δυνατότητα εφαρμογής του αλγορίθμου στο συγκεκριμένο πρόβλημα, αλλά συνεισφέρει ένα πολύτιμο εργαλείο στην ερευνητική κοινότητα, διευκολύνοντας μελλοντικές μελέτες σε παρόμοιους τομείς.

Η καινοτομία επεκτείνεται στην ενσωμάτωση Δυναμικού Προγραμματισμού για τη φόρτιση και την εκφόρτιση της μπαταρίας, μια στρατηγική που έχει αποδειχθεί ότι είναι επωφελής. Συνδυάζοντας, λοιπόν, τον αλγόριθμο PSO με την μέθοδο του Δυναμικού Προγραμματισμού προκύπτει μια πρωτοφανής μεθοδολογία, η οποία δεν έχει διερευνηθεί ακόμη. Αυτός ο συνδυασμός υπόσχεται να αποκαλύψει νέες γνώσεις σχετικά με την αποδοτικότητα της διαχείρισης ενέργειας.

Τέλος, το παρών έργο είναι ένα κρίσιμο βήμα προς την κατεύθυνση της αντιμετώπισης των προκλήσεων που θέτει το σημερινό ενεργειακό τοπίο, με στόχο ένα μέλλον όπου η διαχείριση της ενέργειας θα είναι τόσο οικονομικά αποδοτική όσο και περιβαλλοντικά συνειδητή, καθιστώντας τον χρήστη στο επίκεντρο. Έτσι, προσφέρεται ένα μοντέλο που ενσωματώνει ενεργά τους χρήστες στη διαδικασία διαχείρισης της ενέργειας.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν αναλύονται πιο λεπτομερώς η υλοποίηση του αλγορίθμου PSO και της μεθόδου του Δυναμικού Προγραμματισμού, οι περιορισμοί που τέθηκαν καθώς και τα αποτελέσματα του κώδικα εκτελώντας ένα πραγματικό σενάριο.

## 4 Υλικό και Μέθοδοι

### 4.1 Περιγραφή προβλήματος-Αλγόριθμου

#### 4.1.1 Στόχος του Προβλήματος

Στο θεωρητικό κομμάτι διαπιστώθηκε η σημασία της βέλτιστης διαχείρισης των ευέλικτων φορτίων στα μικροδίκτυα, υπογραμμίζοντας τα πολύπλευρα πλεονεκτήματα που προσφέρει η εν λόγω διαχείριση όσον αφορά την αποδοτικότητα, την αξιοπιστία, τη βιωσιμότητα και τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας. Πριν αναφερθούν πιο εκτενώς οι τεχνικές βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν ορίζεται το πρόβλημα στο οποίο πρέπει να βρεθεί βέλτιστη λύση.

Το βασικό πρόβλημα ορίζεται με πρωταρχικό στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας που οι καταναλωτές είναι υποχρεωμένοι να καταβάλλουν στις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας. Για να επιτευχθεί ο κύριος στόχος, το πρόβλημα εστιάζει στον αποτελεσματικό προγραμματισμό των ευέλικτων φορτίων σε χρονικό εύρος ημέρας ή ημερών, ο οποίος περιλαμβάνει και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας. Η ενσωμάτωση ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας είναι κομβικής σημασίας. Εισάγει μία δυναμική διάσταση στη διαχείριση του μικροδικτύου, επιτρέποντας τη χρονική μετατόπιση της κατανάλωσης ενέργειας και την αξιοποίηση της παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές με βέλτιστο τρόπο. Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην εξισορρόπηση της προσφοράς και της ζήτησης λειτουργώντας ως ρυθμιστικό στοιχείο που ενισχύει τόσο την οικονομική όσο και τη λειτουργική αποδοτικότητα του μικροδικτύου.

Για την αντιμετώπιση αυτού του πολύπλοκου προβλήματος βελτιστοποίησης χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Particle Swarm Optimazation (PSO) και η μέθοδος του Δυναμικού Προγραμματισμού (DP). Ο αλγόριθμος PSO επιλέγεται για την αποτελεσματικότητά του στην εύρεση βέλτιστων λύσεων σε πολύπλοκους, πολυδιάστατους χώρους αναζήτησης, γεγονός που τον καθιστά κατάλληλο για τον ευέλικτο προγραμματισμό των φορτίων καθημερινά για μεγάλο χρονικό εύρος.

Από την άλλη πλευρά, ο Δυναμικός Προγραμματισμός (DP) χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της βέλτιστης στρατηγικής φόρτισης και εκφόρτισης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρία). Δεδομένης της ικανότητάς του να αναλύει μια πολύπλοκη διαδικασία λήψης αποφάσεων σε απλούστερα, διαδοχικά στάδια, ο Δυναμικός Προγραμματισμός επιτρέπει τον πιο αποδοτικό τρόπο χρήσης της μπαταρίας σε κάθε χρονική στιγμή.

Με την ενσωμάτωση αυτού του αλγορίθμου και της μεθόδου, η έρευνα αποσκοπεί στην κατασκευή μιας ολοκληρωμένης προσέγγισης που όχι μόνο μειώνει το κόστος για τους καταναλωτές αλλά θα ενισχύει τη βιωσιμότητα και την αξιοπιστία της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.

#### 4.1.2 Προσδιορισμός των Ευέλικτων Φορτίων

Αρχικά, υπάρχουν τα σταθερά φορτία που οδηγούν σε σταθερή κατανάλωση, αντιπροσωπεύοντας τη βασική ζήτηση, η οποία παρέχεται σε κιλοβατώρες (kWh) για κάθε ώρα της ημέρας. Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν τα ευέλικτα φορτία όπου επιδιώκεται η καταλληλότερη επιλογή θέσης για την τοποθέτηση τους εντός της ημέρας. Παρακάτω, παρουσιάζονται τα ευέλικτα φορτία που επιλέχθηκαν μαζί με τη μέση ωριαία κατανάλωση τους (31):

Ονομασία στο αρχείο εισόδου	Συσκευή	Μέση Ωριαία Κατανάλωση (kWh)
FlexibleLoad1	Water Heater	1.7
FlexibleLoad2	Dish Water	1.7
FlexibleLoad3	EVs	8
FlexibleLoad4	Refrigator	0.175
FlexibleLoad5	Washing machine	1.8
FlexibleLoad6	Other flexible loads	3

Πίνακας 1-Παρουσίαση Ευέλικτων Φορτίων

#### 4.1.3 Διαδικασία Αλληλεπίδρασης Χρήστη και Συστήματος

##### 4.1.3.1 Επιλογή Ευέλικτου Φορτίου

Όσον αφορά τα δεδομένα εισόδου για τη διαχείριση των ευέλικτων φορτίων, ο χρήστης αλληλοεπιδρά άμεσα με το σύστημα. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ένα ή περισσότερα από τα διαθέσιμα φορτία, δηλώνοντας την επιλογή του μέσω της πληκτρολόγησης του αντίστοιχου αριθμού του επιθυμητού φορτίου στο προβλεπόμενο πλαίσιο εισαγωγής. Στον κώδικα, ενσωματώνεται μια λειτουργία ελέγχου που διασφαλίζει την έγκυρη είσοδο του χρήστη. Αν ο χρήστης καταχωρήσει έναν αριθμό που δεν αντιστοιχεί σε κάποιο από τα διαθέσιμα ευέλικτα φορτία, τότε το σύστημα θα εμφανίζει ένα μήνυμα λάθους και θα ζητά από τον χρήστη να ξαναεπιλέξει ένα από τα προσφερόμενα ευέλικτα φορτία.

Για την υλοποίηση αυτού του περιορισμού, χρησιμοποιούμε δύο συναρτήσεις: τη 'get\_flexible\_load\_identifiers' και τη 'get\_flexible\_load\_input'. Η 'get\_flexible\_load\_identifiers', επιστρέφει μια λίστα με τα αναγνωριστικά όλων των διαθέσιμων ευέλικτων φορτίων. Η 'get\_flexible\_load\_input', καλεί τον χρήστη να καταχωρήσει τα ευέλικτα φορτία που επιθυμεί να χρησιμοποιήσει και ελέγχει αν οι εισαγόμενοι αριθμοί αντιστοιχούν σε ήδη υπάρχοντα φορτία βάσει του καταλόγου που λαμβάνεται από την 'get\_flexible\_load\_identifiers'. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ληφθούν έγκυροι αριθμοί flexible load. Οι δύο αυτές συναρτήσεις 'συνεργάζονται' για

να διασφαλίσουν ότι οι χρήστες μπορούν να επιλέξουν μόνο από τα διαθέσιμα ευέλικτα φορτία που έχουν οριστεί, αποφεύγοντας τυχόν σφάλματα επιλογής ανύπαρκτων φορτίων. Παρακάτω ακολουθεί απόσπασμα του κώδικα που υλοποιεί το συγκεκριμένο σκοπό:

Function: Get Flexible Load Identifiers

Input: filename of a CSV file

Output: a list of flexible load identifiers

1. Read the CSV file into a DataFrame.
2. Extract the first column of the DataFrame, which contains the flexible load identifiers.
3. Add the column's header to the beginning of the list of identifiers.
4. Return the list of flexible load identifiers.

Function: Get Flexible Load Input from User

Input: a list of flexible load identifiers

Output: a list of valid flexible load numbers input by the user

1. Repeat indefinitely:
  - a. Prompt the user to enter flexible load numbers separated by spaces.
  - b. Split the input string into a list of numbers.
  - c. Initialize a flag to indicate that the input is valid.
  - d. For each number in the list:
    - i. Check if the corresponding flexible load identifier exists in the list of identifiers.
      - ii. If an identifier does not exist, inform the user and set the validity flag to false.
      - iii. Break the loop if the input is invalid.
  - e. If all input numbers are valid, return the list of numbers.

Main Program Flow:

1. Retrieve the list of flexible load identifiers using the given CSV file path.
2. Request and validate flexible load numbers from the user based on the retrieved identifiers.

Εικόνα 2-Ψευδοκώδικας για τις συναρτήσεις 'get\_flexible\_load\_identifiers' και τη 'get\_flexible\_load\_input'

#### 4.1.3.2 Ώρες λειτουργίας κάθε Ευέλικτου Φορτίου

Αφού ο χρήστης επιλέξει τα ευέλικτα φορτία που επιθυμεί να λειτουργήσουν, το σύστημα τον καλεί να καταχωρήσει τον συνολικό αριθμό ωρών λειτουργίας που απαιτούνται για κάθε ένα από αυτά. Σε αυτό το στάδιο, υφίστανται περιορισμός στις συνολικές ώρες λειτουργίας για κάθε ευέλικτο φορτίο καθώς πρέπει να κυμαίνονται από 1 έως 23 ώρες. Αυτός ο κανόνας διασφαλίζει ότι οι ώρες λειτουργίας των ευέλικτων φορτίων παραμένουν εντός ενός ρεαλιστικού εύρους. Επίσης, η επιλογή 24 ωρών λειτουργίας ή περισσότερων απορρίπτεται από τον κώδικα, καθώς δεν επιτρέπεται να υπερβαίνει τον αριθμό των διαθέσιμων ωρών σε μια ημέρα, ο οποίος είναι 24.

```

For each flexible load number in the list of flexible load numbers:
  Repeat indefinitely:
    Prompt the user to enter the operating hours for the current flexible load (should be a
    number between 1 and 23).
    Read the user's input as an integer.

    If the input integer is between 1 and 23 (inclusive):
      Add the integer to the list of operating hours.
      Break out of the loop (input is valid).

    Else:
      Inform the user that the input is invalid and prompt them to enter a valid value
      (between 1 and 23).

```

Εικόνα 3-Ψευδοκώδικας για τον περιορισμό των ωρών λειτουργίας κάθε Ευέλικτου Φορτίου

#### 4.1.3.3 Χρονικός Περιορισμός

Ο χρήστης έχει, επίσης, τη δυνατότητα να καθορίσει το επιτρεπόμενο χρονικό εύρος λειτουργίας του κάθε ευέλικτου φορτίου. Εντός του επιτρεπόμενου διαστήματος επιλέγονται τελικά οι ώρες που λειτουργεί το κάθε flexible load.

```

Repeat indefinitely for each flexible load number in the list:
  Prompt the user to enter the start and end times for the current flexible load, which
  should be separated by a space.

  Try to:
    Read the user's input and split it into two integers, t1 and t2.

    If t1 is greater than or equal to 0, and less than t2, and t2 is less than or equal to 23:
      Add t1 to the start time list.
      Add t2 to the end time list.
      Break out of the loop (input is valid).

    Else:
      Inform the user that the input is invalid and ensure that  $0 \leq t1 < t2 \leq 23$ .

  If a ValueError occurs (input was not two integers):
    Inform the user that the input is invalid and request integer values for start and end
    times.

```

Εικόνα 4-Ψευδοκώδικας για τον περιορισμό του επιτρεπόμενου χρονικού εύρους λειτουργίας του κάθε Ευέλικτου Φορτίου

#### 4.1.3.4 Αρχεία εισόδου ζήτησης και παραγωγής ενέργειας

Το σύστημα ενσωματώνει δεδομένα σταθερής κατανάλωσης και παραγωγής ενέργειας, τα οποία παρέχονται σε κιλοβατώρες (kWh) για κάθε ώρα της ημέρας. Τα δεδομένα σταθερής κατανάλωσης προέρχονται, κυρίως, από τα σταθερά φορτία που υπάρχουν

στο σύστημα. Από την άλλη πλευρά, τα δεδομένα παραγωγής ενέργειας προκύπτουν από ανανεώσιμες πηγές όπως τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β), για αντιστάθμιση μέρους της ζήτησης. Είναι προκαθορισμένα εξαρχής και συμπεριλαμβάνονται ως είσοδο στο πρόγραμμα με την μορφή αρχείου .csv και όνομα αρχείων consumption και production, αντίστοιχα. Αυτά τα δεδομένα είναι ζωτικής σημασίας, καθώς επηρεάζουν άμεσα τη διαδικασία λήψης αποφάσεων για την κατανομή του φορτίου και τις στρατηγικές αποθήκευσης ενέργειας.

Τα δεδομένα παραγωγής ενέργειας και τα δεδομένα βασικής ζήτησης που δίνονται είναι δομημένα ως ωριαίες τιμές, δηλαδή για μία ημέρα υπάρχουν 24 διαφορετικά σημεία δεδομένων που αντιπροσωπεύουν κάθε ώρα της ημέρας. Αυτή η μορφή εκτείνεται σε πολλές ημέρες του έτους, προσφέροντας συσσωρευτικά μια ολοκληρωμένη ημερήσια και ετήσια προοπτική. Έτσι, ο χρήστης καλείται να δώσει μια αρχική ημερομηνία με σκοπό ο κώδικας να αρχικοποιήσει τις λίστες των μεταβλητών της ζήτησης και της παραγωγής. Επιπρόσθετα, ο χρήστης καλείται να καθορίσει το διάστημα των ημερών κατά το οποίο ο κώδικας θα εκτελεστεί, προκειμένου να αναζητήσει τον βέλτιστο προγραμματισμό.

#### 4.1.3.5 Παράδειγμα αλληλεπίδρασης χρήστη-συστήματος

Η διαδικασία αλληλεπίδρασης μεταξύ του χρήστη και του συστήματος είναι συνεχής, με στόχο την συλλογή των απαραίτητων δεδομένων εισόδου που θα επιτρέψουν την εκτέλεση του κώδικα. Αυτή η διαδικασία θα γίνει πλήρως κατανοητή μέσω του παρακάτω παραδείγματος, συμπεριλαμβάνοντας μια λεπτομερή ανάλυση των βημάτων που ακολουθήθηκαν:

```
Enter the flexible load numbers separated by space: 1 2 7
Flexible load 7 does not exist. Please enter valid load numbers.
Enter the flexible load numbers separated by space: 1 2
Enter the operating hours for flexible load 1 (1-23): 25
Invalid input. Please enter a value between 1 and 23.
Enter the operating hours for flexible load 1 (1-23): 2
Enter the start and end time (hour) for flexible load 1 (separated by space): 1 25
Invalid input. Please ensure that 0 <= t1 < t2 <= 23.
Enter the start and end time (hour) for flexible load 1 (separated by space): 1 23
Enter the operating hours for flexible load 2 (1-23): 2
Enter the start and end time (hour) for flexible load 2 (separated by space): 1 23
Enter the number of days to run the optimization: 2
Enter the initial date (YYYY-MM-DD): 2018-08-02
```

Εικόνα 5-Παράδειγμα διαδικασίας αλληλεπίδρασης μεταξύ του χρήστη και του συστήματος

- 1<sup>ο</sup> Βήμα: **Επιλογή ευέλικτου φορτίου**

Ο χρήστης πληκτρολογεί (1 7) όταν του ζητείται να επιλέξει τα ευέλικτα φορτία που επιθυμεί. Το σύστημα ενημερώνει τον χρήστη ότι το ευέλικτο φορτίο 7 δεν υπάρχει και ζητά να επιλέξει ξανά φορτία που υπάρχουν. Στη συνέχεια, ο χρήστης εισάγει σωστά ότι θέλει τα φορτία (1 2)

- **2° Βήμα: Εισαγωγή ωρών λειτουργίας κάθε φορτίου**

Για το φορτίο 1, ο χρήστης καλείται πρώτα να εισάγει τις ώρες λειτουργίας του και εισάγει το 25, το οποίο δεν είναι έγκυρο. Το σύστημα απαντά με μήνυμα σφάλματος ζητώντας μια τιμή μεταξύ 1 και 23. Στη συνέχεια, ο χρήστης εισάγει εκ νέου την τιμή 2, η οποία γίνεται αποδεκτή.

- **3° Βήμα: Εισαγωγή χρονικού περιορισμού για κάθε φορτίο**

Ο χρήστης καλείται να δώσει χρονικούς περιορισμούς για τις ώρες λειτουργίας κάθε φορτίου. Αρχικά εισάγει (1 25) για το φορτίο 1, η οποία είναι άκυρη, καθώς το άνω όριο υπερβαίνει τις συνολικές ώρες της ημέρας. Αφού του ζητηθεί ένα μήνυμα σφάλματος, ο χρήστης εισάγει το (1 23), το οποίο είναι εντός του έγκυρου εύρους και συνεπώς γίνεται αποδεκτό από το σύστημα. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για το φορτίο 2.

- **4° Βήμα: Εισαγωγή αριθμού ημερών**

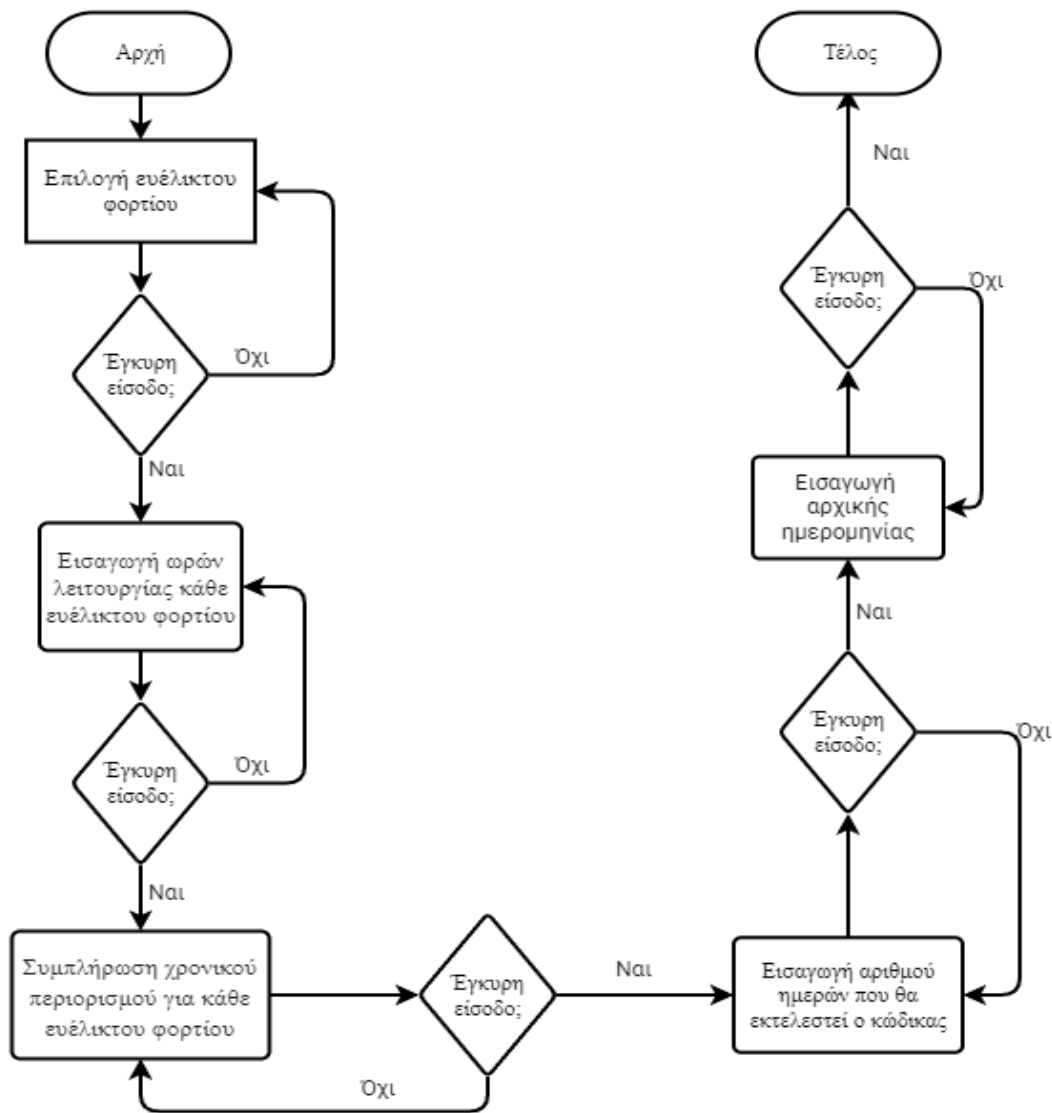
Ο χρήστης καλείται να εισάγει τον αριθμό των ημερών για τη βελτιστοποίηση και εισάγει 2. Ο χρήστης έχει την ελευθερία να επιλέξει το επιθυμητό χρονικό διάστημα, χωρίς περιορισμούς, για το οποίο ο κώδικας θα εκτελεστεί προκειμένου να παραχθούν τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης.

- **5° Βήμα: Εισαγωγή της αρχικής ημερομηνίας**

Ο χρήστης καλείται να δώσει την αρχική ημερομηνία για την έναρξη της βελτιστοποίησης και εισάγει 2018-08-02, η οποία έχει τη σωστή μορφή. Σε περίπτωση που ο χρήστης εισάγει λανθασμένη ημερομηνία, το σύστημα θα τον καλέσει να πληκτρολογήσει ξανά μια έγκυρη, αυτή τη φορά, ημερομηνία.

Αυτή η διαδικασία, περιλαμβανομένων όλων των προηγούμενων βημάτων, διενεργείται κάθε φορά που κάποιος επιθυμεί να τρέξει τον κώδικα. Είναι μια διαδικασία, σχεδιασμένη για να διασφαλίζει την ορθή εισαγωγή δεδομένων και την αποδοτικότερη λειτουργία του προγράμματος.

Το διάγραμμα ροής της παραπάνω διαδικασίας, που δημιουργήθηκε με τη βοήθεια της εφαρμογής Aspose (34), εμφανίζεται παρακάτω.



#### 4.1.4 Αντικειμενική Συνάρτηση

Επιπλέον, ένα από τα κρισιμότερα στοιχεία της παρούσας μελέτης είναι η ενσωμάτωση συστήματος αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρία), η οποία διέπεται από τις αρχές του Δυναμικού Προγραμματισμού. Η φόρτιση και εκφόρτιση της μπαταρίας σχεδιάζεται με κύριο στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους, λαμβάνοντας υπόψη τις μεταβαλλόμενες τιμές αγοράς και πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας. Οι τιμές αγοράς και πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας παρέχονται σε κιλοβατώρες ανά ευρώ (kWh/€) και είναι δομημένες ως ωριαίες τιμές, δηλαδή για μία ημέρα υπάρχουν 24 διαφορετικά σημεία δεδομένων που αντιπροσωπεύουν την τιμή (πώλησης ή αγοράς ενέργειας) για κάθε ώρα της ημέρας (35), (36). Είναι προκαθορισμένες εξαρχής και συμπεριλαμβάνονται ως είσοδο στο πρόγραμμα με την μορφή αρχείων .csv και ονόματα αρχείων hourly\_prices και hourly\_sales\_prices, αντίστοιχα.

Η αντικειμενική συνάρτηση, η οποία αποτελεί το επίκεντρο της παρούσας μελέτης και παρουσιάζεται παρακάτω, έχει σχεδιαστεί με τον στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους για τους καταναλωτές. Η καθημερινή μείωση του κόστους επιφέρει χαμηλότερες χρεώσεις για ένα διάστημα ημερών. Άρα:

$$MinZ = \sum_0^N \sum_{t=1}^T (C_g[t] * E_g[t] - C_{sell}[t] * E_{sold}[t])$$

Με:

T= {0,1...24},

N: Μέρους βελτιστοποίησης που επιθυμεί ο χρήστης

E<sub>g</sub>: Η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται από το δίκτυο την χρονική στιγμή t,

E<sub>sold</sub>: Η ηλεκτρική ενέργεια που πωλείται προς το δίκτυο την χρονική στιγμή t,

C<sub>g</sub>: Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται από το δίκτυο τη χρονική στιγμή t,

C<sub>sell</sub>: Η τιμή που πουλάμε την ενέργεια πλεονάζουσα ηλεκτρικής χρονική στιγμή t.

Συμπερασματικά, η παρούσα μελέτη παρουσιάζει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για τη διαχείριση ελαστικών φορτίων σε ένα μικροδίκτυο με τη χρήση του αλγόριθμου PSO (Particle Swarm Optimization), ο οποίος θα εξηγηθεί εκτενώς παρακάτω. Με την ενσωμάτωση της μεθόδου του Δυναμικού Προγραμματισμού για την αποθήκευση ενέργειας, η προτεινόμενη προσέγγιση στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του κόστους.

## 4.2 Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Διαχείρισης Ευέλικτων φορτίων

### 4.2.1 Εισαγωγή στον Αλγόριθμο Particle Swarm Optimazation

Στα πλαίσια της τεχνητής νοημοσύνης έχουν αναπτυχθεί διάφοροι αλγόριθμοι, όπως ο Particle Swarm Optimization (PSO) που επινοήθηκε από τους James Kennedy και Russell Eberhart το 1995 (37). Ο PSO και οι διάφοροι άλλοι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν να μιμούνται διεργασίες της φύσης, προσδοκούν να δώσουν λύσεις σε διάφορα προβλήματα που υπάρχουν.

