



Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας

Μεταπτυχιακή Εξειδίκευση στα Πληροφοριακά
Συστήματα

Διπλωματική Εργασία

Βελτιστοποίηση της λειτουργίας συστημάτων
αποθήκευσης ενέργειας στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας.

Χρήστος Κατσόγιαννος

Επιβλέπων καθηγητής: Καψάλης Βασίλειος

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή (Κατσόγιαννου Χρήστου) που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



Βελτιστοποίηση της λειτουργίας συστημάτων
αποθήκευσης ενέργειας στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας.

Χρήστος Κατσόγιαννος

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Καψάλης Βασίλειος

Ρηγόπουλος Γεώργιος

Καθηγητής Τμήματος Ηλεκτρολόγων

Μέλος ΣΕΠ ΕΑΠ

Μηχανικών και Μηχανικών

Υπολογιστών Πανεπιστημίου

Πελοποννήσου

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2026

«Στη γυναίκα μου και στον μικρό μας γιο,
το «γιατί» πίσω από κάθε μου προσπάθεια.»

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη βέλτιστη λειτουργία ενός συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με μπαταρίες στο πλαίσιο της ελληνικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Στόχος της εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου πλαισίου πρόβλεψης τιμών, βελτιστοποίησης της λειτουργίας της μπαταρίας και τεchnοοικονομικής αξιολόγησης της επένδυσης, με έμφαση στη συμμετοχή στις αγορές της επόμενης ημέρας (DAM) και τις ενδοημερήσιες αγορές (IDA1, IDA2 και IDA3). Αρχικά, αναλύονται τα βασικά χαρακτηριστικά των συστημάτων BESS και η δομή των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ στη συνέχεια αναπτύσσονται μοντέλα πρόβλεψης των τιμών για τις επιμέρους αγορές. Η πρόβλεψη πραγματοποιείται με αξιοποίηση ιστορικών δεδομένων αγοράς, χρονικών χαρακτηριστικών και δεδομένων καιρικών συνθηκών, με χρονική ανάλυση 15 λεπτών. Οι παραγόμενες προβλέψεις χρησιμοποιούνται ως είσοδος σε ένα μαθηματικό μοντέλο διαδοχικής βελτιστοποίησης, το οποίο καθορίζει τη βέλτιστη λειτουργία του BESS λαμβάνοντας υπόψη τους τεχνικούς περιορισμούς της μπαταρίας, την απόδοση φόρτισης και εκφόρτισης, τα όρια κατάστασης φόρτισης, την ημερήσια συνολική διακινούμενη ενέργεια και το κόστος υποβάθμισης. Η απόδοση της προτεινόμενης στρατηγικής αξιολογείται μέσω δύο σεναρίων. Στο Realistic Scenario, η βελτιστοποίηση βασίζεται στις προβλεπόμενες τιμές, ενώ το οικονομικό αποτέλεσμα υπολογίζεται με τις πραγματικές τιμές της αγοράς. Στο Deterministic Scenario χρησιμοποιούνται οι πραγματικές τιμές και κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης, παρέχοντας ένα θεωρητικό σημείο αναφοράς της επίδοσης. Τέλος, πραγματοποιείται τεchnοοικονομική αξιολόγηση σε ορίζοντα δέκα ετών, λαμβάνοντας υπόψη την υποβάθμιση της μπαταρίας, το λειτουργικό κόστος και τις απαιτούμενες επενδύσεις ενίσχυσης της χωρητικότητας. Η αξιολόγηση πραγματοποιείται μέσω των δεικτών NPV, IRR και ROI και παρέχει μια συνολική εικόνα της οικονομικής βιωσιμότητας του εξεταζόμενου συστήματος.

Λέξεις – Κλειδιά

Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, πρόβλεψη τιμών, βελτιστοποίηση, αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, τεchnοοικονομική αξιολόγηση

«Optimization of Energy Storage Systems Operation in Electricity Markets »

Christos Katsogiannos

Abstract

This thesis investigates the optimal operation of a Battery Energy Storage System (BESS) within the Greek electricity market. The main objective is to develop an integrated framework for electricity price forecasting, battery operation optimization, and techno-economic evaluation of the investment, with emphasis on participation in the Day-Ahead Market (DAM) and Intraday Auctions (IDA1, IDA2, and IDA3). Initially, the main characteristics of BESS technologies and the structure of electricity markets are analyzed. Subsequently, electricity price forecasting models are developed for the individual markets. The forecasting process utilizes historical market data, temporal features, and weather-related information at a 15-minute time resolution. The resulting forecasts are used as inputs to a sequential mathematical optimization model, which determines the optimal operation of the BESS while considering the technical constraints of the battery, charging and discharging efficiencies, State of Charge limits, daily energy throughput, and battery degradation costs. The performance of the proposed strategy is evaluated through two scenarios. In the Realistic Scenario, the optimization is based on forecasted prices, while the economic performance is calculated using actual market prices. In the Deterministic Scenario, actual prices are used during the optimization process as well, providing a theoretical benchmark for the performance of the strategy. Finally, a ten-year techno-economic assessment is performed, considering battery degradation, operating costs, and the required investments for capacity augmentation. The evaluation is based on the financial indicators NPV, IRR, and ROI, providing an overall assessment of the economic viability of the examined BESS system.

Keywords: Energy storage systems, BESS, electricity price forecasting, optimization, electricity markets, techno-economic evaluation

Περιεχόμενα

Περίληψη	v
Abstract	vi
Περιεχόμενα	vii
Κατάλογος εικόνων/σχημάτων	ix
Κατάλογος πινάκων.....	Error! Bookmark not defined.
Συντομογραφίες & Ακρωνύμια	xi
1. Εισαγωγή	1
1.1 Εισαγωγικό πλαίσιο και κίνητρα της έρευνας.....	1
1.2 Η εξέλιξη των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας.....	2
1.3 Ο ρόλος των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας.....	3
1.4 Αναγκαιότητα πρόβλεψης τιμών και βελτιστοποίησης λειτουργίας.....	4
1.5 Σκοπός και στόχοι της διπλωματικής εργασίας.....	4
1.6 Δομή της εργασίας	5
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση	6
3. Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες (BESS).....	11
3.1 Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας	11
3.2 Δομή και αρχιτεκτονική των BESS	12
3.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά BESS.....	13
3.4 Υποβάθμιση μπαταριών και οικονομικές επιπτώσεις.....	14
3.5 Υπηρεσίες και εφαρμογές των BESS στο ηλεκτρικό σύστημα.....	14
4. Αγορές ηλεκτρικής ενέργειας και ρυθμιστικό πλαίσιο.....	16
4.1 Δομή και λειτουργία των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας	16
4.2 Το Ευρωπαϊκό Target Model	16
4.3 Προμερήσια Αγορά Ηλεκτρικής Ενέργειας (Day-Ahead Market – DAM).....	17
4.3.1 Συμμετέχοντες και είδη προσφορών	18
4.3.2 Χρονοδιάγραμμα λειτουργίας DAM (Gate Opening – Gate Closure)	18
4.3.3 Οριακή τιμή συστήματος.....	19
4.4 Ενδοημερήσια αγορά ηλεκτρικής ενέργειας (IDM)	21
4.4.1 Βασική λειτουργία IDM	21
4.4.2 Χρονοδιάγραμμα λειτουργίας (IDM).....	23
4.5 Αγορά Εξισορρόπησης (Balancing Market – BM)	24
4.5.1 Ρόλος και σκοπός της Αγοράς Εξισορρόπησης.....	24
4.5.2 Δομή της Αγοράς Εξισορρόπησης	24
4.5.3 Συμμετέχοντες στην Αγορά Εξισορρόπησης	25
4.5.4 Διαδικασία λειτουργίας της Αγοράς Εξισορρόπησης.....	25
4.5.5 Σχέση με DAM και IDM	26
4.5.6 Σημασία για τα Συστήματα Αποθήκευσης (BESS).....	26
5. Μεθοδολογία και ανάπτυξη των μοντέλων πρόβλεψης	27
5.1 Πηγές Δεδομένων.....	27
5.2 Δεδομένα Αγοράς Επόμενης Ημέρας (DAM).....	27
5.3 Δεδομένα Ενδοημερήσιας Αγοράς (IDM).....	28
5.4 Δεδομένα Αγοράς Εξισορρόπησης (BM)	28
5.5 Μεθοδολογία Πρόβλεψης	29
5.6 Ανάλυση και Υλοποίηση Κώδικων Πρόβλεψης	29
5.6.1 Ανάλυση και Υλοποίηση Κώδικα Πρόβλεψης για την DAM	29
5.6.2 Ανάλυση και Υλοποίηση Κώδικα Πρόβλεψης για την IDA1	32

5.6.3 Ανάλυση και Υλοποίηση Κώδικα Πρόβλεψης για την IDA2	35
5.6.4 Ανάλυση και Υλοποίηση Κώδικα Πρόβλεψης για την IDA3	38
5.6.5 Ανάλυση και Υλοποίηση Κώδικα Πρόβλεψης για το Balancing Market ...	41
5.7 Περιβάλλον Υλοποίησης.....	44
6. Μεθοδολογία και μαθηματική διατύπωση του μοντέλου βελτιστοποίησης.....	46
6.1 Εισαγωγή.....	46
6.2 Δεδομένα εισόδου και χρονικός ορίζοντας της προσομοίωσης.....	47
6.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος αποθήκευσης	49
6.4 Μοντέλο υποβάθμισης της μπαταρίας	50
6.5 Μαθηματική διατύπωση των περιορισμών λειτουργίας.....	52
6.5.1 Περιορισμοί ισχύος φόρτισης και εκφόρτισης.....	53
6.5.2 Περιορισμοί κατάστασης φόρτισης (State of Charge)	53
6.5.3 Εξίσωση εξέλιξης της κατάστασης φόρτισης.	54
6.5.4 Περιορισμός της ημερήσιας ενεργειακής διέλευσης.	54
6.5.5 Περιορισμός τελικής κατάστασης φόρτισης.....	55
6.6 Πολυ-σταδιακή διαδικασία διαδοχικής βελτιστοποίησης.....	56
6.7 Βελτιστοποίηση της αγοράς Day-Ahead Market (DAM).....	57
6.8 Βελτιστοποίηση της αγοράς Intraday Auction 1 (IDA1).....	59
6.9 Βελτιστοποίηση της αγοράς Intraday Auction 2 (IDA2).....	61
6.10 Βελτιστοποίηση της αγοράς Intraday Auction 3 (IDA3)	62
6.11 Οικονομική αξιολόγηση της στρατηγικής λειτουργίας.....	63
6.11.1 Υπολογισμός οικονομικού αποτελέσματος της αγοράς DAM.....	64
6.11.2 Υπολογισμός οικονομικού αποτελέσματος της αγοράς IDA1.....	64
6.11.3 Υπολογισμός οικονομικού αποτελέσματος της αγοράς IDA2.....	65
6.11.4 Υπολογισμός οικονομικού αποτελέσματος της αγοράς IDA3.....	65
6.11.5 Υπολογισμός του καθαρού ημερήσιου οικονομικού αποτελέσματος	65
6.12 Υπολογισμός της ημερήσιας ενεργειακής διέλευσης και των ισοδύναμων πλήρων κύκλων λειτουργίας.	66
6.13 Επεξεργασία, αποθήκευση και οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων	67
6.14 Ανάπτυξη της γραφικής διεπαφής χρήστη.....	68
6.15 Ανάπτυξη και διαδικτυακή διάθεση της εφαρμογής.....	69
7. Τεχνοοικονομική αξιολόγηση του συστήματος αποθήκευσης	71
7.1 Εισαγωγή.....	71
7.2 Δεδομένα εισόδου της τεχνοοικονομικής αξιολόγησης.....	72
7.3 Βασικές παραδοχές της οικονομικής ανάλυσης	73
7.4 Μοντέλο γήρανσης της μπαταρίας	73
7.4.1 Ημερολογιακή γήρανση (Calendar Degradation)	74
7.4.2 Υποβάθμιση λόγω κύκλων λειτουργίας (Cycle Degradation)	74
7.4.3 Υπολογισμός της διαθέσιμης ενεργειακής χωρητικότητας.....	75
7.5 Διαδικασία ενίσχυσης της χωρητικότητας της μπαταρίας (Battery Augmentation)	76
7.6 Υπολογισμός των ετήσιων εσόδων και των ταμειακών ροών.....	77
7.7 Υπολογισμός των χρηματοοικονομικών δεικτών αξιολόγησης	77
7.7.1 Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value – NPV).....	78
7.7.2 Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (Internal Rate of Return – IRR)	78
7.7.3 Δείκτης Απόδοσης της Επένδυσης (Return on Investment – ROI).....	79
7.8 Σύνοψη της τεχνοοικονομικής αξιολόγησης.....	79
8. Αποτελέσματα προβλέψεων.....	80

8.1 Συγκριτικά αποτελέσματα DAM.....	80
8.2 Συγκριτικά αποτελέσματα IDA1	81
8.3 Συγκριτικά αποτελέσματα IDA2	81
8.4 Συγκριτικά αποτελέσματα IDA3	82
8.5 Συγκριτικά αποτελέσματα BM.....	83
8.6 Αξιολόγηση μοντέλων πρόβλεψης.....	85
9. Αποτελέσματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης.....	87
9.1 Εισαγωγή.....	87
9.2 Αποτελέσματα του Realistic scenario	87
9.2.1 Συνολικά αποτελέσματα βελτιστοποίησης	87
9.2.2 Μηνιαία κατανομή του καθαρού οικονομικού αποτελέσματος.....	90
9.3 Αποτελέσματα του Deterministic Scenario	91
9.3.1 Συνολικά αποτελέσματα βελτιστοποίησης	91
9.3.2 Μηνιαία κατανομή του καθαρού οικονομικού αποτελέσματος.....	94
9.4 Σύγκριση της συνεισφοράς των επιμέρους αγορών.....	95
9.5 Συνολική αξιολόγηση.....	97
10. Αποτελέσματα της τεχνοοικονομικής αξιολόγησης.....	99
10.1 Εισαγωγή.....	99
10.2 Αποτελέσματα του Realistic Scenario.....	99
10.3 Αποτελέσματα του Deterministic Scenario	100
10.4 Συγκριτική αξιολόγηση.....	100
11. Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα	103
12. Βιβλιογραφία.....	106

Κατάλογος εικόνων/σχημάτων

Εικόνα 1.1 Υβριδικό πάρκο παραγωγής ενέργειας με συνδυασμό φωτοβολταϊκών και ανεμογεννητριών.....	1
Εικόνα 1.2 Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες BESS	2
Εικόνα 3.1 Αρχιτεκτονική συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες (BESS), με κύρια υποσυστήματα BMS, PCS και EMS.....	12
Εικόνα 4.1 Τιμή Εκκαθάρισης (Οριακή Τιμή Συστήματος – MCP).....	21
Εικόνα 8.1 Συγκριτικό διάγραμμα DAM τιμών πρόβλεψης με πραγματικές (2025/01/08).....	80
Εικόνα 8.2 Συγκριτικό διάγραμμα DAM τιμών πρόβλεψης με πραγματικές (2025/07/08).....	80
Εικόνα 8.3 Συγκριτικό διάγραμμα IDA1 τιμών πρόβλεψης με πραγματικές (2025/01/08).....	81
Εικόνα 8.4 Συγκριτικό διάγραμμα IDA1 τιμών πρόβλεψης με πραγματικές (2025/07/08).....	81

Εικόνα 8.5 Συγκριτικό διάγραμμα IDA2 τιμών πρόβλεψης με πραγματικές (2025/01/08).....	82
Εικόνα 8.6 Συγκριτικό διάγραμμα IDA2 τιμών πρόβλεψης με πραγματικές (2025/07/08).....	82
Εικόνα 8.7 Συγκριτικό διάγραμμα IDA3 τιμών πρόβλεψης με πραγματικές (2025/01/08).....	83
Εικόνα 8.8 Συγκριτικό διάγραμμα IDA3 τιμών πρόβλεψης με πραγματικές (2025/07/08).....	83
Εικόνα 8.9 Συγκριτικό διάγραμμα BM UP τιμών πρόβλεψης με πραγματικές (2025/01/08).....	84
Εικόνα 8.10 Συγκριτικό διάγραμμα BM DOWN τιμών πρόβλεψης με πραγματικές (2025/01/08).....	84
Εικόνα 8.11 Συγκριτικό διάγραμμα BM UP τιμών πρόβλεψης με πραγματικές (2025/07/08).....	84
Εικόνα 8.12 Συγκριτικό διάγραμμα BM DOWN τιμών πρόβλεψης με πραγματικές (2025/07/08).....	85
Εικόνα 9.1 Διάγραμμα optimization Realistic scenario (2025/10/21)	89
Εικόνα 9.2 Διάγραμμα state of charge Realistic scenario (2025/10/21)	89
Εικόνα 9.3 Διάγραμμα του τελικού προγράμματος λειτουργίας της μπαταρίας. Realistic scenario (2025/10/21).....	90
Εικόνα 9.4 Μηνιαία κατανομή του καθαρού οικονομικού αποτελέσματος. Realistic scenario	90
Εικόνα 9.5 Διάγραμμα optimization Deterministic scenario (2025/10/21).....	93
Εικόνα 9.6 Διάγραμμα state of charge Deterministic scenario (2025/10/21).....	93
Εικόνα 9.7 Διάγραμμα του τελικού προγράμματος λειτουργίας της μπαταρίας. Deterministic scenario (2025/10/21).....	94
Εικόνα 9.8 Μηνιαία κατανομή του καθαρού οικονομικού αποτελέσματος. Deterministic scenario	94

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 2.1 Σενάρια γερμανικής αγοράς.....	9
--	---

Πίνακας 4.1 Χρονοδιάγραμμα λειτουργίας DAM	19
Πίνακας 4.2 Χρονοδιάγραμμα λειτουργίας IDA	23

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

AΔΜΗΕ	Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
BESS	Battery Energy Storage System
DAM	Day-Ahead Market
IDA1	Intraday Auction 1
IDA2	Intraday Auction 2
IDA3	Intraday Auction 3
BM	Balancing Market
HEEnEx	Hellenic Energy Exchange
SOC	State of Charge
MTU	Market Time Unit
MCP	Market Clearing Price
MAE	Mean Absolute Error
RMSE	Root Mean Square Error
NPV	Net Present Value
IRR	Internal Rate of Return
ROI	Return on Investment
CAPEX	Capital Expenditure
O&M	Operation and Maintenance

1. Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγικό πλαίσιο και κίνητρα της έρευνας

Το ηλεκτρικό σύστημα παγκοσμίως βρίσκεται σήμερα σε μια περίοδο έντονου μετασχηματισμού. Η αυξανόμενη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Εικόνα 1.1), σε συνδυασμό με την ανάγκη περιορισμού των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, οδηγεί σταδιακά σε πιο ευέλικτα και αποκεντρωμένα μοντέλα λειτουργίας των αγορών ενέργειας.



Εικόνα 1.1 Υβριδικό πάρκο παραγωγής ενέργειας με συνδυασμό φωτοβολταϊκών και ανεμογεννητριών.

Η ενσωμάτωση μεγάλου ποσοστού στοχαστικής παραγωγής, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, δημιουργεί νέες τεχνικές και οικονομικές προκλήσεις για τη διατήρηση της ευστάθειας του ηλεκτρικού συστήματος και την αποτελεσματική λειτουργία των αγορών (Lund et al., 2015). Η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί ένα ιδιαίτερο αγαθό, καθώς η παραγωγή και η κατανάλωσή της πρέπει να ισορροπούν σε πραγματικό χρόνο. Σε αντίθεση με άλλα προϊόντα, η δυνατότητα αποθήκευσης σε μεγάλη κλίμακα ήταν μέχρι πρόσφατα περιορισμένη, γεγονός που αύξανε τις απαιτήσεις σε εφεδρείες και ευελιξία του συστήματος.

Με την εξέλιξη των τεχνολογιών αποθήκευσης και ειδικότερα των συστημάτων αποθήκευσης με μπαταρίες (Εικόνα 1.2), καθίσταται πλέον δυνατή η χρονική μετατόπιση της ενέργειας και η ενεργός διαχείριση της παραγωγής και της ζήτησης (Zakeri & Syri, 2015). Παράλληλα, δημιουργούνται νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες, καθώς μπορούν να συμμετέχουν σε αγορές ενέργειας και επικουρικών υπηρεσιών εκμεταλλευόμενα τις διακυμάνσεις των τιμών (Oliveira et al., 2021).