Ο αλγόριθμος PSO χαρακτηρίζεται ως ένας εξελικτικός ευρετικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης, που βασίζει τη λειτουργία του στη μίμηση και την προσομοίωση των κοινωνικών χαρακτηριστικών μιας ομάδας ατόμων. Πιο συγκεκριμένα, εμπνεύστηκε από τον τρόπο που κινούνται συλλογικά τα σμήνη των πουλιών στον αέρα, ή τα κοπάδια των ψαριών στο νερό προς ένα συγκεκριμένο στόχο (38). Κάθε μέλος του σμήνους, που αναφέρεται ως 'particle', αντιπροσωπεύει μια πιθανή λύση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης (39). Αυτά τα σωματίδια κινούνται στον πολυδιάστατο

χώρο αναζήτησης του προβλήματος, προσαρμόζοντας τις θέσεις τους με βάση την δική τους εμπειρία αλλά και με βάση την εμπειρία των άλλων σωματιδίων του σμήνους.

#### 4.2.2 Χαρακτηριστικά και λειτουργία PSO

Κάθε σωματίδιο έχει δύο βασικά χαρακτηριστικά: τη θέση (position) και την ταχύτητα (velocity) (40). Η θέση αντιστοιχεί σε μια πιθανή λύση του προβλήματος και η διανυσματική ταχύτητα καθορίζει το μέτρο και την κατεύθυνση με την οποία θα κινηθεί το particle. Η κίνηση κάθε σωματιδίου επηρεάζεται από την προσωπική καλύτερη θέση (pbest) και την παγκόσμια καλύτερη θέση (gbest). Η pbest είναι η καλύτερη λύση που έχει επιτύχει ένα συγκεκριμένο σωματίδιο μέχρι στιγμής, ενώ η gbest είναι η καλύτερη λύση που έχει βρεθεί από ολόκληρο το σμήνος (41).

Παρακάτω θα αναλυθούν συνοπτικά τα βήματα που ακολουθεί ο αλγόριθμος PSO για να καταλήξει σε ένα πολύ ικανοποιητικό αποτέλεσμα:

1. Αρχικοποίηση: Τα σωματίδια τοποθετούνται τυχαία στο χώρο αναζήτησης και τους ανατίθενται αρχικές ταχύτητες.
2. Αξιολόγηση: Κάθε σωματίδιο αξιολογείται με βάση την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος και ανάλογα με τη τιμή που επιστρέφει η συνάρτηση κρίνεται αν η λύση είναι καλή ή όχι.
3. Ενημέρωση προσωπικής καλύτερης θέσης (pbest): Εάν η τρέχουσα θέση ενός σωματιδίου είναι καλύτερη από την δική του προσωπική καλύτερη θέση (pbest), η pbest αλλάζει τιμή και γίνεται ίση με την τρέχουσα θέση.
4. Ενημέρωση 'παγκόσμιας' καλύτερης θέσης (gbest): Η καλύτερη θέση μεταξύ όλων των σωματιδίων προσδιορίζεται και ορίζεται ως gbest
5. Ενημέρωση ταχύτητας (velocity) και θέσης (position): Κάθε σωματίδιο ενημερώνει την ταχύτητά του με βάση το pbest και το gbest του. Η ενημέρωση της ταχύτητας είναι ένας συνδυασμός της τρέχουσας ταχύτητας του σωματιδίου, της απόστασης από το pbest και της απόστασης από το gbest. Στη συνέχεια, το σωματίδιο μετακινείται σε μια νέα θέση με βάση την ενημερωμένη ταχύτητά του.
6. Επανάληψη: Τα βήματα 2-5 επαναλαμβάνονται για έναν καθορισμένο αριθμό επαναλήψεων ή μέχρι να ικανοποιηθεί ένα κριτήριο σύγκλισης.

#### 4.2.3 Παράμετροι και πλεονεκτήματα PSO

Ο αλγόριθμος PSO περιλαμβάνει έναν αριθμό διαφορετικών παραμέτρων που ρυθμίζουν τη συμπεριφορά και την αποτελεσματικότητα του στη βελτιστοποίηση ενός προβλήματος. Οι παράμετροι αυτοί είναι (42):

- $n\_particles$ : αντιπροσωπεύει τον αριθμό των σωματιδίων στο σμήνος.
- $n\_iterations$ : καθορίζει τον αριθμό των επαναλήψεων (ή των χρονικών βημάτων) που θα εκτελεστεί ο αλγόριθμος.
- Βάρος αδράνειας ( $w$ ): Ελέγχει τον αντίκτυπο της προηγούμενης ταχύτητας ενός σωματιδίου στην τρέχουσα ταχύτητά του, παρέχοντας μια ισορροπία μεταξύ global and local exploration.

- Γνωστική συνιστώσα (c1): Αντικατοπτρίζει την τάση του σωματιδίου να επιστρέψει στο pbest του.
- Κοινωνική συνιστώσα (c2): Αντικατοπτρίζει την τάση του σωματιδίου να κινηθεί προς το gbest.

Η απόφαση να επιλεγεί ο PSO έναντι άλλων διαθέσιμων αλγορίθμων επηρεάστηκε από τα ξεκάθαρα πλεονεκτήματά του. Ο PSO φημίζεται για την ευκολία εφαρμογής του, καθώς είναι σχετικά απλός στην κατανόηση και την εφαρμογή του, ακόμη και για πολύπλοκα προβλήματα. Η απλότητα αυτή συμπληρώνεται περαιτέρω από το γεγονός ότι απαιτεί ρύθμιση λίγων μόνο παραμέτρων, καθιστώντας τη βελτιστοποίηση λιγότερο δυσχερή και πιο αποτελεσματική σε σύγκριση με άλλους.

Συμπερασματικά, η ικανότητα του PSO να ψάχνει και να βρίσκει αποτελεσματικές λύσεις σε πολύπλοκους, πολυδιάστατους χώρους αναζήτησης το καθιστά ένα ισχυρό ‘εργαλείο’ βελτιστοποίησης. Η εφαρμογή του στα μικροδίκτυα αντιπροσωπεύει έναν μόνο από τους πολλούς τομείς όπου ο PSO μπορεί να προσφέρει σημαντικά οφέλη. Καθώς τα μικροδίκτυα και άλλα συστήματα γίνονται πιο πολύπλοκα, η προσαρμοστικότητα και η αποτελεσματικότητα του PSO διασφαλίζουν ότι παραμένει ένας μηχανισμός στην αναζήτηση εύρεσης βέλτιστης λύσης.

#### 4.2.4 Διαχείριση Ευέλικτων Φορτίων μέσω της ενσωμάτωσης συστήματος Αποθήκευσης Ενέργειας

Η ενσωμάτωση ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, και συγκεκριμένα μιας μπαταρίας, στο συγκεκριμένο ζήτημα διαχείρισης φορτίου αποτελεί στρατηγική βελτίωση. Αρχικά, η λογική πίσω από την εισαγωγή ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας έγκειται στην ικανότητά του να αποθηκεύει την πλεονάζουσα ενέργεια που παράγεται κατά τις περιόδους αιχμής της παραγωγής (43). Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συχνά παράγουν ενέργεια με κυμαινόμενο και απρόβλεπτο τρόπο (44) λόγω της εξάρτησής τους από τις εκάστοτε περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως αποδεικνύεται από τα δεδομένα παραγωγής που δόθηκαν. Σε περιόδους που η παραγωγή υπερβαίνει τη ζήτηση, η πλεονάζουσα ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί στη μπαταρία. Αντίθετα, σε περιόδους χαμηλής παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη της ζήτησης (43), εξασφαλίζοντας έτσι μια συνεπή και αξιόπιστη παροχή ενέργειας.

Ο ρόλος της μπαταρίας στη μετατόπιση φορτίου είναι ιδιαίτερα σημαντικός. Η μετατόπιση φορτίου αναφέρεται στη στρατηγική μετακίνηση της κατανάλωσης ενέργειας από το εκάστοτε φορτίο από περιόδους υψηλής ζήτησης σε περιόδους χαμηλότερης ζήτησης (45). Με τη χρήση της αποθηκευμένης ενέργειας από τη μπαταρία σε περιόδους υψηλής ζήτησης, θα μειωθεί η εξάρτηση από τις παραδοσιακές πηγές ενέργειας (δίκτυο ηλεκτροδότησης). Αυτό συμβάλλει στη βελτιστοποίηση του κόστους, καθώς οι τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας συνήθως ποικίλλουν κατά τη διάρκεια της ημέρας, με υψηλότερες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας στις ώρες αιχμής (46).

Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά και τις παραμέτρους της μπαταρίας, η χωρητικότητα αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που πρέπει να οριστεί. Η

βελτιστοποίηση της χωρητικότητας και της λειτουργίας της μπαταρίας μπορεί να συμβάλει στη μεγιστοποίηση των οφελών και της σταθερότητας των ενεργειακών συστημάτων (47), (48). Η χωρητικότητα μιας μπαταρίας καθορίζει πόση ενέργεια μπορεί να αποθηκεύσει, επηρεάζοντας το πόσο αποτελεσματικά μπορεί να 'συμπληρώσει' τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Για την επιλογή κατάλληλης χωρητικότητας μιας μπαταρίας για ένα σύστημα ενέργειας πρέπει να ληφθεί υπόψη το προφίλ ισχύος που 'αντιμετωπίζει' η μπαταρία (49). Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει παράγοντες όπως:

- Περίοδοι υψηλής και χαμηλής ζήτησης: Σε περιόδους υψηλής ζήτησης, η μπαταρία μπορεί να πρέπει να παρέχει περισσότερη ενέργεια για να καλύψει το έλλειμμα, ενώ κατά τις περιόδους χαμηλής ζήτησης, η μπαταρία μπορεί να φορτίζεται από το δίκτυο ή από την περίσσεια ενέργειας.
- Διακυμάνσεις στην παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας: Ειδικά σε συστήματα που ενσωματώνουν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας το προφίλ ισχύος μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τις συνθήκες του καιρού και την ώρα της ημέρας.
- Στόχοι του συστήματος διαχείρισης ενέργειας: Περιλαμβάνει τους στόχους για αυτονομία, αποδοτικότητα, και ίσως και την οικονομική βιωσιμότητα του συστήματος.

Έτσι, σύμφωνα με τα παραπάνω, είναι κρίσιμο για τη βέλτιστη σχεδίαση και λειτουργία της μπαταρίας να αναλυθεί το προφίλ ισχύος του εκάστοτε συστήματος, καθώς αυτό διασφαλίζει ότι η μπαταρία θα μπορεί να ανταποκριθεί σωστά στις διακυμάνσεις της ζήτησης και της παραγωγής. Συνοψίζοντας, η ενσωμάτωση ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας στη διαχείριση φορτίου αποτελεί ένα κρίσιμο και στρατηγικό βήμα προς την υλοποίηση του στόχου.

#### 4.2.5 Εισαγωγή στον Δυναμικό Προγραμματισμό

Ο δυναμικός προγραμματισμός (Dynamic Programming-DP), μια τεχνική που αναπτύχθηκε από τον Richard Bellman τη δεκαετία του 1950 (50), αντιπροσωπεύει μια ισχυρή μαθηματική προσέγγιση στη βελτιστοποίηση προβλημάτων. Ο Δυναμικός Προγραμματισμός χρησιμοποιείται, κυρίως, για την αντιμετώπιση προβλημάτων λήψης πολυσταδιακών αποφάσεων (51). Το πολυσταδιακό πρόβλημα απόφασης χαρακτηρίζεται ως ένα πρόβλημα στο οποίο πρέπει να ληφθεί μια ακολουθία αποφάσεων με κάθε απόφαση να επηρεάζει τις μελλοντικές αποφάσεις (52).

Το κύριο χαρακτηριστικό του Δυναμικού Προγραμματισμού είναι η διαδικασία διάσπασης ενός σύνθετου προβλήματος σε πιο απλά και μικρότερα υποπροβλήματα. Αυτή η διαδικασία μετατρέπει ένα περίπλοκο πρόβλημα σε μια σειρά από μικρότερα, πιο διαχειρίσιμα υποπροβλήματα, τα οποία επιλύονται καθένα ξεχωριστά, μόνο μία φορά. Οι λύσεις των υποπροβλημάτων στη συνέχεια αποθηκεύονται, συνήθως σε μια δομή δεδομένων, και χρησιμοποιούνται μετέπειτα για τη λύση του αρχικού προβλήματος (53). Αυτό επιτρέπει την αποφυγή επαναλαμβανόμενων υπολογισμών για το ίδιο υποπρόβλημα, οδηγώντας έτσι στη μείωση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας του αρχικού προβλήματος.

#### 4.2.6 Βασικές Αρχές και Συστατικά του Δυναμικού Προγραμματισμού

Η κεντρική ιδέα του Δυναμικού Προγραμματισμού έγκειται στην αρχή της βελτιστοποίησης, η οποία υποστηρίζει ότι μια βέλτιστη λύση σε ένα συνολικό πρόβλημα προκύπτει από τον συνδυασμό των βέλτιστων λύσεων των μικρότερων υποπροβλημάτων του (54). Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε προβλήματα που έχουν επικαλυπτόμενα υποπροβλήματα, δηλαδή όπου τα ίδια μικρότερα προβλήματα εμφανίζονται πολλές φορές μέσα στη διαδικασία επίλυσης του συνολικού προβλήματος. Η αρχή της βελτιστοποίησης, βοηθά να αναπτυχθούν λύσεις που είναι αποδοτικές καθώς αποφεύγεται ο ίδιος υπολογισμός πολλές φορές, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα.

Μετά την εξέταση των βασικών αρχών του Δυναμικού Προγραμματισμού, είναι σημαντικό να επεξηγηθούν τα βασικά του συστατικά. Αυτά τα στοιχεία αποτελούν την ουσία της τεχνικής του Δυναμικού Προγραμματισμού και είναι απαραίτητα για την πλήρη κατανόηση της. Παρακάτω, αναφέρονται τα βασικά του συστατικά του Δυναμικού Προγραμματισμού (55):

- Στάδιο(i): Το αρχικό πρόβλημα χωρίζεται σε  $n$  στάδια, όπου αρχικό είναι το στάδιο  $n$  και τελικό το στάδιο 1. Ο δείκτης  $i$  δίνει το στάδιο στο οποίο βρισκόμαστε κάποια στιγμή. Το  $i$  παίρνει τιμές από 1 έως  $n$
- Κατάσταση ( $S_i$ ): Είναι η πιθανή συνθήκη στην οποία μπορεί να βρεθεί το σύστημα σε ένα συγκεκριμένο στάδιο του προβλήματος. Κάθε στάδιο μπορεί να περιλαμβάνει περισσότερες από μία καταστάσεις.
- Μεταβλητή απόφασης ( $X_i$ ): Για κάθε στάδιο του προβλήματος υπάρχει μία μεταβλητή απόφασης ή ένα σύνολο μεταβλητών απόφασης.
- Συνάρτηση κόστους ( $C_i(X_i)$ ): Για την απόφαση  $X_i$ , η συνάρτηση αυτή δίνει την τιμή στο στάδιο  $i$ .
- Συνάρτηση βέλτιστης τιμής ( $f_i(S_i)$ ): Είναι συνολικά η καλύτερη (μέγιστη/ελάχιστη) συνάρτηση τιμών από το στάδιο  $i$  στο στάδιο  $n$ , δεδομένου ότι στο στάδιο  $i$  η κατάσταση είναι η  $S_i$ .
- Βέλτιστη πολιτική απόφασης ( $p_i(S_i) = X_i^*$ ): Πρόκειται για τη βέλτιστη σε κάποιο στάδιο απόφαση που εξαρτάται από την κατάσταση. Η διαδικασία επίλυσης προβλημάτων με τη μέθοδο του Δυναμικού Προγραμματισμού εξασφαλίζει ότι σε κάθε στάδιο θα βρεθεί μία βέλτιστη απόφαση για όλες τις καταστάσεις.
- Συνάρτηση μετασχηματισμού ( $t_i(S_i, X_i)$ ): Η συνάρτηση αυτή δείχνει πώς αλλάζει η κατάσταση στο επόμενο στάδιο, βάσει της τρέχουσας κατάστασης, σταδίου και απόφασης.
- Αναδρομική σχέση: Είναι μία σχέση που δείχνει τον τρόπο που συνδέεται η βέλτιστη απόφαση στο στάδιο  $i$  με τη βέλτιστη απόφαση στο στάδιο  $i+1$  (δεδομένου, βέβαια, ότι η τελευταία είναι ήδη γνωστή).

Η ανάλυση των βασικών συστατικών του Δυναμικού Προγραμματισμού αποκαλύπτει την ευελιξία του, που ως αποτέλεσμα έχει και την ευρεία εφαρμογή του σε διάφορα πεδία, όπως τα οικονομικά, τη πληροφορική και τα GPS (καθώς συντελεί στον υπολογισμό της συντομότερης διαδρομής) (56). Βάσει των παραπάνω, επιλέχθηκε ο

Δυναμικός Προγραμματισμός για τον βέλτιστο προγραμματισμό της διαχείρισης της στάθμης της μπαταρίας (φόρτιση-εκφόρτιση) στο πρόβλημα διαχείρισης φορτίου.

### 4.3 Υλοποίηση προσαρμοσμένου Particle Swarm Optimization και Δυναμικού Προγραμματισμού (DP) για την διαχείριση Ευέλικτων φορτίων

#### 4.3.1 Υλοποίηση Αλγορίθμου Particle Swarm Optimization(PSO)

Σε αυτή την υποενότητα, θα παρατεθεί το σκεπτικό πίσω από την ανάπτυξη και την προσαρμογή-τροποποίηση του αλγορίθμου Particle Swarm Optimization(PSO) για την αντιμετώπιση του προβλήματος διαχείρισης ευέλικτων φορτίων. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος διαχείρισης φορτίου, εστίασαμε στη αλλαγή μεμονωμένων σημείων του τυπικού κώδικα του PSO που ως στόχο είχε την αξιοποίηση των ισχυρών δυνατοτήτων του PSO αλλά και την ενσωμάτωση των απαιτήσεων του προβλήματος της διαχείρισης φορτίου. Παρακάτω, θα καταγραφεί η διαδρομή έως την τελική μορφή του κώδικα, επισημαίνοντας συγκεκριμένες τροποποιήσεις και προσαρμογές που έγιναν. Επιπλέον, τα κρίσιμα τμήματα του κώδικα θα παρουσιαστούν με συνοδευτικές επεξηγήσεις και στιγμιότυπα οθόνης, ώστε να παρέχεται μια λεπτομερή και εμπειριστατωμένη εξήγηση της υλοποίησης.

##### 4.3.1.1 Αρχικοποίηση και αναπαράσταση σωματιδίων

Κάθε particle αντιπροσωπεύει μια πιθανή λύση του προβλήματος διαχείρισης φορτίου. Δημιουργούνται χρησιμοποιώντας την εντολή:

```
Initialize an empty list to store particles, called 'particles'.

For each number from 1 to 'n_particles' (the total number of particles to create):
    Create a new particle by calling the 'initialize_particle' function with the start times list (t1_list), end times list (t2_list), and operating hours list (operating_hours_list) as arguments.
    Add the newly created particle to the 'particles' list.

After the loop, 'particles' will contain 'n_particles' initialized particles.
```

Εικόνα 6-Ψευδοκώδικας για την δημιουργία particle (πιθανές λύσεις του προβλήματος)

,η οποία δημιουργεί μια λίστα υποψήφιων λύσεων όπου ο συνολικός αριθμός καθορίζεται από τη μεταβλητή n\_particles. Αυτά τα particle που δημιουργούνται δεν είναι απλώς αφηρημένα σημεία στο χώρο αναζήτησης, ενσωματώνουν συγκεκριμένα χρονοδιαγράμματα για τη διαχείριση των φορτίων εντός συγκεκριμένων χρονικών περιορισμών. Αυτό συμβαίνει διότι ο αρχικός πληθυσμός που δημιουργείται με τη χρήση της συνάρτησης initialize\_particle, λαμβάνει υπόψη τις ώρες λειτουργίας

(operating\_hours\_list) και τα επιτρεπόμενα χρονικά διαστήματα (t1\_list, t2\_list) για κάθε φορτίο, διασφαλίζοντας ότι οι υποψήφιες λύσεις είναι αποδεκτές από την αρχή.

#### 4.3.1.2 Προσαρμογή ταχυτήτων και θέσεων

Το θεμέλιο της τροποποίησής έγκειται στον τρόπο με τον οποίο οι υποψήφιες λύσεις κινούνται και εξερευνούν το χώρο αναζήτησης. Στον προσαρμοσμένο αλγόριθμο PSO για τη διαχείριση ευέλικτων φορτίων, ο κώδικας εκτελεί την επανάληψη κάθε σωματιδίου στο σμήνος, όπως υποδεικνύεται από την εντολή:

```
For each particle in the list of particles (with the index 'i' representing its position in the list):  
    Generate a random number between 0 and 1, call this 'r1'.  
    Generate another random number between 0 and 1, call this 'r2'.
```

Εικόνα 7-Ψευδοκώδικας για την επανάληψη κάθε particle στο σμήνος

Αυτός ο βρόχος είναι αρκετά σημαντικός για αυτό το λόγο επισημαίνεται, επειδή ο αριθμός των σωματιδίων που υπαγορεύεται από το n\_particles καθορίζει το εύρος των πιθανών λύσεων που διερευνώνται. Για κάθε σωματίδιο, οι τυχαίοι συντελεστές r1 και r2 που φαίνονται στη παραπάνω εικόνα, παράγονται από την random.uniform(0,1), όπου εισάγουν ένα στοχαστικό στοιχείο στην ενημέρωση της ταχύτητας. Αυτή η τυχειότητα είναι απαραίτητη για να εξασφαλιστεί ότι ο αλγόριθμος δεν συγκλίνει απλώς στο πλησιέστερο τοπικό βέλτιστο αλλά εξερευνά ευρύτερα τον χώρο αναζήτησης.

Οι ταχύτητες ενημερώνονται λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση ενημέρωσης ταχύτητας μέσω της εντολής:

```
For each particle and its index 'i' in the list of particles:  
    Convert the current velocity of the particle at index 'i' to a numerical array.  
    Convert the personal best position of the particle at index 'i' to a numerical array.  
    Convert the current position of the particle to a numerical array.  
    Convert the global best position to a numerical array.  
  
    Calculate the personal influence by multiplying a constant 'c1' with 'r1' (a random number between 0 and 1) and the difference between personal best position and current position.  
    Calculate the social influence by multiplying a constant 'c2' with 'r2' (another random number between 0 and 1) and the difference between global best position and current position.  
  
    Update the velocity of the particle by adding the current velocity to the personal influence and the social influence.  
  
    Store the updated velocity back into the velocities list at index 'i'.
```

Εικόνα 8-Ψευδοκώδικας για τον τρόπο ενημέρωσης των ταχυτήτων κάθε particle

,η οποία εξισορροπεί αποφασιστικά την αδράνεια της προηγούμενης ταχύτητας του σωματιδίου (ο όρος np.array(velocities[i]) αντιπροσωπεύει την τρέχουσα ταχύτητα του

σωματιδίου, συμβάλλοντας στην ορμή του σωματιδίου) με τη γνωστική συνιστώσα (ο όρος  $c_1 * r_1 * (np.array(p\_best[i]) - np.array(particle))$  αντιπροσωπεύει την τάση του σωματιδίου να επιστρέφει στην προσωπική του καλύτερη θέση (pBest) με το  $c_1$  να είναι ένας συντελεστής στάθμισης και το  $r_1$  να προσθέτει τυχαιότητα) όσο και με την κοινωνική συνιστώσα (ο όρος  $c_2 * r_2 * (np.array(g\_best) - np.array(particle))$  αντιπροσωπεύει την τάση του σωματιδίου προς την παγκόσμια καλύτερη θέση του σμήνους (gBest) με το  $c_2$  να είναι ένας άλλος συντελεστής στάθμισης και το  $r_2$  να εισάγει τυχαιότητα). Αυτή η ισορροπία επιτρέπει μια δυναμική διαδικασία εξερεύνησης, όπου τα σωματίδια καθοδηγούνται τόσο από τη δική τους εμπειρία όσο και από τη συλλογική εμπειρία ολόκληρου του σμήνους.

Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος ενημερώνει τις θέσεις του σωματιδίου με ιδιαίτερη έμφαση στις ώρες λειτουργίας κάθε ευέλικτου φορτίου εντός του σωματιδίου. Μέσω του βρόχου που φαίνεται παρακάτω:

```
Initialize 'idx' to 0, to keep track of the index within particle and velocity arrays.

For each flexible load, identified by index 'j', along with its start time 't1', end time 't2', and operating hours:
  Initialize an empty list called 'new_times' to store new operating times for the current flexible load.

  For each hour of operation required by the current flexible load:
    Calculate a 'new_time' by adding the corresponding velocity to the particle's current position and clamping
    this value between 't1' (start time) and 't2' (end time).
    Ensure 'new_time' is an integer.

    While 'new_time' is already in 'new_times' (to avoid duplicates within the same flexible load):
      Generate a random 'new_time' within the range from 't1' to 't2'.

  Add the 'new_time' to the 'new_times' list.
  Update the position of the particle at the current index 'idx' with 'new_time'.
  Increment 'idx' by 1 .
```

Εικόνα 9-Ψευδοκώδικας για τον τρόπο ενημέρωσης των θέσεων κάθε particle

λαμβάνει υπόψη τους λειτουργικούς περιορισμούς και το επιτρεπτό χρονικό εύρος κάθε φορτίου, ο αλγόριθμος διασφαλίζει ότι οι νέοι προτεινόμενοι χρόνοι (new\_times) για τη λειτουργία κάθε φορτίου είναι τόσο επιτρεπόμενοι όσο και βέλτιστοι. Επιπρόσθετα, στην παραπάνω εικόνα έχει πολύ μεγάλη σημασία να απομονωθούν οι εξής 2 γραμμές κώδικα:

```
While 'new_time' is already in 'new_times' (to avoid duplicates within the same flexible load):
  Generate a random 'new_time' within the range from 't1' to 't2'.
```

,οι οποίες γράφτηκαν ειδικά για να εξασφαλίσουν ότι όλες οι προτεινόμενες ώρες λειτουργίας για κάθε φορτίο είναι μοναδικές. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε δεδομένο φορτίο, εάν υποτίθεται ότι θα λειτουργήσει για πολλές ώρες, δεν θα του ανατεθεί η ίδια ώρα για περισσότερες από μία περιόδους λειτουργίας του. Αυτό είναι ζωτικής

σημασίας, καθώς εγγυάται ότι οι λύσεις που προτείνει ο αλγόριθμος δεν είναι μόνο καλές όσον αφορά την αντικειμενική συνάρτηση, αλλά είναι και εντός των πραγματικών περιορισμών της διαχείρισης φορτίων.

#### 4.3.1.3 Ενημέρωση Καλύτερων Λύσεων και Σύγκλιση Αλγορίθμου

Σε συνέχεια των παραπάνω, τα τμήματα κώδικα εστιάζουν στην ενημέρωση των προσωπικών καλύτερων (pBest) και των παγκόσμιων καλύτερων (gBest) θέσεων, τα οποία είναι σημαντικά για την καθοδήγηση του σμήνους προς τις βέλτιστες λύσεις. Αρχικά, ο κώδικας υπολογίζει το `current_cost` για τη θέση κάθε σωματιδίου. Αυτό το κόστος συγκρίνεται στη συνέχεια με το κόστος της γνωστής καλύτερης θέσης του σωματιδίου (`p_best_cost`).

For each particle:

Calculate 'current\_cost' by evaluating the objective function with the particle's current position and other relevant parameters.

Calculate 'p\_best\_cost' by evaluating the objective function with the particle's personal best position and the same set of relevant parameters.

If 'current\_cost' is less than 'p\_best\_cost':

Update the personal best position of the particle with its current position.

*Εικόνα 10-Ψευδοκώδικας για την διαδικασία που πραγματοποιείται για την εύρεση της καλύτερης θέσης ενός particle*

Εάν η τρέχουσα θέση βρεθεί να είναι πιο βέλτιστη (δηλαδή έχει χαμηλότερο κόστος), αυτό υποδηλώνει ότι το σωματίδιο έχει ανακαλύψει μία καλύτερη λύση για τη διαχείριση των φορτίων, ενημερώνοντας τη προσωπική καλύτερη θέση του σωματιδίου σε αυτή τη θέση. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται για να βρεθεί η προσωπική καλύτερη θέση ενός σωματιδίου.

Ταυτόχρονα, όμως, ο κώδικας προσδιορίζει το σωματίδιο με την καλύτερη συνολική θέση στο σμήνος, που συμβολίζεται ως `g_best_now`. Αυτή η θέση αντιπροσωπεύει την καλύτερη λύση που ανακαλύφθηκε από οποιοδήποτε σωματίδιο μέχρι την τρέχουσα επανάληψη. Υπολογίζοντας και συγκρίνοντας το κόστος αυτής της συνολικά καλύτερης θέσης (`g_best_cost_now`) με το αρχικά καλύτερο κόστος (`g_best_cost`), ο αλγόριθμος καθορίζει αν έχει βρεθεί μια βέλτιστη συνολική λύση. Όταν εντοπίζεται μια νέα, ανώτερη παγκόσμια βέλτιστη λύση, ο αλγόριθμος ενημερώνει την παγκόσμια βέλτιστη λύση σε αυτή τη νέα θέση και προσαρμόζει ανάλογα το αντίστοιχο κόστος της παγκόσμιας βέλτιστης λύσης.

Ο κώδικας που υλοποιεί την διαδικασία φαίνεται παρακάτω:

1. Initialize 'p\_best' by making a deep copy of the current list of particles to preserve the initial states as their best personal states.
2. Evaluate the objective function for each particle to determine their costs
3. Find the index of the particle with the minimum cost using the 'argmin' function.
4. Initialize 'g\_best' by making a deep copy of the particle with the minimum cost found in the previous step.
5. Calculate 'g\_best\_cost' by evaluating the objective function with 'g\_best' and the same set of parameters.

*Εικόνα 11-Ψευδοκώδικας για αρχικοποίηση των p\_best, g\_best και g\_best\_cost στα πλαίσια υλοποίησης του προσαρμοσμένου Particle Swarm Optimazation*

1. Evaluate the objective function for each particle using the provided.
2. Find the particle with the minimum cost by comparing the costs obtained from the objective function evaluations.
3. Store this particle's position as 'g\_best\_now' and calculate its cost 'g\_best\_cost\_now' using the objective function with the same set of parameters.
4. Compare the newly calculated 'g\_best\_cost\_now' with the current global best cost 'g\_best\_cost':
  - If 'g\_best\_cost\_now' is less than 'g\_best\_cost', indicating a better (lower) cost:
  - Update 'g\_best' by making a deep copy of 'g\_best\_now' to ensure it is a separate object.
  - Update 'g\_best\_cost' with 'g\_best\_cost\_now' to reflect the new best cost.

*Εικόνα 12-Ψευδοκώδικας για την διαδικασία που πραγματοποιείται για την εύρεση της παγκόσμιας καλύτερης θέσης μεταξύ των particle*

Αυτή η διαδικασία, όπου γίνεται συνεχής ενημέρωση των καλύτερων ατομικών και 'παγκόσμιων' λύσεων, κατευθύνει τον αλγόριθμο PSO να επιδιώκει τις ιδανικότερες λύσεις. Ο αλγόριθμος διατηρεί μια λεπτή ισορροπία μεταξύ της εξερεύνησης νέων δυνατοτήτων (νέων θέσεων) και της εκμετάλλευσης ήδη γνωστών ευνοϊκών περιοχών. Αυτή η ισορροπία είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στους πολύπλοκους, πολυδιάστατους χώρους αναζήτησης σε προβλήματα διαχείρισης φορτίου, επιτρέποντας στον PSO να βρίσκει αποτελεσματικές λύσεις.

Συνοπτικά, παραπάνω παρατέθηκαν μερικά κρίσιμα σημεία του κώδικα PSO που προσαρμόστηκε στις ειδικές ανάγκες της διαχείρισης φορτίου, διασφαλίζοντας ότι κάθε σωματίδιο διερευνά έξυπνα τις πιθανές λύσεις, ενώ παράλληλα σέβεται τους περιορισμούς κάθε φορτίου. Ως αποτέλεσμα ήταν να επέλθει η ισορροπία μεταξύ της εξερεύνησης νέων δυνατοτήτων (νέων θέσεων) και της εκμετάλλευσης ήδη γνωστών ευνοϊκών περιοχών, καθιστώντας την κατάλληλη προσέγγιση για την εύρεση βέλτιστων ή σχεδόν βέλτιστων λύσεων.

#### 4.3.2 Εφαρμογή του Δυναμικού Προγραμματισμού στη Διαχείριση λειτουργίας της Μπαταρίας

Ο Δυναμικός Προγραμματισμός (DP) στη διαχείριση της μπαταρίας περιλαμβάνει τον στρατηγικό σχεδιασμό της φόρτισης και της εκφόρτισης της με την πάροδο του χρόνου, λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβλητή φύση τόσο της παραγωγής όσο και της κατανάλωσης ενέργειας. Ο Δυναμικός Προγραμματισμός εξασφαλίζει ότι η μπαταρία φορτίζεται όταν υπάρχει πλεονάζουσα ενέργεια και αποφορτίζεται ή διατηρεί σταθερή την ενεργειακή της στάθμη όταν η ζήτηση υπερβαίνει την παραγωγή. Παράλληλα, καθορίζεται η ακριβής ποσότητα ενέργειας που θα φορτίζεται ή θα εκφορτίζεται κάθε φορά. Αυτό εξασφαλίζει ότι η μπαταρία χρησιμοποιείται αποδοτικά, μειώνοντας το φαινόμενο της υπερφόρτωσης ή της υποβάθμισης και διασφαλίζει μία βέλτιστη χρήση της αποθηκευμένης ενέργειας.

Η εφαρμογή Δυναμικού Προγραμματισμού στη διαχείριση μπαταρίας ξεκινά με το να οριστούν τα βασικά 'συστατικά' του μοντέλου. Αυτά τα στοιχεία περιλαμβάνουν τα στάδια του προβλήματος, τις μεταβλητές απόφασης και κατάσταση αλλά και τις συναρτήσεις κόστους, που έχουν ήδη αναφερθεί.

Στο πλαίσιο προβλήματος, κάθε στάδιο ( $n$ ) αντιπροσωπεύει τις συνολικές ώρες μιας ημέρας, δηλαδή συνολικά υπάρχουν 24 στάδια (από το 1 έως το 24). Σε οποιοδήποτε δεδομένο στάδιο  $n$ , η μεταβλητή απόφασης ( $X_n$ ) προσδιορίζει την τελική ενέργεια της μπαταρίας ( $(24-n)^n$  ώρα), ενώ η μεταβλητή κατάσταση ( $S_n$ ) παρέχει την αρχική διαθέσιμη ενέργεια της μπαταρίας σε αυτό το στάδιο.

Η αναδρομική σχέση  $F_n$  αναδεικνύεται ως ο βασικός 'πυλώνας' της διαδικασίας λήψης αποφάσεων. Αυτή η σχέση εκφράζει ότι η βέλτιστη απόφαση σε ένα δεδομένο στάδιο ( $n$ ) εξαρτάται από την απόφαση που έχει ληφθεί στο προηγούμενο στάδιο ( $n-1$ ). Έτσι δημιουργείται μια συνεχόμενη εξάρτηση, όπου κάθε επιλογή συνδέεται και επηρεάζεται από τις αποφάσεις που έχουν ληφθεί στα προηγούμενα στάδια, οδηγώντας τελικά στην διαμόρφωση της βέλτιστης λύσης. Πιο συγκεκριμένα, η  $F_n(S_n, X_n)$  περιλαμβάνει το συνολικό κόστος ( $C$ ) για το συγκεκριμένο στάδιο ( $n$ ), το οποίο είναι συνδυασμός τόσο του κόστους φόρτισης όσο και του κόστους αποθήκευσης ενέργειας στη μπαταρία, καθώς και του κόστους βέλτιστης πολιτικής του προηγούμενου σταδίου,  $F_{n-1}^*(S_n, X_n)$ . Η μαθηματική σχέση της αναδρομικής συνάρτησης φαίνεται παρακάτω και είναι η εξής:

$$\text{Αναδρομική Σχέση: } F_n(S_n, X_n) = C(S_n, X_n) + F_{n-1}^*(S_n, X_n)$$

$$\text{Με } C(S_n, X_n) = C_{\text{charge-dicharge}}(X_n) + C_{\text{store}}(S_n) \text{ και}$$

$$C_{\text{charge-dicharge}} = \begin{cases} (Demand - Supply + X_n - S_n) * C_{\_g}, & Demand > Supply \\ (Supply - Demand - X_n + S_n) * C_{\_sell}, & Demand < Supply \end{cases}$$

Όπου,  $C_{\text{store}}(S_n)=0$  (καθώς δεν υπάρχει κόστος αποθήκευσης ενέργειας στην μπαταρία)

Επίσης, ισχύει,

Σχέση μεταξύ  $X_n$  και  $X_{n-1}$ : Ο προορισμός του σταδίου  $n$  είναι αφετηρία του σταδίου  $n-1$ . Άρα :

$$X_n = X_{n-1}$$

### 4.3.3 Κρίσιμα σημεία του κώδικα για την υλοποίηση του Δυναμικού Προγραμματισμού (DP)

Ο κώδικας υλοποίησης του Δυναμικού Προγραμματισμού που χρησιμοποιείται για τη διαχείριση της φόρτισης και της εκφόρτισης της μπαταρίας στο πρόβλημα διαχείρισης φορτίου είναι αρκετά πολύπλοκος. Για αυτό το λόγο, απαιτείται λεπτομερή ανάλυση στα κρίσιμα σημεία του κώδικα για να διευκολυνθεί η κατανόηση της λογικής και να γίνει πλήρως κατανοητός. Ο κώδικας του Δυναμικού Προγραμματισμού αποτελείται από τις 2 εξής συναρτήσεις:

- Συνάρτηση `calculated_table`: Αυτή η συνάρτηση υπολογίζει το κόστος, κάποιας θέσης του πίνακα σε ένα συγκεκριμένο στάδιο, που σχετίζεται με μια συγκεκριμένη κατάσταση ζήτησης και παραγωγής ενέργειας. Λαμβάνει υπόψη παράγοντες όπως η σταθερή κατανάλωση, η παραγωγή ενέργειας, τα διάφορα ευέλικτα φορτία αλλά και το κόστος βέλτιστης πολιτικής του προηγούμενου σταδίου. Ο υπολογισμός του κόστους διαφέρει ανάλογα με το αν η ζήτηση είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή στο συγκεκριμένο στάδιο ή το αντίστροφο, χρησιμοποιώντας αντίστοιχα διαφορετικούς συντελεστές κόστους ( $C_g$  και  $C_{sell}$ ). Παρατίθεται απόσπασμα από το κώδικα που φαίνεται ο τρόπος υπολογισμού του κόστους:

Function: `calculated_table`

Inputs: `particle, hourly_fixed_consumption, hourly_supply, chosen_flexible_loads, operating_hours_list, t1_list, t2_list, iter, nodeStatus, nodePosition, nodeForce, C_g, C_sell`

Procedure:

Calculate Demand and Supply:

Determine the total demand (`Demand_t`) at the current time step, considering both fixed and flexible consumption.

Determine the total supply (`Supply_t`) available at the same time step.

Decision Making for Cost Calculation:

If demand exceeds supply:

If condition `nodeStatus` is greater than or equal to `nodePosition`, calculate the cost of buying additional energy, adjusted for any specific conditions represented by `nodeStatus`, `nodePosition`, and add any additional costs `nodeForce`.

If the condition is not met, return a placeholder ('-') indicating the scenario is not applicable or cannot be calculated under the given conditions.

If supply exceeds demand (indicating excess energy that could be sold):

If condition `nodePosition` is greater than or equal to `nodeStatus`, calculate the revenue (or negative cost) from selling the excess energy, again adjusted for `nodeStatus`, `nodePosition`, and include `nodeForce`.

If the condition is not met, return a placeholder ('-') for scenarios that do not fit the calculation criteria.

Return the Calculated Cost:

The function concludes by returning the calculated cost for this time step.

*Εικόνα 13-Ψευδοκώδικας για την υλοποίηση της συνάρτησης `calculated_table` που χρησιμοποιείται στον Δυναμικό Προγραμματισμό (DP)*

- Συνάρτηση `store_iter`: Πρόκειται για μια πιο σύνθετη συνάρτηση, που αποτελεί το κύριο 'σώμα' του κώδικα για τη βελτιστοποίηση της φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας. Τα βήματα που ακολουθεί η συνάρτηση για την υλοποίηση της είναι τα εξής:
  1. Αρχικοποίηση διαφόρων λιστών και λεξικών στο λεξικό εξόδου για την τρέχουσα επανάληψη (προσδιορίζει σε ποιο στάδιο βρισκόμαστε και έχει οριστεί με όνομα μεταβλητής `iter`). Αυτό περιλαμβάνει τα `s_nodes` (κόμβοι αρχής-καθορίζουν την αρχική ενέργεια της μπαταρίας), `x_nodes` (κόμβοι τέλους-καθορίζουν την τελική διαθέσιμη ενέργεια της μπαταρίας), `table` (για την αποθήκευση υπολογισμένων τιμών), `f_nodes` (για την αποθήκευση τιμών τελικών κόμβων) και `x_min` (για την αποθήκευση κόμβων ελάχιστου κόστους).
  2. Στη συνέχεια, γεμίζει `s_nodes` και `x_nodes` με τιμές που αντιπροσωπεύουν διαφορετικές καταστάσεις της μπαταρίας, με τιμές που κυμαίνονται από 0 έως τη μέγιστη χωρητικότητα της μπαταρίας (`B_max`), οι οποίες αυξάνονται κατά `battery_batch`.
  3. Η συνάρτηση εκτελεί υπολογισμούς για κάθε δυνατό συνδυασμό αρχικών και τελικών κόμβων, υπολογίζοντας ένα κόστος με τη χρήση της συνάρτησης `'calculated_table'`. Προηγουμένως, έχει αναφερθεί ο τρόπος λειτουργίας αυτής της συνάρτησης.
  4. Στη συνέχεια, προσδιορίζει το ελάχιστο κόστος (`temp_min`) για κάθε κόμβο αρχής και το τοποθετεί στο `f_nodes`. Ταυτόχρονα, αποθηκεύει τους τελικούς κόμβους που οδήγησαν σε αυτό το ελάχιστο κόστος στο `x_min`.
  5. Η συνάρτηση ελέγχει ποιο στάδιο του Δυναμικού Προγραμματισμού εκτελείται από τον κώδικα μέσω της συνθήκης (`periods - iter - 1 > 0`). Εάν υπάρχουν εναπομείναντα στάδια και δεν βρισκόμαστε στο τελευταίο η συνάρτηση καλεί τον εαυτό της με τον δείκτη του επόμενου σταδίου, δηλαδή `iter + 1`.
  6. Εάν βρεθεί, όμως στη τελευταία περίοδο θα ακολουθηθούν τα βήματα 1-5 με την μόνη διαφορά ότι στο `s_nodes` θα τοποθετηθεί μόνο μία τιμή, η οποία είναι ίση με το `B_initial`. Η διαδικασία για τους υπολογισμούς και την αποθήκευση παραμένει ίδια.
  7. Μετά τον υπολογισμό του κόστους και τον προσδιορισμό των ελάχιστων διαδρομών για κάθε επανάληψη, η συνάρτηση κατασκευάζει πιθανές διαδρομές (`f_route`) και καταστάσεις που αντιπροσωπεύουν την ποσότητα ενέργειας που απομένει στην μπαταρία σε κάθε βήμα της διαδικασίας (`f_rem`), εξετάζοντας τις καταστάσεις της μπαταρίας που έχουν καταγραφεί στο `x_min`. Αυτό το βήμα ουσιαστικά προσπαθεί να βρει τη βέλτιστη διαδρομή από την αρχική κατάσταση στην τελική κατάσταση για όλες τις επαναλήψεις.
  8. Τέλος, η συνάρτηση επιστρέφει το ελάχιστο κόστος (`f_min`) που εντοπίστηκε στην τελευταία επανάληψη, το οποίο αντιπροσωπεύει το βέλτιστο κόστος.

Τα παραπάνω αποτελούν τα κρίσιμα σημεία υλοποίησης του Δυναμικού Προγραμματισμού για τη βελτιστοποίηση φόρτισης/εκφόρτισης της μπαταρίας σε χρονικό εύρος ημέρας ή ημερών.

## 5 Πειραματικό Μέρος και Αποτελέσματα

Στην προσπάθειά να εξασφαλιστεί ένα πιο βιώσιμο μέλλον, η εφαρμογή στρατηγικών για διαχείριση της ενέργειας εντός του μικροδικτύου δεν είναι απλώς μια θεωρητική διερεύνηση, αλλά μια πρακτική αναγκαιότητα. Αφού παρατέθηκαν και αναλύθηκαν στρατηγικές που χρησιμοποιήθηκαν, σε θεωρητικό επίπεδο, για τη διαχείριση της ενέργειας εντός μικροδικτύου είναι πολύ κρίσιμο να δοκιμαστούν σε σενάρια πραγματικού κόσμου.

Έφτασε πλέον η στιγμή για τη μετάβαση από τα θεωρητικά μοντέλα στην πραγματική εφαρμογή. Ειδικότερα, θα εφαρμοστεί μια ποικιλία πραγματικών σεναρίων, αντικατοπτρίζοντας τις πολύπλευρες απαιτήσεις κατανάλωσης ενέργειας που χαρακτηρίζουν τη σύγχρονη εποχή. Αυτή η φάση υλοποίησης είναι κρίσιμη καθώς οι θεωρητικές προβλέψεις και τα υπολογιστικά μοντέλα δοκιμάζονται σε σχέση με την πολυπλοκότητα των προτύπων χρήσης ενέργειας στον πραγματικό κόσμο.

Το σενάριο θα παραμένει αναλλοίωτο και η ουσία της ανάλυσης έγκειται στην εφαρμογή διαφορετικών εκδόσεων του κώδικα για αυτό το σενάριο. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει να συγκριθούν άμεσα η απόδοση και η αποτελεσματικότητα κάθε παραλλαγής του κώδικα υπό ίδιες συνθήκες, προσφέροντας μια σαφής σύγκριση του τρόπου με τον οποίο διαφορετικές αλγοριθμικές προσεγγίσεις επηρεάζουν τα αποτελέσματα της ενεργειακής διαχείρισης.

### 5.1 Προσδιορισμός Διαφορετικών Εκδοχών Κώδικα για Εκτέλεση και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Αναλύοντας λεπτομερώς τα χαρακτηριστικά των διαφορετικών εκδοχών που έχουν επιλεγεί, είναι σημαντικό να κατανοηθεί η λογική πίσω από τη καθεμία. Οι διαφορετικές εκδοχές υλοποίησης του κώδικα δεν είναι αυθαίρετες, αλλά επιλέχθηκαν σκόπιμα για να αντικατοπτρίζουν τα προοδευτικά στάδια της πολυπλοκότητας της ενεργειακής διαχείρισης σε ένα τυπικό μικροδίκτυο.

Η ‘basic version’ χρησιμεύει ως το θεμελιώδες μοντέλο στη μελέτη. Αντιπροσωπεύει την πιο παραδοσιακή μορφή ενεργειακής διαχείρισης, όπου δεν υπάρχουν ενσωματωμένες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Σε αυτή την εκδοχή, η μοναδική πηγή ενέργειας του καταναλωτή είναι το δίκτυο και η κατανάλωση ενέργειας είναι τυχαία, με βάση τις προτιμήσεις του καταναλωτή, και μη βελτιστοποιημένη. Αυτό το σενάριο είναι ζωτικής σημασίας, καθώς παρέχει ένα σημείο αναφοράς ώστε να αναδειχτούν οι διαφορές των πιο προηγμένων στρατηγικών διαχείρισης ενέργειας.

Προχωρώντας σε μια πιο εξελιγμένη προσέγγιση, παρουσιάζεται η ‘PV-Optimized Swarm Version’ με ενσωματωμένες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η συγκεκριμένη εκδοχή καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική, καθώς προσφέρει μια εναλλακτική πηγή ενέργειας πέρα από το κύριο δίκτυο. Η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας φέρνει στο προσκήνιο τον αλγόριθμο Particle Swarm Optimization (PSO), ο οποίος

χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό της πιο αποδοτικής στρατηγικής χρήσης της ενέργειας μέσω του εντοπισμού της καταλληλότερης θέσης της τοποθέτησης των ευέλικτων φορτίων. Αυτή η εκδοχή αποτελεί ένα σημαντικό βήμα προς τη βιώσιμη διαχείριση της ενέργειας, αναδεικνύοντας τον αντίκτυπο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Η πιο εξελιγμένη προσέγγιση δεν περιλαμβάνει μόνο την παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αλλά ενσωματώνει και τη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας σε μπαταρία. Αυτή η προσθήκη παρέχει ένα πρωτοφανές επίπεδο ευελιξίας στη διαχείριση των ευέλικτων φορτίων και τη χρήση της αποθηκευμένης ενέργειας. Σε αυτές τις εκδοχές, διερευνούμε την αποτελεσματικότητα τόσο της προσαρμοσμένης υλοποίησης του αλγορίθμου PSO για το συγκριμένο πρόβλημα όσο και μίας προ υπάρχουσας υλοποίησής του ίδιου αλγορίθμου προσβάσιμη μέσω βιβλιοθήκης της γλώσσας προγραμματισμού Python, προσφέροντας έτσι μια σύγκριση των δυνατοτήτων βελτιστοποίησής κάθε περίπτωσης. Αυτές οι εκδοχές, αναδεικνύουν τις δυνατότητες των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε συνδυασμό με την αποθήκευση ενέργειας με σκοπό τη βελτιστοποίηση της χρήσης ενέργειας και τη μείωση της εξάρτησης από το δίκτυο.

Τα αποτελέσματα των εκδοχών θα παρουσιαστούν με λεπτομερή τρόπο. Θα εξεταστεί η απόδοση των στρατηγικών που χρησιμοποιήθηκαν στις διαφορετικές εκδοχές, αξιολογώντας βασικές μετρήσεις όπως το κόστος (daily costs), την ενέργεια που καταναλώνεται από το δίκτυο (Energy consumption), τη ποσότητα πώλησης ενέργειας πίσω στο δίκτυο (Energy sell), το Δείκτη Ενεργειακής Απόδοσης (EER), το Δείκτη Sell-Back (SBR) αλλά και το χρόνο εκτέλεσης. Τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν μέσα από μια σειρά γραφημάτων και πινάκων.

Αυτή η εφαρμογή των διαφορετικών εκδοχών εξυπηρετεί ένα διπλό σκοπό. Αρχικά, επικυρώνει την αποτελεσματικότητα των τεχνικών που χρησιμοποιήθηκαν σε πραγματικές συνθήκες (θα φανεί μέσω των αποτελεσμάτων) και, δεύτερον, προσφέρει πολύτιμες γνώσεις και δεδομένα που δεν υπάρχουν μέχρι στιγμής που μπορούν μελλοντικά να καθοδηγήσουν σε βελτιώσεις στο τομέα της διαχείρισης της ενέργειας. Έτσι, σκοπός είναι ένα μέλλον όπου η βιωσιμότητα δεν θα είναι απλώς μία φιλοδοξία αλλά θεμελιώδες στοιχείο των ενεργειακών συστημάτων.

## **5.2 Προσδιορισμός Βασικού Σεναρίου Χρήσης Ευέλικτων Φορτίων**

Το παρόν έργο, εστιάζει σε μια σειρά από συγκριμένα ευέλικτα φορτία. Τα φορτία αυτά περιλαμβάνουν τον ηλεκτρικό θερμοσίφωνα, το πλυντήριο πιάτων, τα ηλεκτρικά οχήματα (EVs), το πλυντήριο ρούχων, και διάφορα άλλα περιστασιακά φορτία. Η προτεραιότητα για το σενάριο που θα εφαρμοστεί είναι να καθοριστεί ο αριθμός των ωρών λειτουργίας για κάθε φορτίο, καθώς και ο χρονικός περιορισμός εντός της ημέρας κατά το οποίο θα διανέμονται αυτές οι ώρες λειτουργίας.

Για κάθε φορτίο ξεχωριστά ισχύει:

- **Ηλεκτρικός Θερμοσίφωνας (Water Heater):** Συνήθως λειτουργεί για 2 ώρες με σκοπό την παραγωγή ζεστού νερού. Αυτό το ζεστό νερό προτιμάται να χρησιμοποιείται κυρίως κατά τις απογευματινές ή βραδινές ώρες.
- **Πλυντήριο Πιάτων (Dish Washer):** Απαιτεί 1 ώρα λειτουργίας και κατά κύριο λόγο χρησιμοποιείται συνήθως τις μεσημεριανές προς απογευματινές ώρες.
- **Ηλεκτρικά Οχήματα (EVs):** Η φόρτισή τους διαρκεί περίπου 4 ώρες και γίνεται οποιαδήποτε στιγμή κατά τη διάρκεια της ημέρας ανάλογα με την ανάγκη.
- **Πλυντήριο Ρούχων (Washing Machine):** Συνήθως λειτουργεί για 2 ώρες και ενδείκνυται να ολοκληρώνει τη λειτουργία του μέχρι τις βραδινές ώρες.
- **Άλλα Περιστασιακά Φορτία:** Περιλαμβάνουν φορτία τα οποία ενεργοποιούνται ανάλογα με τις ειδικές ανάγκες της κάθε περίπτωσης. Το συνολικό χρονικό διάστημα χρήσης αυτών των φορτίων ανέρχεται στις 3 ώρες κατά τη διάρκεια της ημέρας, χωρίς να υπάρχει συγκεκριμένος χρονικός περιορισμός για τη λειτουργία τους. Δηλαδή μπορούν να ενεργοποιηθούν ανά πάσα στιγμή κατά τη διάρκεια της ημέρας.

### 5.3 Αποτελέσματα από την Εκτέλεση Διαφορετικών Εκδοχών του κώδικα

Ο πρωταρχικός στόχος είναι η βέλτιστη κατανομή και διαχείριση των φορτίων που συμπεριλαμβάνονται στο σενάριο σε διάρκεια 30 ημερών (ενός μήνα δηλαδή) κατά την καλοκαιρινή περίοδο (αρχική ημερομηνία 01-08-2018), με προτεραιότητα τόσο την ελαχιστοποίηση του κόστους όσο και την ικανοποίηση των αναγκών των χρηστών.