Εικόνα 1.2 Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες BESS

Ωστόσο, η λειτουργία ενός συστήματος αποθήκευσης δεν είναι απλή διαδικασία. Η λήψη αποφάσεων σχετικά με τη φόρτιση και την εκφόρτιση πρέπει να λαμβάνει υπόψη την εξέλιξη των τιμών, τους τεχνικούς περιορισμούς της μπαταρίας, καθώς και τη μακροχρόνια υποβάθμιση του εξοπλισμού. Επομένως, η ανάπτυξη μοντέλων βελτιστοποίησης αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για τη μεγιστοποίηση της οικονομικής απόδοσης και τη βιώσιμη λειτουργία των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας.

1.2 Η εξέλιξη των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας

Η απελευθέρωση των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας αποτέλεσε βασικό στάδιο μετασχηματισμού του ενεργειακού τομέα τόσο στην Ευρώπη όσο και διεθνώς. Η μετάβαση από κεντρικά ελεγχόμενα μονοπωλιακά συστήματα σε ανταγωνιστικές αγορές συνέβαλε στη βελτίωση της αποδοτικότητας και στη δημιουργία νέων επιχειρηματικών μοντέλων (Conejo et al., 2010).

Στο ευρωπαϊκό περιβάλλον, οι αγορές οργανώνονται σύμφωνα με το Target Model, το οποίο περιλαμβάνει τρεις βασικές αγορές: την προμερήσια, την ενδομερήσια και την αγορά εξισορρόπησης (European Commission, 2019). Η προμερήσια αγορά αποτελεί τον κύριο μηχανισμό διαμόρφωσης τιμών, ενώ η ενδομερήσια δίνει τη δυνατότητα στους συμμετέχοντες να προσαρμόζουν τις θέσεις τους καθώς προκύπτουν νέα δεδομένα. Η αγορά εξισορρόπησης διασφαλίζει την ισορροπία του συστήματος σε πραγματικό χρόνο.

Στην Ελλάδα, η εφαρμογή του Target Model το 2020 οδήγησε στην εισαγωγή νέων μηχανισμών συναλλαγών και στη βελτίωση της διαφάνειας της αγοράς (HEpEx, 2021). Η αυξανόμενη διείσδυση φωτοβολταϊκών σταθμών έχει ενισχύσει τη μεταβλητότητα των τιμών, με αποτέλεσμα χαμηλές τιμές σε ώρες υψηλής παραγωγής και αυξημένες τιμές σε ώρες αιχμής. Οι συνθήκες αυτές δημιουργούν σημαντικές ευκαιρίες για Ενεργειακή αγοραπωλησία (arbitrage) μέσω των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας.

1.3 Ο ρόλος των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας αποτελούν βασικό πυλώνα της ενεργειακής μετάβασης. Η δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας επιτρέπει τη χρονική μετατόπιση της παραγωγής, τη βελτίωση της αξιοποίησης των ΑΠΕ. (IRENA, 2017).

Οι μπαταρίες λιθίου αποτελούν την κυρίαρχη τεχνολογία στον τομέα των BESS λόγω της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, της ταχείας απόκρισης και της μείωσης του κόστους τα τελευταία χρόνια. Ωστόσο, η λειτουργία τους συνοδεύεται από περιορισμούς, όπως είναι η υποβάθμιση λόγω κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης, οι περιορισμοί ισχύος και το βάθος εκφόρτισης (Divya & Østergaard, 2009).

Τα BESS μπορούν να προσφέρουν πολλαπλές υπηρεσίες, όπως εξισορρόπηση φορτίου, υποστήριξη τάσης, διαχείριση αιχμών ζήτησης και συμμετοχή στις αγορές ενέργειας. Η δυνατότητα συμμετοχής σε πολλαπλές αγορές αυξάνει σημαντικά το δυναμικό εσόδων, αλλά παράλληλα απαιτεί προηγμένα μοντέλα λειτουργίας και στρατηγικές βελτιστοποίησης.

1.4 Αναγκαιότητα πρόβλεψης τιμών και βελτιστοποίησης λειτουργίας

Η λήψη αποφάσεων για τη λειτουργία ενός BESS βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην πρόβλεψη των μελλοντικών τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας. Η μεταβλητότητα των τιμών καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη αλγορίθμων που μπορούν να προβλέπουν τη συμπεριφορά της αγοράς και να προσαρμόζουν δυναμικά τη λειτουργία της μπαταρίας (Weron, 2014).

Τα μοντέλα βελτιστοποίησης επιδιώκουν τη μεγιστοποίηση του οικονομικού οφέλους μέσω της επιλογής των κατάλληλων χρονικών στιγμών φόρτισης και εκφόρτισης. Παράλληλα, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τεχνικοί περιορισμοί, όπως η απόδοση κύκλου, η διάρκεια ζωής της μπαταρίας και οι περιορισμοί ισχύος. Η ενσωμάτωση στοχαστικών μοντέλων επιτρέπει τη διαχείριση της αβεβαιότητας των τιμών και τη μείωση του επιχειρηματικού κινδύνου (Morales et al., 2014).

1.5 Σκοπός και στόχοι της διπλωματικής εργασίας

Ο βασικός σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου βελτιστοποίησης για τη λειτουργία ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες που συμμετέχει στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας. Το μοντέλο θα αξιοποιεί προβλέψεις τιμών και θα λαμβάνει υπόψη τεχνικούς περιορισμούς λειτουργίας.

Οι κύριοι στόχοι περιλαμβάνουν:

- την ανάλυση της δομής και λειτουργίας των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας,
- τη μελέτη των τεχνικών χαρακτηριστικών των BESS,
- την ανάπτυξη αλγορίθμου βελτιστοποίησης σε περιβάλλον Python,
- την αξιολόγηση της οικονομικής βιωσιμότητας της επένδυσης

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας η εφαρμογή της διαδοχικής διαδικασίας βελτιστοποίησης περιορίζεται στην Προημερήσια Αγορά (DAM) και στις τρεις Ενδοημερήσιες Δημοπρασίες (IDA1, IDA2 και IDA3). Η Αγορά Εξισορρόπησης (Balancing Market – BM) εξετάζεται σε επίπεδο πρόβλεψης και αξιολόγησης των

μοντέλων, αλλά δεν ενσωματώνεται στο τελικό μοντέλο βελτιστοποίησης και στην τεχνοοικονομική αξιολόγηση, καθώς η ακρίβεια πρόβλεψης, ιδιαίτερα για την ανοδική εξισορρόπηση, κρίθηκε ανεπαρκής για αξιόπιστη ενσωμάτωση στη διαδοχική διαδικασία λήψης αποφάσεων. Αντίστοιχα, η Συνεχής Ενδοημερήσια Αγορά (Continuous Intraday Market – XBID) δεν περιλαμβάνεται στο υπολογιστικό μοντέλο της παρούσας εργασίας και αντιμετωπίζεται ως αντικείμενο μελλοντικής επέκτασης.

1.6 Δομή της εργασίας

Η εργασία οργανώνεται σε διακριτά κεφάλαια που καλύπτουν τόσο το θεωρητικό υπόβαθρο όσο και την πρακτική εφαρμογή. Αρχικά γίνεται μία ανασκόπηση σε ορισμένες έρευνες και έπειτα παρουσιάζονται οι τεχνολογίες αποθήκευσης και οι αγορές ηλεκτρικής ενέργειας. Στη συνέχεια αναπτύσσεται το μαθηματικό μοντέλο και η μεθοδολογία βελτιστοποίησης, ενώ στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και η οικονομική αξιολόγηση των σεναρίων.

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η αξιοποίηση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας για σκοπούς ενεργειακής αγοραπωλησίας στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας τα τελευταία χρόνια, ιδιαίτερα στο ευρωπαϊκό πλαίσιο. Η παρούσα βιβλιογραφική ανασκόπηση εξετάζει μια σειρά από μελέτες που προσεγγίζουν το πρόβλημα της βέλτιστης λειτουργίας BESS από διαφορετικές οπτικές γωνίες, τόσο σε επίπεδο επιμέρους αγορών όσο και σε συγκριτικό επίπεδο μεταξύ κρατών, δημιουργώντας ένα συνεκτικό υπόβαθρο για την ανάπτυξη της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Η εργασία με τίτλο «Modeling and Optimization of Battery Energy Storage Systems in the Italian Wholesale Market» αναλύει την ιταλική χονδρική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, εξετάζοντας τη συμμετοχή ενός BESS τόσο στη Day-Ahead Market (DAM) όσο και στην Intra-Day Market και ειδικότερα στην πλατφόρμα XBID. Κεντρικό ερώτημα της μελέτης αποτελεί η διερεύνηση της οικονομικής βιωσιμότητας του arbitrage μέσω αποθήκευσης, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες της αγοράς, τις τιμολογιακές κατανομές, αλλά και τους τεχνικούς περιορισμούς του συστήματος αποθήκευσης.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος, οι συγγραφείς αναπτύσσουν ένα αναλυτικό πλαίσιο λειτουργίας BESS, το οποίο περιλαμβάνει αλγορίθμους βελτιστοποίησης και εργαλεία πρόβλεψης τόσο των τιμών όσο και της πιθανότητας αποδοχής προσφορών. Στη DAM, η πρόβλεψη των ζωνικών τιμών πραγματοποιείται μέσω υβριδικού μοντέλου βαθιάς μάθησης (LSTM-CNN), ενώ στην XBID χρησιμοποιούνται ιστορικά δεδομένα προσφορών σε συνδυασμό με Kernel Density Estimation και μοντέλο πρόβλεψης της πιθανότητας αποδοχής προσφοράς. Η στρατηγική arbitrage αξιολογείται μέσω τεσσάρων σεναρίων (Case A–D), τα οποία διαφοροποιούνται ως προς τη συμμετοχή ή μη στην DAM και την XBID.

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα της μελέτης, η DAM, λόγω της κατανομής των τιμών και των περιορισμένων spreads, δεν προσφέρει οικονομικά βιώσιμες ευκαιρίες arbitrage για ένα BESS. Αντίθετα, η συμμετοχή στην XBID οδηγεί σε πολύ μεγάλη αύξηση των ετήσιων εσόδων, με τις πιο επιθετικές στρατηγικές (Cases 4 και 5) να

οδηγούν σε θετικές τιμές καθαρής παρούσας αξίας. Παράλληλα, αναδεικνύεται ο καθοριστικός ρόλος του μηχανισμού επιλογής τιμής προσφοράς και του επιπέδου ανάληψης ρίσκου, καθώς η αύξηση του ρίσκου μπορεί να βελτιώσει τα έσοδα αλλά ταυτόχρονα μειώνει την πιθανότητα αποδοχής των προσφορών. Η εργασία καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η ενδοημερήσια αγορά αποτελεί βασικό πυλώνα για την οικονομική βιωσιμότητα των BESS στην Ιταλία.

Το άρθρο “Optimal Daily Trading of Battery Operations Using Arbitrage Spreads” των Ekaterina Abramova και Derek Bunn επικεντρώνεται στη βέλτιστη ημερήσια λειτουργία ενός BESS στην αγορά χονδρικής ηλεκτρικής ενέργειας της Γερμανίας, χρησιμοποιώντας ιστορικά δεδομένα day-ahead από τον δείκτη EPEX Spot. Η εργασία αυτή διαφοροποιείται καθώς δεν εστιάζει στις απόλυτες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά στα arbitrage spreads, δηλαδή στις διαφορές τιμών μεταξύ διαφορετικών ωρών της ίδιας ημέρας.

Το πρόβλημα διατυπώνεται ως ημερήσιο optimization πρόβλημα, στο οποίο το BESS επιλέγει βέλτιστα τις ώρες φόρτισης και εκφόρτισης με στόχο τη μεγιστοποίηση του αναμενόμενου κέρδους. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στο γεγονός ότι οι ωριαίες τιμές δεν είναι ανεξάρτητες ούτε ακολουθούν κανονική κατανομή, γεγονός που οδηγεί στη χρήση κατανομών πιθανότητας για τα spreads. Το μαθηματικό μοντέλο περιλαμβάνει περιορισμούς κατάστασης φόρτισης (SOC), αποδοτικότητας φόρτισης και εκφόρτισης, καθώς και περιορισμούς ισχύος, ενώ διατηρεί γραμμική ή κυρτή δομή, αποφεύγοντας τη χρήση πολύπλοκων μοντέλων μηχανικής μάθησης.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η στρατηγική βασισμένη στα spreads υπερτερεί των απλών στρατηγικών αγοράς στη χαμηλότερη και πώλησης στη υψηλότερη τιμή, προσφέροντας πιο σταθερά έσοδα και μειωμένο κίνδυνο. Επιπλέον, αναδεικνύεται ότι πολλαπλές συναλλαγές εντός της ημέρας μπορούν να αυξήσουν την κερδοφορία, ιδιαίτερα σε αγορές με υψηλή μεταβλητότητα τιμών. Η εργασία αυτή αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα καθαρής και μεθοδολογικά αυστηρής προσέγγισης του arbitrage.

Σε ευρύτερο ευρωπαϊκό επίπεδο, η εργασία «An Assessment of European Electricity Arbitrage Using Storage Systems» εξετάζει κατά πόσο το arbitrage μέσω συστημάτων

αποθήκευσης είναι οικονομικά βιώσιμο σε διαφορετικές ευρωπαϊκές αγορές ηλεκτρισμού. Το βασικό πρόβλημα που αναλύεται αφορά το ερώτημα σε ποιες χώρες το arbitrage προσφέρει πραγματική αξία για έναν επενδυτή και ποιοι παράγοντες καθορίζουν τη διαφοροποίηση της κερδοφορίας μεταξύ αγορών.

Η προσέγγιση βασίζεται στη χρήση ιστορικών δεδομένων τιμών και στην εφαρμογή ενός ιδανικού μοντέλου με πλήρη γνώση των μελλοντικών τιμών (Deterministic foresight), ώστε να αποτυπωθεί το θεωρητικό μέγιστο δυναμικό εσόδων. Το μοντέλο ενσωματώνει τεχνικούς περιορισμούς της μπαταρίας, τη σταδιακή υποβάθμιση της χωρητικότητας λόγω κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης, καθώς και διαφορετικά μεγέθη μετατροπέα. Η ανάλυση καλύπτει 24 ευρωπαϊκές χώρες, μεταξύ των οποίων η Ιρλανδία, η Γαλλία, η Ολλανδία, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Νορβηγία και η Σουηδία.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το arbitrage δεν είναι εξίσου κερδοφόρο σε όλες τις αγορές. Χώρες με υψηλότερη μεταβλητότητα τιμών, όπως η Ιρλανδία και το Ηνωμένο Βασίλειο, προσφέρουν περισσότερες ευκαιρίες arbitrage και οδηγούν σε εντατικότερη λειτουργία των BESS. Αντίθετα, αγορές όπως η Νορβηγία και η Σουηδία, με πιο σταθερό προφίλ τιμών, παρουσιάζουν περιορισμένες δυνατότητες arbitrage. Ωστόσο, η αυξημένη λειτουργική ένταση συνεπάγεται και ταχύτερη φθορά του εξοπλισμού. Η χρηματοοικονομική ανάλυση δείχνει ότι, με τα δεδομένα κόστους που χρησιμοποιούνται, καμία αγορά δεν εμφανίζει θετική καθαρή παρούσα αξία όταν εξετάζεται αποκλειστικά το arbitrage, γεγονός που αναδεικνύει την ανάγκη συνδυασμού πολλαπλών αγορών και υπηρεσιών.

Τέλος, μία ακόμα πολύ σημαντική εργασία που θα αξιοποιήσουμε είναι η μελέτη με τίτλο: «FlexIndex "How much money can I make with a battery?"» η οποία αφορά την αγορά της Γερμανίας.

Η παρούσα εργασία αναλύει τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σε συνδυασμό με τις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η στρατηγική arbitrage σε τρεις τύπους αγορών — Day-Ahead (DAA), Intraday (IDA) και Intraday Continuous (IDC) — και αξιολογείται η επίδραση των χαρακτηριστικών της μπαταρίας, όπως η χωρητικότητα, η ισχύς και ο μέγιστος αριθμός κύκλων, στην κερδοφορία των συναλλαγών.

Ο δείκτης FlexIndex παρέχει μια διαφανή μέτρηση της οικονομικής αξίας της ευελιξίας στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας στη Γερμανία, μέσω της βελτιστοποίησης μιας τυποποιημένης μπαταρίας (1 MWh, 1 MW, 1 κύκλος). Ο δείκτης υπολογίζεται με βάση τη μεγιστοποίηση των ημερήσιων εσόδων από τις τρεις διαδοχικές αγορές, χρησιμοποιώντας ένα ανοιχτού κώδικα γραμμικό μοντέλο υπό απλοποιημένες υποθέσεις, όπως τέλεια πρόβλεψη τιμών, απουσία απωλειών και ανεξάρτητη βελτιστοποίηση κάθε ημέρας. Εδώ οι τιμές θεωρούνται γνωστές, οπότε δεν χρειάστηκε να υλοποιηθεί κάποιο μοντέλο πρόβλεψης όπως θα γίνει στη δική μας περίπτωση.

Για την αξιολόγηση της λειτουργίας και της οικονομικής αποδοτικότητας του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας (BESS) αναλύθηκαν τα παρακάτω σενάρια τα οποία διαφοροποιούν τη χωρητικότητα, την ισχύ και τον αριθμό των επιτρεπόμενων κύκλων της μπαταρίας, προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση αυτών των χαρακτηριστικών στην κερδοφορία από arbitrage στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας. Επειδή θέλουμε να δούμε πως τα κέρδη μεταβάλλονται μόνο από αυτά τα μεγέθη διατηρήσαμε σταθερά τα inputs των τιμών των DAA, IDA και IDC. Με τον τρόπο αυτό, η ανάλυση παρέχει ολοκληρωμένη εικόνα της σημασίας κάθε παραμέτρου στη στρατηγική εκμετάλλευσης της ευελιξίας της μπαταρίας.

Παρακάτω ακολουθεί ένας πίνακας με τα σενάρια που τρέξαμε και τα αποτελέσματα αυτών.

Σενάριο	DAA (€)	IDA (€)	IDC (€)	Σύνολο (€)
1ο (2 MWh, 2 MW, 2 cycles)	68	57	71	196
2ο (4 MWh, 2 MW, 2 cycles)	128	86	87,5	301,5
3ο (2 MWh, 1 MW, 2 cycles)	64	43	41,25	148,25
4ο (2 MWh, 2 MW, 1 cycle)	42	36	35	113

Πίνακας 2.1 Σενάρια γερμανικής αγοράς

Από την ανάλυση των σεναρίων προκύπτει ότι η αύξηση της χωρητικότητας και της ισχύος της μπαταρίας μεγιστοποιεί τα κέρδη arbitrage, καθώς επιτρέπει μεγαλύτερη αποθήκευση και ταχύτερη εκμετάλλευση των διαφορών τιμών στις αγορές ενέργειας

(DAA, IDA, IDC). Αντίθετα, ο περιορισμός του αριθμού των κύκλων μειώνει σημαντικά τη συνολική κερδοφορία, περιορίζοντας τις διαθέσιμες ευκαιρίες arbitrage.

Στην ελληνική αγορά, η εφαρμογή ενός παρόμοιου μοντέλου απαιτεί προσαρμογές λόγω χαμηλότερης ρευστότητας, υψηλότερης διακύμανσης τιμών, διαφορετικών ωραρίων κλεισίματος αγορών και χαρακτηριστικών των τοπικών συστημάτων BESS. Επιπλέον, η ελληνική αγορά διαθέτει ενεργοποιημένο balancing market.

Γενικά ο κώδικας που παρατίθεται στη συγκεκριμένη έρευνα μαζί με τις απαραίτητες τροποποιήσεις φυσικά θα αποτελέσει τη βάση για τη δική μας έρευνα.