Για την επίτευξη των στόχων, λήφθηκαν υπόψη οι περιορισμοί που έχουν καθοριστεί στο σενάριο. Οι περιορισμοί αυτοί ενσωματώνονται στα δεδομένα εισόδου κατά τη διάρκεια της αλληλεπίδρασης του συστήματος με τον χρήστη. Επιπλέον, για την εκτέλεση του κώδικα θα χρησιμοποιηθούν αρχεία δεδομένων, που απαρτίζονται από το production.csv, το consumption.csv, το average\_hourly\_consumption.csv, το hourly\_prices.csv και το hourly\_sales\_prices.csv. Ο κώδικας θα επεξεργαστεί και θα αξιοποιήσει τα δεδομένα από τα αρχεία καθώς και τις πληροφορίες που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση του συστήματος με τον χρήστη, με σκοπό την αποδοτική διαχείριση των παραμέτρων και την παραγωγή αποτελεσμάτων.

Οπότε, κατά την εκτέλεση του κώδικά στις διαφορετικές εκδοχές του ίδιου σεναρίου, παρατηρήθηκαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

#### 5.3.1 ‘Basic’ Version

##### 5.3.1.1 Παράμετροι Εισόδου

Το στιγμιότυπο οθόνης που θα παρατέθηκε παρακάτω παρουσιάζει τη διεπαφή του συστήματος με τον χρήστη όπου εισάγονται οι ώρες λειτουργίας για κάθε ευέλικτο φορτίο. Το στιγμιότυπο αντιπροσωπεύει ένα δείγμα τριών ημερών από μια σειρά εισαγωγής δεδομένων που καλύπτουν μια πλήρη περίοδο 30 ημερών.

Τα δεδομένα για τις υπόλοιπες 27 ημέρες συμπληρώνονται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, αλλά για λόγους οικονομίας χώρου δεν παρουσιάζονται.

```

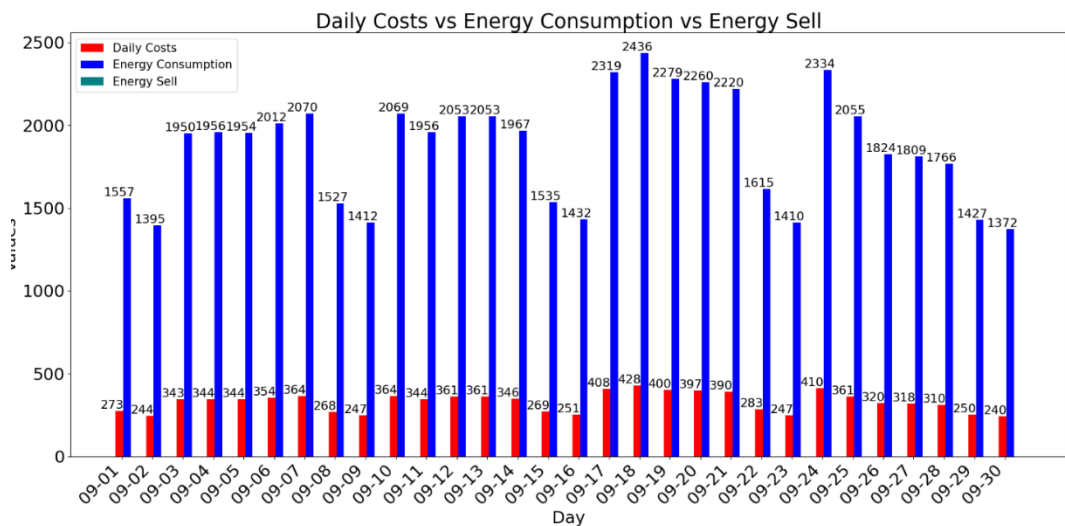
Enter the flexible load numbers separated by space: 1 2 3 5 6
Enter the operating duration (in hours) for flexible load 1: 2
Enter the operating duration (in hours) for flexible load 2: 1
Enter the operating duration (in hours) for flexible load 3: 4
Enter the operating duration (in hours) for flexible load 5: 2
Enter the operating duration (in hours) for flexible load 6: 3
Enter the initial date (YYYY-MM-DD): 2018-09-01
Enter the number of days: 30
Enter the exact operating hours for flexible load 1 on 2018-09-01 (separated by space): 8 12
Enter the exact operating hours for flexible load 2 on 2018-09-01 (separated by space): 14
Enter the exact operating hours for flexible load 3 on 2018-09-01 (separated by space): 9 11 12 17
Enter the exact operating hours for flexible load 5 on 2018-09-01 (separated by space): 9 11
Enter the exact operating hours for flexible load 6 on 2018-09-01 (separated by space): 10 11 19
Cost for 2018-09-01: 273.39546904
Enter the exact operating hours for flexible load 1 on 2018-09-02 (separated by space): 14 15
Enter the exact operating hours for flexible load 2 on 2018-09-02 (separated by space): 19
Enter the exact operating hours for flexible load 3 on 2018-09-02 (separated by space): 10 12 15 16
Enter the exact operating hours for flexible load 5 on 2018-09-02 (separated by space): 9 19
Enter the exact operating hours for flexible load 6 on 2018-09-02 (separated by space): 11 18 22
Cost for 2018-09-02: 244.93846348
Enter the exact operating hours for flexible load 1 on 2018-09-03 (separated by space): 8 15
Enter the exact operating hours for flexible load 2 on 2018-09-03 (separated by space): 16
Enter the exact operating hours for flexible load 3 on 2018-09-03 (separated by space): 10 14 15 16
Enter the exact operating hours for flexible load 5 on 2018-09-03 (separated by space): 15 19
Enter the exact operating hours for flexible load 6 on 2018-09-03 (separated by space): 6 9 14
Cost for 2018-09-03: 343.21808109
Enter the exact operating hours for flexible load 1 on 2018-09-04 (separated by space): 9 11
Enter the exact operating hours for flexible load 2 on 2018-09-04 (separated by space): 19
Enter the exact operating hours for flexible load 3 on 2018-09-04 (separated by space): 10 13 15 20
Enter the exact operating hours for flexible load 5 on 2018-09-04 (separated by space): 8 9
Enter the exact operating hours for flexible load 6 on 2018-09-04 (separated by space): 15 19 22

```

Εικόνα 14-Δεδομένα Εισόδου για την εκτέλεση της 'Basic' Version

### 5.3.1.2 Energy Management System Performance Analysis

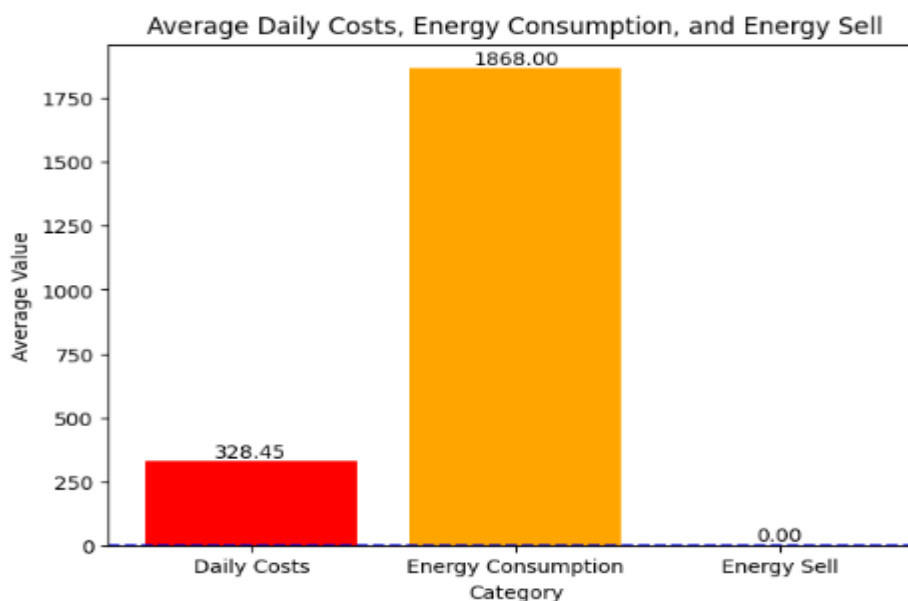
- Daily Costs vs Energy Consumption vs Energy Sell



Εικόνα 15-Διαγράμματα αποτελεσμάτων για τις μεταβλητές Daily Costs , Energy Consumption, Energy Sell μετά την εκτέλεση της 'Basic' Version

Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει, για κάθε ημέρα στη διάρκεια ενός μηνός, τις τιμές τριών βασικών στοιχείων: το κόστος (daily costs), την ενέργεια που καταναλώνεται από το δίκτυο (Energy consumption) και τη ποσότητα πώλησης ενέργειας πίσω στο δίκτυο (Energy sell). Δίνεται η δυνατότητα να παρατηρηθούν οι διακυμάνσεις του ημερήσιου κόστους και πώς αυτές συσχετίζονται με τα μοτίβα κατανάλωσης και πώλησης ενέργειας. Η απεικόνιση της πώλησης ενέργειας στο γράφημα γίνεται ευκολά αντιληπτό πως θα είναι μονιμά μηδενική καθώς στη 'Basic Version' δεν υπάρχει παραγωγή ενέργειας.

- Average Energy Metrics



Εικόνα 16-Διαγράμματα για τις μέσες τιμές των μεταβλητών Daily Costs , Energy Consumption, Energy Sell μετά την εκτέλεση της 'Basic' Version

Αυτό το ραβδόγραμμα απεικονίζει τις μέσες τιμές τριών κρίσιμων παραμέτρων για μια περίοδο 30 ημερών. Οι μέσοι όροι που παρουσιάζονται αντιπροσωπεύουν συνολικά τα ημερήσια δεδομένα, προσφέροντας τη δυνατότητα σύγκρισης των εν λόγω παραμέτρων στις διαφορετικές εκδοχές κώδικα, καθώς η ανάλυση 30 ξεχωριστών τιμών για κάθε παράμετρο θα ήταν πιο περίπλοκη.

- Energy Efficiency and Sell-Back Ratios

Το Energy Efficiency Ratio (EER) αντικατοπτρίζει το βαθμό ανεξαρτησίας του συστήματος από το δίκτυο ενέργειας. Συγκεκριμένα, το EER μετρά το ποσοστό της ενέργειας που λαμβάνεται από το δίκτυο σε σχέση με τη συνολική ενεργειακή ανάγκη του συστήματος, περιλαμβάνοντας τόσο τη σταθερή ζήτηση όσο και τα ευέλικτα φορτία που θα χρησιμοποιηθούν. Επιδιώκεται χαμηλότερη τιμή για το EER, καθώς αυτό σημαίνει

μεγαλύτερη ανεξαρτησία από το δίκτυο λόγω μειωμένης ανάγκης για εισροή ενέργειας από αυτό. Στην παρούσα εκδοχή, το EER είναι σταθερά ίσο με ένα, καθώς όλη η απαιτούμενη ενέργεια προέρχεται από το δίκτυο.

Από την άλλη πλευρά, το Sell-Back Ratio (SBR) δηλώνει το ποσοστό της ενέργειας που πωλείται πίσω στο δίκτυο σε σχέση με τη συνολική παραγόμενη ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές. Ωστόσο, στην τρέχουσα εκδοχή, δεν υπάρχει παραγωγή ενέργειας, οπότε το SBR είναι μηδενικό.

Τα διαγράμματα για αυτούς τους δύο δείκτες δεν θεωρούνται σημαντικά για αυτή την εκδοχή και για λόγους οικονομίας χώρου δεν παρουσιάζονται. Σε μελλοντικές εκδοχές, όπου το Sell-Back Ratio και το Energy Efficiency Ratio είναι πιο ενδιαφέροντα, θα παρουσιαστούν για να βοηθήσουν σε μία πιο ολοκληρωμένη συγκριτική ανάλυση.

- Χρόνος Εκτέλεσης

Ο χρόνος εκτέλεσης αντιπροσωπεύει τη διάρκεια που απαιτείται για να ολοκληρώσει ένα πρόγραμμα μια συγκεκριμένη εργασία ή σειρά εργασιών με σκοπό την παραγωγή ακριβών και αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Ο χρόνος εκτέλεσης αποτελεί έναν κρίσιμο δείκτη για τη συνολική αποδοτικότητα του προγράμματος, καθώς αντικατοπτρίζει την ικανότητά του να παράγει επιθυμητά αποτελέσματα εντός ενός λογικού χρονικού πλαισίου. Σκοπός είναι να επιτευχθεί μια βέλτιστη ισορροπία μεταξύ της ταχύτητας εκτέλεσης και της ποιότητας των αποτελεσμάτων. Στην τρέχουσα έκδοση, ο χρόνος εκτέλεσης έχει μειωθεί σε εξαιρετικά μικρά επίπεδα, θέλοντας λιγότερο από ένα λεπτό για την εξαγωγή αποτελεσμάτων. Αυτό σημαίνει ότι το πρόγραμμα έχει την ικανότητα να ανταποκρίνεται γρήγορα και να επεξεργάζεται δεδομένα ή να εκτελεί εργασίες σε ελάχιστο χρόνο. Ωστόσο, αυτή η ταχύτητα έχει επιτευχθεί με κάποιο κόστος στην ποιότητα των αποτελεσμάτων. Στις επόμενες εκδοχές θα γίνουν προσπάθειες για βελτίωση αποτελεσμάτων καθώς δεν ικανοποιούνται πλήρως οι προσδοκίες σε ό,τι αφορά την ακρίβεια και την αξιοπιστία.

## 5.3.2 ‘PV-Optimized Swarm’ Version

### 5.3.2.1 Παράμετροι Εισόδου

Οι χρήστες καλούνται να εισάγουν-παρέχουν λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τα ευέλικτα φορτία που θα χρησιμοποιηθούν κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος. Αρχικά, οφείλουν να καθορίσουν τα φορτία, εισάγοντας τους ‘κωδικούς’ αριθμούς που προσδιορίζει το καθένα. Επιπλέον, απαιτείται να καταχωρήσουν τις ώρες λειτουργίας για κάθε φορτίο, προσδιορίζοντας για κάθε φορτίο το χρονικό περιορισμό, στον οποίο μπορούν να κατανεμηθούν οι αντίστοιχες ώρες λειτουργίας του. Στο τελικό στάδιο, ζητείται από τους χρήστες να εισαγάγουν την ημερομηνία έναρξης της

περιόδου για την οποία θα παραχθούν οι βελτιστοποιήσεις, καθώς και τον αριθμό των ημερών που θα καλύψει η ανάλυση.

```
Enter the flexible load numbers separated by space: 1 2 3 5 6
Enter the operating hours for flexible load 1 (1-23): 2
Enter the start and end time (hour) for flexible load 1 (separated by space): 8 16
Enter the operating hours for flexible load 2 (1-23): 1
Enter the start and end time (hour) for flexible load 2 (separated by space): 14 20
Enter the operating hours for flexible load 3 (1-23): 4
Enter the start and end time (hour) for flexible load 3 (separated by space): 8 20
Enter the operating hours for flexible load 5 (1-23): 2
Enter the start and end time (hour) for flexible load 5 (separated by space): 8 20
Enter the operating hours for flexible load 6 (1-23): 3
Enter the start and end time (hour) for flexible load 6 (separated by space): 6 22
Enter the number of days to run the optimization: 30
Enter the initial date (YYYY-MM-DD): 2018-09-01
```

*Εικόνα 17-Δεδομένα Εισόδου για την εκτέλεση της 'PV-Optimized Swarm' Version*

### 5.3.2.2 Energy Management System Performance Analysis

- Βελτιστοποιημένα Αποτελέσματα για Ευέλικτα Φορτία

Στην παρούσα έκδοση, αλλά και στις επόμενες, που θα παρουσιαστούν παρακάτω, θα καταγραφούν οι βελτιστοποιημένες λύσεις που παράγονται από τον αντίστοιχο κώδικα. Με την ολοκλήρωση της εκτέλεσης, εμφανίζονται οι βέλτιστες λύσεις για κάθε ημέρα του διαστήματος που εισήγαγε ο χρήστης (30 ημέρες). Αυτές παρουσιάζονται ως μία λίστα από υπολίστες, όπου η καθεμία αντιπροσωπεύει το πρόγραμμα λειτουργίας κάθε φορτίου. Η κάθε υπολίστα περιέχει τις ώρες ενεργοποίησης που θα πρέπει να τηρήσει το συγκεκριμένο φορτίο για την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους, σύμφωνα με την προκαθορισμένη αντικειμενική συνάρτηση που ορίστηκε στο θεωρητικό κομμάτι. Οι υπολίστες είναι διατεταγμένες βάσει της σειράς των φορτίων που ορίζει ο χρήστης στα δεδομένα εισόδου. Τα εμφανιζόμενα αριθμητικά δεδομένα στο παρακάτω στιγμιότυπο αποτελούν μια συνοπτική αναπαράσταση του προτεινόμενου ημερήσιου προγραμματισμού για κάθε φορτίο.

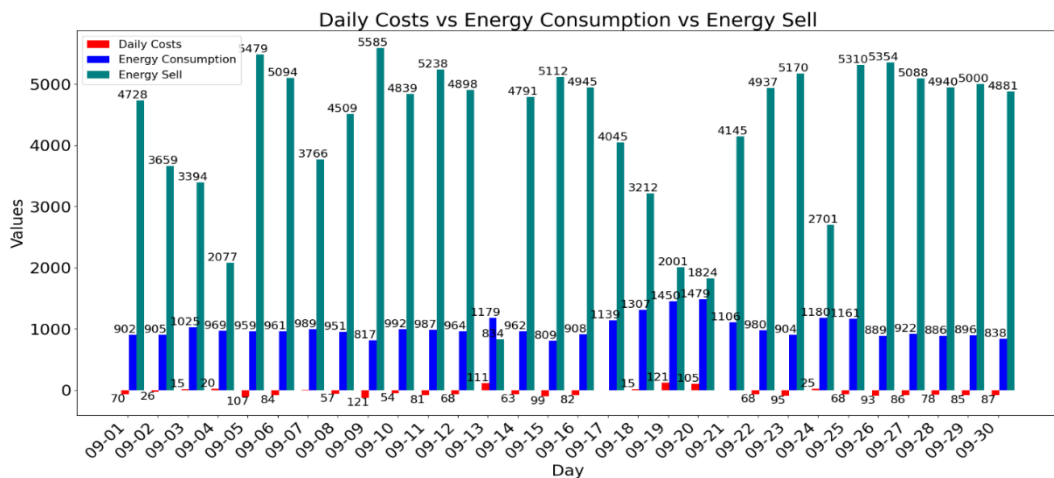
```

Date 2018-09-01 Optimal solution: [[9, 12], [15], [9, 12, 14, 17], [10, 12], [8, 10, 13]]
Date 2018-09-02 Optimal solution: [[10, 12], [17], [9, 10, 16, 17], [9, 14], [7, 13, 14]]
Date 2018-09-03 Optimal solution: [[8, 10], [15], [8, 11, 15, 16], [10, 12], [10, 14, 15]]
Date 2018-09-04 Optimal solution: [[8, 16], [14], [11, 14, 15, 16], [11, 18], [10, 13, 17]]
Date 2018-09-05 Optimal solution: [[8, 14], [16], [8, 13, 14, 16], [11, 16], [9, 11, 17]]
Date 2018-09-06 Optimal solution: [[11, 14], [15], [10, 11, 13, 14], [12, 15], [10, 11, 16]]
Date 2018-09-07 Optimal solution: [[8, 12], [15], [10, 11, 13, 17], [12, 19], [9, 15, 17]]
Date 2018-09-08 Optimal solution: [[9, 13], [17], [10, 13, 14, 17], [11, 15], [12, 16, 17]]
Date 2018-09-09 Optimal solution: [[11, 12], [14], [8, 9, 14, 16], [8, 11], [8, 12, 14]]
Date 2018-09-10 Optimal solution: [[8, 11], [14], [8, 10, 11, 15], [11, 12], [13, 16, 17]]
Date 2018-09-11 Optimal solution: [[11, 13], [16], [8, 12, 13, 14], [11, 14], [10, 12, 14]]
Date 2018-09-12 Optimal solution: [[10, 13], [14], [9, 12, 13, 16], [14, 16], [9, 16, 17]]
Date 2018-09-13 Optimal solution: [[11, 14], [16], [10, 11, 16, 17], [10, 16], [9, 13, 15]]
Date 2018-09-14 Optimal solution: [[8, 13], [15], [8, 11, 12, 15], [10, 17], [8, 10, 17]]
Date 2018-09-15 Optimal solution: [[9, 11], [16], [12, 13, 14, 15], [14, 17], [10, 13, 17]]
Date 2018-09-16 Optimal solution: [[8, 9], [14], [9, 11, 13, 14], [16, 17], [8, 9, 12]]
Date 2018-09-17 Optimal solution: [[8, 15], [17], [8, 11, 12, 16], [8, 12], [10, 11, 12]]
Date 2018-09-18 Optimal solution: [[12, 15], [15], [9, 13, 14, 16], [9, 12], [9, 13, 15]]
Date 2018-09-19 Optimal solution: [[10, 13], [19], [9, 10, 12, 13], [10, 12], [8, 9, 22]]
Date 2018-09-20 Optimal solution: [[9, 14], [15], [9, 11, 12, 13], [12, 13], [6, 10, 22]]
Date 2018-09-21 Optimal solution: [[8, 14], [14], [8, 13, 14, 15], [9, 16], [10, 11, 17]]
Date 2018-09-22 Optimal solution: [[10, 12], [17], [9, 13, 14, 15], [11, 16], [11, 13, 16]]
Date 2018-09-23 Optimal solution: [[8, 15], [17], [10, 12, 13, 16], [8, 15], [10, 13, 17]]
Date 2018-09-24 Optimal solution: [[11, 13], [16], [10, 13, 15, 16], [9, 16], [8, 10, 11]]
Date 2018-09-25 Optimal solution: [[9, 14], [17], [8, 10, 13, 15], [10, 12], [9, 13, 17]]
Date 2018-09-26 Optimal solution: [[12, 15], [16], [8, 10, 12, 13], [10, 16], [9, 13, 16]]
Date 2018-09-27 Optimal solution: [[13, 16], [15], [9, 11, 12, 15], [8, 11], [9, 12, 15]]
Date 2018-09-28 Optimal solution: [[10, 13], [17], [8, 9, 10, 16], [8, 12], [9, 13, 16]]
Date 2018-09-29 Optimal solution: [[8, 13], [14], [8, 12, 16, 17], [12, 13], [12, 13, 16]]
Date 2018-09-30 Optimal solution: [[8, 14], [14], [8, 10, 13, 15], [9, 17], [11, 15, 16]]

```

Εικόνα 18-Προτεινόμενη λύση του σεναρίου που εξετάζεται για την ‘PV-Optimized Swarm’ Version

- Daily Costs vs Energy Consumption vs Energy Sell



Εικόνα 19-Διαγράμματα αποτελεσμάτων για τις μεταβλητές Daily Costs, Energy Consumption, Energy Sell μετά την εκτέλεση της ‘PV-Optimized Swarm’ Version

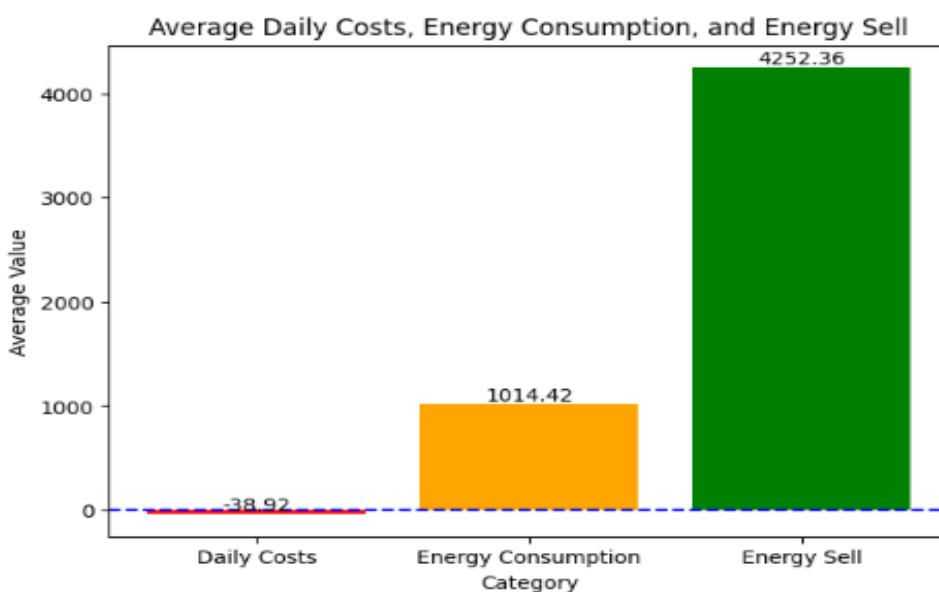
Σε συστήματα ενεργειακής διαχείρισης που ενσωματώνουν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, παρατηρείται σημαντική βελτίωση της οικονομικής αποδοτικότητας. Η παραγωγή ενέργειας συντελεί στην εξισορρόπηση της ζήτησης, προσφέροντας τη δυνατότητα σημαντικής μείωσης του κόστους. Το αποτέλεσμα αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές κατά την σύγκριση της παραπάνω εικόνας με την αντίστοιχη της ‘basic’ version. Σε κάποιες περιπτώσεις, μάλιστα, μπορεί ακόμη να καταγραφούν και έσοδα, καθώς η

περίσσεια μπορεί να πωληθεί πίσω στο δίκτυο, οδηγώντας σε αρνητικό κόστος - ένδειξη κερδοφορίας. Αυτό δημιουργεί ένα δυναμικό περιβάλλον όπου οι παράμετροι κόστους και εσόδων μεταβάλλονται συνεχώς, επηρεάζοντας τόσο το συνολικό κόστος του συστήματος όσο και την πώληση ή αγορά ενέργειας από το δίκτυο.

Κατά την ανάλυση των ενεργειακών δεδομένων που αποτυπώνονται στην παραπάνω φωτογραφία, αναδύεται ένα ενδιαφέρον μοτίβο, ιδιαίτερα στις ημερομηνίες 13, 19 και 20 Σεπτεμβρίου. Σε γενικές γραμμές, τα δεδομένα δείχνουν ότι η ενέργεια που πωλείται πίσω στο δίκτυο υπερβαίνει σημαντικά την ενέργεια που καταναλώνεται από αυτό, γεγονός που αποδεικνύει τα υψηλά επίπεδα παραγωγής ενέργειας, ιδίως κατά τις μεσημεριανές ώρες. Ωστόσο, αυτές οι τρεις συγκεκριμένες ημερομηνίες αποκλίνουν από αυτή την τάση, παρουσιάζοντας μια ιδιότυπη ισορροπία μεταξύ της ενέργειας που καταναλώνεται από το δίκτυο και της ενέργειας που πωλείται πίσω σε αυτό. Κατά συνέπεια, το κόστος που σχετίζεται με αυτές τις ημερομηνίες είναι σημαντικά υψηλότερο σε σύγκριση με άλλες περιόδους.

Κατά την προσεκτικότερη εξέταση, αποκαλύπτεται ότι η απόκλιση αυτή συμπίπτει με τη μείωση της παραγωγής ενέργειας κατά τις ημερομηνίες αυτές. Η μείωση αυτή έρχεται σε σαφή αντίθεση με τα συνήθη πρότυπα παραγωγής που παρατηρούνται τις υπόλοιπες ημέρες. Αυτή η διακύμανση υποδηλώνει ότι η παραγωγή ενέργειας υπόκειται σε μεταβλητότητα, η οποία πιθανώς επηρεάζεται από εξωτερικούς παράγοντες, όπως οι καιρικές συνθήκες. Αυτή η μείωση της παραγωγής επηρεάζει άμεσα το ενεργειακό ισοζύγιο, οδηγώντας σε αυξημένη εξάρτηση από την ενέργεια του δικτύου και σε επακόλουθη αύξηση του κόστους.

- Average Energy Metrics



Εικόνα 20-Διαγράμματα για τις μέσες τιμές των μεταβλητών Daily Costs , Energy Consumption, Energy Sell μετά την εκτέλεση της 'PV-Optimized Swarm' Version

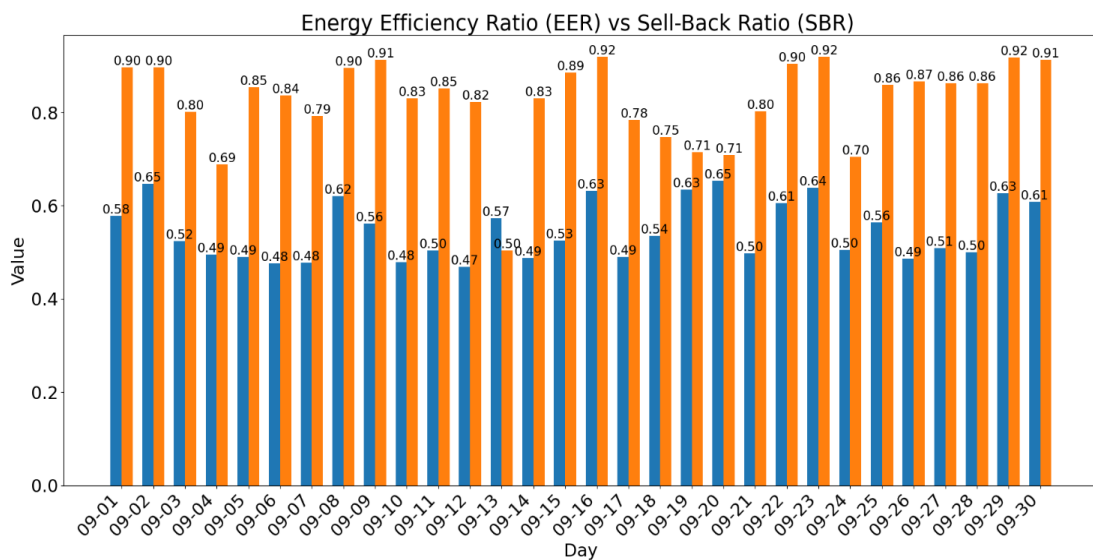
Το παραπάνω ραβδόγραμμα αναδεικνύει τη συμβολή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην αύξηση της αποδοτικότητας του συστήματος για περίοδο 30 ημερών. Ως αποτέλεσμα, το μέσο ημερήσιο κόστος μειώνεται σημαντικά σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές στην ‘basic’ version. Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται πιο λεπτομερή στοιχεία:

	Basic Version	PV-Optimized Swarm Version	Percentage change(%)
Daily Cost	328.45 €	-38.92 €	-112%
Energy Consumption	1868 kWh	1014.42 kWh	-45,69%
Energy Sell	-	-	-

Πίνακας 2-Συγκριτική αριθμητική ανάλυση μεταξύ της ‘Basic’ Version και της ‘PV-Optimized Swarm’ Version

Ο υπολογισμός του Percentage change(%) για την μεταβλητή Energy Sell δεν έχει νόημα στη συγκεκριμένη περίπτωση καθώς στη ‘Basic’ Version η τιμή της μεταβλητής ήταν ίση με μηδέν. Ο πίνακας τιμών προσφέρει ακριβή αριθμητικά στοιχεία που υπογραμμίζουν την βελτίωση των αποτελεσμάτων στην PV-Optimized Swarm Version.

- Energy Efficiency and Sell-Back Ratios



Εικόνα 21-Διάγραμμα για τους, Energy Efficiency και Sell-Back, δείκτες στην ‘PV-Optimized Swarm’ Version

Το ραβδόγραμμα παρουσιάζει μια διορατική σύγκριση του Δείκτη Ενεργειακής Απόδοσης (EER) και του Δείκτη Sell-Back (SBR) σε διάστημα 30 ημερών, αποκαλύπτοντας σημαντικές πτυχές στη διαχείριση της ενέργειας. Οι τιμές του EER, αν και παρουσιάζουν κάποια ημερήσια διακύμανση, υποδεικνύουν γενικά μια τάση μείωσης της εξάρτησης από το εξωτερικό ενεργειακό δίκτυο, η οποία αποτελεί θετική εξέλιξη προς την κατεύθυνση της ενεργειακής ανεξαρτησίας. Μια χαμηλότερη EER σημαίνει ότι ένα μικρότερο ποσοστό της ενεργειακής ζήτησης του συστήματος καλύπτεται από το δίκτυο.

Από την άλλη πλευρά, ο SBR διατηρεί υψηλά επίπεδα καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου, γεγονός που υποδηλώνει ότι ένα σημαντικό μέρος της παραγόμενης ενέργειας πωλείται πίσω στο δίκτυο. Αυτό αντανακλά στην αποτελεσματική αξιοποίηση της εγκατεστημένης ισχύος όχι μόνο για την κάλυψη των εσωτερικών ενεργειακών αναγκών αλλά και για τη συμβολή στην τροφοδοσία του δικτύου, δημιουργώντας μια ευκαιρία για τη δημιουργία εσόδων. Ωστόσο, η κατάσταση αυτή ανοίγει μια συζήτηση σχετικά με τις δυνατότητες καλύτερης διαχείρισης της ενέργειας, όπου θα αναλυθεί καλύτερα παρακάτω.

- Χρόνος Εκτέλεσης

Παραπάνω εξηγήθηκε και διαπιστώθηκε η σημασία του χρόνου εκτέλεσης στη συνολική απόδοση του συστήματος. Στην προκειμένη περίπτωση, η ενσωμάτωση του αλγορίθμου Particle Swarm Optimization έχει πράγματι αυξήσει τη διάρκεια της διαδικασίας, η οποία ανέρχεται στα 500 δευτερόλεπτα (περίπου 8,5 λεπτά). Ωστόσο, αυτή η αύξηση στο χρόνο εκτέλεσης δικαιολογείται από τη σημαντική βελτίωση των αποτελεσμάτων.

### 5.3.3 ‘Ready algorithm with battery’ Version

#### 5.3.3.1 Παράμετροι Εισόδου

Για να διασφαλιστεί η συνέπεια στην ανάλυσή, διατηρήθηκαν ίδιες παράμετροι εισόδου για κάθε εκδοχή κώδικα που εκτελείται. Για να εξοικονομηθεί χώρος και να αποφευχθεί ο πλεονασμός, δεν θα παρατίθενται επανειλημμένα αυτές οι παράμετροι. Αντ' αυτού, θα γίνει παραπομπή στην Εικόνα 17 όπου περιγράφονται αναλυτικά. Η αναφορά αυτή χρησιμεύει ως οδηγός για όσους επιθυμούν διευκρινίσεις.

#### 5.3.3.2 Energy Management System Performance Analysis

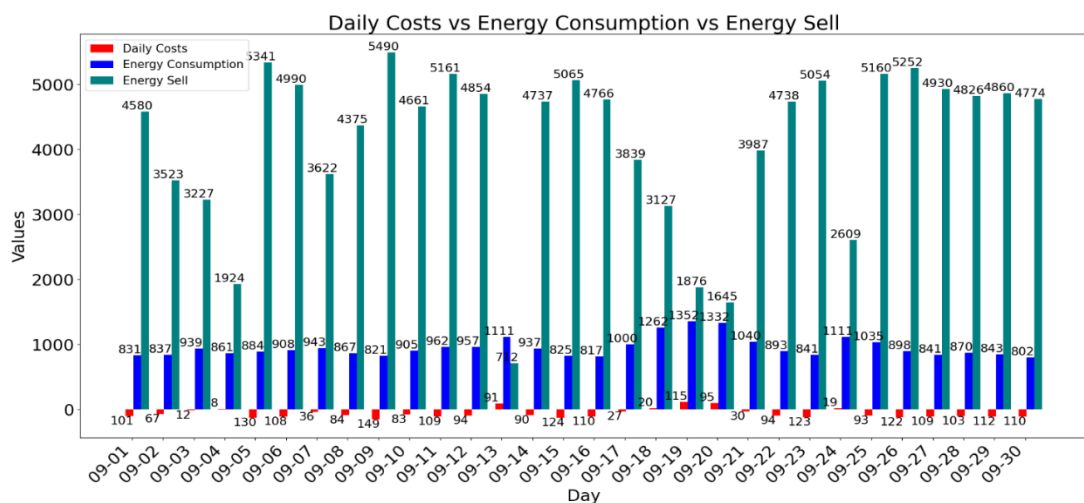
- Βελτιστοποιημένα Αποτελέσματα για Ευέλικτα Φορτία

Προηγουμένως, ερμηνεύτηκε με λεπτομέρεια η μορφή της βέλτιστης λύσης που προκύπτει ‘τρέχοντας’ κάθε εκδοχή ξεχωριστά. Παρακάτω παρουσιάζεται η βέλτιστη λύση που επιτεύχθηκε με την εφαρμογή του αλγορίθμου Particle Swarm Optimization, ο οποίος επιλέχθηκε από μια βιβλιοθήκη της Python, αλλά και του Δυναμικού Προγραμματισμού για τον προσδιορισμό της στάθμης της μπαταρίας κάθε χρονική στιγμή.

```
Optimal solution for 2018-09-01: ([[14, 15], [14], [9, 11, 14, 15], [10, 13], [11, 15, 16]])
Optimal solution for 2018-09-02: ([[10, 12], [16], [8, 10, 12, 14], [14, 16], [12, 16, 17]])
Optimal solution for 2018-09-03: ([[10, 12], [16], [8, 10, 12, 14], [14, 16], [12, 16, 17]])
Optimal solution for 2018-09-04: ([[10, 11], [17], [10, 12, 14, 16], [10, 18], [11, 12, 13]])
Optimal solution for 2018-09-05: ([[9, 12], [17], [8, 9, 12, 15], [13, 15], [10, 14, 17]])
Optimal solution for 2018-09-06: ([[9, 10], [15], [8, 10, 11, 14], [9, 15], [9, 13, 17]])
Optimal solution for 2018-09-07: ([[13, 15], [14], [8, 9, 12, 13], [11, 13], [9, 12, 13]])
Optimal solution for 2018-09-08: ([[9, 14], [17], [10, 11, 13, 15], [10, 17], [8, 13, 16]])
Optimal solution for 2018-09-09: ([[9, 14], [17], [10, 11, 13, 15], [10, 17], [8, 13, 16]])
Optimal solution for 2018-09-10: ([[9, 14], [17], [10, 11, 13, 15], [10, 17], [8, 13, 16]])
Optimal solution for 2018-09-11: ([[8, 15], [16], [12, 14, 15, 16], [10, 13], [8, 11, 12]])
Optimal solution for 2018-09-12: ([[11, 14], [15], [12, 13, 14, 15], [13, 14], [9, 13, 17]])
Optimal solution for 2018-09-13: ([[11, 14], [18], [9, 14, 15, 16], [16, 17], [11, 16, 21]])
Optimal solution for 2018-09-14: ([[12, 14], [15], [8, 13, 15, 16], [8, 13], [10, 11, 14]])
Optimal solution for 2018-09-15: ([[14, 15], [16], [12, 14, 16, 17], [10, 14], [9, 16, 17]])
Optimal solution for 2018-09-16: ([[14, 15], [16], [12, 14, 16, 17], [10, 14], [9, 16, 17]])
Optimal solution for 2018-09-17: ([[8, 12], [17], [9, 11, 13, 14], [8, 10], [8, 13, 14]])
Optimal solution for 2018-09-18: ([[9, 15], [16], [10, 11, 13, 14], [8, 9], [10, 11, 15]])
Optimal solution for 2018-09-19: ([[11, 12], [16], [8, 10, 11, 12], [10, 17], [6, 11, 19]])
Optimal solution for 2018-09-20: ([[8, 15], [17], [9, 10, 12, 13], [14, 15], [11, 12, 19]])
Optimal solution for 2018-09-21: ([[8, 14], [15], [10, 11, 13, 14], [12, 17], [9, 13, 17]])
Optimal solution for 2018-09-22: ([[8, 14], [15], [10, 11, 13, 14], [12, 17], [9, 13, 17]])
Optimal solution for 2018-09-23: ([[8, 14], [15], [10, 11, 13, 14], [12, 17], [9, 13, 17]])
Optimal solution for 2018-09-24: ([[10, 14], [14], [8, 14, 15, 16], [11, 15], [9, 10, 12]])
Optimal solution for 2018-09-25: ([[10, 14], [14], [8, 14, 15, 16], [11, 15], [9, 10, 12]])
Optimal solution for 2018-09-26: ([[10, 14], [14], [8, 14, 15, 16], [11, 15], [9, 10, 12]])
Optimal solution for 2018-09-27: ([[13, 14], [14], [10, 12, 13, 17], [10, 12], [13, 15, 17]])
Optimal solution for 2018-09-28: ([[13, 14], [14], [10, 12, 13, 17], [10, 12], [13, 15, 17]])
Optimal solution for 2018-09-29: ([[10, 12], [16], [9, 11, 13, 14], [13, 17], [8, 10, 11]])
Optimal solution for 2018-09-30: ([[12, 15], [17], [13, 14, 15, 17], [9, 17], [8, 9, 16]])
```

Εικόνα 22-Προτεινόμενη λύση για το σενάριο που εξετάζεται όταν εκτελούμε τον κώδικα της ‘Ready Algorithm with Battery’ Version

- Daily Costs vs Energy Consumption vs Energy Sell



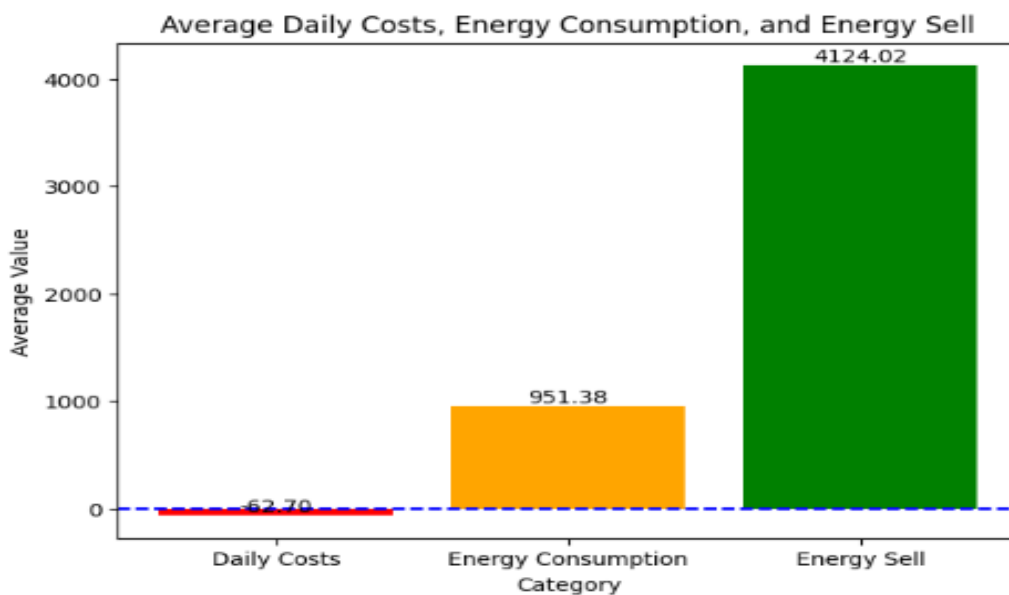
Εικόνα 23-Διαγράμματα αποτελεσμάτων για τις μεταβλητές Daily Costs, Energy Consumption, Energy Sell μετά την εκτέλεση της ‘Ready Algorithm with Battery’ Version

Παρατηρώντας προσεκτικά το παραπάνω ραβδόγραμμα δημιουργείται η αίσθηση ότι το ημερήσιο κόστος μειώθηκε σε ικανοποιητικό βαθμό. Επίσης, πτωτική τάση είχαν οι τιμές τόσο της ενέργειας που αντλείται από το δίκτυο όσο και της ενέργειας που πωλείται στο δίκτυο. Η μείωση της ενέργειας που πωλείται στο δίκτυο αποδίδεται κυρίως σε δύο κύριες αιτίες. Πρώτον, η ενσωμάτωση ενός συστήματος αποθήκευσης (μπαταρία) απορροφά ένα σεβαστό μέρος της παραγόμενης ενέργειας με σκοπό της φόρτιση της σε χρονικές στιγμές που η στάθμη της είναι χαμηλή. Δεύτερον, η βελτιωμένη διαχείριση και κατανομή των ενεργειακών φορτίων σε αυτή την εκδοχή είχαν ως αποτέλεσμα μια πιο συνετή χρήση της ενέργειας που παράγεται. Αντί να πουληθεί η πλεονάζουσα ενέργεια πίσω στο δίκτυο, βελτιστοποιείται η διαχείριση της εντός συστήματος ώστε να καταναλωθεί η ενέργεια πιο αποτελεσματικά για τις εσωτερικές ενεργειακές ανάγκες του.

Ο πλήρης αντίκτυπος αυτών των βελτιώσεων θα εκτιμηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια μέσω της ανάλυσης των μέσων τιμών. Αυτό θα αποτελέσει τη βάση για άμεση σύγκριση με προηγούμενες εκδόσεις, επιτρέποντάς να εξαχθούν πιο ασφαλή συμπεράσματα.

- Average Energy Metrics

Το παρακάτω ραβδόγραμμα που αφορά τις μέσες τιμές των βασικών μεταβλητών παρατέθηκε για να διευκρινίσει τον αντίκτυπο της ενσωμάτωσης ενός συστήματος αποθήκευσης (μπαταρία). Ο πίνακας που είναι τοποθετημένος κάτω από το ραβδόγραμμα θα διευκολύνει τη συγκριτική ανάλυση μεταξύ της Ready algorithm with battery Version και της PV-Optimized Swarm Version.



Εικόνα 24-Διαγράμματα για τις μέσες τιμές των μεταβλητών Daily Costs, Energy Consumption, Energy Sell μετά την εκτέλεση της 'Ready Algorithm with Battery' Version

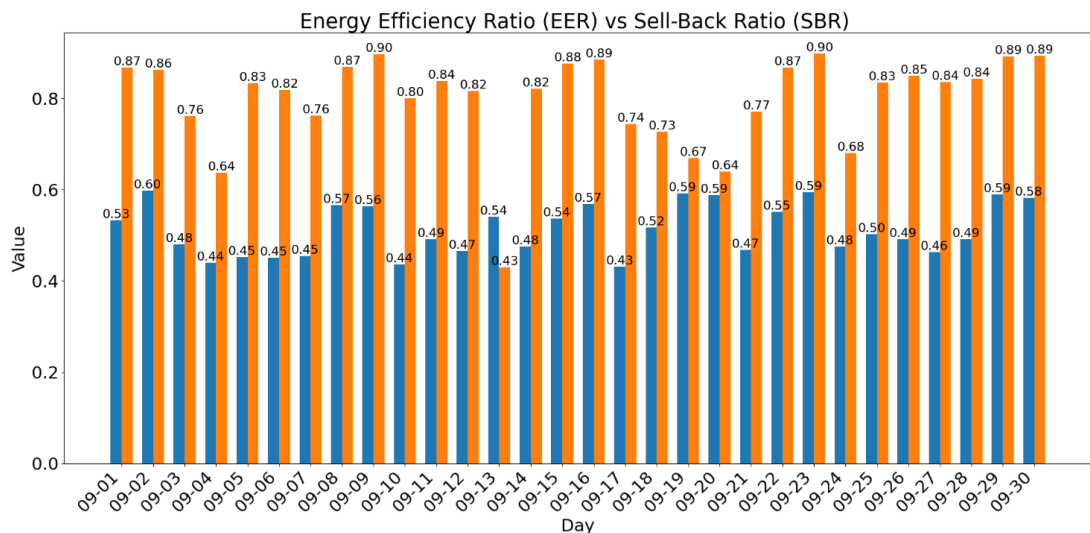
	PV-Optimized Swarm Version	Ready algorithm with battery Version	Percentage change(%)
Daily Cost	-38.92 €	-62.7 €	-61.09%
Energy Consumption	1014.42 kWh	951.38 kWh	-6.21%
Energy Sell	4252.36 kWh	4124.02 kWh	-3.01%

Πίνακας 3-Συγκριτική αριθμητική ανάλυση μεταξύ της 'PV-Optimized Swarm' Version και της 'Ready Algorithm with Battery' Version

Τα αριθμητικά δεδομένα αποδεικνύουν ότι η ενσωμάτωση της μπαταρίας στο σύστημά πέτυχε τον πρωταρχικό στόχο: **τη μείωση τόσο του κόστους (-61.09%)** όσο και της κατανάλωσης ενέργειας από το δίκτυο. Παρόλο που υπάρχει μείωση της ενέργειας που πωλείται πίσω στο δίκτυο, αυτό δικαιολογείται, όπως εξηγήθηκε προηγουμένως, και αποτελεί λογικό αποτέλεσμα της ενισχυμένης ενεργειακής αυτάρκειας.

- Energy Efficiency and Sell-Back Ratios

Η βελτίωση της απόδοσης του συστήματος, μετά την ενσωμάτωση της μπαταρίας, αποδεικνύεται περαιτέρω από το δείκτη Energy Efficiency που παρουσιάζεται στο παρακάτω ραβδόγραμμα. Καθ' όλη τη διάρκεια των 30 ημερών, παρατηρείται μια σταθερή πτωτική τάση του δείκτη σε σχέση με την PV-Optimized Swarm Version.



Εικόνα 25-Διάγραμμα για τους, Energy Efficiency και Sell-Back, δείκτες στην 'Ready Algorithm with Battery' Version

- Χρόνος Εκτέλεσης

Η ενσωμάτωση της μπαταρίας και η βελτιστοποίηση της λειτουργίας της μέσω Δυναμικού Προγραμματισμού, σε συνδυασμό με τον αλγόριθμο Particle Swarm Optimazation, παρατείνει τον χρόνο εκτέλεσης του κώδικα σε 2610 δευτερόλεπτα (περίπου 43.5 λεπτά). Ωστόσο, η ουσιαστική βελτίωση των αποτελεσμάτων δικαιολογεί αυτή τη σταδιακή αύξηση (+422%) του χρόνου επεξεργασίας σε σύγκριση με την προηγούμενη έκδοση. Το αντιστάθμισμα μεταξύ της αυξημένης διάρκειας εκτέλεσης και της βελτιωμένης απόδοσης θεωρείται αποδεκτό, λαμβάνοντας υπόψη τα σημαντικά οφέλη που επιτυγχάνονται στην αποδοτικότητα του συστήματος και τη μείωση του κόστους.

- Daily Analysis of Battery

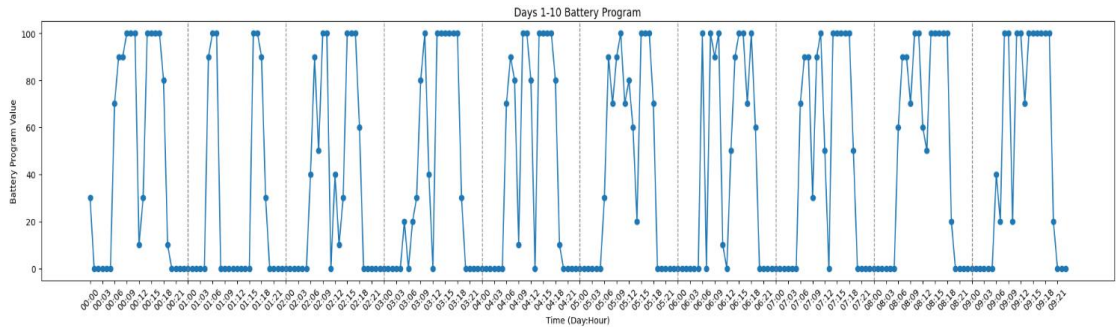
Κατά την εισαγωγή της μπαταρίας στο σύστημα ένα ζήτημα που δημιουργήθηκε ήταν ο προσδιορισμός της ωριαίας στάθμης της κατά τη διάρκεια της ημέρας σε χρονικό ορίζοντα τον αριθμό των ημερών που ο χρήστης θα εισάγει ώστε να εκτελεστεί ο κώδικας. Παρακάτω παρουσιάζονται τα καθημερινά προφίλ λειτουργίας της μπαταρίας, περιγράφοντας την 24ωρη δραστηριότητα για κάθε μία από τις 30 εξεταζόμενες ημέρες.

```
Battery program for 2018-09-01: [30, 0, 0, 0, 0, 0, 70, 90, 90, 100, 100, 100, 10, 30, 100, 100, 100, 100, 80, 10, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-02: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 90, 100, 100, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 100, 100, 90, 30, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-03: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 40, 90, 50, 100, 100, 0, 40, 10, 30, 100, 100, 100, 60, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-04: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 20, 0, 20, 30, 80, 100, 40, 0, 100, 100, 100, 100, 100, 100, 30, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-05: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 70, 90, 80, 10, 100, 100, 80, 0, 100, 100, 100, 100, 80, 10, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-06: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 30, 90, 70, 90, 100, 70, 80, 60, 20, 100, 100, 100, 70, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-07: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 100, 0, 100, 90, 100, 10, 0, 50, 90, 100, 100, 70, 100, 60, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-08: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 70, 90, 90, 30, 90, 100, 50, 0, 100, 100, 100, 100, 100, 50, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-09: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 60, 90, 90, 70, 100, 100, 60, 50, 100, 100, 100, 100, 100, 20, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-10: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 40, 20, 100, 100, 20, 100, 100, 70, 100, 100, 100, 100, 100, 100, 20, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-11: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 90, 100, 100, 100, 100, 40, 30, 20, 70, 100, 100, 100, 100, 60, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-12: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 60, 100, 100, 60, 50, 10, 0, 50, 80, 100, 100, 100, 100, 100, 40, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-13: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 100, 0, 100, 0, 100, 100, 100, 100, 100, 0, 100, 100, 100, 30, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-14: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 80, 90, 90, 90, 100, 40, 0, 0, 80, 100, 100, 100, 100, 60, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-15: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 50, 70, 90, 30, 100, 40, 0, 100, 100, 100, 100, 100, 100, 50, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-16: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 60, 70, 90, 20, 10, 100, 50, 100, 100, 100, 100, 100, 40, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-17: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 30, 40, 40, 100, 70, 40, 60, 20, 10, 100, 100, 100, 50, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-18: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 100, 40, 50, 0, 20, 20, 20, 70, 100, 100, 20, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-19: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 100, 100, 100, 100, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-20: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 100, 0, 50, 70, 50, 100, 100, 100, 70, 40, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-21: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 80, 50, 100, 50, 70, 0, 50, 100, 100, 100, 100, 100, 50, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-22: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 60, 60, 70, 90, 100, 100, 100, 100, 100, 100, 100, 100, 50, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-23: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 80, 90, 100, 100, 100, 100, 60, 90, 100, 100, 100, 100, 60, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-24: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 20, 30, 0, 40, 100, 80, 30, 90, 100, 100, 60, 10, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-25: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 60, 70, 90, 60, 20, 70, 90, 70, 100, 100, 100, 100, 40, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-26: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 60, 80, 80, 60, 100, 100, 100, 50, 20, 100, 100, 100, 30, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-27: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 40, 30, 90, 100, 100, 10, 80, 30, 100, 100, 100, 100, 40, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-28: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 60, 60, 100, 100, 80, 40, 20, 30, 70, 100, 100, 100, 30, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-29: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 10, 90, 100, 90, 100, 20, 100, 40, 40, 100, 100, 100, 40, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-30: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 40, 50, 80, 10, 100, 20, 40, 100, 100, 100, 100, 40, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
```

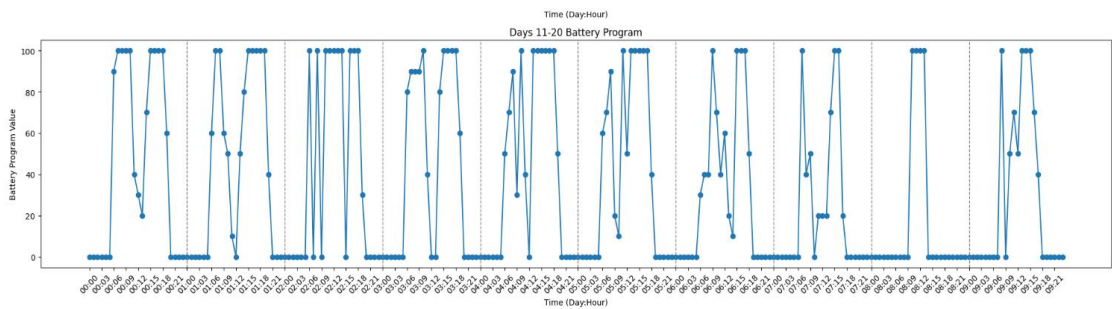
Εικόνα 26-Προτεινόμενος ωριαίος προσδιορισμός της στάθμης της μπαταρίας, για διάστημα 30 ημερών, όταν εκτελούμε τον κώδικα της 'Ready Algorithm with Battery' Version

Το ημερήσιο προφίλ της μπαταρίας απεικονίζεται ως μια δομημένη λίστα που περιλαμβάνει 24 τιμές, κάθε μία από τις οποίες αντιπροσωπεύει την κατάσταση της μπαταρίας στο τέλος κάθε ώρας καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας.