Όλες οι παραπάνω έρευνες μαζί με μία πληθώρα ερευνών ακόμα θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα διπλωματική εργασία σαν βάση προκειμένου να διαμορφωθεί το θεωρητικό και μεθοδολογικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο θα στηριχθεί η ανάλυση που ακολουθεί. Συγκεκριμένα, οι μελέτες αυτές αξιοποιούνται αφενός για την κατανόηση της λογικής του arbitrage μέσω συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας και αφετέρου για την ανάδειξη των κρίσιμων παραμέτρων που επηρεάζουν την οικονομική αποδοτικότητα ενός BESS, όπως η μεταβλητότητα των τιμών, τα spreads μεταξύ αγορών και οι τεχνικοί περιορισμοί της μπαταρίας.

3. Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες (BESS)

3.1 Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας

Η αποθήκευση ενέργειας αποτελεί βασικό δομικό στοιχείο του σύγχρονου ηλεκτρικού συστήματος, ιδίως σε περιβάλλοντα με αυξημένη διείσδυση μεταβλητών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Η στοχαστικότητα της αιολικής και της ηλιακής παραγωγής οδηγεί σε αποκλίσεις μεταξύ παραγωγής και ζήτησης, οι οποίες δεν μπορούν πλέον να αντιμετωπιστούν αποκλειστικά με συμβατικές μονάδες βάσης. Η δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας επιτρέπει τη χρονική μετατόπιση της παραγωγής, τη μείωση των περικοπών ΑΠΕ και τη βελτίωση της ευστάθειας του συστήματος (Lund et al., 2015· IRENA, 2017).

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ταξινομούνται συνήθως με βάση τον φυσικό μηχανισμό αποθήκευσης της ενέργειας σε μηχανικές, ηλεκτροχημικές, ηλεκτρικές, θερμικές και χημικές μεθόδους (Hannan et al., 2021).

Μηχανική αποθήκευση περιλαμβάνει την αντλησιοταμίευση, τα συστήματα πεπιεσμένου αέρα (CAES) και τους σφόνδυλους. Η αντλησιοταμίευση είναι ώριμη και αξιόπιστη τεχνολογία μεγάλης κλίμακας, με υψηλή διάρκεια ζωής και μεγάλες ενεργειακές χωρητικότητες. Ωστόσο, απαιτεί κατάλληλη γεωμορφολογία και σημαντικές επενδύσεις υποδομής, γεγονός που περιορίζει την περαιτέρω ανάπτυξή της σε πολλές χώρες. Τα CAES προσφέρουν δυνατότητα αποθήκευσης μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας, αλλά παρουσιάζουν χαμηλότερη απόδοση και μεγαλύτερη πολυπλοκότητα λειτουργίας.

Ηλεκτροχημική αποθήκευση, και ειδικά τα συστήματα αποθήκευσης με μπαταρίες, εμφανίζουν τη μεγαλύτερη δυναμική ανάπτυξης. Το βασικό πλεονέκτημά τους είναι η ταχεία απόκριση και η ευκολία εγκατάστασης τόσο σε επίπεδο δικτύου όσο και σε κατανεμημένες εφαρμογές. Η δυνατότητα παροχής ισχύος σε χρονικές κλίμακες δευτερολέπτων τα καθιστά κατάλληλα για υπηρεσίες ευελιξίας και εξισορρόπησης (Zakeri & Syri, 2015).

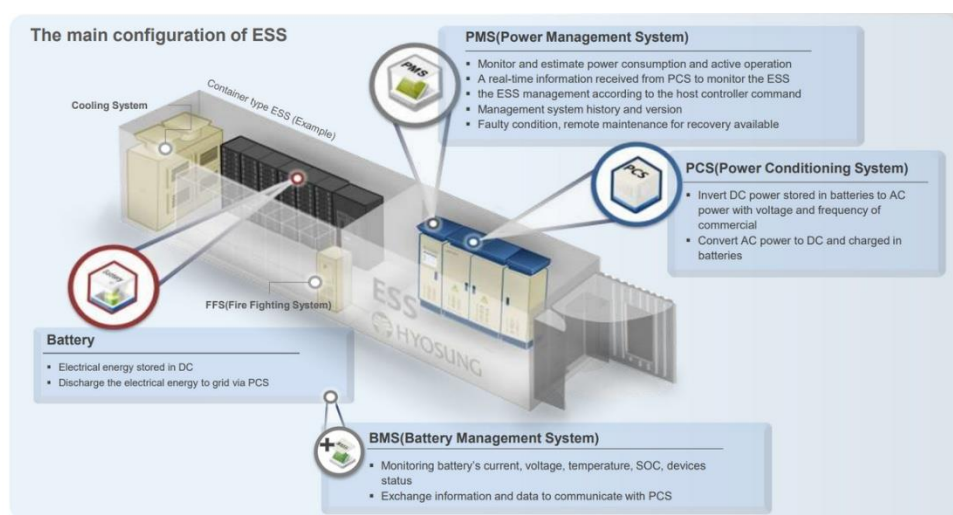
Παράλληλα, τεχνολογίες όπως η αποθήκευση υδρογόνου και οι θερμικές μέθοδοι βρίσκονται σε φάση ανάπτυξης για εφαρμογές μεγάλης διάρκειας αποθήκευσης, ωστόσο τα BESS κυριαρχούν σήμερα στις εφαρμογές βραχυχρόνιας και μεσοχρόνιας εξομάλυνσης.

3.2 Δομή και αρχιτεκτονική των BESS

Ένα σύστημα αποθήκευσης με μπαταρίες (BESS) δεν αποτελεί μόνο συστοιχία μπαταριών, αλλά ολοκληρωμένο ηλεκτροτεχνικό σύστημα. (Εικόνα 3.1)

Περιλαμβάνει:

- Στοιχεία μπαταριών (cells, modules, packs)
- Σύστημα μετατροπής ισχύος (PCS)
- Σύστημα διαχείρισης μπαταρίας (BMS)
- Σύστημα διαχείρισης ενέργειας (EMS)
- Υποστηρικτικές διατάξεις προστασίας και ψύξης



Εικόνα 3.1 Αρχιτεκτονική συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες (BESS), με κύρια υποσυστήματα BMS, PCS και EMS.

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου αποτελούν την κυρίαρχη τεχνολογία λόγω υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, μεγάλης απόδοσης κύκλου και χαμηλού ρυθμού αυτοεκφόρτισης. Τεχνολογίες όπως LFP και NMC χρησιμοποιούνται ευρέως σε έργα

κλίμακας δικτύου (Andreotti et al., 2024). Η ταχεία μείωση του κόστους των Li-ion μπαταριών την τελευταία δεκαετία έχει μεταβάλει ριζικά την οικονομική εικόνα της αποθήκευσης, καθιστώντας έργα που παλαιότερα θεωρούνταν μη βιώσιμα πλέον εμπορικά εφικτά.

Σε εφαρμογές behind-the-meter, τα BESS συνδυάζονται συχνά με φωτοβολταϊκά, με στόχο τη μείωση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας και τη βελτιστοποίηση συμβολαίων ισχύος. Η βέλτιστη διαστασιολόγηση τέτοιων συστημάτων επηρεάζεται από το προφίλ φορτίου και τις τιμές ενέργειας (Peng et al., 2021). Αντίθετα, σε εφαρμογές δικτύου, το βασικό επιχειρηματικό μοντέλο βασίζεται στο ενεργειακό arbitrage και στη συμμετοχή σε αγορές επικουρικών υπηρεσιών.

3.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά BESS

Η λειτουργία ενός BESS περιγράφεται μέσω συγκεκριμένων τεχνικών παραμέτρων, οι οποίες ενσωματώνονται και στα μοντέλα βελτιστοποίησης.

Ονομαστική ισχύς και χωρητικότητα

Η ισχύς (MW) καθορίζει το μέγιστο ρυθμό ανταλλαγής ενέργειας με το δίκτυο, ενώ η χωρητικότητα (MWh) την ποσότητα ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί. Ο λόγος ισχύος προς ενέργεια καθορίζει αν το σύστημα είναι κατάλληλο για βραχυχρόνια ή μακροχρόνια αποθήκευση (Grimaldi et al., 2024).

Κατάσταση φόρτισης (SOC)

Η κατάσταση φόρτισης εκφράζει το επίπεδο αποθηκευμένης ενέργειας. Τα όρια της καθορίζονται ώστε να αποφεύγεται υπερφόρτιση ή βαθιά εκφόρτιση που επιταχύνει την υποβάθμιση.

Βάθος εκφόρτισης (DoD)

Το βάθος εκφόρτισης σχετίζεται άμεσα με τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

Μεγαλύτερο βάθος εκφόρτισης συνεπάγεται μεγαλύτερη καταπόνηση και μειωμένο αριθμό κύκλων ζωής (Hannan et al., 2021).

Απόδοση κύκλου

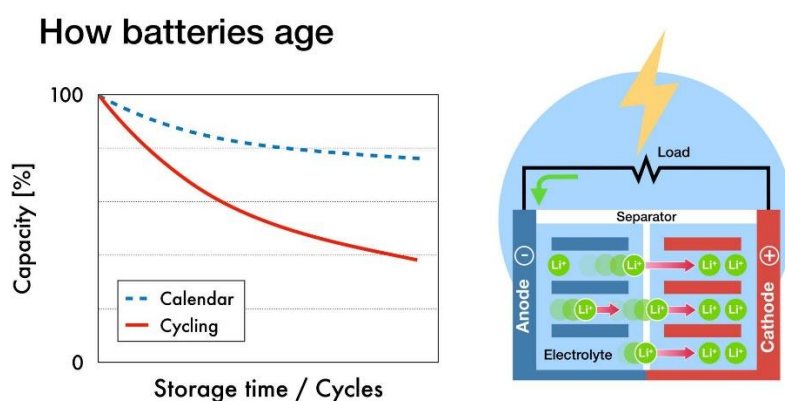
Η απόδοση κύκλου επηρεάζει άμεσα την κερδοφορία του arbitrage. Δυναμικά

μοντέλα απόδοσης δείχνουν ότι η απόδοση μεταβάλλεται με την ισχύ λειτουργίας (Grimaldi et al., 2024).

3.4 Υποβάθμιση μπαταριών και οικονομικές επιπτώσεις

Η γήρανση των μπαταριών αποτελεί κρίσιμο ζήτημα. Περιλαμβάνει τη γήρανση λόγω κύκλων και τη γήρανση ημερολογίου. (Εικόνα 3.2) Όπως προκύπτει από τη διεθνή βιβλιογραφία, η ενσωμάτωση κόστους υποβάθμισης στη βελτιστοποίηση μειώνει σημαντικά τα αναμενόμενα έσοδα. Σε ορισμένες περιπτώσεις αγγίζουν μείωση κατά 13–24% ετησίως (Grimaldi et al., 2024).

Η στρατηγική λειτουργίας επηρεάζει τη διάρκεια ζωής. Περιορισμός των κύκλων και αποφυγή ακραίων καταστάσεων φόρτισης μπορούν να επεκτείνουν τον χρόνο ζωής του έργου, επηρεάζοντας θετικά την οικονομική του βιωσιμότητα.



Calendar ageing: Occurs when the battery is at rest condition, no current flow.

Cycling ageing: Occurs when the battery is charged/discharged.

Εικόνα 3.2 Σχέση βάθους εκφόρτισης (DoD) και αριθμού κύκλων ζωής μπαταρίας.

3.5 Υπηρεσίες και εφαρμογές των BESS στο ηλεκτρικό σύστημα.

Τα BESS προσφέρουν:

- ενεργειακό arbitrage
- ρύθμιση συχνότητας

- peak shaving
- υποστήριξη τάσης
- εφεδρείες

Το arbitrage αποτελεί βασική πηγή εσόδων, καθώς οι διακυμάνσεις τιμών δημιουργούν ευκαιρίες εμπορίας (Abramova & Bunn, 2021). Σε αγορές με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ, όπως η ελληνική, η αυξημένη μεταβλητότητα ενισχύει τον ρόλο των BESS στην αγορά (Grant Thornton, 2023).

4. Αγορές ηλεκτρικής ενέργειας και ρυθμιστικό πλαίσιο.

4.1 Δομή και λειτουργία των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας

Οι σύγχρονες αγορές ηλεκτρικής ενέργειας βασίζονται σε ανταγωνιστικά μοντέλα λειτουργίας, τα οποία αντικατέστησαν τα παραδοσιακά κάθετα ολοκληρωμένα μονοπώλια. Στο ευρωπαϊκό πλαίσιο, η λειτουργία των αγορών καθορίζεται από το λεγόμενο Target Model, το οποίο επιδιώκει την ενοποίηση των εθνικών αγορών και την αποτελεσματική κατανομή των πόρων μέσω μηχανισμών αγοράς (European Commission, 2019).

Η βασική αρχή λειτουργίας των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας είναι η ισορροπία μεταξύ προσφοράς και ζήτησης σε πραγματικό χρόνο. Η τιμή της ενέργειας καθορίζεται από το οριακό κόστος της τελευταίας μονάδας παραγωγής που καλύπτει τη ζήτηση (marginal pricing). Το σύστημα αυτό ενθαρρύνει την αποδοτική λειτουργία των μονάδων και την είσοδο νέων τεχνολογιών χαμηλού κόστους, όπως οι ΑΠΕ (Conejo et al., 2010).

Με την αυξανόμενη διείσδυση μεταβλητών ΑΠΕ, η μεταβλητότητα των τιμών αυξάνεται σημαντικά, γεγονός που δημιουργεί νέες ευκαιρίες για τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Η μεταβολή της προσφοράς από ηλιακές και αιολικές μονάδες οδηγεί σε συχνές διακυμάνσεις τιμών εντός της ημέρας, οι οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν μέσω στρατηγικών arbitrage (Weron, 2014).

4.2 Το Ευρωπαϊκό Target Model

Το Target Model αποτελεί τη βάση για την οργάνωση των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Η δομή του περιλαμβάνει τέσσερις βασικές αγορές:

1. Προημερήσια αγορά (Day-Ahead Market – DAM)
2. Ενδοημερήσια αγορά (Intra-Day Market – IDM)
3. Συνεχή ενδοημερήσια αγορά (Continuous Intraday Market)
4. Αγορά εξισορρόπησης (Balancing market)

Σκοπός του Target Model είναι η ενοποίηση των αγορών μέσω μηχανισμών σύζευξης, ώστε να επιτυγχάνεται βέλτιστη χρήση των διασυνδέσεων και σύγκλιση τιμών μεταξύ χωρών (ENTSO-E, 2020).

Η λειτουργία του μοντέλου βασίζεται στην αρχή ότι οι συμμετέχοντες λαμβάνουν αποφάσεις σε διαφορετικούς χρονικούς ορίζοντες, από μακροχρόνιες συμβάσεις μέχρι πραγματικό χρόνο.

4.3 Προημερήσια Αγορά Ηλεκτρικής Ενέργειας (Day-Ahead Market – DAM)

Η προημερήσια αγορά (Day-Ahead Market – DAM) αποτελεί τον βασικό μηχανισμό διαμόρφωσης τιμών ηλεκτρικής ενέργειας στο ευρωπαϊκό Target Model (European Commission, 2019). Στην Ελλάδα λειτουργεί από το 2020 μέσω του Ελληνικού Χρηματιστηρίου Ενέργειας (HEEx), σε πλήρη ευθυγράμμιση με το ευρωπαϊκό σύστημα σύζευξης αγορών (Single Day-Ahead Coupling – SDAC) (Hellenic Energy Exchange, 2022).

Η DAM μέχρι και τις 30 Σεπτεμβρίου του 2025 λειτουργούσε ως ημερήσια δημοπρασία (auction market), στην οποία οι συμμετέχοντες υπέβαλλαν προσφορές αγοράς και πώλησης για κάθε ώρα της επόμενης ημέρας παράδοσης. Από την 1η Οκτωβρίου 2025, η Προημερήσια Αγορά στην Ελλάδα λειτουργεί με δεκαπεντάλεπτη χρονική ανάλυση, στο πλαίσιο της πανευρωπαϊκής εφαρμογής του 15-minute MTU μέσω του Single Day-Ahead Coupling (SDAC). Η ελληνική αγορά είναι πλέον πλήρως εναρμονισμένη με το ευρωπαϊκό μοντέλο σύζευξης, με τις τιμές εκκαθάρισης και τα αποτελέσματα αγοράς να προσδιορίζονται ανά 15 λεπτά για όλες τις ζώνες προσφοράς. Η μετάβαση αυτή υλοποιήθηκε τόσο σε τεχνικό όσο και σε ρυθμιστικό επίπεδο, σε συμφωνία με τις κατευθύνσεις των ευρωπαϊκών θεσμών (ENTSO-E, 2023· ACER, 2022).

Η υιοθέτηση του 15λεπτου MTU ενισχύει τη διαφάνεια της αγοράς, περιορίζει τις αποκλίσεις μεταξύ προγραμματισμένης και πραγματικής παραγωγής και βελτιώνει τη λειτουργική αποδοτικότητα του ηλεκτρικού συστήματος. Παράλληλα, επιτρέπει την ακριβέστερη αποτύπωση της βραχυχρόνιας μεταβλητότητας της ζήτησης και της παραγωγής από ΑΠΕ, συμβάλλοντας στην αποτελεσματικότερη ενσωμάτωσή τους και

στη συνολική βελτίωση της οικονομικής αποδοτικότητας της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Η εκκαθάριση της αγοράς πραγματοποιείται με τον μηχανισμό οριακής τιμολόγησης (marginal pricing – pay-as-cleared), όπου όλοι οι συμμετέχοντες αμείβονται με την ίδια τιμή για κάθε χρονική περίοδο (Conejo et al., 2010).

Στο τέλος της εκκαθάρισης, η αγορά εξασφαλίζει την ισορροπία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης, λαμβάνοντας υπόψη και τις διασυνοριακές ανταλλαγές ηλεκτρικής ενέργειας (RAAEY, 2024).

4.3.1 Συμμετέχοντες και είδη προσφορών

Στην προημερήσια αγορά συμμετέχουν:

- παραγωγοί ηλεκτρικής ενέργειας
- προμηθευτές και traders
- aggregators και χαρτοφυλάκια ΑΠΕ
- μεγάλοι καταναλωτές (demand response)

Οι συναλλαγές πραγματοποιούνται ηλεκτρονικά μέσω του συστήματος ETSS του Ελληνικού Χρηματιστηρίου Ενέργειας (Hellenic Energy Exchange, 2022).

4.3.2 Χρονοδιάγραμμα λειτουργίας DAM (Gate Opening – Gate Closure)

Σύμφωνα με το Hellenic Energy Exchange (HEEx), η προημερήσια αγορά λειτουργεί με συγκεκριμένο χρονοδιάγραμμα υποβολής προσφορών και εκκαθάρισης.

Ωρα (CET)	Στάδιο	Περιγραφή
10:00 D-2	Gate Opening	Άνοιγμα Προημερήσιας Αγοράς
09:25	Financial Limits Calculation	Υπολογισμός χρηματοοικονομικών ορίων συμμετεχόντων
09:30	Clearing Members Notification	Ενημέρωση εκκαθαριστικών μελών για τα οικονομικά όρια

09:30	Priority Orders Submission	Υποβολή priority price-taking orders από ΑΔΜΗΕ, Last Resort RES Aggregator και ΔΑΠΕΕΠ
09:30	Orders to ETSS	Υποβολή των priority orders στο σύστημα ETSS από το HEnEx
09:45	Orders Publication	Δημοσίευση των priority price-taking orders
09:45	MTU Information Publication	Δημοσίευση πληροφοριών για κάθε Market Time Unit (MTU)
11:00	Orders Validation Opening	Έναρξη ελέγχου εγκυρότητας προσφορών
12:00	Gate Closure	Κλείσιμο Προημερήσιας Αγοράς
12:00	Orders to MCO	Αποστολή ανωνυμοποιημένων προσφορών στον Market Coupling Operator
12:29	EUPHEMIA Execution	Εκτέλεση του αλγορίθμου σύζευξης EUPHEMIA
12:43	Preliminary Results Confirmation	Επιβεβαίωση προκαταρκτικών αποτελεσμάτων
13:00	Results Notification	Ενημέρωση συμμετεχόντων για την εκτέλεση των προσφορών
13:05	Clearing House Submission	Αποστολή αποτελεσμάτων στον εκκαθαριστικό φορέα
14:00	Market Results Publication	Δημοσίευση αποτελεσμάτων αγοράς ανά MTU
00:00	Delivery Start	Έναρξη ημέρας παράδοσης (πρώτο MTU)

Πίνακας 4.1 Χρονοδιάγραμμα λειτουργίας DAM

4.3.3 Οριακή τιμή συστήματος.