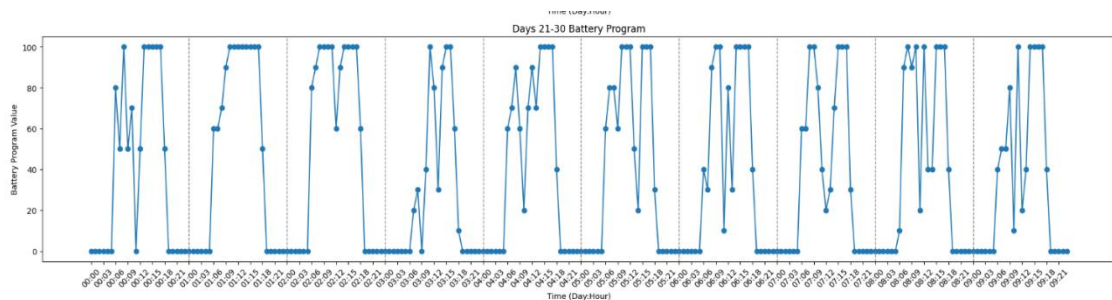
Αξιοποιώντας τις λεπτομερείς ωριαίες τιμές που παρέχονται, κατασκευάζεται ένα γράφημα που θα απεικονίζει τις καθημερινές αυξομειώσεις στην στάθμη της μπαταρίας. Αυτή η οπτική αναπαράσταση θα είναι συνεχής και θα σχεδιαστεί για να διακρίνει ευδιάκριτα μοτίβα στη λειτουργία της στάθμης της μπαταρίας. Τα γραφήματα θα καταταμηθούν και θα παρουσιαστούν σε διαστήματα ανά 10 ημέρες.



Εικόνα 27-Συνεχές γράφημα για την στάθμη της μπαταρίας, για το 1<sup>ο</sup> 10ήμερο των 30 ημερών, όταν εκτελούμε τον κώδικα της 'Ready Algorithm with Battery' Version



Εικόνα 28-Συνεχές γράφημα για την στάθμη της μπαταρίας, για το 2<sup>ο</sup> 10ήμερο των 30 ημερών, όταν εκτελούμε τον κώδικα της 'Ready Algorithm with Battery' Version

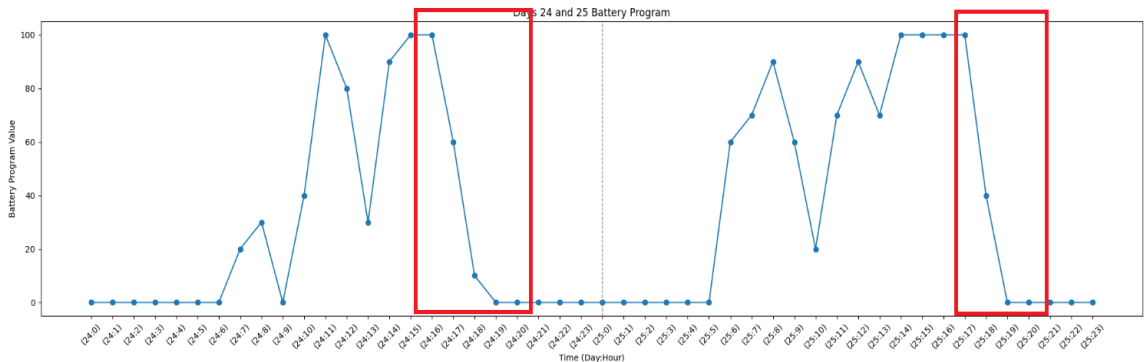


Εικόνα 29-Συνεχές γράφημα για την στάθμη της μπαταρίας, για το 3<sup>ο</sup> 10ήμερο των 30 ημερών, όταν εκτελούμε τον κώδικα της 'Ready Algorithm with Battery' Version

Οι γραφικές παραστάσεις σχεδιάστηκαν με σκοπό τη μεγαλύτερη σαφήνεια, έτσι τοποθετήθηκαν διακεκομμένες κάθετες γραμμές που σηματοδοτούν ευδιάκριτα το τέλος κάθε ημέρας. Επιπλέον, περιλαμβάνουν ετικέτες στο κάτω μέρος, που προσδιορίζουν την ημέρα και μερικές κρίσιμες ώρες με τη μορφή (Day:Hour), για εύκολη αναφορά. Αυτή η

διάταξη όχι μόνο διευκολύνει την ανάλυση μεμονωμένων ημερών, αλλά επιτρέπει επίσης τη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών ημερών. Μέσω αυτής της παρουσίασης, εντοπίστηκαν δύο επαναλαμβανόμενα μοτίβα που εμφανίζονται με συνέπεια σε κάθε ημέρα, τα οποία και θα αναλυθούν λεπτομερώς.

Για την καλύτερη κατανόηση του πρώτου μοτίβου που εντοπίστηκε, παρουσιάζεται το ακόλουθο σχήμα:

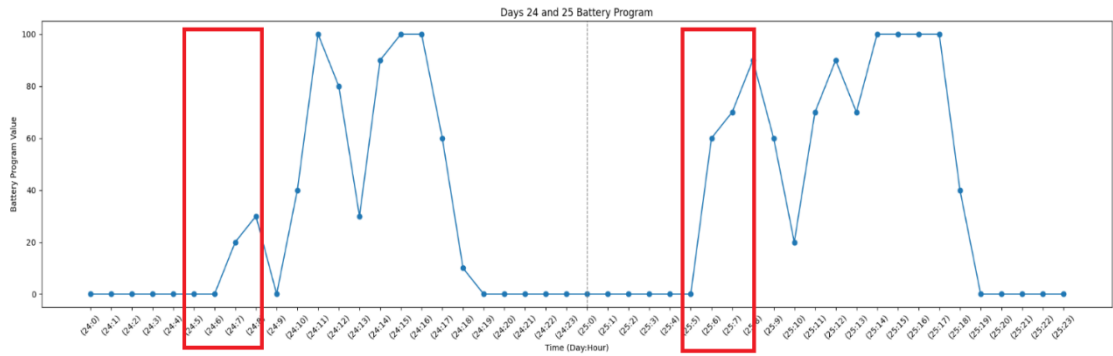


Εικόνα 30-Απομόνωση των διακυμάνσεων της στάθμης της μπαταρίας για 2 τυχαίες ημέρες για την κατανόηση του 1ου μοτίβου που εντοπίστηκε

Εξετάζοντας προσεκτικά δύο συγκεκριμένες ημέρες από το σύνολο των 30 (συγκεκριμένα την 24η και την 25η, αν και οποιοδήποτε ζευγάρι θα μπορούσε να αναλυθεί με παρόμοιο τρόπο), γίνεται εμφανές ότι η μπαταρία διαχειρίζεται την παραγόμενη ενέργεια με τέτοιο τρόπο ώστε να φτάσει σε πλήρη φόρτιση πριν από την έναρξη των περιόδων κατά τις οποίες η κατανάλωση ενέργειας υπερβαίνει την παραγωγή συμφωνά με τα αρχεία εισόδου. Σε αυτές τις περιόδους, η μπαταρία εκφορτίζεται, τροφοδοτώντας το συστήματα μέσω της αποθηκευμένης ενέργειας. Αυτή η συμπεριφορά έχει αιτία καθώς η τιμολόγηση της ενέργειας που προέρχεται από το δίκτυο φτάνει στην κορύφωσή της.

Κατά συνέπεια, η στάθμη της μπαταρίας παρουσιάζει ένα διακριτό μοτίβο, αφού φτάσει στη μέγιστη χωρητικότητά της συνήθως έπειτα από 2 έως 3 περιόδους μηδενίζεται λόγω ότι εκ φορτίζει την αποθηκευμένη ενέργεια για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του συστήματος. Πριν από αυτήν την κατάσταση, η στάθμη της μπαταρίας υπόκεινται σε διακυμάνσεις, οι οποίες ποικίλλουν και εξαρτώνται από την τιμολόγηση της ενέργειας, τη ζήτηση αλλά και την παραγωγή ενέργειας της εκάστοτε ημέρας.

Αφού εξετάστηκε και αναλύθηκε το πρώτο μοτίβο, τώρα η προσοχή στρέφεται στο δεύτερο μοτίβο. Η παρακάτω εικόνα θα χρησιμεύσει για τη διευκόλυνση της κατανόησης και της ανάλυσης αυτού του μοτίβου.



Εικόνα 31-Απομόνωση των διακυμάνσεων της στάθμης της μπαταρίας για 2 τυχαίες ημέρες για την κατανόηση του 2ου μοτίβου που εντοπίστηκε

Τα τμήματα που οριοθετούνται από τα κόκκινα ορθογώνια στο γράφημα απεικονίζουν ένα σταθερό μοτίβο. Η στάθμη της μπαταρίας είναι συνήθως στο χαμηλότερο σημείο της (δηλαδή μηδενική) στην αρχή της ημέρας. Στη συνέχεια, υπάρχει μια σκόπιμη αύξηση της, η οποία επιτυγχάνεται με την προμήθεια ενέργειας από το δίκτυο καθώς η παραγωγή ενέργειας είναι ακόμα μηδενική. Το σύστημα προβλέπει τις μελλοντικές ενεργειακές ανάγκες, επιλέγοντας να αγοράσει ενέργεια σε χαμηλότερη τιμή κατά τη διάρκεια των περιόδων εκτός αιχμής, αντί να επωμίζεται υψηλότερο κόστος σε επόμενες περιόδους. Κατά συνέπεια, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την προληπτική συσσώρευση ενεργειακού αποθέματος στην μπαταρία, προετοιμάζοντας ουσιαστικά το σύστημα να ανταποκριθεί σε περιόδους υψηλότερης ζήτησης πιο οικονομικά. Αυτό το μοτίβο υπογραμμίζει μια στρατηγική αξιοποίησης της ενέργειας του δικτύου για βέλτιστη χρήση από τη μπαταρία και οικονομικά αποδοτικότερη λειτουργία του συστήματος.

### 5.3.4 ‘Matched algorithm with battery’ Version

#### 5.3.4.1 Παράμετροι Εισόδου

Για να εξοικονομηθεί χώρος και να αποφευχθεί ο πλεονασμός, δεν θα παρατίθενται επανειλημμένα οι παράμετροι εισόδου. Αντ' αυτού, παρέχεται παραπομπή στην Εικόνα 17 όπου περιγράφονται αναλυτικά.

#### 5.3.4.2 Energy Management System Performance Analysis

- Βελτιστοποιημένα Αποτελέσματα για Ευέλικτα Φορτία

Χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Particle Swarm Optimazation, ο οποίος είναι ειδικά προσαρμοσμένος στα χαρακτηριστικά του προβλήματος, σε συνδυασμό με τον Δυναμικό Προγραμματισμό για τον προσδιορισμό της

στάθμης της μπαταρίας για κάθε χρονική στιγμή, προκύπτει η ακόλουθη βέλτιστη λύση.

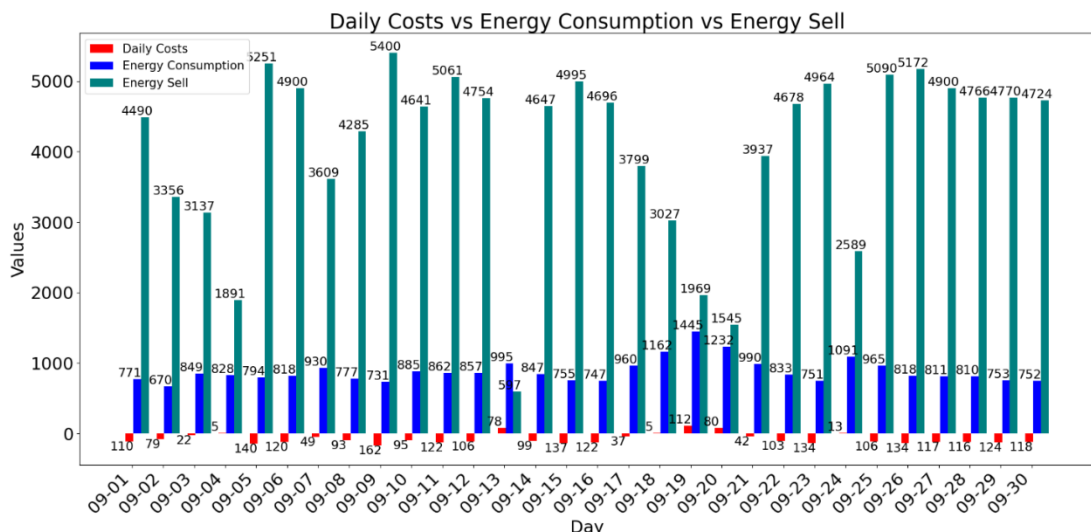
```

Optimal solution for 2018-09-01: ([[8, 15], [16], [11, 12, 14, 16], [15, 17], [8, 12, 13]])
Optimal solution for 2018-09-02: ([[11, 13], [17], [10, 11, 13, 16], [14, 20], [7, 10, 17]])
Optimal solution for 2018-09-03: ([[8, 11], [17], [8, 10, 15, 16], [11, 16], [9, 12, 17]])
Optimal solution for 2018-09-04: ([[12, 14], [17], [8, 12, 15, 16], [11, 17], [8, 10, 17]])
Optimal solution for 2018-09-05: ([[8, 10], [14], [9, 10, 12, 13], [11, 14], [8, 13, 16]])
Optimal solution for 2018-09-06: ([[8, 14], [17], [9, 10, 11, 15], [12, 17], [8, 15, 16]])
Optimal solution for 2018-09-07: ([[12, 14], [15], [8, 9, 11, 12], [9, 11], [8, 14, 15]])
Optimal solution for 2018-09-08: ([[11, 13], [17], [8, 12, 15, 16], [9, 16], [8, 9, 12]])
Optimal solution for 2018-09-09: ([[8, 12], [14], [8, 9, 12, 15], [8, 14], [10, 12, 14]])
Optimal solution for 2018-09-10: ([[8, 13], [17], [9, 10, 12, 15], [10, 14], [10, 12, 16]])
Optimal solution for 2018-09-11: ([[12, 13], [15], [9, 11, 12, 15], [10, 15], [8, 10, 15]])
Optimal solution for 2018-09-12: ([[13, 14], [17], [8, 10, 15, 17], [11, 14], [8, 12, 17]])
Optimal solution for 2018-09-13: ([[10, 11], [17], [12, 14, 16, 17], [10, 16], [9, 12, 16]])
Optimal solution for 2018-09-14: ([[10, 12], [16], [8, 11, 12, 15], [8, 16], [10, 12, 14]])
Optimal solution for 2018-09-15: ([[9, 15], [14], [8, 9, 13, 15], [13, 17], [9, 14, 16]])
Optimal solution for 2018-09-16: ([[9, 13], [16], [8, 12, 15, 17], [11, 12], [10, 13, 16]])
Optimal solution for 2018-09-17: ([[8, 13], [17], [9, 13, 14, 15], [8, 14], [10, 11, 13]])
Optimal solution for 2018-09-18: ([[9, 11], [15], [11, 12, 15, 16], [11, 14], [8, 10, 13]])
Optimal solution for 2018-09-19: ([[8, 13], [18], [8, 10, 13, 18], [9, 17], [8, 10, 19]])
Optimal solution for 2018-09-20: ([[13, 15], [15], [9, 10, 13, 15], [10, 20], [9, 15, 19]])
Optimal solution for 2018-09-21: ([[10, 13], [14], [8, 10, 14, 15], [8, 11], [8, 9, 12]])
Optimal solution for 2018-09-22: ([[9, 12], [16], [8, 10, 13, 15], [9, 11], [8, 12, 15]])
Optimal solution for 2018-09-23: ([[11, 14], [16], [12, 13, 15, 17], [10, 16], [11, 13, 15]])
Optimal solution for 2018-09-24: ([[13, 16], [14], [10, 11, 13, 14], [13, 16], [9, 13, 14]])
Optimal solution for 2018-09-25: ([[8, 10], [16], [9, 10, 12, 14], [8, 14], [9, 13, 16]])
Optimal solution for 2018-09-26: ([[8, 11], [16], [8, 11, 15, 17], [11, 14], [10, 15, 17]])
Optimal solution for 2018-09-27: ([[10, 13], [17], [8, 11, 12, 16], [12, 16], [8, 11, 15]])
Optimal solution for 2018-09-28: ([[9, 11], [16], [8, 12, 15, 17], [12, 14], [9, 13, 15]])
Optimal solution for 2018-09-29: ([[9, 12], [14], [8, 10, 11, 13], [13, 17], [9, 14, 16]])
Optimal solution for 2018-09-30: ([[9, 11], [14], [9, 10, 14, 16], [14, 17], [8, 11, 15]])

```

Εικόνα 32-Προτεινόμενη λύση για το σενάριο που εξετάζεται όταν εκτελούμε τον κώδικα της 'Matched Algorithm with Battery' Version

- Daily Costs vs Energy Consumption vs Energy Sell



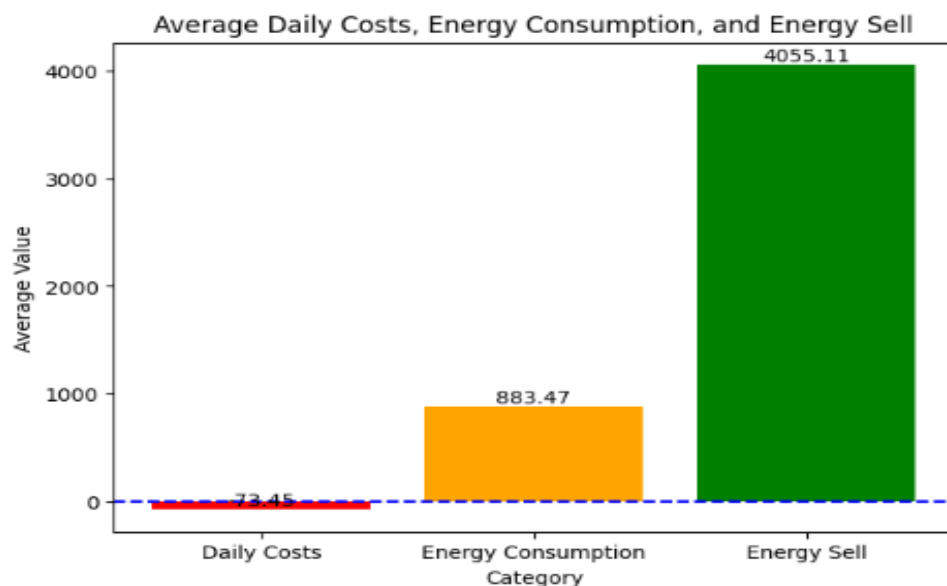
Εικόνα 33-Διαγράμματα αποτελεσμάτων για τις μεταβλητές Daily Costs, Energy Consumption, Energy Sell μετά την εκτέλεση της 'Matched Algorithm with Battery' Version

Οι τεχνικές βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται από έκδοση σε έκδοση γίνονται όλο και πιο εκλεπτυσμένες. Η τρέχουσα έκδοση αποτελεί το

αποκορύφωμα των προσπαθειών, χρησιμοποιώντας τα πιο προηγμένα "εργαλεία" για την επίτευξη των καλύτερων δυνατών αποτελεσμάτων. Παρατηρείται, επίσης, ότι τις περισσότερες ημέρες το κόστος δεν είναι απλώς αρνητικό, που υποδηλώνει μια μικρή παραγωγή εσόδων, αλλά αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό περιθώριο κέρδους. Επιπλέον, η μείωση της ενέργειας που πωλείται πίσω στο δίκτυο αποτελεί απόδειξη της αποδοτικότερης χρήσης της ενέργειας εντός του συστήματος, μια πτυχή που ήδη έχει τονιστεί προηγουμένως.

- Average Energy Metrics

Το ραβδόγραμμα παρουσιάζει τις μέσες τιμές των τριών βασικών μεταβλητών στην τρέχουσα έκδοση. Βάση αυτών δημιουργείται ένας συγκεντρωτικός πίνακας για τη σύγκριση των μέσων τιμών τους με τις αντίστοιχες της Ready algorithm with battery Version, ώστε να καταγραφεί η μεταβολή τους.



Εικόνα 34-Διαγράμματα για τις μέσες τιμές των μεταβλητών Daily Costs, Energy Consumption, Energy Sell μετά την εκτέλεση της 'Matched Algorithm with Battery' Version

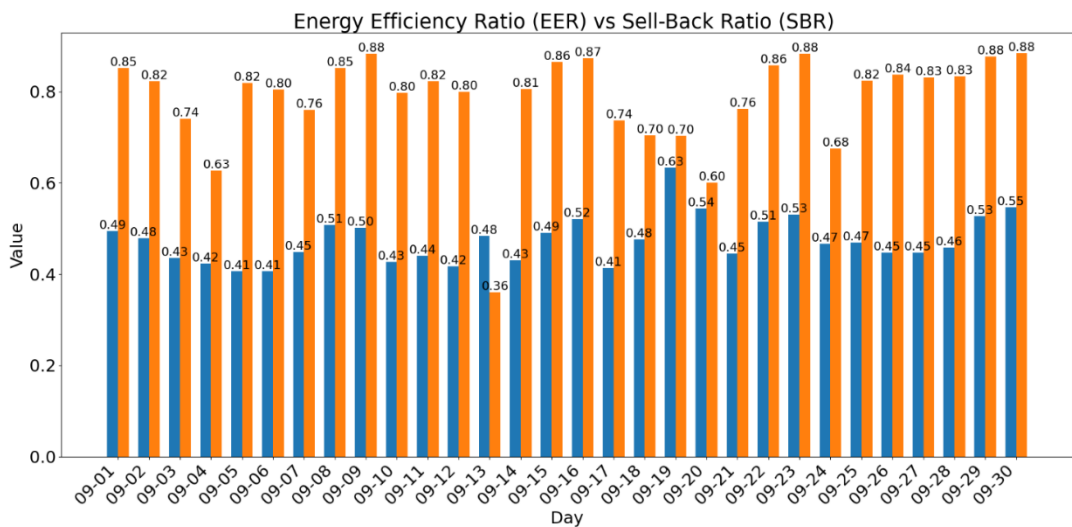
	Ready algorithm with battery Version	Matched algorithm with battery Version	Percentage change(%)
Daily Cost	-62.7 €	-73.45 €	-17.15%
Energy Consumption	951.38 kWh	883.47 kWh	-7.14%
Energy Sell	4124.02 kWh	4055.11 kWh	-1.6%

Πίνακας 4-Συγκριτική αριθμητική ανάλυση μεταξύ της 'Ready Algorithm with Battery' Version και της 'Matched Algorithm with Battery' Version

Τα δεδομένα καταδεικνύουν σαφώς ότι η χρήση του προσαρμοσμένου αλγορίθμου Particle Swarm Optimazation, σε αντίθεση με τη χρήση μιας προϋπάρχουσας υλοποίησης Particle Swarm Optimazation προσβάσιμη μέσω μιας τυπικής βιβλιοθήκης Python, πέτυχε τον κύριο στόχο, ο οποίος δεν είναι άλλος από τη μείωση του κόστους (-17.5%). Παρόλο που η κλίμακα της μείωσης δεν είναι τόσο μεγάλη όσο παρατηρήθηκε μεταξύ της Basic Version και της PV-Optimized Swarm Version, πρόκειται για μια αξιοσημείωτη μείωση που μπορεί να γίνει πιο εμφανής με την πάροδο ενός μεγαλύτερου χρονικού διαστήματος (> 30 ημέρες).

- Energy Efficiency and Sell-Back Ratios

Η αύξηση της απόδοσης του συστήματος αποδεικνύεται περαιτέρω από τη μείωση των τιμών του δείκτη Energy Efficiency, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες ημερήσιες τιμές της Ready algorithm with battery Version. Η μείωση αυτή (όχι πολύ μεγάλη) υπογραμμίζει μια σαφή βελτίωση των επιδόσεων διαχείρισης ενέργειας του συστήματος αλλά και μεγαλύτερη ανεξαρτησία από το δίκτυο.



Εικόνα 35-Διάγραμμα για τους, Energy Efficiency και Sell-Back, δείκτες στην 'Matched Algorithm with Battery' Version

- Χρόνος Εκτέλεσης

Η εφαρμογή του προσαρμοσμένου αλγορίθμου επέφερε βελτιώσεις στα αποτελέσματά. Αυτή η βελτίωση, ωστόσο, συνοδεύτηκε από αύξηση του χρόνου εκτέλεσης, ένα αντιστάθμισμα που είναι απολύτως δικαιολογημένο. Παρά τη σημαντική επέκταση του χρόνου εκτέλεσης σε 7330.59 δευτερόλεπτα (περίπου 122 λεπτά), ο χρόνος παραμένει σε ένα αποδεκτό

εύρος, αν λάβει κάποιος υπόψιν ότι άλλα προγράμματα μπορεί να απαιτούν πολλές περισσότερες ώρες για να αποδώσουν "καλά" αποτελέσματα.

- Daily Analysis of Battery

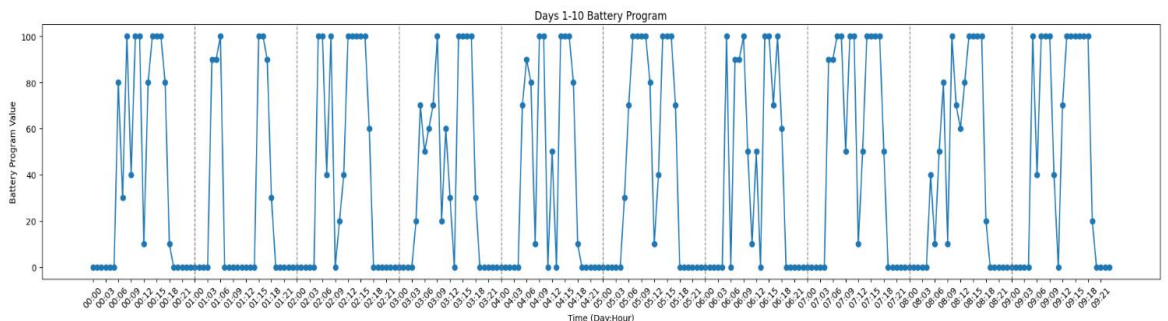
Τα καθημερινά προφίλ λειτουργίας της μπαταρίας που προέκυψαν, εκτελώντας το κώδικα για διάστημα 30 ημερών παρουσιάζονται παρακάτω.

```

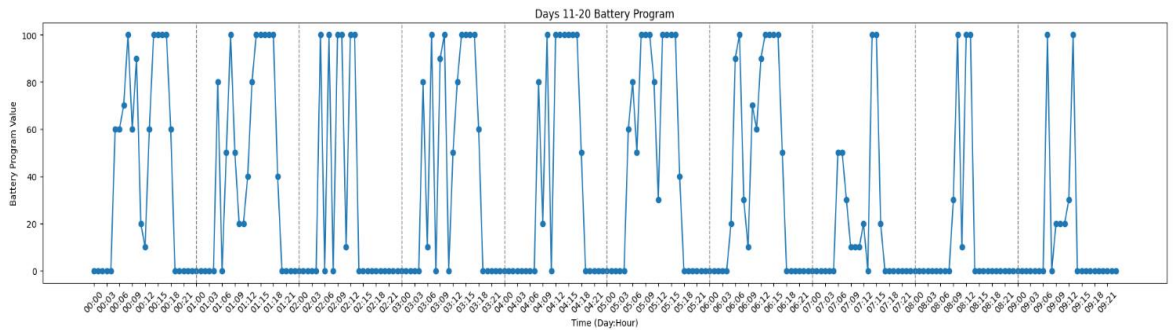
Battery program for 2018-09-01: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 80, 30, 100, 40, 100, 100, 10, 80, 100, 100, 100, 80, 10, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-02: [0, 0, 0, 0, 0, 90, 90, 100, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 100, 100, 90, 30, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-03: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 100, 100, 40, 100, 0, 20, 40, 100, 100, 100, 100, 100, 60, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-04: [0, 0, 0, 0, 0, 20, 70, 50, 60, 70, 100, 20, 60, 30, 0, 100, 100, 100, 100, 30, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-05: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 70, 90, 80, 10, 100, 100, 0, 50, 0, 100, 100, 100, 80, 10, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-06: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 30, 70, 100, 100, 100, 100, 80, 10, 40, 100, 100, 100, 70, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-07: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 100, 0, 90, 90, 100, 50, 10, 50, 0, 100, 100, 70, 100, 60, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-08: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 90, 90, 100, 100, 50, 100, 100, 10, 50, 100, 100, 100, 100, 50, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-09: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 40, 10, 50, 80, 10, 100, 70, 60, 80, 100, 100, 100, 100, 20, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-10: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 100, 40, 100, 100, 100, 40, 0, 70, 100, 100, 100, 100, 100, 100, 20, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-11: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 60, 60, 70, 100, 60, 90, 20, 10, 60, 100, 100, 100, 100, 60, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-12: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 80, 0, 50, 100, 50, 20, 20, 40, 80, 100, 100, 100, 100, 40, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-13: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 100, 0, 100, 0, 100, 100, 10, 100, 100, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-14: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 80, 10, 100, 0, 90, 100, 0, 50, 80, 100, 100, 100, 100, 60, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-15: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 80, 20, 100, 0, 100, 100, 100, 100, 100, 100, 50, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-16: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 60, 80, 50, 100, 100, 100, 80, 30, 100, 100, 100, 100, 40, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-17: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 20, 90, 100, 30, 10, 70, 60, 90, 100, 100, 100, 100, 50, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-18: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 50, 50, 30, 10, 10, 10, 20, 0, 100, 100, 20, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-19: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 30, 100, 10, 100, 100, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-20: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 100, 0, 20, 20, 20, 30, 100, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-21: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 100, 40, 20, 100, 60, 60, 10, 60, 100, 100, 100, 100, 50, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-22: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 10, 90, 70, 100, 0, 80, 0, 0, 0, 100, 100, 100, 50, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-23: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 70, 90, 100, 100, 100, 40, 90, 100, 100, 100, 100, 100, 60, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-24: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 10, 0, 30, 50, 100, 100, 60, 10, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-25: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 80, 100, 100, 20, 10, 60, 100, 100, 100, 100, 100, 100, 40, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-26: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 90, 10, 100, 20, 50, 100, 20, 60, 100, 100, 100, 100, 30, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-27: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 60, 30, 90, 100, 100, 10, 70, 20, 100, 100, 100, 100, 40, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-28: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 80, 0, 0, 20, 40, 40, 70, 40, 60, 100, 100, 100, 30, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-29: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 10, 60, 60, 100, 100, 20, 100, 60, 100, 100, 100, 100, 40, 0, 0, 0, 0, 0]
Battery program for 2018-09-30: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 20, 80, 50, 90, 100, 60, 30, 80, 100, 100, 100, 40, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
    
```

Εικόνα 36-Προτεινόμενος ωριαίος προσδιορισμός της στάθμης της μπαταρίας , για διάστημα 30 ημερών, όταν εκτελούμε τον κώδικα της 'Matched Algorithm with Battery' Version

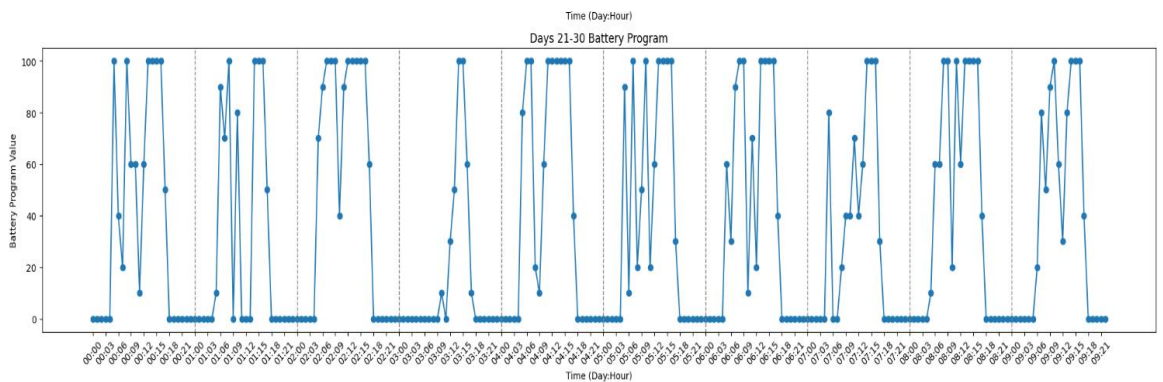
Αξιοποιώντας τις ωριαίες τιμές της παραπάνω εικόνας, κατασκευάστηκε ένα γράφημα που απεικονίζει τις καθημερινές διακυμάνσεις στα επίπεδα ενέργειας της μπαταρίας.



Εικόνα 37-Συνεχές γράφημα για την στάθμη της μπαταρίας, για το 1<sup>ο</sup> 10ήμερο των 30 ημερών, όταν εκτελούμε τον κώδικα της 'Matched Algorithm with Battery' Version



Εικόνα 38-Συνεχές γράφημα για την στάθμη της μπαταρίας, για το 2<sup>ο</sup> 10ήμερο των 30 ημερών, όταν εκτελούμε τον κώδικα της 'Matched Algorithm with Battery' Version



Εικόνα 39-Συνεχές γράφημα για την στάθμη της μπαταρίας, για το 3<sup>ο</sup> 10ήμερο των 30 ημερών, όταν εκτελούμε τον κώδικα της 'Matched Algorithm with Battery' Version

Κατά την ενδελεχή εξέταση και των τριών γραφημάτων, τα δύο μοτίβα που εντοπίστηκαν και αναλύθηκαν προηγουμένως γίνονται εμφανή, το οποίο είναι κάτι απόλυτα φυσιολογικό και αναμενόμενο. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό, είναι επειδή ο προσαρμοσμένος αλγόριθμος που χρησιμοποιείται έχει σχεδιαστεί ειδικά για τη βελτιστοποίηση της κατανομής φορτίων κατανέμοντας τα στις κατάλληλες χρονικές στιγμές και δεν αφορά τη λειτουργία της μπαταρίας, η οποία καθορίζεται αποκλειστικά από τον Δυναμικό Προγραμματισμό.

#### 5.4 Ανάλυση και Συγκριτική Αξιολόγηση της Επίδρασης Διαφορετικών παραμέτρων $n\_particles$ και $n\_iterations$ στις Διαφορετικές Εκδοχές κώδικα

Στις τρεις εκδοχές (PV-Optimized Swarm Version, Ready algorithm with battery Version, Matched algorithm with battery Version) όπου χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος Particle Swarm Optimazation, οι παράμετροι  $n\_particles$  και  $n\_iterations$  ορίστηκαν σε 50 και 100, αντίστοιχα. Η αύξηση αυτών των παραμέτρων θεωρείται μια στρατηγική για την καλύτερη εξερεύνηση του χώρου λύσεων. Με αυτό το τρόπο, παρέχεται στον αλγόριθμο μεγαλύτερο εύρος αναζήτησης και περισσότερες επαναλήψεις για να βελτιώσει την προσέγγισή του, αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα σύγκλισης σε μια πιο βέλτιστη λύση.

Ωστόσο, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι αυξήσεις του  $n\_particles$  και του  $n\_iterations$  δεν εξασφαλίζουν με βεβαιότητα τη βελτίωση της λύσης. Η αποτελεσματικότητα της αύξησης των  $n\_particles$  και των  $n\_iterations$  εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η πολυπλοκότητα του εκάστοτε προβλήματος και τα χαρακτηριστικά του χώρου λύσεων.

Επιπλέον, αξίζει να τονιστεί ότι με την αύξηση των  $n\_particles$  και των  $n\_iterations$ , δυνητικά ενισχύεται η πιθανότητα εύρεσης πιο βέλτιστων λύσεων, αλλά αυτό συνεπάγεται την ανάγκη για μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ. Αυτή η κλιμάκωση των απαιτήσεων σε πόρους συσχετίζεται άμεσα με την αύξηση του χρόνου υπολογισμού. Η ισορροπία μεταξύ της ποιότητας της λύσης και της υπολογιστικής αποδοτικότητας συχνά επηρεάζει την επιλογή στη διαδικασία λήψης αποφάσεων σχετικά με τις σταθερές μεταβλητές του αλγορίθμου.

Παρακάτω θα εμφανιστούν τα αποτελέσματα για τις τρεις διαφορετικές εκδόσεις σε ξεχωριστούς πίνακες, που προέκυψαν από την εκτέλεση τους με αυξημένες τιμές των παραμέτρων  $n\_particles$  και  $n\_iterations$ . Αυτή η παρουσίαση θα παρέχει μια πιο σαφή εικόνα για την αξιολόγηση και τον προσδιορισμό των σταθερών ( $n\_particles$  &  $n\_iterations$ ) που ταιριάζει καλύτερα με τους στόχους και εξυπηρετεί αποτελεσματικότερα τις ανάγκες του συστήματος.

#### Για την PV-Optimized Swarm Version:

	$n\_particles=50$ & $n\_iterations=100$	$n\_particles=150$ & $n\_iterations=200$	Percentage change(%)
Daily Cost	-38.92 €	-44.85 €	-15.23%
Energy Consumption	1014.42 kWh	1000.66 kWh	-1.36%
Energy Sell	4252.36 kWh	4164.46 kWh	-2.07%
Χρόνος Εκτέλεσης	500 sec	1239.39 sec	147.8%

*Πίνακας 5-Συγκριτική αριθμητική ανάλυση της 'PV-Optimized Swarm' Version για μεγαλύτερες τιμές των  $n\_particles$  και  $n\_iterations$*

#### Για την Ready algorithm with battery Version:

	$n\_particles=50$ & $n\_iterations=100$	$n\_particles=150$ & $n\_iterations=200$	Percentage change(%)
Daily Cost	-62.7 €	-67.39 €	-7.48%
Energy Consumption	951.38 kWh	940.1 kWh	-1.19%
Energy Sell	4124.02 kWh	4112.74 kWh	-0.27%
Χρόνος Εκτέλεσης	2610 sec	4121.32 sec	57.9%

*Πίνακας 6-Συγκριτική αριθμητική ανάλυση της 'Ready Algorithm with Battery' Version για μεγαλύτερες τιμές των  $n\_particles$  και  $n\_iterations$*

#### Για την Matched algorithm with battery Version:

	n_particles=50 & n_iterations=100	n_particles=150 & n_iterations=200	Percentage change(%)
Daily Cost	-73.45 €	-76.86 €	-4.64%
Energy Consumption	883.47 kWh	833.74 kWh	-5.63%
Energy Sell	4055.11 kWh	3952.71 kWh	-2.53%
Χρόνος Εκτέλεσης	7330.59 sec	21759.21 sec	196.83%

Πίνακας 7-Συγκριτική αριθμητική ανάλυση της 'Matched Algorithm with Battery' Version για μεγαλύτερες τιμές των n\_particles και n\_iterations

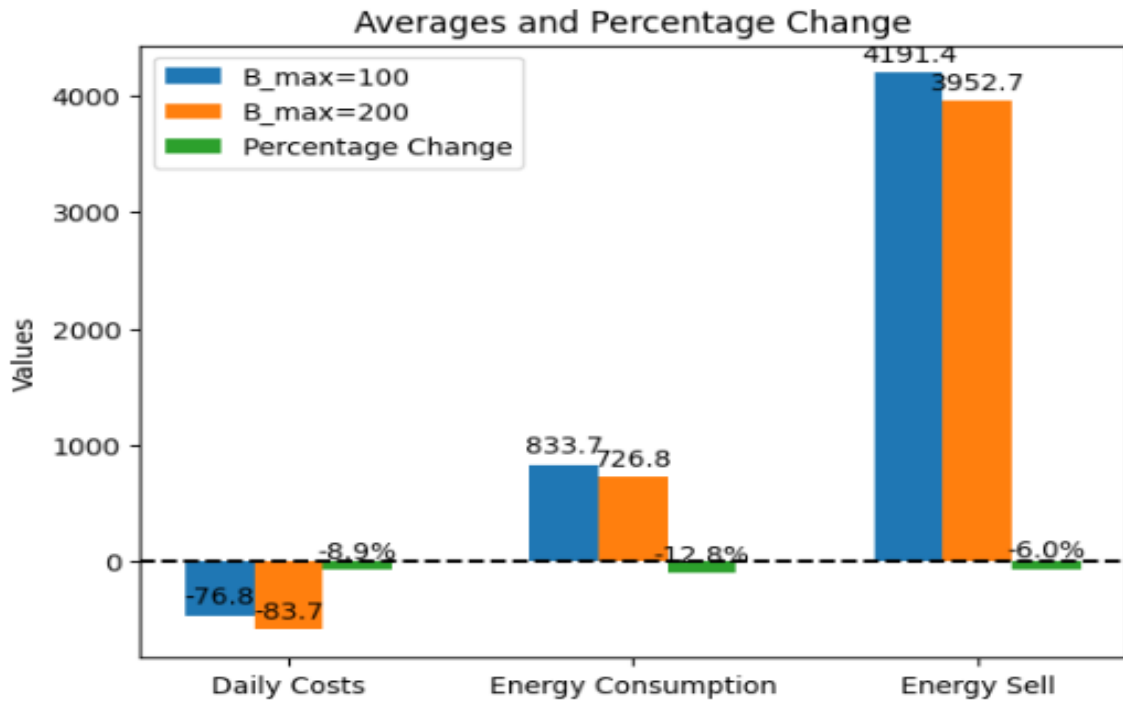
Τα αριθμητικά δεδομένα που παρουσιάζονται στους πίνακες δείχνουν σαφώς ότι, λόγω της όχι δεδομένης μεγάλης πολυπλοκότητας του προβλήματος και της δομημένης προσέγγισης για τη διερεύνηση του χώρου λύσεων, η αύξηση των n\_particles και των n\_iterations συνέβαλε στη βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων. Ωστόσο, ο βαθμός βελτίωσης δεν είναι τόσο μεγάλος όσο θα περίμενε κανείς. Η παρατήρηση αυτή υποδηλώνει ότι οι αρχικές τιμές που επιλέχθηκαν για τα n\_particles και n\_iterations ήταν αρκετά αποτελεσματικές.

Ειδικότερα, η αύξηση του χρόνου εκτέλεσης ήταν σημαντικά δυσανάλογη με τα κέρδη στην απόδοση του συστήματος. Η ώθηση των τιμών των n\_particles και n\_iterations σε ακόμη υψηλότερες τιμές θα οδηγούσε πιθανότατα σε εκθετική αύξηση του χρόνου υπολογισμού, με μικρές μόνο βελτιώσεις στις λύσεις. Κατά συνέπεια, η περαιτέρω κλιμάκωση αυτών των παραμέτρων μπορεί να μην αποτελεί αποδοτική στρατηγική, καθώς θα οδηγούσε σε ελάχιστες βελτιώσεις εις βάρος σημαντικά περισσότερων πόρων και χρόνου εκτέλεσης.

## 5.5 Συγκριτική Ανάλυση Διαφορετικών Μεγίστων Χωρητικότητας Μπαταρίας (B\_max)

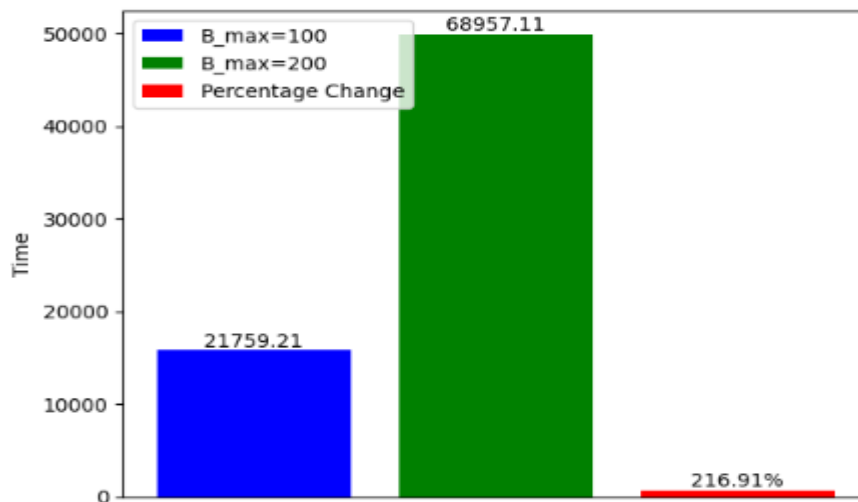
Η επόμενη φάση της ανάλυσής περιλαμβάνει εξέταση της μέγιστης χωρητικότητας της μπαταρίας. Αρχικά, επιλέχθηκε τιμή χωρητικότητας ίση με 100 kWh με στόχο να διασφαλιστεί ότι το μέγεθος της μπαταρίας ήταν συγκρίσιμο μέγεθος με τα επίπεδα κατανάλωσης που αναφέρονται στα αρχεία δεδομένων. Για τη καλύτερη κατανόηση της επίδραση της μέγιστης χωρητικότητας της μπαταρίας στο σύστημα, θα αυξηθεί η τιμή της και θα εκτελεστεί ξανά ο κώδικας που δίνει τα πιο βέλτιστα αποτελέσματα (προσαρμοσμένος αλγόριθμος Particle Swarm Optimazation και Δυναμικός Προγραμματισμός για το προσδιορισμό της στάθμης της μπαταρίας κάθε χρονική στιγμή).

Για τις βασικές μεταβλητές που μελετήθηκαν και παραπάνω προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα αυξάνοντας την μέγιστη χωρητικότητα από 100 kWh σε 200 kWh.



Εικόνα 40-Συγκριτική ανάλυση αποτελεσμάτων για τις μεταβλητές Daily Costs, Energy Consumption και Energy Sell όταν η μέγιστη χωρητικότητα της μπαταρίας είναι 100 και 200

Όσον αφορά το χρόνο εκτέλεσης:



Εικόνα 41-Συγκριτική ανάλυση για τους χρόνους εκτέλεσης όταν η μέγιστη χωρητικότητα της μπαταρίας είναι 100 και 200

Εν κατακλείδι, η αύξηση της μέγιστης χωρητικότητας (B\_max) της μπαταρίας είναι επωφελής τόσο για τη μείωση του κόστους, αλλά και για τη βελτιστοποίηση της ποσότητας αγοράς ενέργειας από το δίκτυο. Καθώς αυξάνεται η χωρητικότητα της

μπαταρίας, αυξάνονται και οι ανάγκες της μπαταρίας για ενέργεια, μειώνοντας κατά συνέπεια την ενέργεια που πωλείται πίσω στο δίκτυο. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτή η αύξηση της  $B_{max}$  οδηγεί σε σημαντική αύξηση του χρόνου υπολογισμού. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η πολυπλοκότητα του Δυναμικού Προγραμματισμού αυξάνεται λόγω του  $B_{max}$ , καθώς οι υπολογισμοί που απαιτούνται πολλαπλασιάζονται.

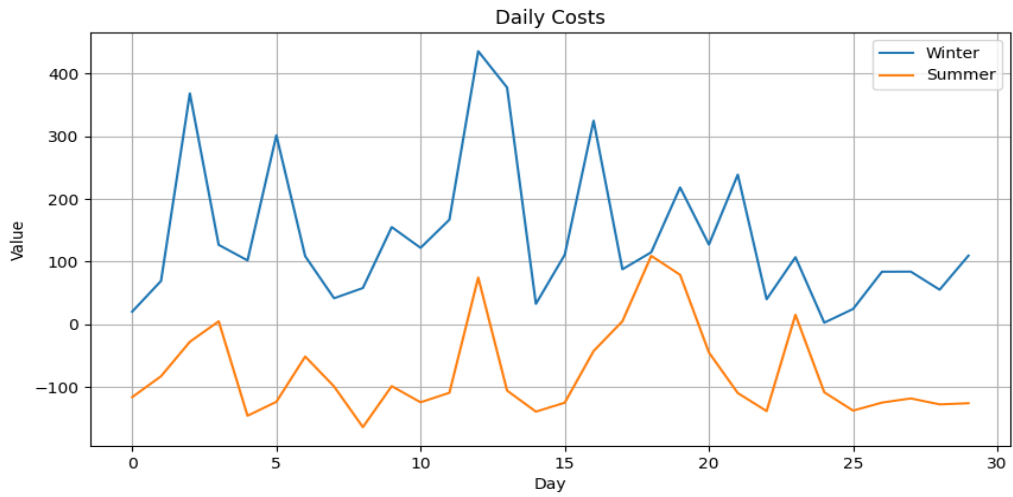
Είναι ενδιαφέρον ότι ενώ η αύξηση της χωρητικότητας της μπαταρίας μπορεί διαισθητικά αλλά και αριθμητικά να φαίνεται επωφελής είναι ζωτικής σημασίας να εξεταστούν οι πιθανές αντισταθμίσεις. Μια σημαντική αύξηση της  $B_{max}$  θα μπορούσε να οδηγήσει σε δυσανάλογους χρόνους υπολογισμού όπως και οδήγησε, ενώ υπάρχει επίσης ο κίνδυνος η μπαταρία να μην φτάσει ποτέ σε πλήρη φόρτιση, εάν η χωρητικότητά της ξεπερνά υπερβολικά τις δυνατότητες παραγωγής του συστήματος. Αυτό το σενάριο θα οδηγούσε σε μια υπερμεγέθη μπαταρία που δεν συντονίζεται με τις λειτουργικές ανάγκες του συστήματος. Ως εκ τούτου, ο καθορισμός του  $B_{max}$  σε 100 kWh αναδεικνύεται ως μια ισορροπημένη επιλογή, επιτυγχάνοντας μια συνετή ισορροπία μεταξύ της υπολογιστικής απόδοσης και της ποιότητας των αποτελεσμάτων.

## **5.6 Συγκριτική Αξιολόγηση Εποχιακής Επίδρασης στην Απόδοση του Συστήματος**

Διευρύνοντας το φάσμα της μελέτης, θεωρείται σκόπιμο να επεκταθεί το πεδίο εφαρμογής του σεναρίου πέρα από την αρχική θερινή περίοδο. Βασιζόμενοι σε αυτό, διερευνήθηκε πώς ανταποκρίνεται το σύστημα κατά τους χειμερινούς μήνες. Κατά συνέπεια, ορίστηκε ως αρχική ημερομηνία εκτέλεσης η 1η Δεκεμβρίου 2018, καλύπτοντας ένα διάστημα 30 ημερών. Το σενάριο που ορίστηκε είναι ακριβώς το ίδιο που εκτελέστηκε και στην καλοκαιρινή περίοδο (ίδιος αριθμός ευέλικτων φορτίων και ίδιες ώρες λειτουργίας για το καθένα ξεχωριστά). Η υλοποίηση του κώδικα που επιλέχθηκε για την εκτέλεση αυτού του σεναρίου επιλέχθηκε με βάση τα καλύτερα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση.

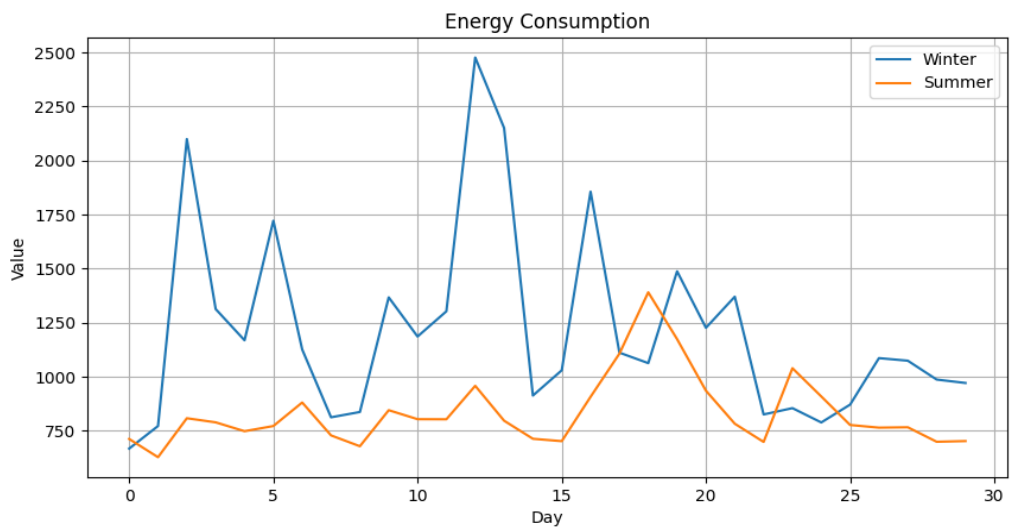
Για τις βασικές μεταβλητές δημιουργήθηκαν μεμονωμένα, συνεχή διαγράμματα, ενσωματώνοντας τα δεδομένα τόσο της θερινής όσο και της χειμερινής περιόδου.