Η οριακή τιμή συστήματος (ΟΤΣ), ή Market Clearing Price (MCP), αποτελεί τη βασική τιμή εκκαθάρισης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και καθορίζεται στην Προημερήσια Αγορά μέσω της αλληλεπίδρασης προσφοράς και ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Η προημερήσια αγορά αποτελεί τον κύριο μηχανισμό εμπορίας ηλεκτρικής

ενέργειας στις ευρωπαϊκές αγορές και λειτουργεί μέσω δημοπρασίας ενιαίας τιμής για κάθε χρονική μονάδα (HEnEx, 2023).

Στο πλαίσιο του Target Model της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η ΟΤΣ προκύπτει από τη σύγκλιση των καμπυλών προσφοράς και ζήτησης ενέργειας, όπου η τιμή της τελευταίας μονάδας που απαιτείται για την κάλυψη της ζήτησης καθορίζει την τιμή εκκαθάρισης για όλους τους συμμετέχοντες. (Εικόνα 4.1) (ACER, 2021) Η διαδικασία αυτή βασίζεται στον μηχανισμό της οριακής τιμολόγησης (marginal pricing), σύμφωνα με τον οποίο όλοι οι παραγωγοί που προσφέρουν ενέργεια σε τιμή χαμηλότερη ή ίση της ΟΤΣ αποζημιώνονται στην ίδια τιμή, ανεξάρτητα από το πραγματικό κόστος παραγωγής τους (Kirschen & Strbac, 2019).

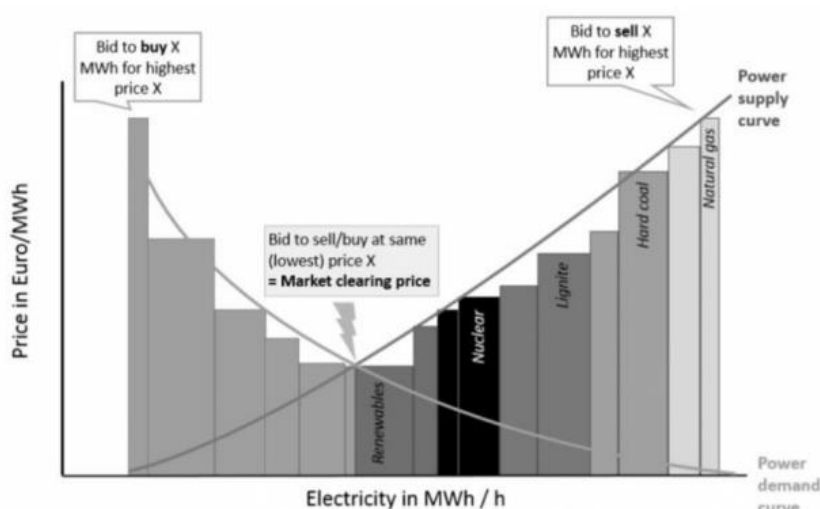
Η διαμόρφωση της ΟΤΣ επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως το μείγμα παραγωγής, οι τιμές καυσίμων (φυσικό αέριο, άνθρακας), οι καιρικές συνθήκες και η διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Σε περιόδους υψηλής παραγωγής ΑΠΕ, ιδίως από φωτοβολταϊκά και αιολικά συστήματα, παρατηρείται μείωση της ΟΤΣ λόγω της χαμηλής οριακής τιμής παραγωγής των τεχνολογιών αυτών, γεγονός που συχνά οδηγεί σε έντονη μεταβλητότητα των τιμών. Αντίθετα, σε περιόδους χαμηλής παραγωγής ΑΠΕ ή υψηλής ζήτησης, η ΟΤΣ αυξάνεται, καθώς απαιτείται η συμμετοχή μονάδων υψηλότερου κόστους, όπως μονάδες φυσικού αερίου (ENTSO-E, 2022).

Στην ελληνική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, μετά την εφαρμογή του Target Model το 2020, η ΟΤΣ στην DAM καθορίζεται από το Ελληνικό Χρηματιστήριο Ενέργειας (HEnEx) μέσω δημοπρασίας ενιαίας τιμής και είναι πλήρως εναρμονισμένη με τα ευρωπαϊκά πρότυπα σύζευξης αγορών (market coupling). Η σύζευξη με τις γειτονικές αγορές (π.χ. Ιταλία και Βουλγαρία) επιτρέπει τη διασυνοριακή βελτιστοποίηση της ροής ενέργειας και συμβάλλει στη σύγκλιση των τιμών μεταξύ χωρών (HEnEx, 2023).

Η ΟΤΣ αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη λειτουργία και την οικονομική βιωσιμότητα των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες (BESS), καθώς καθορίζει τις ευκαιρίες ενεργειακού arbitrage. Οι διακυμάνσεις της τιμής μεταξύ ωρών χαμηλής και υψηλής ζήτησης δημιουργούν ευκαιρίες για φόρτιση και εκφόρτιση των μπαταριών, επιτρέποντας τη μεγιστοποίηση των εσόδων των επενδυτών (Abramova & Bunn,

2021). Ειδικότερα, σε αγορές με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ, όπως η ελληνική, η αυξημένη μεταβλητότητα της ΟΤΣ ενισχύει σημαντικά τον ρόλο των BESS τόσο ως εργαλείων εξισορρόπησης όσο και ως μηχανισμών εμπορικής εκμετάλλευσης της ενέργειας (Grant Thornton, 2023).

Συνολικά, η ΟΤΣ στην προημερήσια αγορά αποτελεί τον βασικό μηχανισμό τιμολόγησης της ηλεκτρικής ενέργειας και αντικατοπτρίζει τόσο τις συνθήκες της αγοράς όσο και τη μετάβαση του ενεργειακού συστήματος προς ένα μοντέλο υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ και αυξημένης ευελιξίας. Η κατανόηση της λειτουργίας και των παραγόντων που επηρεάζουν την ΟΤΣ είναι απαραίτητη για τον σχεδιασμό επενδύσεων σε τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας και για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους στο σύγχρονο ενεργειακό περιβάλλον.



Εικόνα 4.1 Τιμή Εκκαθάρισης (Οριακή Τιμή Συστήματος – MCP)

4.4 Ενδοημερήσια αγορά ηλεκτρικής ενέργειας (IDM)

4.4.1 Βασική λειτουργία IDM

Η Ενδοημερήσια Αγορά (Intra-Day Market – IDM) αποτελεί βασικό πυλώνα της σύγχρονης αρχιτεκτονικής των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας, όπως αυτή διαμορφώνεται στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού Target Model. Η ενδοημερήσια αγορά λειτουργεί χρονικά μεταξύ της Προημερήσιας Αγοράς και της φυσικής παράδοσης της

ηλεκτρικής ενέργειας και παρέχει τη δυνατότητα στους συμμετέχοντες να προσαρμόσουν τις θέσεις τους με βάση νεότερες πληροφορίες σχετικά με τη ζήτηση, την παραγωγή και τις καιρικές συνθήκες (ACER, 2021).

Η ανάγκη ύπαρξης της ενδοημερήσιας αγοράς προκύπτει από τη στοχαστική φύση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ιδίως από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια. Η παραγωγή αυτών των τεχνολογιών εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες και συνεπώς είναι δύσκολο να προβλεφθεί με ακρίβεια στην προημερήσια φάση. Ως αποτέλεσμα, οι αποκλίσεις μεταξύ προγραμματισμένης και πραγματικής παραγωγής είναι αναπόφευκτες και πρέπει να διορθώνονται πριν την πραγματική λειτουργία του συστήματος (ENTSO-E, 2022).

Στην ελληνική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, η IDM τέθηκε σε λειτουργία το 2020 στο πλαίσιο της εφαρμογής του Target Model και οργανώνεται από το Ελληνικό Χρηματιστήριο Ενέργειας (HEnEx). Αρχικά λειτούργησε με τοπικές ενδοημερήσιες δημοπρασίες (LIDAs), ενώ στη συνέχεια ενσωματώθηκε στο περιφερειακό μοντέλο συμπληρωματικών δημοπρασιών (CRIDAs) με διασύνδεση με τις αγορές της Ιταλίας και της Σλοβενίας, ενώ πλέον έχει ολοκληρωθεί η πλήρης σύζευξη μέσω της πλατφόρμας XBID

Η λειτουργία της ενδοημερήσιας αγοράς συμβάλλει σημαντικά στη βελτίωση της αποδοτικότητας της αγοράς και στη μείωση του κόστους εξισορρόπησης, καθώς επιτρέπει τη συνεχή επικαιροποίηση των προγραμμάτων παραγωγής και κατανάλωσης. Επιπλέον, ενισχύει τη ρευστότητα της αγοράς και διευκολύνει τη διείσδυση των ΑΠΕ, παρέχοντας μηχανισμό διαχείρισης της μεταβλητότητάς τους (IEA, 2022).

Ιδιαίτερη σημασία έχει η ενδοημερήσια αγορά για τη λειτουργία των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες (BESS). Τα BESS μπορούν να εκμεταλλευτούν τις διακυμάνσεις των τιμών εντός της ημέρας, πραγματοποιώντας αγορές σε περιόδους χαμηλών τιμών και πωλήσεις σε περιόδους υψηλών τιμών, επιτυγχάνοντας κέρδη μέσω ενεργειακού arbitrage. Η αυξημένη μεταβλητότητα των τιμών, η οποία εντείνεται σε αγορές με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ, καθιστά την ενδοημερήσια αγορά ιδιαίτερα σημαντική για τη βιωσιμότητα των επενδύσεων σε αποθήκευση (Abramova & Bunn, 2021).

Συνολικά, η ενδοημερήσια αγορά αποτελεί κρίσιμο μηχανισμό ευελιξίας του ηλεκτρικού συστήματος, καθώς γεφυρώνει το χρονικό χάσμα μεταξύ προγραμματισμού και πραγματικής λειτουργίας, μειώνει τις αποκλίσεις και ενισχύει τη σταθερότητα του δικτύου.

4.4.2 Χρονοδιάγραμμα λειτουργίας (IDM)

Η ελληνική IDM περιλαμβάνει τρεις διαδοχικές δημοπρασίες ημερησίως, γνωστές ως IDA1, IDA2 και IDA3, οι οποίες επιτρέπουν τη διόρθωση των θέσεων των συμμετεχόντων μετά την εκκαθάριση της προημερήσιας αγοράς. Οι δημοπρασίες αυτές λειτουργούν στο πλαίσιο των Complementary Regional Intraday Auctions (CRIDAs) και πραγματοποιούνται σε σύζευξη με άλλες ευρωπαϊκές αγορές (ENTSO-E, 2023).

Οι ώρες λειτουργίας των ενδοημερήσιων δημοπρασιών (σε CET) είναι οι εξής:

Δημοπρασία	Άνοιγμα	Κλείσιμο πύλης	Δημοσίευση αποτελεσμάτων
IDA1	13:00	15:00	15:30
IDA2	15:30	22:00	22:30
IDA3	22:30	10:00 (ημέρα παράδοσης D)	10:30

Πίνακας 4.2 Χρονοδιάγραμμα λειτουργίας IDA

Οι δημοπρασίες αυτές επιτρέπουν την επαναδιαμόρφωση των θέσεων των συμμετεχόντων με βάση πιο ακριβείς προβλέψεις, ιδιαίτερα για την παραγωγή από ΑΠΕ, η οποία χαρακτηρίζεται από στοχαστικότητα και αβεβαιότητα (IEA, 2022).

Η Συνεχής Ενδοημερήσια Αγορά (Continuous Intraday Market) αποτελεί μέρος της Ενδοημερήσιας Αγοράς και λειτουργεί παράλληλα με τις διακριτές ενδοημερήσιες δημοπρασίες. Σε αντίθεση με τις IDA1, IDA2 και IDA3, στις οποίες οι εντολές συγκεντρώνονται και εκκαθαρίζονται σε προκαθορισμένες χρονικές στιγμές, στη συνεχή αγορά οι συμμετέχοντες μπορούν να υποβάλλουν και να τροποποιούν εντολές αγοράς και πώλησης καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου διαπραγμάτευσης. Οι εντολές

αντιστοιχίζονται δυναμικά μέσω του βιβλίου εντολών, επιτρέποντας στους συμμετέχοντες να αντιδρούν άμεσα σε νέες πληροφορίες σχετικά με τη ζήτηση, την παραγωγή και τις συνθήκες της αγοράς.

Η λειτουργία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για τα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς παρέχει τη δυνατότητα συχνότερης αναπροσαρμογής των θέσεων της μπαταρίας όσο πλησιάζει ο χρόνος φυσικής παράδοσης. Έτσι, ένα BESS μπορεί να αξιοποιεί μεταβολές των τιμών και νέες ευκαιρίες ενεργειακού arbitrage που δεν ήταν διαθέσιμες κατά την προηγούμενη εκκαθάριση των αγορών. Ωστόσο, η δυναμική φύση της συνεχούς διαπραγμάτευσης απαιτεί διαφορετική προσέγγιση στη λήψη αποφάσεων σε σχέση με τις διακριτές δημοπρασίες και, για τον λόγο αυτό, η συγκεκριμένη αγορά δεν ενσωματώνεται στο μοντέλο βελτιστοποίησης της παρούσας εργασίας.

4.5 Αγορά Εξισορρόπησης (Balancing Market – BM)

Η Αγορά Εξισορρόπησης αποτελεί το τελευταίο και κρίσιμο στάδιο της λειτουργίας της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο διασφαλίζει την πραγματική ισορροπία μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης σε πραγματικό χρόνο. Σε αντίθεση με την Προημερήσια και την Ενδοημερήσια Αγορά, οι οποίες βασίζονται σε προβλέψεις, η αγορά εξισορρόπησης ενεργοποιείται για να αντιμετωπίσει αποκλίσεις που προκύπτουν κατά τη φυσική λειτουργία του συστήματος (ENTSO-E, 2022).

4.5.1 Ρόλος και σκοπός της Αγοράς Εξισορρόπησης

Η βασική λειτουργία της Αγοράς Εξισορρόπησης είναι η διατήρηση της ισορροπίας μεταξύ παραγωγής και ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε χρονική στιγμή. Το ηλεκτρικό σύστημα απαιτεί συνεχή ισορροπία, καθώς ακόμη και μικρές αποκλίσεις μπορούν να οδηγήσουν σε αστάθεια ή και σε διακοπές ηλεκτροδότησης. Ο Διαχειριστής του Συστήματος Μεταφοράς (ΑΔΜΗΕ στην Ελλάδα) ενεργοποιεί εφεδρείες ισχύος ή εντολές αύξησης/μείωσης παραγωγής για την αποκατάσταση της ισορροπίας (IPTO, 2023).

4.5.2 Δομή της Αγοράς Εξισορρόπησης

Η Αγορά Εξισορρόπησης στην Ελλάδα αποτελείται από τρεις βασικές υποαγορές:

- Αγορά Ισχύος Εξισορρόπησης (Balancing Capacity Market)

Σε αυτή την αγορά οι συμμετέχοντες δεσμεύουν διαθέσιμη ισχύ (εφεδρείες) για πιθανή ενεργοποίηση από τον Διαχειριστή. Οι μονάδες παραγωγής, αποθήκευσης ή και εύελικτης ζήτησης αμείβονται για τη διαθεσιμότητά τους, ανεξάρτητα από το αν τελικά ενεργοποιηθούν (ACER, 2021).

- Αγορά Ενέργειας Εξισορρόπησης (Balancing Energy Market)

Αφορά την πραγματική ενεργοποίηση ενέργειας για την εξισορρόπηση του συστήματος. Ο ΑΔΜΗΕ ενεργοποιεί εντολές ανοδικής ή καθοδικής ρύθμισης (upward/downward regulation) ανάλογα με τις ανάγκες του συστήματος, με βάση τις προσφορές των συμμετεχόντων (IPTO, 2023).

- Αγορά Αποκλίσεων (Imbalance Settlement)

Η αγορά αυτή υπολογίζει το κόστος αποκλίσεων των συμμετεχόντων από τα προγράμματα που είχαν δηλώσει στις αγορές DAM και IDM. Οι συμμετέχοντες επιβαρύνονται ή αποζημιώνονται ανάλογα με τη θέση τους σε σχέση με το σύστημα, βάσει των τιμών εξισορρόπησης (ACER, 2022).

4.5.3 Συμμετέχοντες στην Αγορά Εξισορρόπησης

Στην Αγορά Εξισορρόπησης συμμετέχουν μονάδες παραγωγής, μονάδες αποθήκευσης, φορείς εύελικτης ζήτησης και προμηθευτές ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίοι υποβάλλουν προσφορές για παροχή ισχύος και ενέργειας εξισορρόπησης (IPTO, 2023).

4.5.4 Διαδικασία λειτουργίας της Αγοράς Εξισορρόπησης

Η λειτουργία της αγοράς περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

1. Υποβολή προσφορών εξισορρόπησης
2. Επιλογή εφεδρειών από τον ΑΔΜΗΕ
3. Ενεργοποίηση μονάδων σε πραγματικό χρόνο
4. Εκκαθάριση αποκλίσεων και τιμολόγηση

Η διαδικασία πραγματοποιείται σε συνεχή βάση καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας (ENTSO-E, 2022).

Η Αγορά Εξισορρόπησης λειτουργεί ήδη με 15λεπτη χρονική ανάλυση (15-minute MTU). Η ημέρα χωρίζεται σε 96 χρονικές περιόδους, επιτρέποντας την ακριβέστερη παρακολούθηση των αποκλίσεων και την ταχύτερη ενεργοποίηση εφεδρειών (ENTSO-E, 2022· ACER, 2022).

4.5.5 Σχέση με DAM και IDM

Η Αγορά Εξισορρόπησης λειτουργεί συμπληρωματικά με την προημερήσια και την ενδοημερήσια Αγορά. Η προημερήσια καθορίζει τις αρχικές θέσεις των συμμετεχόντων, η ενδοημερήσια επιτρέπει τη διόρθωσή τους και η αγορά εξισορρόπησης καλύπτει τις τελικές αποκλίσεις σε πραγματικό χρόνο (ACER, 2021).

4.5.6 Σημασία για τα Συστήματα Αποθήκευσης (BESS)

Η Αγορά Εξισορρόπησης αποτελεί σημαντική πηγή εσόδων για τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, τα οποία μπορούν να παρέχουν υπηρεσίες ταχείας απόκρισης, ρύθμισης συχνότητας και εξισορρόπησης φορτίου. Η ευελιξία των BESS τα καθιστά ιδιαίτερα ανταγωνιστικά σε αγορές με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ (IEA, 2022).

5. Μεθοδολογία και ανάπτυξη των μοντέλων πρόβλεψης

5.1 Πηγές Δεδομένων

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία προέρχονται από επίσημους φορείς της ευρωπαϊκής και ελληνικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα:

- Hellenic Energy Exchange (HEnEx) για τα δεδομένα της αγοράς επόμενης ημέρας (Day-Ahead Market – DAM), και της ενδοημερήσιας αγοράς (Intraday Market – IDM)
- ΑΔΜΗΕ (ADMIE) για τα δεδομένα της αγοράς εξισορρόπησης (Balancing Market – BM).

Το σύνολο των δεδομένων καλύπτει την περίοδο 2024–2025.

5.2 Δεδομένα Αγοράς Επόμενης Ημέρας (DAM)

Τα δεδομένα ήταν αρχικά διαθέσιμα σε ξεχωριστά αρχεία για τα έτη 2024 και 2025, τα οποία ενοποιήθηκαν σε μία ενιαία χρονοσειρά. Από το αρχικό σύνολο δεδομένων διατηρήθηκαν μόνο οι απαραίτητες μεταβλητές, δηλαδή η χρονική στιγμή (MTU) και η τιμή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η χρονική μεταβλητή μετατράπηκε σε μορφή datetime και τα δεδομένα ταξινομήθηκαν χρονολογικά. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στο γεγονός ότι μέρος των δεδομένων του 2024 και του 2025 ήταν διαθέσιμο σε ωριαία ανάλυση, λόγω της σταδιακής μετάβασης της αγοράς σε 15λεπτα χρονικά διαστήματα.

Για την ενοποίηση της χρονικής ανάλυσης εφαρμόστηκε η μέθοδος forward fill, με την οποία κάθε ωριαία τιμή επεκτάθηκε στα αντίστοιχα ενδιάμεσα 15λεπτα διαστήματα. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίστηκε η συμβατότητα των δεδομένων και η δημιουργία μιας συνεχούς και ομοιογενούς χρονοσειράς.

5.3 Δεδομένα Ενδοημερήσιας Αγοράς (IDM)

Τα δεδομένα της ενδοημερήσιας αγοράς συλλέχθηκαν από τα αποτελέσματα των δημοπρασιών Intraday Auction (IDA1, IDA2 και IDA3), τα οποία δημοσιεύονται σε μορφή ημερήσιων αρχείων Excel. Για το έτος 2024 χρησιμοποιήθηκαν επίσης αρχεία τύπου CRIDA, τα οποία αντιστοιχούν σε προηγούμενη μορφή της αγοράς και θεωρήθηκαν ισοδύναμα με τα IDA.

Κάθε αρχείο περιλαμβάνει τις τιμές εκκαθάρισης της αγοράς (Market Clearing Price – MCP) για κάθε χρονικό διάστημα παράδοσης (DELIVERY_MTU). Δεδομένου ότι το MTU στο ελληνικό σύστημα αντιστοιχεί σε 15 λεπτά, κάθε ημέρα αποτελείται από 96 χρονικά διαστήματα.

Η επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με ενιαία μεθοδολογία για όλες τις δημοπρασίες (IDA1, IDA2, IDA3) και περιλάμβανε:

- αυτοματοποιημένη ανάγνωση όλων των αρχείων,
- επιλογή των βασικών μεταβλητών (DELIVERY_MTU, MCP),
- μετατροπή σε μορφή (datetime, price),
- συγχώνευση όλων των αρχείων σε ενιαία σύνολα δεδομένων,
- ταξινόμηση των δεδομένων σε χρονολογική σειρά.

Για τη συμπλήρωση των ελλειπουσών τιμών εφαρμόστηκε forward fill σε περιπτώσεις ωριαίων δεδομένων,

Το τελικό αποτέλεσμα ήταν τρεις πλήρεις και ομοιογενείς χρονοσειρές τιμών για τις αγορές IDA1, IDA2 και IDA3.

5.4 Δεδομένα Αγοράς Εξισορρόπησης (BM)

Τα δεδομένα της αγοράς εξισορρόπησης συλλέχθηκαν από τον ΑΔΜΗΕ και περιλαμβάνουν τις τιμές ενεργοποίησης ενέργειας για την εξεταζόμενη περίοδο.

Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη ξεχωριστού μοντέλου πρόβλεψης, καθώς η αγορά εξισορρόπησης παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τις αγορές DAM και IDM.

5.5 Μεθοδολογία Πρόβλεψης

Η ανάπτυξη των μοντέλων πρόβλεψης βασίστηκε σε τεχνικές μηχανικής μάθησης. Για κάθε αγορά (DAM, IDM, BM) κατασκευάστηκε ξεχωριστό μοντέλο.

Η διαδικασία περιλαμβάνει:

1. προεπεξεργασία δεδομένων,
2. δημιουργία χαρακτηριστικών (feature engineering),
3. εκπαίδευση μοντέλων,
4. αξιολόγηση απόδοσης.

Χρησιμοποιήθηκαν οι αλγόριθμοι XGBoost και lightGBM οι οποίοι είναι κατάλληλοι για την πρόβλεψη τιμών ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της ικανότητάς τους να αποτυπώνουν μη γραμμικές σχέσεις και σύνθετα μοτίβα.

5.6 Ανάλυση και Υλοποίηση Κώδικων Πρόβλεψης

Σε αυτό το σημείο της εργασίας παρουσιάζεται η μεθοδολογία υλοποίησης των μοντέλων πρόβλεψης μέσω κώδικα.

Για κάθε αγορά (DAM, IDM, BM) αναλύονται:

- η επιλογή των χαρακτηριστικών (features),
- η διαδικασία εκπαίδευσης του μοντέλου,
- η παραγωγή προβλέψεων,

Η ανάλυση αυτή επιτρέπει την κατανόηση των επιλογών που έγιναν κατά την ανάπτυξη των μοντέλων και τεκμηριώνει τη μεθοδολογία της εργασίας.

5.6.1 Ανάλυση και Υλοποίηση Κώδικα Πρόβλεψης για την DAM

Για την αγορά επόμενης ημέρας (DAM) αναπτύχθηκε ένα μοντέλο πρόβλεψης τιμών σε ανάλυση 15 λεπτών, με στόχο την εκτίμηση ολόκληρης της καμπύλης τιμών της επόμενης ημέρας. Η λογική της υλοποίησης ακολουθεί τον πραγματικό τρόπο λειτουργίας της αγοράς, καθώς για κάθε ημέρα στόχο D αξιοποιούνται μόνο τα

δεδομένα που είναι διαθέσιμα έως τις 12:00 της προηγούμενης ημέρας D-1, ώστε να παραχθούν προβλέψεις για όλα τα 96 χρονικά διαστήματα της ημέρας D.

Σε πρώτο στάδιο φορτώνονται τα ιστορικά δεδομένα της DAM. Στη συνέχεια, το βασικό dataset εμπλουτίζεται με εξωτερικές προβλέψεις που αφορούν το φορτίο, την ηλιακή παραγωγή και την αιολική παραγωγή σε ανάλυση 15 λεπτών. Η προσθήκη αυτών των μεταβλητών είναι σημαντική, καθώς η τιμή στην αγορά επόμενης ημέρας δεν εξαρτάται μόνο από τη δική της ιστορική πορεία, αλλά και από τη συνολική εικόνα του συστήματος, δηλαδή από τη σχέση μεταξύ ζήτησης και διαθέσιμης παραγωγής από ΑΠΕ.

Με βάση τις παραπάνω προβλέψεις δημιουργούνται και ορισμένα επιπλέον χαρακτηριστικά, όπως το καθαρό φορτίο (*net load*), η συνολική παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές, το ποσοστό συμμετοχής των ΑΠΕ στο φορτίο, αλλά και μεταβλητές που αποτυπώνουν τη βραχυχρόνια μεταβολή της ηλιακής και αιολικής παραγωγής. Τα χαρακτηριστικά αυτά επιλέχθηκαν ώστε το μοντέλο να λαμβάνει υπόψη όχι μόνο το επίπεδο της ζήτησης ή της παραγωγής, αλλά και τη δυναμική τους, η οποία μπορεί να επηρεάζει άμεσα τη διαμόρφωση της τιμής.

Έπειτα εφαρμόζεται μετασχηματισμός *asinh* στην τιμή της αγοράς. Η επιλογή αυτή έγινε επειδή οι τιμές ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζουν συχνά έντονη μεταβλητότητα και ακραίες τιμές, γεγονός που μπορεί να δυσκολέψει την εκπαίδευση του μοντέλου. Ο συγκεκριμένος μετασχηματισμός βοηθά στη σταθεροποίηση της κατανομής των δεδομένων και στη μείωση της επίδρασης των *spikes*, χωρίς να δημιουργεί πρόβλημα σε περιπτώσεις αρνητικών τιμών.

Σημαντικό μέρος της υλοποίησης αποτελεί το στάδιο του *feature engineering*, όπου δημιουργούνται τα χαρακτηριστικά που τελικά θα χρησιμοποιηθούν από το μοντέλο. Αρχικά, κατασκευάζονται χρονικές υστερήσεις της μετασχηματισμένης τιμής (*lags*), έτσι ώστε να αξιοποιείται η πρόσφατη αλλά και η πιο μακρινή ιστορική συμπεριφορά της αγοράς. Παράλληλα, υπολογίζονται κυλιόμενα στατιστικά, όπως μέσοι όροι, τυπικές αποκλίσεις, μέγιστες και ελάχιστες τιμές σε παράθυρα 24 ωρών και 7 ημερών, ώστε να αποτυπώνεται τόσο το πρόσφατο επίπεδο των τιμών όσο και η μεταβλητότητα της αγοράς σε διαφορετικούς χρονικούς ορίζοντες.

Επιπλέον, ενσωματώνονται χρονικά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την εποχικότητα της αγοράς, όπως η ώρα της ημέρας, η ημέρα της εβδομάδας και ο μήνας. Με αυτόν τον τρόπο το μοντέλο μπορεί να αναγνωρίσει επαναλαμβανόμενα μοτίβα, όπως οι ημερήσιοι κύκλοι τιμών ή οι διαφορές μεταξύ εργάσιμων ημερών και Σαββατοκύριακων. Παράλληλα, προστίθενται και χαρακτηριστικά που περιγράφουν απότομες μεταβολές της τιμής, όπως διαφορές μεταξύ διαδοχικών χρονικών βημάτων και δείκτες επιτάχυνσης της μεταβολής.

Για την εκπαίδευση του μοντέλου, το dataset διαμορφώνεται έτσι ώστε κάθε γραμμή να αντιστοιχεί σε μία πρόβλεψη ημέρας-εμπρός. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε ημέρα χρησιμοποιούνται ως είσοδος τα χαρακτηριστικά που είναι διαθέσιμα στις 12:00 της προηγούμενης ημέρας, ενώ ως στόχοι ορίζονται οι 96 τιμές της επόμενης ημέρας. Με αυτόν τον τρόπο, το πρόβλημα διατυπώνεται ως πρόβλεψη ολόκληρης της ημερήσιας καμπύλης τιμών και όχι μεμονωμένων χρονικών σημείων. Στη συνέχεια, τα δεδομένα χωρίζονται σε σύνολο εκπαίδευσης και σύνολο ελέγχου με χρονικό κριτήριο, ώστε η αξιολόγηση να γίνεται σε μεταγενέστερη περίοδο και να προσεγγίζει καλύτερα τις πραγματικές συνθήκες πρόβλεψης.

Ως βασικός αλγόριθμος χρησιμοποιήθηκε ο XGBoost Regressor, σε συνδυασμό με τη δομή MultiOutputRegressor, ώστε να είναι δυνατή η πρόβλεψη και των 96 χρονικών βημάτων της επόμενης ημέρας. Η επιλογή του XGBoost βασίζεται στην ικανότητά του να χειρίζεται μη γραμμικές σχέσεις και μεγάλο αριθμό ετερογενών χαρακτηριστικών, κάτι που ταιριάζει ιδιαίτερα στο συγκεκριμένο πρόβλημα. Παράλληλα, εφαρμόζεται μηχανισμός στάθμισης των δειγμάτων, δίνοντας μεγαλύτερη βαρύτητα σε ημέρες με πολύ υψηλές τιμές, με στόχο να βελτιωθεί η συμπεριφορά του μοντέλου σε περιόδους έντονης μεταβλητότητας ή ακραίων τιμών.

Μετά την ολοκλήρωση της εκπαίδευσης, ακολουθεί η διαδικασία παραγωγής προβλέψεων για την περίοδο αξιολόγησης. Για κάθε ημέρα του έτους ελέγχου, το μοντέλο λαμβάνει τα διαθέσιμα χαρακτηριστικά της προηγούμενης ημέρας και παράγει τις 96 προβλεπόμενες τιμές της επόμενης. Στη συνέχεια εφαρμόζεται ο αντίστροφος μετασχηματισμός, ώστε οι προβλέψεις να επιστρέψουν στην αρχική τους κλίμακα σε €/MWh και να μπορούν να συγκριθούν άμεσα με τις πραγματικές τιμές της αγοράς.

Η αξιολόγηση του μοντέλου γίνεται με χρήση των δεικτών MAE και RMSE, οι οποίοι επιτρέπουν μια συνολική αποτίμηση της ακρίβειας των προβλέψεων. Παράλληλα, δημιουργούνται ενδεικτικά γραφήματα σύγκρισης μεταξύ πραγματικών και προβλεπόμενων τιμών για επιλεγμένες ημέρες, ώστε να υπάρχει και μια πιο ποιοτική εικόνα της απόδοσης του μοντέλου ως προς τη μορφή της ημερήσιας καμπύλης και την αποτύπωση πιθανών διακυμάνσεων.

Συνολικά, η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για τη DAM συνδυάζει τρεις βασικές πηγές πληροφορίας: την ιστορική συμπεριφορά της ίδιας της τιμής, εξωγενείς μεταβλητές που περιγράφουν τη λειτουργία του ηλεκτρικού συστήματος και χρονικά χαρακτηριστικά εποχικότητας. Ο συνδυασμός αυτών των στοιχείων επιτρέπει στο μοντέλο να αποτυπώσει τόσο τη βραχυχρόνια δυναμική της αγοράς όσο και τις ευρύτερες συνθήκες που επηρεάζουν τη διαμόρφωση των τιμών στην αγορά επόμενης ημέρας

5.6.2 Ανάλυση και Υλοποίηση Κώδικα Πρόβλεψης για την IDA1

Για την αγορά IDA1 αναπτύχθηκε μοντέλο πρόβλεψης τιμών σε ανάλυση 15 λεπτών, με στόχο την εκτίμηση της ημερήσιας καμπύλης τιμών για κάθε ημέρα του ορίζοντα πρόβλεψης. Σε αντίθεση με την DAM, όπου η πρόβλεψη βασίζεται κυρίως σε ιστορικά στοιχεία της ίδιας της αγοράς και στις εξωτερικές προβλέψεις του συστήματος, στην περίπτωση της IDA1 αξιοποιείται επιπλέον η πληροφορία που προέρχεται από την ήδη γνωστή καμπύλη της DAM. Η επιλογή αυτή είναι λογική, καθώς η IDA1 ακολουθεί χρονικά τη DAM και σε μεγάλο βαθμό επηρεάζεται από τα αποτελέσματα της προηγούμενης αγοράς.

Αρχικά φορτώνονται τα ιστορικά δεδομένα της IDA1. Στη συνέχεια φορτώνονται τα δεδομένα της DAM, καθώς και οι προβλέψεις φορτίου, ηλιακής παραγωγής και αιολικής παραγωγής σε ανάλυση 15 λεπτών. Όλα τα παραπάνω ενώνονται σε ένα κοινό dataset, έτσι ώστε κάθε χρονική στιγμή να περιλαμβάνει τόσο την τιμή της IDA1 όσο και τις βασικές μεταβλητές που περιγράφουν την κατάσταση της αγοράς και του ηλεκτρικού συστήματος.

Όπως και στο μοντέλο της DAM, εφαρμόζεται μετασχηματισμός *asinh* στην τιμή της IDA1, με σκοπό να περιοριστεί η επίδραση ακραίων τιμών και να βελτιωθεί η

σταθερότητα της εκπαίδευσης. Η χρήση του ίδιου μετασχηματισμού και στις δύο αγορές εξασφαλίζει και μια ενιαία μεθοδολογική προσέγγιση στην επεξεργασία των δεδομένων τιμών.

Η δημιουργία του τελικού dataset πρόβλεψης γίνεται σε ημερήσιο επίπεδο. Για κάθε ημέρα κατασκευάζεται μία γραμμή δεδομένων που περιλαμβάνει πληροφορία για ολόκληρη την ημέρα και έχει ως στόχο την πρόβλεψη των 96 τιμών της IDA1. Στο στάδιο αυτό αξιοποιούνται τρεις βασικές κατηγορίες χαρακτηριστικών.

Η πρώτη κατηγορία αφορά την καμπύλη της DAM, η οποία εισάγεται στο μοντέλο τόσο μέσω συνοπτικών στατιστικών όσο και μέσω της πλήρους ημερήσιας μορφής της. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίζονται ο ημερήσιος μέσος όρος, η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της DAM, καθώς και το ημερήσιο εύρος τιμών. Παράλληλα, για κάθε ένα από τα 96 χρονικά βήματα της ημέρας εισάγεται ως ξεχωριστό χαρακτηριστικό η αντίστοιχη τιμή της DAM. Με αυτόν τον τρόπο, το μοντέλο δεν γνωρίζει μόνο το γενικό επίπεδο της αγοράς επόμενης ημέρας, αλλά και το αναλυτικό σχήμα της ημερήσιας καμπύλης, το οποίο μπορεί να λειτουργήσει ως βασικό σημείο αναφοράς για την πρόβλεψη της IDA1.

Η δεύτερη κατηγορία χαρακτηριστικών αφορά τη σχέση μεταξύ IDA1 και DAM. Για κάθε ημέρα υπολογίζεται η διαφορά μεταξύ της πραγματικής καμπύλης της IDA1 και της αντίστοιχης καμπύλης της DAM, δηλαδή το ημερήσιο spread μεταξύ των δύο αγορών. Από αυτή τη διαφορά εξάγονται στατιστικά μεγέθη, όπως ο μέσος όρος, η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή, καθώς και η τυπική απόκλιση του spread. Η πληροφορία αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, καθώς επιτρέπει στο μοντέλο να μάθει όχι μόνο το επίπεδο της DAM, αλλά και το πώς η IDA1 αποκλίνει συνήθως από αυτήν. Με άλλα λόγια, το μοντέλο δεν προβλέπει την IDA1 «από το μηδέν», αλλά προσπαθεί να αναπαραστήσει τη σχέση της με την ήδη γνωστή αγορά επόμενης ημέρας.

Η τρίτη κατηγορία χαρακτηριστικών σχετίζεται με τα θεμελιώδη στοιχεία του συστήματος, δηλαδή το φορτίο και την παραγωγή από ΑΠΕ. Για κάθε ημέρα υπολογίζονται συνοπτικά μεγέθη από τις προβλέψεις φορτίου, ηλιακής παραγωγής και αιολικής παραγωγής, όπως ο μέσος όρος, η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του φορτίου, καθώς και η συνολική ημερήσια παραγωγή από ηλιακά και αιολικά. Παράλληλα, όπως

και στην περίπτωση της DAM, εισάγονται στο μοντέλο και οι 96 τιμές των αντίστοιχων καμπυλών φορτίου, ηλιακής και αιολικής παραγωγής. Έτσι, το μοντέλο έχει πρόσβαση τόσο στη συνολική εικόνα της ημέρας όσο και στη λεπτομερή χρονική εξέλιξη των βασικών μεταβλητών που επηρεάζουν την αγορά.

Αφού δημιουργηθούν τα χαρακτηριστικά, ως μεταβλητές-στόχοι ορίζονται οι 96 μετασχηματισμένες τιμές της IDA1 για κάθε ημέρα. Στη συνέχεια, το dataset χωρίζεται σε σύνολο εκπαίδευσης και σύνολο ελέγχου με χρονικό κριτήριο. Το σύνολο εκπαίδευσης περιλαμβάνει τις ημέρες έως το τέλος του 2024, ενώ οι προβλέψεις για το 2025 χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση του μοντέλου. Με αυτόν τον τρόπο η διαδικασία παραμένει χρονικά συνεπής και προσομοιώνει καλύτερα πραγματικές συνθήκες πρόβλεψης.

Για την εκπαίδευση χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος LightGBM Regressor, σε συνδυασμό με τη δομή MultiOutputRegressor, ώστε να είναι δυνατή η ταυτόχρονη πρόβλεψη και των 96 χρονικών βημάτων της επόμενης ημέρας. Η επιλογή του LightGBM έγινε επειδή πρόκειται για έναν αλγόριθμο δέντρων αποφάσεων με πολύ καλή απόδοση σε προβλήματα παλινδρόμησης με μεγάλο αριθμό χαρακτηριστικών και μη γραμμικές σχέσεις. Παράλληλα, όπως και στη DAM, εφαρμόζεται στάθμιση των δειγμάτων στο σύνολο εκπαίδευσης, έτσι ώστε οι ημέρες με υψηλές τιμές να αποκτούν μεγαλύτερη βαρύτητα κατά την εκπαίδευση. Η επιλογή αυτή στοχεύει στη βελτίωση της συμπεριφοράς του μοντέλου σε περιόδους αυξημένης μεταβλητότητας ή ακραίων αποκλίσεων.