Daily Cost:



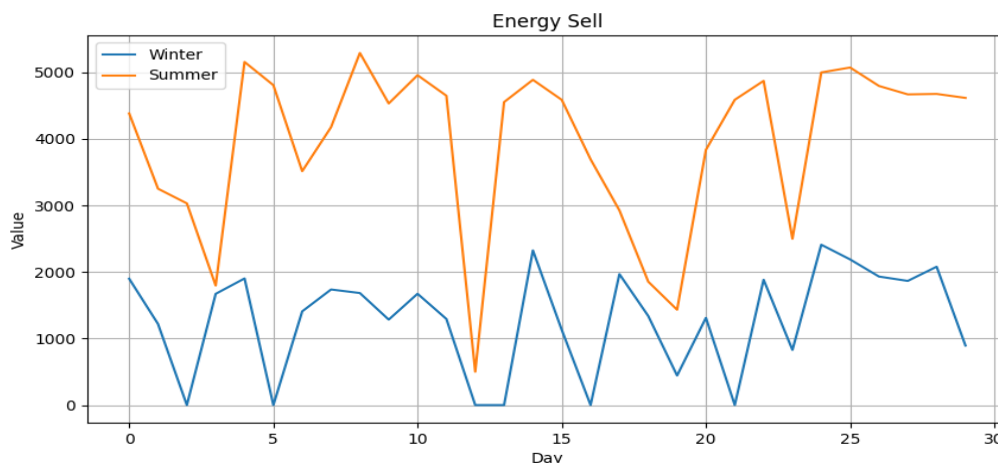
Εικόνα 42-Συγκριτικό γράφημα για την μεταβλητή Daily Costs κατά την καλοκαιρινή και χειμερινή περίοδο

### Energy Consumption:



Εικόνα 43-Συγκριτικό γράφημα για την μεταβλητή Energy Consumption κατά την καλοκαιρινή και χειμερινή περίοδο

### Energy Sell:



Εικόνα 44-Συγκριτικό γράφημα για την μεταβλητή Energy Sell κατά την καλοκαιρινή και χειμερινή περίοδο

Και τα τρία σχήματα καταδεικνύουν τη σημαντική επίδραση της εποχής στις τρεις μεταβλητές. Η αξιοσημείωτη διαφορά στις τιμές μεταξύ των δύο εποχών οφείλεται κυρίως στη σημαντικά υψηλότερη παραγωγή ενέργειας το καλοκαίρι σε σύγκριση με το χειμώνα. Κατά συνέπεια, το κόστος (Daily Cost) κατά τη διάρκεια του χειμώνα είναι σημαντικά υψηλότερο σε σχέση με το καλοκαίρι.

Ένα σημείο ιδιαίτερου ενδιαφέροντος στο 1<sup>ο</sup> σχήμα, εκ των τριών, είναι η σύγκλιση των δύο διαγραμμάτων τη 19η και 20ή Σεπτεμβρίου, μια περίοδος που είχε επισημανθεί προηγουμένως λόγω της μειωμένης παραγωγής ενέργειας. Η σύγκλιση αυτή αποδίδεται εν μέρει στο ότι οι συγκεκριμένες μέρες το χειμώνα (19<sup>η</sup> και 20<sup>η</sup> Δεκεμβρίου) έχουν ένα από τα χαμηλότερα κόστη, υποδεικνύοντας ότι η παραγωγή ενέργειας αυτών των μερών είναι υψηλότερη σε σύγκριση με άλλες.

Μια άλλη ενδιαφέρουσα παρατήρηση στο 3<sup>ο</sup> διάγραμμα (Energy Sell), κατά σειρά, είναι οι συχνές "βουτιές" στο μηδέν (4-5 φορές) που γίνονται. Μια λεπτομερής ανάλυση των δεδομένων για τις συγκεκριμένες ημερομηνίες αποκάλυψε ότι η διαφορά μεταξύ της παραγωγής ενέργειας και της σταθερής κατανάλωσης ήταν αρνητική σε κάθε ώρα της ημέρας, το οποίο σημαίνει ότι το σύστημα καλείται να καλύψει τις ανάγκες του μέσω του δικτύου ή μέσω της μπαταρίας αποκλειστικά.

Αυτή η παρατήρηση οδήγησε σε πιο λεπτομερή ανάλυση της συμπεριφοράς της στάθμης της μπαταρίας κατά τη διάρκεια των εν λόγω ημερών. Το προφίλ φόρτισης της μπαταρίας στις συγκεκριμένες ημέρες ακολουθούσε συγκεκριμένο μοτίβο που έμοιαζε ως εξής: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 100, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0] (χρησιμοποιήθηκε το παράδειγμα της 3<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου). Το μοτίβο αυτό καταδεικνύει ότι μέσω του Δυναμικού Προγραμματισμού, το σύστημα αναγνωρίζει την ανάγκη πλήρους φόρτισης της μπαταρίας αγοράζοντας ενέργεια από το δίκτυο στις ώρες με χαμηλότερη τιμή και διοχετεύοντας την σε ώρες με υψηλότερη τιμή. Στη περίπτωση της 3<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου ελήφθη η απόφαση να αγοραστούν επιπλέον 100 kWh ενέργειας. Η κίνηση αυτή αποσκοπούσε στην πλήρη φόρτιση της μπαταρίας κατά την τελευταία

ώρα (7<sup>η</sup> ώρα ή 7 το πρωί) της ημέρας στην οποία η τιμή της ενέργειας ήταν μειωμένη, καθώς στις επόμενες ώρες οι τιμές ενέργειας θα αυξηθούν. Στη συνέχεια, η αποθηκευμένη ενέργεια χρησιμοποιήθηκε την επόμενη ώρα (8<sup>η</sup> ώρα ή 8 το πρωί), κατά την οποία το κόστος αγοράς ενέργειας είχε αυξηθεί. Αυτή η 'έξυπνη' χρήση της μπαταρίας από το σύστημα αποσκοπεί στη βελτιστοποίηση της εξοικονόμησης κόστους, κάτι το οποίο εν τέλει το πετυχαίνει.

Σε αυτή την περίπτωση η αύξηση της χωρητικότητας της μπαταρίας θα ήταν αναμφίβολα επωφέλης. Με μεγαλύτερη ικανότητα αποθήκευσης, οι ποσότητες αποθήκευσης ενέργειας θα ήταν μεγαλύτερες, ιδίως σε περιόδους χαμηλότερου κόστους. Αυτό το απόθεμα θα μπορούσε στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία του συστήματος σε περιόδους που η αγορά ενέργειας είναι πιο δαπανηρή. Η διευρυμένη χωρητικότητα θα λειτουργούσε ουσιαστικά ως ρυθμιστικό απόθεμα, επιτρέποντας μια πιο πιθανώς πιο αποτελεσματική διαχείριση της ενέργειας.

## 6 Συμπεράσματα και Προτάσεις Μελλοντικής Εξέλιξης

### 6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διατριβή, πραγματοποιήθηκε μια ολοκληρωμένη μελέτη με σκοπό την επιλογή των κατάλληλων αλγορίθμων και μεθόδων για τη βέλτιστη διαχείριση φορτίου σε συστήματα μικροδικτύων. Η προσπάθεια αυτή περιελάμβανε όχι μόνο τη διερεύνηση των υφιστάμενων αλγορίθμων και μεθόδων διαχείρισης φορτίου, αλλά και την ανάπτυξη ενός πλαισίου λήψης αποφάσεων για την διαδικασία επιλογής. Η μεθοδολογία βασίστηκε στην αξιολόγηση της αποδοτικότητας και της αποτελεσματικότητας διαφόρων αλγορίθμων και μεθόδων σε παρόμοια προβλήματα. Έτσι, αποφασίστηκε η στρατηγική προσέγγιση που αναλύθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια διεξοδικά.

Κατά τη διάρκεια αυτής της διατριβής, ένα ευρύ φάσμα δεδομένων, μεθοδολογιών και θεωρητικών προοπτικών αξιοποιήθηκε για να διερευνηθεί η περιπλοκότητα του προβλήματος. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν και παρουσιάστηκαν από αυτή την μελέτη, παρέχουν πολύτιμες γνώσεις και ιδέες για το υπό εξέταση θέμα. Σε αυτό το τελευταίο κεφάλαιο αξιοποιούνται τα στοιχεία που συγκεντρώνονται ώστε να διατυπωθούν τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την έρευνα.

Η μελέτη αυτή θέτει τους χρήστες στο προσκήνιο, δίνοντάς τους τη δυνατότητα να επιλέγουν τα προτιμώμενα φορτία και το σε ποιο χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια της ημέρας θα τοποθετηθεί το εκάστοτε φορτίο, ενισχύοντας την ικανοποίησή τους. Το σενάριο, που σχεδιάστηκε για να αντικατοπτρίζει τις πραγματικές ανάγκες ενέργειας της σύγχρονης κοινωνίας, αποδεικνύει ότι η χρησιμοποίηση τόσο τυπικών, μέσω βιβλιοθήκης της γλώσσας προγραμματισμού Python, όσο και του προσαρμοσμένου αλγορίθμου Particle Swarm Optimazation (PSO), σε συνδυασμό με Δυναμικό Προγραμματισμό για τη διαχείριση της στάθμης της μπαταρίας κάθε χρονική στιγμή, μειώνει σημαντικά το κόστος και μειώνει σταδιακά την εξάρτηση του συστήματος από το δίκτυο. Η λύση που παρουσιάζεται στην έξοδο του κώδικα είναι διαμορφωμένη με γνώμονα την εξασφάλιση της κατανόησης από το ευρύ κοινό. Τέλος, η αλλαγή των εποχών επηρεάζουν σημαντικά το κόστος. Αυτό οφείλεται, κυρίως, στην αύξηση της παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, η οποία μεταβάλλει σημαντικά τη δυναμική της προσφοράς και της ζήτησης. Ουσιαστικά, η εποχικότητα της παραγωγής ενέργειας αποτελεί βασικό παράγοντα καθώς επηρεάζει άμεσα το κόστος κατά τις διάφορες περιόδους του έτους.

Όσον αφορά τον αλγόριθμο PSO, αποδεικνύεται αποτελεσματική επιλογή, καθώς επιτυγχάνονται οι στόχοι της μελέτης που περιγράφονται στο θεωρητικό πλαίσιο. Η προσαρμοσμένη, στο πρόβλημα, υλοποίηση του PSO ξεχωρίζει ιδιαίτερα για τα αποτελέσματα που προκύπτουν. Στο πλαίσιο του PSO, η επιλογή των σταθερών που τον συνοδεύουν είναι σημαντική για την εξισορρόπηση της αποτελεσματικότητας των λύσεων αλλά και του χρόνου υπολογισμού. Οι δοκιμές επιβεβαίωσαν ότι οι αρχικές τιμές που ορίστηκαν στις σταθερές ήταν αρκετά καλές επιλογές. Βέβαια, η αύξηση των  $n\_iterations$  και  $n\_particles$  μείωσε περαιτέρω το κόστος και την εξάρτηση από το

δίκτυο, οδήγησε όμως σε αύξηση του χρόνου υπολογισμού. Ωστόσο, οι χρόνοι αυτοί παρέμειναν εντός λογικών ορίων. Η περαιτέρω αύξηση των  $n\_iterations$  και  $n\_particles$  θα οδηγούσε σε εκθετική αύξηση του χρόνου, γεγονός που θα έκανε την διαδικασία ανυπόφορη.

Ο Δυναμικός Προγραμματισμός (DP) διαδραματίζει επίσης ζωτικό ρόλο στην εύρεση αλλά και στην αποτελεσματικότητα της λύσης, αποδεικνύοντας ότι αποτελεί θεωρητικά ορθή επιλογή για τέτοιες διαδικασίες λήψης αποφάσεων. Η επιλογή του  $B\_max$  συνδέεται στενά με τον Δυναμικό Προγραμματισμό, καθώς ο πίνακας υπολογισμού κάθε σταδίου εξαρτάται τη μέγιστη χωρητικότητα της μπαταρίας οδηγώντας σε εκθετική αύξηση του χρόνου υπολογισμού. Οι σταδιακές αυξήσεις του  $B\_max$  έδειξαν θετικές επιπτώσεις, ωστόσο ο στόχος ήταν η ισορροπία μεταξύ αποτελεσμάτων και χρόνου εκτέλεσης. Με το  $B\_max$  ίσο με 200 kWh, παρατηρήθηκαν βέλτιστα αποτελέσματα εντός αποδεκτών χρονικών πλαισίων, καθιστώντας την καταλληλότερη επιλογή. Αποφευχθήκαν περαιτέρω αυξήσεις της χωρητικότητας λόγω των αναμενόμενων υπερβολικών χρόνων υπολογισμού.

## 6.2 Προτάσεις Εξέλιξης

Είναι σημαντική η ένταξη του έργου στο πλαίσιο ενός εξελισσόμενου τοπίου της διαχείρισης ενέργειας εντός μικροδικτύου. Οι γνώσεις που αποκομίζονται από την παρούσα μελέτη αποτελούν εφελκτήριο, θέτοντας τις βάσεις για περαιτέρω έρευνα και καινοτομία. Ο δρόμος για την επόμενη μέρα έχει ερωτήματα που δεν έχουν ακόμη απαντηθεί και προκλήσεις που δεν έχουν ακόμη αντιμετωπιστεί. Σε αυτό το πνεύμα της αδιάκοπης αναζήτησης της γνώσης παρουσιάστηκαν τα συμπεράσματά, όχι ως ένα τελικό σημείο, αλλά ως ένα πλεονεκτικό σημείο από το οποίο μπορεί να οραματιστεί κάποιος τις μελλοντικές προοπτικές της διαχείρισης φορτίου σε συστήματα μικροδικτύων. Κάποιες προτάσεις μελλοντικής εξέλιξης είναι οι εξής:

- Σχεδίαση ενός διαφορετικού σεναρίου προσομοίωσης σε σχέση με αυτό που παρουσιάστηκε, με αυξημένο πιθανώς τον αριθμό στα φορτία, εκτεταμένες ώρες λειτουργίας για καθένα από αυτά και σύμφωνο με τα πρότυπα κατανάλωσης της εποχής με σκοπό την αξιολόγηση της προσαρμοστικότητας και της απόδοσης του προσαρμοσμένου αλγορίθμου PSO σε συνδυασμό με τον Δυναμικό Προγραμματισμό υπό πιο σύνθετες συνθήκες.
- Δοκιμή του προσαρμοσμένου αλγορίθμου PSO σε ποικίλα προβλήματα με διαφορετικούς στόχους (διαφορετική αντικειμενική συνάρτηση) στο τομέα, κυρίως, της διαχείρισης ενέργειας σε μικροδίκτυο αλλά και σε άλλους τομείς, προκειμένου να διαπιστωθεί η ευελιξία και η ευρεία εφαρμογή του.
- Διεξαγωγή συγκριτικής ανάλυσης διαφόρων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Αυτή η ανάλυση μπορεί να περιλαμβάνει την ενσωμάτωση και άλλων μεθόδων εκτός από τον Δυναμικό Προγραμματισμό για το προσδιορισμό του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, με στόχο την ανακάλυψη πιο αποδοτικών εναλλακτικών λύσεων αν και εφόσον υπάρχουν.

- Αξιολόγηση της απόδοσης του υλοποιημένου προσαρμοσμένου αλγορίθμου PSO έναντι άλλων ευρετικών αλγορίθμων μέσω λεπτομερούς συγκριτικής ανάλυσης για την ανάδειξη των δυνατών και αδύνατων σημείων του στη διαχείριση φορτίου.
- Πρόταση διαφόρων κινήτρων, όπως εκπτώσεις ή ανταμοιβές, για την ενθάρρυνση των καταναλωτών για τη μετατόπιση της χρήσης φορτίων σε ώρες εκτός αιχμής.
- Ενσωμάτωση εκτιμήσεων περιβαλλοντικών επιπτώσεων στην έρευνα, χρησιμοποιώντας ανάλυση κύκλου ζωής και υπολογισμούς αποτυπώματος άνθρακα για την αξιολόγηση της βιωσιμότητας και των οικολογικών οφελών των στρατηγικών που χρησιμοποιήθηκαν για την διαχείριση φορτίου.

Αυτές οι προτάσεις εξέλιξης περιγράφουν συνοπτικά τις μελλοντικές κατευθύνσεις που θα μπορούσε να πάρει η έρευνά. Με τον τρόπο αυτό, υπάρχει η φιλοδοξία να χαραχθεί μια πορεία συνεχής έρευνας που θα διευρύνει τα όρια στο πεδίο της διαχείρισης φορτίου εντός μικροδικτύων.

## 7 Βιβλιογραφία

1. *The Impact of Electricity on Economic Development: A Macroeconomic Perspective*. David I. Stern, Paul J. Burke and Stephan B. Bruns.
2. Smil, Vaclav. *Energy and Civilization A History*.
3. Παναγιώτης, Τσάπας. *Βασικές Αρχές και Τρόπος Λειτουργίας*.
4. Usher, Bruce. *Renewable Energy* .
5. ΘΕΟΔΩΡΟΣ, ΡΟΥΜΠΗΣ. *Ο Στρατηγικός Ρόλος των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην Ενεργειακή Μετάβαση της Ελλάδας*.
6. P.K.Halder, I. Khan. *Electrical Energy Conservation through Human Behavior Change: Perspective in Bangladesh*.
7. Muhammad Hammad Saeed, Wang Fangzong, Basheer Ahmed Kalwar, Sajid Iqbal. *A Review on Microgrids' Challenges & Perspectives*.
8. Sulman Shahzad, Muhammad Abbas Abbasi, Hassan Alo, Muhammad Iqbal, Rania Munir, Heybet Kilic. *Possibilities, Challenges, and Future Opportunities of Microgrids: A Review*.
9. Shahgholian, Ghazanfar. *A brief review on microgrids: Operation, applications, modeling, and control*.
10. Sarthak Chopra, Gowtham Meda Vanaprasad, Sarthak Chopra, Gowtham Meda Vanaprasad, Gibran David Agundis Tinajero, Najmeh Bazmohammadi, Juan C. Vasquez, Josep M. Guerrero. *Power-flow-based energy management of hierarchically controlled islanded AC microgrids*.
11. Ying Wu, Yanpeng Wu, Halil Cimen, Juan C. Vasquez, Josep M. Guerrero. *Towards collective energy Community: Potential roles of microgrid and blockchain to go beyond P2P energy trading*.
12. J. Lowitzsch, C.E. Hoicka, F.J van Tulder. *Renewable energy communities under the 2019 European Clean Energy Package – Governance model for the energy clusters of the future? .*
13. Madhav Sharma, Anoop Singh. *Overcoming Barriers to Microgrid Development: A Review of Policies and Regulations*.
14. University, Northwestern. [Ηλεκτρονικό]  
<https://www.mccormick.northwestern.edu/engineering-management/curriculum/student-projects/projects/resilient-solar-storage-ev-charging-microgrids.html>.
15. Ijaz Ahmed, Muhammad Rehan, Abdul Basit, Ijaz Ahmed, Muhammad Rehan, Abdul Basit, Hasnain Ahmad, Waqas Ahmed, Nasim Ullah, Marian Piecha, Vojtech Blazek & Lukas Prokop. *Review on microgrids design and monitoring approaches for sustainable green energy networks*.
16. Iván Jiménez-Vargas, Juan M. Rey, German Osma-Pinto. *Sizing of hybrid microgrids considering life cycle assessment*.

17. Swetha Shekarappa G, Senbagavalli M, Sheila Mahapatra, and Saurav Raj. [Ηλεκτρονικό] <https://smartgrid.ieee.org/bulletins/may-2023/microgrid-a-pathway-for-present-and-future-technology>.
18. Mark A. Husted, Bharatkumar Suthar , Gavin H. Goodall , Alexandra M. Newman , Paul A. Kohl. Coordinating microgrid procurement decisions with a dispatch strategy featuring a concentration gradient.
19. S. M. Hakimi, S. M. Moghaddas-Tafreshi. *Optimization of smart microgrid considering domestic flexible loads*.
20. Rona George Allwyn, Amer Al-Hinai , Vijaya Margaret. *A comprehensive review on energy management strategy of microgrids*.
21. Bin Lu, Matthew Stocks, Andrew Blakers, Kirsten Anderson. *Geographic information system algorithms to locate prospective sites for pumped hydro energy storage*.
22. Shafiqur Rehman, Luai M. Al-Hadhrami , Md. Mahbub Alam. *Pumped hydro energy storage system: A technological review*.
23. *Carbon nanomaterials and their composites for supercapacitors*. Mingzhu Zhong, Miao Zhang, Xifei Li.
24. Soumya Tiwari, Reza Sabzehgar, Mohammad Rasouli. Load balancing in a microgrid with uncertain renewable resources and loads.
25. Yael Parag, Malcolm Ainspan. *Sustainable microgrids: Economic, environmental and social costs and benefits of microgrid deployment*.
26. Cohn, Lisa. [Ηλεκτρονικό] <https://www.microgridknowledge.com/distributed-energy/article/11427532/optimizing-resilience-in-microgrids-to-address-outages-emergencies>.
27. *Optimal energy management applying load elasticity integrating renewable resources*. Mohamed Mustafa Ragab, Rania A. Ibrahim, Hussein Desouki & Rania Swief.
28. Mohammed A. Saeed, Bishoy E. Sedhom, Abdelrahman S. Elbaghdadi, Ahmed W. Fadl, Mohammed S. Abdelwahab, Menna H. Elden, Bilal Naji Alhasnawi & Abdelfattah A. Eladl. Practical prototype for energy management system in smart microgrid considering uncertainties and energy theft.
29. Xueliang Xing, Limin Jia. Energy management in microgrid and multi-microgrid.
30. Abdelazeem A. Abdelsalam, Honey A. Zedan & Azza A. ElDesouky. *Energy Management of Microgrids Using Load Shifting and Multi-agent System*.
31. Fady Y. Melhem, Student Member, IEEE, Olivier Grunder, Zakaria Hammoudan, and Nazih Moubayed, Senior Member, IEEE. Energy Management in Electrical Smart Grid Environment Using Robust Optimization Algorithm.
32. Faeza Hafiz, David Lubkeman, Iqbal Husain, Poria Fajri. Energy Storage Management Strategy Based on Dynamic Programming and Optimal Sizing of PV Panel-Storage Capacity for a Residential System.

33. Thillainathan Logenthiran, Student Member, IEEE, Dipti Srinivasan, Senior Member, IEEE, and Tan Zong Shun. Demand Side Management in Smart Grid Using Heuristic Optimization.
34. [Ηλεκτρονικό] <https://products.aspose.app/diagram/el/flowchart>.
35. iefimerida. [Ηλεκτρονικό] <https://www.iefimerida.gr/oikonomia/poioi-parohoi-anakoinosan-mple-timologia-reymatos>.
36. [Ηλεκτρονικό] <https://www.sce.com/regulatory/tariff-books/rates-pricing-choices/net-surplus-compensation>.
37. J. Kennedy, R. Eberhart. Particle swarm optimization.
38. Καρυοφύλλης, Δημήτρης. Particle Swarm Optimization και τεχνολογικές εφαρμογές.
39. Serkan Kiranyaz, Turker Ince, Alper Yildirim, Moncef Gabbouj. Fractional Particle Swarm Optimization in Multidimensional Search Space.
40. Abhishek Banerjee, Dharmpal Singh , Sudipta Sahana , Ira Nath. *Impacts of metaheuristic and swarm intelligence approach in optimization*.
41. Diogo Freitas, Luiz Guerreiro Lopes, Fernando Morgado-Dias. Particle Swarm Optimisation: A Historical Review Up to the Current Developments.
42. Arasomwan, Martins Akugbe. On the Performance of Linear Decreasing Inertia Weight Particle Swarm Optimization for Global Optimization.
43. Ehsan Reihani, Saeed Sepasi, Leon R. Roose, Marc Matsuura. *Energy management at the distribution grid using a Battery Energy Storage System (BESS)*.
44. Yuqing Yang, Stephen Bremner, Chris Menictas, Merlinde Kay. *Modelling and optimal energy management for battery energy storage systems in renewable energy systems: A review*.
45. Christian Wimpler, G. Hejazi, Eduardo De Oliveira Fernandes, C. L. Moreira. Impacts of Load Shifting on Renewable Energy Integration.
46. RESOURCES for the FUTURE. [Ηλεκτρονικό] <https://www.rff.org/publications/reports/using-prices-automation-and-data-to-shape-electricity-demand-and-integrate-renewables-into-the-grid/>.
47. Yongli Wang, Chengyuan Qi, Huanran Dong, Shuo Wang, Xiaohai Wang, Ming Zeng, Jinrong Zhu. *Optimal design of integrated energy system considering different battery operation strategy*.
48. Zhuang Zheng, Xin Li , Jia Pan, Xiaowei Luo. *A multi-year two-stage stochastic programming model for optimal design and operation of residential photovoltaic-battery systems*.
49. *Optimal battery sizing considering degradation for renewable energy integration*. Sebastián de la Torre, José M. González-González, José A. Aguado, Sebastián Martín.
50. *Dynamic Programming entry for consideration by the New Palgrave Dictionary of Economics*. John Rust, Larry Blume, Moshy Buchinsky, Larry Epstein.

51. Academics dss Lab. [Ηλεκτρονικό]  
<https://academics.epu.ntua.gr/sites/default/files/2021-07/03.%20%CE%94%CF%85%CE%BD%CE%B1%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CF%8C%CF%82%20%CE%A0%CF%81%CE%BF%CE%B3%CF%81%CE%B1%CE%BC%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CF%83%CE%BC%CF%8C%CF%82.pdf>.
52. HOWARD, RONALD A. *Dynamic Programming and Markov Processes*.
53. Νικολόπουλος, Σταύρος Δ. Σχεδίαση και Ανάλυση Αλγορίθμων. [Ηλεκτρονικό]  
<https://www.cs.uoi.gr/~stavros/BSc-DAA-Algorithms/DAA-09.0-DP-and-LProgramming.pdf>.
54. Light, Bar. *Note, The Principle of Optimality in Dynamic Programming: A Pedagogical*.
55. ΧΑΤΖΗ, ΧΡΥΣΟΥΛΑΣ. *Δυναμικός Προγραμματισμός*.
56. Luca Gonzalez Gauss, Anthony Zhao. *Dynamic Programming and Applications*.