Μετά την ολοκλήρωση της εκπαίδευσης, το μοντέλο παράγει προβλέψεις για όλες τις ημέρες του 2025. Οι προβλέψεις αρχικά προκύπτουν στη μετασχηματισμένη κλίμακα και στη συνέχεια μετατρέπονται ξανά στην αρχική κλίμακα τιμών μέσω του αντίστροφου μετασχηματισμού. Το τελικό αποτέλεσμα είναι μια πλήρης καμπύλη πρόβλεψης της IDA1 για κάθε ημέρα, σε €/MWh και σε ανάλυση 15 λεπτών.

Η αξιολόγηση του μοντέλου γίνεται με χρήση των δεικτών MAE και RMSE, συγκρίνοντας τις προβλεπόμενες τιμές με τις πραγματικές τιμές της IDA1 για το 2025. Παράλληλα, παράγονται και γραφήματα σύγκρισης μεταξύ πραγματικών και προβλεπόμενων καμπυλών για επιλεγμένες ημέρες, ώστε να εξεταστεί και οπτικά ο

βαθμός στον οποίο το μοντέλο ακολουθεί τη μορφή της ημερήσιας καμπύλης και αποτυπώνει τις βασικές διακυμάνσεις της αγοράς.

Συνολικά, η προσέγγιση που ακολουθήθηκε για την IDA1 βασίζεται σε έναν συνδυασμό τριών πηγών πληροφορίας: της ίδιας της καμπύλης της DAM, της σχέσης μεταξύ DAM και IDA1 μέσω του spread, και των εξωγενών μεταβλητών του συστήματος, όπως το φορτίο και η παραγωγή από ΑΠΕ. Με αυτόν τον τρόπο, το μοντέλο δεν αντιμετωπίζει την IDA1 ως μια απομονωμένη αγορά, αλλά ως μια αγορά που διαμορφώνεται σε σημαντικό βαθμό από τα αποτελέσματα της DAM και από τις ίδιες θεμελιώδεις συνθήκες του ηλεκτρικού συστήματος

5.6.3 Ανάλυση και Υλοποίηση Κώδικα Πρόβλεψης για την IDA2

Για την αγορά IDA2 αναπτύχθηκε μοντέλο πρόβλεψης τιμών σε ανάλυση 15 λεπτών, με στόχο την εκτίμηση της πλήρους ημερήσιας καμπύλης τιμών. Σε σχέση με την IDA1, το μοντέλο της IDA2 αξιοποιεί ακόμη περισσότερη πληροφορία από τις προηγούμενες αγορές, καθώς ενσωματώνει τόσο τα αποτελέσματα της DAM όσο και της IDA1. Η επιλογή αυτή βασίζεται στη διαδοχική λειτουργία των ενδοημερήσιων αγορών, όπου η τιμή της IDA2 διαμορφώνεται έχοντας ήδη ως σημείο αναφοράς τις τιμές που έχουν προκύψει στις προηγούμενες φάσεις της αγοράς.

Αρχικά φορτώνονται τα ιστορικά δεδομένα της IDA2 και της IDA1, καθώς και τα δεδομένα της DAM. Παράλληλα, εισάγονται οι εξωτερικές προβλέψεις φορτίου, ηλιακής παραγωγής και αιολικής παραγωγής σε ανάλυση 15 λεπτών. Όλα τα δεδομένα ενώνονται σε ένα ενιαίο dataset, έτσι ώστε για κάθε χρονική στιγμή να είναι διαθέσιμη η τιμή της IDA2 μαζί με τις αντίστοιχες τιμές της IDA1, της DAM και των βασικών μεταβλητών του συστήματος. Με αυτόν τον τρόπο, το μοντέλο εκπαιδεύεται πάνω σε ένα σύνολο δεδομένων που αποτυπώνει όχι μόνο την ιστορική συμπεριφορά της ίδιας της αγοράς, αλλά και τη συνολική εικόνα του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο διαμορφώνεται η τιμή.

Στη συνέχεια εφαρμόζεται μετασχηματισμός asinh στην τιμή της IDA2, με στόχο τη σταθεροποίηση της κατανομής και τον περιορισμό της επίδρασης ακραίων τιμών. Στην περίπτωση αυτή ο μετασχηματισμός υπολογίζεται με βάση αποκλειστικά την περίοδο εκπαίδευσης, ώστε να αποφεύγεται η χρήση πληροφορίας από το σύνολο αξιολόγησης.

Η επιλογή αυτή είναι σημαντική από μεθοδολογική άποψη, καθώς εξασφαλίζει ότι ακόμη και τα βήματα κανονικοποίησης των δεδομένων παραμένουν συμβατά με τη λογική της πρόβλεψης εκτός δείγματος.

Η δημιουργία του dataset πρόβλεψης γίνεται σε ημερήσιο επίπεδο. Για κάθε ημέρα κατασκευάζεται μία γραμμή δεδομένων που περιλαμβάνει χαρακτηριστικά από τις προηγούμενες αγορές και από τις θεμελιώδεις μεταβλητές του συστήματος, ενώ ως στόχοι ορίζονται οι 96 τιμές της IDA2 για την ίδια ημέρα. Η λογική αυτή επιτρέπει στο μοντέλο να προβλέπει ολόκληρη την ημερήσια καμπύλη τιμών και όχι μεμονωμένα χρονικά σημεία.

Τα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αφορά τα χαρακτηριστικά αγοράς από τη DAM και την IDA1. Για καθεμία από αυτές τις αγορές υπολογίζονται συνοπτικά ημερήσια μεγέθη, όπως ο μέσος όρος, η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή, ενώ για τη DAM υπολογίζεται και το ημερήσιο εύρος τιμών. Παράλληλα, εισάγονται στο μοντέλο και οι πλήρεις καμπύλες των δύο αγορών, δηλαδή οι 96 τιμές της DAM και οι 96 τιμές της IDA1 για κάθε ημέρα. Με τον τρόπο αυτό το μοντέλο αποκτά τόσο συνολική εικόνα για το επίπεδο των προηγούμενων αγορών όσο και λεπτομερή πληροφορία για τη μορφή της ημερήσιας καμπύλης τους.

Η δεύτερη κατηγορία χαρακτηριστικών αφορά τη σχέση μεταξύ των αγορών, μέσω του spread μεταξύ IDA1 και DAM. Για κάθε ημέρα υπολογίζεται η διαφορά της καμπύλης της IDA1 από την αντίστοιχη καμπύλη της DAM, και στη συνέχεια εξάγονται στατιστικά μεγέθη όπως ο μέσος όρος, η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή, καθώς και η τυπική απόκλιση του spread. Επιπλέον, το ίδιο το spread εισάγεται και σε επίπεδο 15λέπτου, ως ξεχωριστό χαρακτηριστικό για κάθε χρονικό βήμα της ημέρας. Η ενσωμάτωση αυτής της πληροφορίας επιτρέπει στο μοντέλο να λάβει υπόψη όχι μόνο τις απόλυτες τιμές των προηγούμενων αγορών, αλλά και τον τρόπο με τον οποίο η IDA1 διαφοροποιήθηκε από τη DAM, κάτι που μπορεί να αποτελεί ένδειξη για τη μετέπειτα συμπεριφορά της IDA2.

Η τρίτη κατηγορία χαρακτηριστικών σχετίζεται με τις θεμελιώδεις μεταβλητές του συστήματος, δηλαδή το φορτίο και την παραγωγή από ΑΠΕ. Για κάθε ημέρα

υπολογίζονται συνοπτικά χαρακτηριστικά του φορτίου, όπως ο μέσος όρος, η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή, καθώς και η συνολική ημερήσια παραγωγή από ηλιακή και αιολική ενέργεια. Παράλληλα, όπως και στα προηγούμενα μοντέλα, εισάγονται στο dataset και οι πλήρεις καμπύλες φορτίου, ηλιακής και αιολικής παραγωγής, ώστε το μοντέλο να έχει διαθέσιμη τόσο τη συνολική όσο και τη λεπτομερή χρονική εικόνα της ημέρας.

Αφού ολοκληρωθεί η δημιουργία των χαρακτηριστικών, το dataset χωρίζεται σε σύνολο εκπαίδευσης και σύνολο ελέγχου με χρονικό κριτήριο. Οι ημέρες έως το τέλος του 2024 χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση, ενώ οι ημέρες του 2025 χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση του μοντέλου.

Για την πρόβλεψη χρησιμοποιείται ο LightGBM Regressor σε συνδυασμό με τη δομή MultiOutputRegressor, έτσι ώστε να είναι δυνατή η ταυτόχρονη πρόβλεψη και των 96 χρονικών βημάτων της ημέρας. Η επιλογή του LightGBM ακολουθεί τη λογική που χρησιμοποιήθηκε και στην IDA1, καθώς πρόκειται για έναν αλγόριθμο που μπορεί να διαχειριστεί αποτελεσματικά μεγάλο αριθμό χαρακτηριστικών και να αποδώσει καλά σε προβλήματα με μη γραμμικές σχέσεις. Στην περίπτωση της IDA2 δεν εφαρμόζεται πρόσθετη στάθμιση των δειγμάτων, αλλά χρησιμοποιούνται ίσα βάρη για όλες τις παρατηρήσεις του συνόλου εκπαίδευσης.

Μετά την εκπαίδευση του μοντέλου παράγονται προβλέψεις για όλες τις ημέρες του 2025. Οι προβλέψεις υπολογίζονται αρχικά στη μετασχηματισμένη κλίμακα και στη συνέχεια μετατρέπονται πίσω στην αρχική κλίμακα τιμών μέσω του αντίστροφου μετασχηματισμού. Το αποτέλεσμα είναι μια πλήρης χρονοσειρά προβλεπόμενων τιμών της IDA2 σε ανάλυση 15 λεπτών, η οποία αποθηκεύεται και χρησιμοποιείται για την τελική αξιολόγηση.

Η αξιολόγηση του μοντέλου πραγματοποιείται μέσω των δεικτών MAE και RMSE, συγκρίνοντας τις προβλέψεις με τις πραγματικές τιμές της IDA2 για το 2025. Παράλληλα, παράγονται γραφήματα σύγκρισης πραγματικών και προβλεπόμενων τιμών για επιλεγμένες ημέρες, ώστε να υπάρχει και μια πιο άμεση εικόνα για το κατά πόσο το μοντέλο ακολουθεί τη μορφή της ημερήσιας καμπύλης και αποτυπώνει ικανοποιητικά τις μεταβολές της αγοράς.

Συνολικά, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την IDA2 στηρίζεται στην ιδέα ότι η συγκεκριμένη αγορά δεν εξελίσσεται ανεξάρτητα, αλλά επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από τα αποτελέσματα των προηγούμενων σταδίων της αγοράς, και ιδιαίτερα από τη DAM και την IDA1. Για τον λόγο αυτό, το μοντέλο συνδυάζει πληροφορία από τις προηγούμενες αγορές, από τη μεταξύ τους απόκλιση, αλλά και από τις βασικές μεταβλητές του ηλεκτρικού συστήματος. Με αυτόν τον τρόπο επιχειρεί να αποτυπώσει όσο το δυνατόν πληρέστερα το περιβάλλον μέσα στο οποίο διαμορφώνεται η τιμή της IDA2

5.6.4 Ανάλυση και Υλοποίηση Κώδικα Πρόβλεψης για την IDA3

Σε σχέση με τα προηγούμενα μοντέλα, η περίπτωση της IDA3 παρουσιάζει μια ουσιαστική διαφοροποίηση: η πρόβλεψη δεν αφορά ολόκληρη την ημέρα, αλλά μόνο το δεύτερο μισό της, δηλαδή το διάστημα από τις 12:00 έως τις 23:45. Για τον λόγο αυτό, κάθε ημερήσια πρόβλεψη της IDA3 περιλαμβάνει 48 χρονικά βήματα αντί για 96, προσαρμοσμένα στον πραγματικό χρονικό ορίζοντα της συγκεκριμένης αγοράς.

Η βασική λογική του μοντέλου παραμένει παρόμοια με αυτήν που ακολουθήθηκε στις προηγούμενες ενδοημερήσιες αγορές: η IDA3 δεν αντιμετωπίζεται ως μια απομονωμένη χρονοσειρά, αλλά ως αγορά που επηρεάζεται άμεσα από τα αποτελέσματα των προηγούμενων σταδίων, δηλαδή της DAM, της IDA1 και της IDA2. Για τον λόγο αυτό, η πρόβλεψη της IDA3 βασίζεται κυρίως στην πληροφορία που προέρχεται από τις προηγούμενες αγορές και από τις μεταξύ τους αποκλίσεις.

Αρχικά φορτώνονται τα ιστορικά δεδομένα της IDA3, καθώς και τα αντίστοιχα δεδομένα της IDA2, της IDA1 και της DAM. Παράλληλα, εισάγονται και τα αρχεία προβλέψεων της IDA1 και της IDA2 για το 2025, τα οποία έχουν παραχθεί από τα αντίστοιχα μοντέλα. Στο στάδιο δημιουργίας του τελικού dataset, για την περίοδο του 2025 οι πραγματικές τιμές της IDA1 και της IDA2 αντικαθίστανται από τις προβλεπόμενες τιμές τους. Η επιλογή αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς επιτρέπει η πρόβλεψη της IDA3 να βασίζεται σε πληροφορία που θα ήταν πράγματι διαθέσιμη σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και όχι σε μελλοντικές πραγματικές τιμές που δεν θα ήταν γνωστές τη στιγμή της πρόβλεψης.

Στη συνέχεια εφαρμόζεται μετασχηματισμός *asinh* στην τιμή της IDA3, ώστε να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικότερα ακραίες τιμές και έντονες διακυμάνσεις. Ο μετασχηματισμός αυτός χρησιμοποιείται με την ίδια λογική όπως και στα προηγούμενα μοντέλα, δηλαδή για να σταθεροποιηθεί η κλίμακα της μεταβλητής-στόχου και να γίνει πιο ομαλή η διαδικασία εκπαίδευσης.

Η δημιουργία του dataset πρόβλεψης γίνεται σε ημερήσιο επίπεδο. Για κάθε ημέρα χρησιμοποιούνται ως είσοδος χαρακτηριστικά που περιγράφουν ολόκληρη τη μορφή των προηγούμενων αγορών μέσα στην ημέρα, ενώ ως στόχοι ορίζονται μόνο οι 48 τιμές της IDA3 από τις 12:00 και μετά. Με αυτόν τον τρόπο το πρόβλημα διατυπώνεται ως πρόβλεψη του δεύτερου μισού της ημερήσιας καμπύλης της IDA3, αξιοποιώντας ως διαθέσιμη πληροφορία τις καμπύλες των προηγούμενων αγορών για ολόκληρη την ημέρα.

Τα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο προέρχονται κυρίως από τις προηγούμενες αγορές. Σε πρώτο επίπεδο υπολογίζονται ορισμένα συνοπτικά ημερήσια χαρακτηριστικά, όπως ο μέσος όρος και η μέγιστη τιμή της DAM, καθώς και οι μέσοι όροι της IDA1 και της IDA2. Τα χαρακτηριστικά αυτά δίνουν στο μοντέλο μια γενική εικόνα για το επίπεδο των τιμών στις προηγούμενες αγορές κατά τη συγκεκριμένη ημέρα.

Παράλληλα, το μεγαλύτερο μέρος της πληροφορίας δίνεται μέσω των πλήρων ημερήσιων καμπυλών της DAM, της IDA1 και της IDA2. Για κάθε ένα από τα 96 χρονικά βήματα της ημέρας εισάγονται ως ξεχωριστά χαρακτηριστικά οι αντίστοιχες τιμές των τριών αγορών. Έτσι το μοντέλο δεν περιορίζεται σε συνοπτικούς δείκτες, αλλά έχει πρόσβαση στη λεπτομερή χρονική εξέλιξη των τιμών των προηγούμενων αγορών μέσα στην ημέρα.

Επιπλέον, εισάγονται και χαρακτηριστικά που περιγράφουν τις διαφορές μεταξύ των αγορών, δηλαδή τα *spreads*. Συγκεκριμένα, για κάθε 15λεπτο υπολογίζονται:

- η διαφορά μεταξύ IDA2 και IDA1,
- η διαφορά μεταξύ IDA2 και DAM,
- η διαφορά μεταξύ IDA1 και DAM.

Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι χρήσιμα, επειδή επιτρέπουν στο μοντέλο να αποτυπώσει όχι μόνο το επίπεδο των προηγούμενων αγορών, αλλά και τον τρόπο με τον οποίο αυτές μετακινούνται μεταξύ τους. Στην πράξη, οι αποκλίσεις αυτές μπορούν να λειτουργήσουν ως ένδειξη για τη δυναμική που επικρατεί στην ενδοημερήσια αγορά και, κατ' επέκταση, για τη συμπεριφορά της IDA3.

Για τη δημιουργία του τελικού πίνακα εκπαίδευσης ακολουθείται διαφορετική λογική για την περίοδο εκπαίδευσης και για την περίοδο πρόβλεψης. Για τις ημέρες έως το τέλος του 2024, όπου είναι γνωστές οι πραγματικές τιμές της IDA3, συμπληρώνονται κανονικά οι 48 μεταβλητές-στόχοι της αγοράς. Αντίθετα, για τις ημέρες του 2025, οι τιμές-στόχοι παραμένουν κενές και χρησιμοποιούνται μόνο για την παραγωγή προβλέψεων. Με τον τρόπο αυτό το dataset περιλαμβάνει σε ενιαία μορφή τόσο τις ημέρες εκπαίδευσης όσο και τις ημέρες πρόβλεψης.

Το σύνολο εκπαίδευσης περιλαμβάνει τις ημέρες έως 31/12/2024, ενώ ως σύνολο ελέγχου χρησιμοποιούνται οι ημέρες του 2025. Για την εκπαίδευση του μοντέλου χρησιμοποιείται ο LightGBM Regressor σε συνδυασμό με MultiOutputRegressor, έτσι ώστε να προβλέπονται ταυτόχρονα και τα 48 χρονικά βήματα της IDA3.

Στην περίπτωση της IDA3 εφαρμόζεται επίσης στάθμιση των δειγμάτων στο σύνολο εκπαίδευσης, με στόχο να δοθεί μεγαλύτερη έμφαση στις ημέρες που εμφανίζουν υψηλές τιμές. Για τον σκοπό αυτό υπολογίζεται η μέγιστη τιμή κάθε ημερήσιας καμπύλης στόχου και οι ημέρες που ανήκουν στο ανώτερο 5% λαμβάνουν αυξημένο βάρος κατά την εκπαίδευση. Η επιλογή αυτή στοχεύει στη βελτίωση της συμπεριφοράς του μοντέλου σε ημέρες με πιο έντονες διακυμάνσεις ή ακραίες τιμές, οι οποίες είναι συνήθως πιο δύσκολες στην πρόβλεψη.

Μετά την ολοκλήρωση της εκπαίδευσης, το μοντέλο εφαρμόζεται στις ημέρες του 2025 και παράγει τις προβλεπόμενες τιμές της IDA3 για το διάστημα από τις 12:00 έως το τέλος της ημέρας. Οι προβλέψεις υπολογίζονται αρχικά στη μετασχηματισμένη κλίμακα και στη συνέχεια επαναφέρονται στην αρχική κλίμακα τιμών μέσω του αντίστροφου μετασχηματισμού, ώστε να είναι συγκρίσιμες με τις πραγματικές τιμές της αγοράς.

Η αξιολόγηση του μοντέλου πραγματοποιείται με χρήση των δεικτών MAE και RMSE, συγκρίνοντας τις προβλέψεις με τις πραγματικές τιμές της IDA3 για το 2025. Παράλληλα, παράγονται γραφήματα σύγκρισης πραγματικών και προβλεπόμενων τιμών για επιλεγμένες ημέρες, ώστε να υπάρχει μια πιο ποιοτική εικόνα για την απόδοση του μοντέλου και για το κατά πόσο αυτό αποτυπώνει σωστά τη μορφή της ενδοημερήσιας καμπύλης.

Συνολικά, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την IDA3 βασίζεται στη διαδοχική φύση των ενδοημερήσιων αγορών. Η πρόβλεψη της IDA3 στηρίζεται στα αποτελέσματα των προηγούμενων αγορών, τόσο μέσω των ίδιων των καμπυλών τους όσο και μέσω των spreads μεταξύ τους, ενώ για την περίοδο αξιολόγησης χρησιμοποιούνται ως είσοδος οι προβλέψεις της IDA1 και της IDA2 αντί για τις πραγματικές τιμές τους. Με αυτόν τον τρόπο το μοντέλο προσεγγίζει πιο ρεαλιστικά τη διαδικασία πρόβλεψης της αγοράς και αποτυπώνει καλύτερα την αλληλεξάρτηση μεταξύ των επιμέρους ενδοημερήσιων σταδίων.

5.6.5 Ανάλυση και Υλοποίηση Κώδικα Πρόβλεψης για το Balancing Market

Για το Balancing Market (BM) αναπτύχθηκε μοντέλο πρόβλεψης σε ανάλυση 15 λεπτών με στόχο την εκτίμηση των τιμών εξισορρόπησης για το έτος αξιολόγησης. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες αγορές, όπου το ζητούμενο ήταν η πρόβλεψη μίας ενιαίας καμπύλης τιμών ανά αγορά, στην περίπτωση του Balancing Market η πρόβλεψη αφορά δύο διαφορετικές μεταβλητές: την τιμή ανοδικής εξισορρόπησης (BM Up) και την τιμή καθοδικής εξισορρόπησης (BM Down). Για τον λόγο αυτό υλοποιούνται δύο ξεχωριστά μοντέλα, ένα για κάθε κατεύθυνση της αγοράς εξισορρόπησης.

Η λογική του μοντέλου βασίζεται στο γεγονός ότι η αγορά εξισορρόπησης αποτελεί το τελευταίο στάδιο της αλληλουχίας των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας και, επομένως, επηρεάζεται έντονα από τα αποτελέσματα όλων των προηγούμενων αγορών. Για τον λόγο αυτό, η πρόβλεψη του BM αξιοποιεί πληροφορία από τη DAM, την IDA1, την IDA2 και την IDA3, καθώς και από τις μεταξύ τους διαφορές. Παράλληλα, ενσωματώνονται και εξωγενείς μεταβλητές που περιγράφουν την αναμενόμενη κατάσταση του συστήματος, όπως το φορτίο και η παραγωγή από ΑΠΕ.

Αρχικά φορτώνονται τα ιστορικά δεδομένα των τιμών του Balancing Market, τόσο για την ανοδική όσο και για την καθοδική αγορά, καθώς και τα ιστορικά δεδομένα των προηγούμενων αγορών (DAM, IDA1, IDA2 και IDA3). Στη συνέχεια φορτώνονται οι προβλέψεις των αγορών αυτών για το 2025, ώστε κατά την περίοδο αξιολόγησης το μοντέλο να χρησιμοποιεί ως είσοδο τις προβλεπόμενες τιμές των προηγούμενων αγορών και όχι τις πραγματικές. Με αυτόν τον τρόπο η διαδικασία προσομοιώνει πιο ρεαλιστικά τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, όπου κατά τη στιγμή της πρόβλεψης του BM δεν είναι διαθέσιμες οι πραγματικές μελλοντικές τιμές των προηγούμενων αγορών, αλλά μόνο οι αντίστοιχες εκτιμήσεις τους.

Επιπλέον, εισάγονται στο dataset οι προβλέψεις φορτίου, ηλιακής παραγωγής και αιολικής παραγωγής σε ανάλυση 15 λεπτών. Οι μεταβλητές αυτές θεωρούνται σημαντικές για την αγορά εξισορρόπησης, καθώς αποτυπώνουν τις συνθήκες του συστήματος που μπορούν να δημιουργήσουν ανάγκες για ανοδική ή καθοδική εξισορρόπηση, επηρεάζοντας έτσι άμεσα τις τελικές τιμές.

Για την τιμή BM Up εφαρμόζεται μετασχηματισμός asinh , ο οποίος υπολογίζεται αποκλειστικά πάνω στην περίοδο εκπαίδευσης. Η επιλογή αυτή γίνεται επειδή οι τιμές της ανοδικής εξισορρόπησης μπορεί να εμφανίζουν έντονες αιχμές και μεγάλη διακύμανση, γεγονός που δυσκολεύει την εκπαίδευση του μοντέλου. Ο μετασχηματισμός βοηθά στη σταθεροποίηση της κλίμακας της μεταβλητής και περιορίζει την επίδραση ακραίων παρατηρήσεων. Αντίθετα, για την τιμή BM Down δεν εφαρμόζεται αντίστοιχος μετασχηματισμός και το μοντέλο εκπαιδεύεται απευθείας στην αρχική κλίμακα των τιμών.

Το τελικό dataset δημιουργείται σε επίπεδο 15λέπτου και περιλαμβάνει τόσο τις τιμές των προηγούμενων αγορών όσο και επιπλέον παράγωγα χαρακτηριστικά. Μεταξύ των χαρακτηριστικών αυτών περιλαμβάνονται οι ίδιες οι τιμές της DAM, της IDA1, της IDA2 και της IDA3, αλλά και τα spreads μεταξύ των αγορών, όπως η διαφορά IDA3–IDA2, IDA2–IDA1, IDA1–DAM και IDA3–DAM. Τα χαρακτηριστικά αυτά εισάγονται ώστε το μοντέλο να αποτυπώνει όχι μόνο το επίπεδο των προηγούμενων αγορών, αλλά και τη μεταξύ τους δυναμική, η οποία μπορεί να αποτελεί ένδειξη για πιθανές ανισορροπίες του συστήματος.

Παράλληλα, προστίθενται και χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την πρόσφατη ιστορική συμπεριφορά της ίδιας της αγοράς εξισορρόπησης. Συγκεκριμένα, υπολογίζονται χρονικές υστερήσεις μίας περιόδου, τεσσάρων περιόδων και μίας ημέρας τόσο για την τιμή BM Up όσο και για την τιμή BM Down. Οι μεταβλητές αυτές επιτρέπουν στο μοντέλο να αξιοποιήσει τη βραχυχρόνια αυτοσυσχέτιση της αγοράς εξισορρόπησης και να συνδέσει την τρέχουσα κατάσταση με πρόσφατα επεισόδια ανόδου ή πτώσης των τιμών.

Εκτός από τις τιμές των αγορών και τις υστερήσεις, ενσωματώνονται και χρονικά χαρακτηριστικά, όπως η ώρα της ημέρας και η ημέρα της εβδομάδας, καθώς και οι εξωγενείς μεταβλητές φορτίου, ηλιακής παραγωγής και αιολικής παραγωγής. Ο συνδυασμός αυτών των χαρακτηριστικών επιτρέπει στο μοντέλο να συνυπολογίζει τόσο τη χρονική περιοδικότητα της αγοράς όσο και τις θεμελιώδεις συνθήκες του ηλεκτρικού συστήματος.

Για την εκπαίδευση χρησιμοποιούνται τα δεδομένα έως το τέλος του 2024, ενώ για το 2025 πραγματοποιείται η περίοδος ελέγχου. Το σύνολο εκπαίδευσης δημιουργείται από τις ιστορικές παρατηρήσεις του 2024, αφού προηγουμένως αφαιρεθούν οι γραμμές με ελλιπή δεδομένα λόγω των χρονικών υστερήσεων. Ως μεταβλητές-στόχοι ορίζονται χωριστά η μετασχηματισμένη τιμή BM Up και η πραγματική τιμή BM Down, οδηγώντας έτσι στην εκπαίδευση δύο ανεξάρτητων μοντέλων.

Για την πρόβλεψη χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος XGBoost Regressor, με ξεχωριστό μοντέλο για κάθε μεταβλητή στόχο. Η επιλογή του XGBoost βασίζεται στην ικανότητά του να αποδίδει αποτελεσματικά σε προβλήματα παλινδρόμησης με σύνθετες μη γραμμικές σχέσεις και ετερογενή χαρακτηριστικά. Δεδομένου ότι το BM διαμορφώνεται από έναν συνδυασμό αγοραίων και λειτουργικών παραγόντων, η χρήση ενός μοντέλου δέντρων ενισχυμένης μάθησης θεωρήθηκε κατάλληλη για την αποτύπωση αυτών των αλληλεπιδράσεων.

Κατά την περίοδο πρόβλεψης του 2025, το αρχικό dataset τροποποιείται έτσι ώστε οι πραγματικές τιμές των προηγούμενων αγορών να αντικατασταθούν από τις αντίστοιχες προβλέψεις τους. Στη συνέχεια υπολογίζονται εκ νέου τα spreads και οι χρονικές υστερήσεις, και δημιουργείται το τελικό σύνολο εισόδου για το μοντέλο. Οι

προβλέψεις της BM Up μετατρέπονται ξανά στην αρχική κλίμακα τιμών μέσω του αντίστροφου μετασχηματισμού, ενώ οι προβλέψεις της BM Down παραμένουν στην αρχική τους μορφή.

Η αξιολόγηση του μοντέλου πραγματοποιείται χωριστά για τις δύο κατευθύνσεις της αγοράς εξισορρόπησης. Συγκεκριμένα υπολογίζονται οι δείκτες MAE και RMSE τόσο για την BM Up όσο και για την BM Down, συγκρίνοντας τις προβλεπόμενες τιμές με τις πραγματικές τιμές του 2025. Παράλληλα, παράγονται ενδεικτικά γραφήματα για επιλεγμένες ημέρες, ώστε να αξιολογηθεί οπτικά η ικανότητα του μοντέλου να αναπαράγει τη συμπεριφορά των δύο καμπυλών εξισορρόπησης.

Συνολικά, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την αγορά εξισορρόπησης διαφέρει από τις προηγούμενες αγορές κυρίως στο ότι η πρόβλεψη αφορά δύο διαφορετικές μεταβλητές-στόχους, οι οποίες συνδέονται με διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας του συστήματος. Παράλληλα, το μοντέλο αξιοποιεί πληροφορία από ολόκληρη την ακολουθία των προηγούμενων αγορών, από τις μεταξύ τους αποκλίσεις, από τις πρόσφατες τιμές του ίδιου του BM και από τις εξωγενείς προβλέψεις του συστήματος. Με αυτόν τον τρόπο επιχειρείται μια όσο το δυνατόν πληρέστερη αποτύπωση των παραγόντων που επηρεάζουν τη διαμόρφωση των τιμών εξισορρόπησης.

5.7 Περιβάλλον Υλοποίησης

Η υλοποίηση των μοντέλων πρόβλεψης πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον Python, αξιοποιώντας βιβλιοθήκες που υποστηρίζουν τόσο τη διαχείριση χρονοσειρών όσο και την ανάπτυξη μοντέλων μηχανικής μάθησης. Για την επεξεργασία και οργάνωση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν κυρίως οι βιβλιοθήκες pandas και numpy, οι οποίες επέτρεψαν τη φόρτωση, τον καθαρισμό, τον χρονικό συγχρονισμό και τη δημιουργία των απαραίτητων χαρακτηριστικών από τα ιστορικά δεδομένα των αγορών και τις εξωτερικές προβλέψεις φορτίου και παραγωγής από ΑΠΕ. Για την εκπαίδευση των μοντέλων αξιοποιήθηκαν αλγόριθμοι δέντρων ενισχυμένης μάθησης, και συγκεκριμένα οι XGBoost και LightGBM, ενώ σε περιπτώσεις πρόβλεψης πολλαπλών χρονικών βημάτων χρησιμοποιήθηκε η δομή MultiOutputRegressor της βιβλιοθήκης scikit-learn, ώστε να είναι δυνατή η ταυτόχρονη πρόβλεψη ολόκληρων ημερήσιων καμπυλών τιμών. Επιπλέον, η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων και η σύγκριση

πραγματικών και προβλεπόμενων τιμών πραγματοποιήθηκε με τη βιβλιοθήκη matplotlib. Συνολικά, το περιβάλλον υλοποίησης διαμορφώθηκε έτσι ώστε να υποστηρίζει όλα τα στάδια της μεθοδολογίας, από την προεπεξεργασία και το feature engineering έως την εκπαίδευση, την παραγωγή προβλέψεων και την αξιολόγηση των μοντέλων για τις επιμέρους αγορές DAM, IDA1, IDA2, IDA3 και Balancing Market.

6. Μεθοδολογία και μαθηματική διατύπωση του μοντέλου βελτιστοποίησης

6.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η ανάπτυξη και αξιολόγηση των μοντέλων πρόβλεψης των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας για τις αγορές Day-Ahead Market (DAM), Intraday Auction 1 (IDA1), Intraday Auction 2 (IDA2) και Intraday Auction 3 (IDA3). Οι προβλέψεις αυτές αποτελούν τη βασική πληροφορία εισόδου για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τη λειτουργία του συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο παρόν κεφάλαιο αναπτύσσεται το μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης της λειτουργίας ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, με στόχο τη μεγιστοποίηση του οικονομικού οφέλους από τη συμμετοχή του στις διαδοχικές αγορές ηλεκτρικής ενέργειας. Το μοντέλο διαμορφώνει καθημερινά το πρόγραμμα φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις προβλεπόμενες τιμές της αγοράς όσο και τους τεχνικούς περιορισμούς που διέπουν τη λειτουργία της.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης ακολουθεί τη χρονική αλληλουχία λειτουργίας της ελληνικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Αρχικά επιλύεται το πρόβλημα της αγοράς επόμενης ημέρας (Day-Ahead Market), ενώ στη συνέχεια το πρόγραμμα λειτουργίας της μπαταρίας αναθεωρείται διαδοχικά στις τρεις ενδοημερήσιες δημοπρασίες (IDA1, IDA2 και IDA3). Σε κάθε στάδιο η βελτιστοποίηση δεν ξεκινά από μηδενική βάση, αλλά χρησιμοποιεί ως σημείο αναφοράς το φυσικό πρόγραμμα που έχει διαμορφωθεί στην προηγούμενη αγορά. Με τον τρόπο αυτό προσομοιώνεται η πραγματική διαδικασία συμμετοχής ενός συστήματος αποθήκευσης στις διαδοχικές αγορές ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι αποφάσεις κάθε νέας αγοράς μπορούν να τροποποιήσουν μέρος του ήδη διαμορφωμένου προγράμματος, εισάγοντας νέες συναλλαγές ή κλείνοντας θέσεις που είχαν ληφθεί σε προηγούμενα στάδια. Έτσι, το τελικό πρόγραμμα λειτουργίας προκύπτει έπειτα από διαδοχικές αναθεωρήσεις και όχι από ανεξάρτητες βελτιστοποιήσεις.

Παράλληλα, στο μοντέλο ενσωματώνονται οι βασικοί τεχνικοί περιορισμοί λειτουργίας ενός συστήματος αποθήκευσης, όπως τα όρια φόρτισης και εκφόρτισης, η εξέλιξη της κατάστασης φόρτισης, οι αποδόσεις φόρτισης και εκφόρτισης, καθώς και ο περιορισμός της ημερήσιας ενεργειακής διέλευσης. Επιπλέον, η αντικειμενική συνάρτηση περιλαμβάνει κόστος υποβάθμισης της μπαταρίας (battery degradation cost), ώστε η στρατηγική λειτουργίας να μην επιδιώκει μόνο τη μέγιστη κερδοφορία αλλά και τον περιορισμό της φθοράς που προκαλείται από την χρήση του συστήματος.

Το μοντέλο μπορεί να λειτουργήσει με δύο διαφορετικά σενάρια. Στο πρώτο, οι αποφάσεις βελτιστοποίησης βασίζονται στις προβλεπόμενες τιμές των αγορών ενώ η οικονομική αξιολόγηση πραγματοποιείται με τις πραγματικές ιστορικές τιμές. Το σενάριο αυτό προσεγγίζει ρεαλιστικά τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, καθώς κατά τη στιγμή λήψης των αποφάσεων οι μελλοντικές τιμές δεν είναι γνωστές. Στο δεύτερο σενάριο, τόσο η διαδικασία βελτιστοποίησης όσο και η οικονομική αξιολόγηση βασίζονται στις πραγματικές τιμές της αγοράς, παρέχοντας ένα θεωρητικό άνω όριο της δυνατής οικονομικής απόδοσης. Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει την αξιολόγηση της επίδρασης των σφαλμάτων πρόβλεψης στη συνολική απόδοση της στρατηγικής λειτουργίας.

Τέλος, μετά την ολοκλήρωση της βελτιστοποίησης κάθε ημέρας υπολογίζονται το οικονομικό αποτέλεσμα της συμμετοχής στις επιμέρους αγορές, το συνολικό καθαρό ημερήσιο κέρδος, η ημερήσια ενεργειακή διέλευση της μπαταρίας και οι ισοδύναμοι πλήρεις κύκλοι λειτουργίας. Τα μεγέθη αυτά χρησιμοποιούνται τόσο για την αξιολόγηση της λειτουργικής απόδοσης του συστήματος όσο και ως δεδομένα εισόδου της τεχνοοικονομικής ανάλυσης που παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

6.2 Δεδομένα εισόδου και χρονικός ορίζοντας της προσομοίωσης

Η διαδικασία βελτιστοποίησης βασίζεται σε χρονοσειρές τιμών ηλεκτρικής ενέργειας που αντιστοιχούν στις τέσσερις διαδοχικές αγορές του Ελληνικού Χρηματιστηρίου Ενέργειας, δηλαδή στην αγορά επόμενης ημέρας (Day-Ahead Market – DAM) και στις τρεις ενδοημερήσιες δημοπρασίες (Intraday Auction 1 – IDA1, Intraday Auction 2 – IDA2 και Intraday Auction 3 – IDA3). Για κάθε αγορά χρησιμοποιούνται τόσο οι

προβλεπόμενες όσο και οι πραγματικές ιστορικές τιμές, οι οποίες εισάγονται στο μοντέλο μέσω ανεξάρτητων αρχείων δεδομένων και ενοποιούνται σε κοινό χρονικό πλαίσιο πριν από την έναρξη της προσομοίωσης.

Η επιλογή του κατάλληλου σεναρίου πραγματοποιείται μέσω μίας λογικής μεταβλητής (Boolean flag), η οποία καθορίζει ποιο σύνολο δεδομένων θα χρησιμοποιηθεί κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Ανεξάρτητα όμως από το εξεταζόμενο σενάριο, η δομή του μαθηματικού μοντέλου και οι περιορισμοί λειτουργίας παραμένουν αμετάβλητοι.

Πριν από την έναρξη της προσομοίωσης πραγματοποιείται χρονική ευθυγράμμιση όλων των χρονοσειρών. Οι επιμέρους πίνακες δεδομένων μετατρέπονται σε κοινό χρονικό δείκτη και στη συνέχεια συγχωνεύονται σε ένα ενιαίο σύνολο δεδομένων, ώστε κάθε χρονική στιγμή να αντιστοιχεί στις τιμές όλων των αγορών. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται ότι οι αποφάσεις που λαμβάνονται σε κάθε στάδιο της βελτιστοποίησης βασίζονται σε πλήρως συγχρονισμένες πληροφορίες.

Η περίοδος προσομοίωσης εκτείνεται από την 1η Ιανουαρίου 2025 έως και την 30ή Δεκεμβρίου 2025. Η ανάλυση πραγματοποιείται με χρονική ανάλυση δεκαπέντε λεπτών, επομένως κάθε ημέρα αποτελείται από 96 διαδοχικά χρονικά διαστήματα, τα οποία αντιστοιχούν στα εμπορικά χρονικά προϊόντα της ελληνικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Για κάθε ημέρα επιλύεται ανεξάρτητα μία ακολουθία τεσσάρων προβλημάτων βελτιστοποίησης, ένα για κάθε αγορά, ενώ η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας μεταφέρεται από τη μία ημέρα στην επόμενη, διατηρώντας τη χρονική συνέχεια της προσομοίωσης.

Ιδιαίτερη περίπτωση αποτελεί η τρίτη ενδοημερήσια δημοπρασία (IDA3), για την οποία ενδέχεται να μην υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα σε ορισμένες χρονικές περιόδους ή ακόμη και σε ολόκληρη την ημέρα. Στις περιπτώσεις αυτές το μοντέλο δεν διακόπτει την εκτέλεση της προσομοίωσης, αλλά θεωρεί ότι δεν πραγματοποιούνται νέες συναλλαγές στην αγορά IDA3 και διατηρεί ως τελικό πρόγραμμα λειτουργίας εκείνο που είχε διαμορφωθεί μετά την ολοκλήρωση της αγοράς IDA2. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την ομαλή ολοκλήρωση της ετήσιας προσομοίωσης ακόμη και όταν παρατηρούνται ελλείψεις στα διαθέσιμα δεδομένα αγοράς.

6.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος αποθήκευσης

Το σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας που εξετάζεται στην παρούσα εργασία αντιστοιχεί σε μία εγκατάσταση συνολικής ονομαστικής ενεργειακής χωρητικότητας 100 MWh, η οποία συμμετέχει στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό την εκμετάλλευση των διακυμάνσεων των τιμών μέσω ενεργειακού arbitrage. Η επιλογή των τεχνικών παραμέτρων βασίζεται σε χαρακτηριστικά σύγχρονων συστημάτων αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας τεχνολογίας ιόντων λιθίου και παραμένει σταθερή σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς τόσο κατά τη φόρτιση όσο και κατά την εκφόρτιση ορίζεται ίση με 50 MW. Το μοντέλο θεωρεί ότι η μέγιστη ισχύς είναι ίδια και στις δύο κατευθύνσεις λειτουργίας, γεγονός που απλοποιεί τη μαθηματική διατύπωση χωρίς να αλλοιώνει τη φυσική συμπεριφορά του συστήματος. Η ισχύς αυτή αντιστοιχεί στη μέγιστη ποσότητα ενέργειας που μπορεί να απορροφήσει ή να αποδώσει η μπαταρία σε κάθε χρονική περίοδο της προσομοίωσης.

Η προσομοίωση πραγματοποιείται με χρονικό βήμα 15 λεπτών, το οποίο αντιστοιχεί στη χρονική ανάλυση των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας που εξετάζονται. Συνεπώς, κάθε ημέρα διαχωρίζεται σε 96 διαδοχικές χρονικές περιόδους, μέσα στις οποίες λαμβάνονται οι αποφάσεις φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας. Η ενέργεια που ανταλλάσσεται σε κάθε χρονικό βήμα προκύπτει από το γινόμενο της ισχύος με τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος, δηλαδή 0,25 ώρες.

Κατά τη λειτουργία του συστήματος λαμβάνονται υπόψη οι πραγματικές απώλειες μετατροπής ενέργειας. Για τον λόγο αυτό η απόδοση φόρτισης και η απόδοση εκφόρτισης θεωρούνται ίσες με 95%, γεγονός που σημαίνει ότι μέρος της ενέργειας χάνεται κατά τις διαδικασίες φόρτισης και εκφόρτισης. Οι αποδόσεις αυτές ενσωματώνονται στην εξίσωση εξέλιξης της κατάστασης φόρτισης και επηρεάζουν άμεσα το τελικό ενεργειακό ισοζύγιο της μπαταρίας.

Για την προστασία της μπαταρίας δεν επιτρέπεται η λειτουργία της σε ολόκληρο το εύρος της ονομαστικής χωρητικότητας. Αντίθετα, η κατάσταση φόρτισης περιορίζεται μεταξύ 10 MWh και 90 MWh, δημιουργώντας ένα ασφαλές λειτουργικό παράθυρο μεταξύ 10% και 90% της συνολικής χωρητικότητας. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται

καταστάσεις βαθιάς εκφόρτισης ή πλήρους φόρτισης, οι οποίες επιταχύνουν τη γήρανση των στοιχείων της μπαταρίας και μειώνουν τη διάρκεια ζωής τους.

Με βάση τα παραπάνω όρια, η πραγματικά αξιοποιήσιμη ενεργειακή χωρητικότητα του συστήματος δεν είναι ίση με τα 100 MWh της ονομαστικής χωρητικότητας, αλλά προκύπτει από τη διαφορά μεταξύ του μέγιστου και του ελάχιστου επιτρεπόμενου επιπέδου φόρτισης. Επομένως, η ωφέλιμη χωρητικότητα της μπαταρίας ισούται με 80 MWh, τιμή η οποία χρησιμοποιείται τόσο στους περιορισμούς της βελτιστοποίησης όσο και στους υπολογισμούς του κόστους υποβάθμισης και των ισοδύναμων πλήρων κύκλων λειτουργίας.

Η αρχική κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας κατά την έναρξη της προσομοίωσης ορίζεται ίση με 50 MWh. Η ίδια τιμή χρησιμοποιείται και ως επιθυμητή κατάσταση φόρτισης στο τέλος κάθε ημερήσιου κύκλου βελτιστοποίησης, ώστε η λειτουργία του συστήματος να παραμένει συγκρίσιμη μεταξύ των διαδοχικών ημερών και να αποφεύγεται η τεχνητή αύξηση της κερδοφορίας μέσω μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων αποθηκευμένης ενέργειας από μία ημέρα στην επόμενη. Παράλληλα, η τελική κατάσταση φόρτισης κάθε ημέρας χρησιμοποιείται ως αρχική κατάσταση φόρτισης της επόμενης, διατηρώντας τη χρονική συνέχεια της λειτουργίας του συστήματος σε ολόκληρη την περίοδο προσομοίωσης.

Όλες οι παραπάνω θεωρήσεις έχουν επιλεγεί για της ανάγκες της προσομοίωσης και μπορούν πολύ εύκολα να τροποποιηθούν.

6.4 Μοντέλο υποβάθμισης της μπαταρίας

Η συνεχής φόρτιση και εκφόρτιση ενός συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας προκαλεί σταδιακή υποβάθμιση των ηλεκτροχημικών στοιχείων της μπαταρίας, με αποτέλεσμα τη μείωση της διαθέσιμης χωρητικότητας και της συνολικής διάρκειας ζωής του συστήματος. Για τον λόγο αυτό, η διαδικασία βελτιστοποίησης δεν αποσκοπεί αποκλειστικά στη μεγιστοποίηση των εσόδων από τις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά λαμβάνει υπόψη και το οικονομικό κόστος που συνεπάγεται η λειτουργική καταπόνηση της μπαταρίας.

Στην παρούσα εργασία η υποβάθμιση της μπαταρίας προσεγγίζεται μέσω ενός γραμμικού μοντέλου κόστους (linear degradation model), σύμφωνα με το οποίο κάθε

μονάδα ενέργειας που διέρχεται από το σύστημα επιβαρύνεται με ένα σταθερό κόστος φθοράς. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την άμεση ενσωμάτωση της υποβάθμισης στη συνάρτηση στόχου του προβλήματος βελτιστοποίησης, χωρίς να αυξάνεται σημαντικά η πολυπλοκότητα του μαθηματικού μοντέλου.

Για τον υπολογισμό του μοναδιαίου κόστους υποβάθμισης θεωρείται αρχικά το κόστος αντικατάστασης της μπαταρίας. Το συνολικό κόστος προκύπτει από το γινόμενο της ονομαστικής ενεργειακής χωρητικότητας του συστήματος με το αντίστοιχο κόστος εγκατάστασης ανά μονάδα χωρητικότητας.

Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι:

- η ονομαστική ενεργειακή χωρητικότητα της μπαταρίας είναι 100 MWh,
- το κόστος εγκατάστασης ισούται με 75 €/kWh,
- η διάρκεια ζωής της μπαταρίας αντιστοιχεί σε 10.000 ισοδύναμους πλήρεις κύκλους λειτουργίας (Equivalent Full Cycles – EFC).

Με βάση τις παραπάνω παραδοχές υπολογίζεται αρχικά το συνολικό κόστος αντικατάστασης του συστήματος και στη συνέχεια το κόστος που αντιστοιχεί σε έναν πλήρη κύκλο λειτουργίας. Επειδή ένας πλήρης κύκλος περιλαμβάνει τόσο τη φόρτιση όσο και την εκφόρτιση ολόκληρης της αξιοποιήσιμης χωρητικότητας της μπαταρίας, η συνολική ενεργειακή διέλευση ενός πλήρους κύκλου ισούται με το διπλάσιο της ωφέλιμης χωρητικότητας. Το μοναδιαίο κόστος υποβάθμισης εκφράζεται τελικά σε ευρώ ανά μεγαβατώρα διακινούμενης ενέργειας (€/MWh) και χρησιμοποιείται σε όλα τα στάδια της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Η ενσωμάτωση του κόστους αυτού στην αντικειμενική συνάρτηση έχει ως αποτέλεσμα το μοντέλο να εξισορροπεί δύο αντικρουόμενους στόχους. Από τη μία πλευρά επιδιώκει τη μεγιστοποίηση των οικονομικών εσόδων μέσω της εκμετάλλευσης των διαφορών στις τιμές των αγορών, ενώ από την άλλη αποφεύγει την πραγματοποίηση συναλλαγών που οδηγούν σε υπερβολική καταπόνηση της μπαταρίας χωρίς αντίστοιχο οικονομικό όφελος. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει μια περισσότερο ρεαλιστική στρατηγική λειτουργίας, η οποία λαμβάνει υπόψη όχι μόνο το άμεσο οικονομικό

αποτέλεσμα αλλά και τη μακροχρόνια διατήρηση της αξίας του συστήματος αποθήκευσης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, παρόλο που το κόστος υποβάθμισης συμμετέχει στη συνάρτηση στόχου κάθε επιμέρους σταδίου βελτιστοποίησης, η συνολική ημερήσια φθορά της μπαταρίας υπολογίζεται τελικά με βάση το φυσικό πρόγραμμα λειτουργίας που προκύπτει μετά την ολοκλήρωση όλων των αγορών της ημέρας. Έτσι, το ημερήσιο κόστος υποβάθμισης εξαρτάται από τη συνολική ενέργεια που πραγματικά διήλθε από την μπαταρία και όχι από το πλήθος των εμπορικών συναλλαγών που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η προσέγγιση αυτή αποτυπώνει με μεγαλύτερη ακρίβεια τη φυσική λειτουργία του συστήματος και αποφεύγει την υπερεκτίμηση της πραγματικής φθοράς.

6.5 Μαθηματική διατύπωση των περιορισμών λειτουργίας

Η λειτουργία του συστήματος αποθήκευσης περιγράφεται μέσω ενός συνόλου γραμμικών περιορισμών, οι οποίοι εξασφαλίζουν ότι οι λύσεις που προκύπτουν από τη διαδικασία βελτιστοποίησης είναι τεχνικά εφικτές και συμβατές με τα φυσικά χαρακτηριστικά της μπαταρίας. Οι ίδιοι βασικοί περιορισμοί εφαρμόζονται σε όλα τα στάδια της βελτιστοποίησης, ανεξάρτητα από την αγορά που εξετάζεται κάθε φορά, γεγονός που διατηρεί ενιαία τη μαθηματική διατύπωση του προβλήματος σε ολόκληρη τη διάρκεια της ημερήσιας προσομοίωσης.

Οι περιορισμοί αυτοί αφορούν τα όρια ισχύος φόρτισης και εκφόρτισης, την εξέλιξη της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας, τα επιτρεπόμενα όρια της κατάστασης φόρτισης, τον περιορισμό της συνολικής ημερήσιας ενεργειακής διέλευσης, καθώς και την απαίτηση η μπαταρία να ολοκληρώνει κάθε ημερήσιο κύκλο λειτουργίας με προκαθορισμένη κατάσταση φόρτισης. Η ταυτόχρονη εφαρμογή όλων των περιορισμών διασφαλίζει ότι οι αποφάσεις που λαμβάνονται σε κάθε στάδιο της διαδικασίας βελτιστοποίησης μπορούν να υλοποιηθούν από ένα πραγματικό σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

Στις επόμενες υποενότητες παρουσιάζονται αναλυτικά οι επιμέρους μαθηματικοί περιορισμοί που χρησιμοποιούνται στο προτεινόμενο μοντέλο.

6.5.1 Περιορισμοί ισχύος φόρτισης και εκφόρτισης

Η ισχύς με την οποία μπορεί να φορτίζει ή να εκφορτίζει η μπαταρία περιορίζεται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος ισχύος και του μετατροπέα (power converter). Για κάθε χρονική περίοδο της προσομοίωσης, η ισχύς φόρτισης και η ισχύς εκφόρτισης δεν επιτρέπεται να υπερβαίνουν τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή των 50 MW.

Στο μαθηματικό μοντέλο οι μεταβλητές φόρτισης και εκφόρτισης εκφράζονται σε κανονικοποιημένη μορφή, λαμβάνοντας τιμές στο διάστημα από 0 έως 1. Η πραγματική ισχύς που ανταλλάσσεται με την μπαταρία προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό των μεταβλητών αυτών με τη μέγιστη ισχύ του συστήματος. Με τον τρόπο αυτό η ίδια μαθηματική διατύπωση εφαρμόζεται σε όλες τις αγορές χωρίς να απαιτείται διαφορετική κλίμακα μεταβλητών.

Επιπλέον, στις ενδοημερήσιες αγορές εφαρμόζονται πρόσθετοι περιορισμοί, ώστε η συνολική φυσική ισχύς της μπαταρίας, η οποία προκύπτει από τον συνδυασμό του ήδη υφιστάμενου προγράμματος και των νέων συναλλαγών, να μην υπερβαίνει ποτέ τη μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ φόρτισης ή εκφόρτισης. Έτσι διασφαλίζεται ότι οι τροποποιήσεις που πραγματοποιούνται στις διαδοχικές αγορές παραμένουν πάντοτε συμβατές με τις τεχνικές δυνατότητες του συστήματος.

6.5.2 Περιορισμοί κατάστασης φόρτισης (State of Charge)

Η κατάσταση φόρτισης εκφράζει την ποσότητα ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στην μπαταρία σε κάθε χρονική στιγμή της προσομοίωσης. Για την ασφαλή λειτουργία του συστήματος επιβάλλονται ανώτερα και κατώτερα όρια, ώστε η διαθέσιμη ενέργεια να παραμένει πάντοτε μέσα στο επιτρεπόμενο λειτουργικό εύρος.

Στην παρούσα εργασία το κατώτερο επιτρεπόμενο επίπεδο φόρτισης ορίζεται στα 10 MWh, ενώ το ανώτερο επίπεδο ορίζεται στα 90 MWh. Οι περιορισμοί αυτοί εφαρμόζονται σε κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης και αποτρέπουν τόσο τη βαθιά εκφόρτιση όσο και την υπερφόρτιση της μπαταρίας, καταστάσεις οι οποίες μπορούν να επιταχύνουν τη γήρανση των ηλεκτροχημικών στοιχείων και να μειώσουν τη διάρκεια ζωής του συστήματος.

Η ύπαρξη των συγκεκριμένων ορίων επιτρέπει επίσης τη διατήρηση ενός σταθερού και προβλέψιμου εύρους λειτουργίας, γεγονός που διευκολύνει τόσο τη διαδικασία βελτιστοποίησης όσο και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών ημερών προσομοίωσης.

6.5.3 Εξίσωση εξέλιξης της κατάστασης φόρτισης.

Η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας ενημερώνεται διαδοχικά σε κάθε χρονική περίοδο μέσω της εξίσωσης ενεργειακού ισοζυγίου. Η εξίσωση αυτή περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο η ενέργεια που εισέρχεται ή εξέρχεται από την μπαταρία μεταβάλλει το διαθέσιμο ενεργειακό της περιεχόμενο, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις αποδόσεις φόρτισης και εκφόρτισης όσο και τη διάρκεια κάθε χρονικού βήματος.

Στην αγορά DAM η μεταβολή της κατάστασης φόρτισης εξαρτάται αποκλειστικά από τις αποφάσεις φόρτισης και εκφόρτισης που λαμβάνονται κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Αντίθετα, στις ενδοημερήσιες αγορές η εξέλιξη του υπολογίζεται από το τελικό φυσικό πρόγραμμα λειτουργίας της μπαταρίας, το οποίο προκύπτει από τον συνδυασμό του προγράμματος της προηγούμενης αγοράς με τις νέες συναλλαγές και τις αντίστοιχες διορθωτικές κινήσεις (close positions). Με τον τρόπο αυτό το μαθηματικό μοντέλο παρακολουθεί πάντοτε τη φυσική λειτουργία της μπαταρίας και όχι μόνο τις χρηματοοικονομικές συναλλαγές που πραγματοποιούνται στις αγορές.

Η συγκεκριμένη διατύπωση αποτελεί ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του προτεινόμενου μοντέλου, καθώς εξασφαλίζει ότι όλες οι μεταβολές του προγράμματος λειτουργίας αποτυπώνονται με συνέπεια στην πραγματική κατάσταση φόρτισης του συστήματος.

6.5.4 Περιορισμός της ημερήσιας ενεργειακής διέλευσης.

Εκτός από τους περιορισμούς ισχύος και κατάστασης φόρτισης, στο μοντέλο επιβάλλεται περιορισμός στη συνολική ποσότητα ενέργειας που μπορεί να διακινηθεί μέσω της μπαταρίας κατά τη διάρκεια μίας ημέρας. Ο περιορισμός αυτός έχει ως στόχο να αποτρέψει την υπερβολική χρήση του συστήματος αποθήκευσης, η οποία θα οδηγούσε σε αυξημένη λειτουργική καταπόνηση και ταχύτερη υποβάθμιση της μπαταρίας.

Η ημερήσια ενεργειακή διέλευση υπολογίζεται ως το άθροισμα της συνολικής ενέργειας που φορτίζεται και της συνολικής ενέργειας που εκφορτίζεται κατά τη διάρκεια των 24 ωρών. Για την παρούσα εργασία θεωρείται ότι η μπαταρία μπορεί να πραγματοποιεί έως τέσσερις ισοδύναμους πλήρεις κύκλους λειτουργίας ανά ημέρα, τιμή η οποία χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της μέγιστης επιτρεπόμενης ημερήσιας διέλευσης.

Ο συγκεκριμένος περιορισμός εφαρμόζεται ανεξάρτητα σε κάθε ημέρα της προσομοίωσης και διασφαλίζει ότι η συνολική φυσική ενέργεια που διέρχεται από την μπαταρία δεν υπερβαίνει το προκαθορισμένο όριο. Στην αγορά DAM ο υπολογισμός πραγματοποιείται με βάση το αρχικό πρόγραμμα φόρτισης και εκφόρτισης, ενώ στις επόμενες αγορές ο περιορισμός εφαρμόζεται στο επικαιροποιημένο φυσικό πρόγραμμα που προκύπτει μετά την ενσωμάτωση των νέων συναλλαγών και των αντίστοιχων διορθώσεων. Με αυτόν τον τρόπο το μοντέλο παρακολουθεί πάντοτε τη συνολική φυσική λειτουργία της μπαταρίας και όχι μόνο τις επιμέρους εμπορικές συναλλαγές.

6.5.5 Περιορισμός τελικής κατάστασης φόρτισης

Πέρα από τους επιμέρους τεχνικούς περιορισμούς, επιβάλλεται και περιορισμός στην κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας στο τέλος κάθε ημερήσιου κύκλου βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, η κατάσταση φόρτισης στο τέλος της ημέρας πρέπει να είναι ίση με την προκαθορισμένη τιμή στόχο των 50 MWh, η οποία χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς για την έναρξη της επόμενης ημέρας προσομοίωσης.

Η απαίτηση αυτή εξασφαλίζει ότι όλες οι ημέρες αξιολογούνται υπό παρόμοιες συνθήκες λειτουργίας και αποτρέπει τη δημιουργία τεχνητού οικονομικού οφέλους μέσω της μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων αποθηκευμένης ενέργειας από μία ημέρα στην επόμενη. Παράλληλα, η τελική κατάσταση φόρτισης που προκύπτει μετά την ολοκλήρωση όλων των σταδίων της βελτιστοποίησης χρησιμοποιείται ως αρχική κατάσταση φόρτισης της επόμενης ημέρας, διατηρώντας τη χρονική συνέχεια της προσομοίωσης σε ολόκληρο τον ετήσιο χρονικό ορίζοντα.

Η εφαρμογή του συγκεκριμένου περιορισμού καθιστά το προτεινόμενο μοντέλο περισσότερο ρεαλιστικό, καθώς η λειτουργία της μπαταρίας αντιμετωπίζεται ως μία συνεχής διαδικασία και όχι ως ένα σύνολο ανεξάρτητων ημερήσιων προβλημάτων

βελτιστοποίησης. Με τον τρόπο αυτό η κατάσταση φόρτισης εξελίσσεται ομαλά από ημέρα σε ημέρα, αντανακλώντας καλύτερα τη λειτουργία ενός πραγματικού συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

6.6 Πολυ-σταδιακή διαδικασία διαδοχικής βελτιστοποίησης

Η συμμετοχή ενός συστήματος αποθήκευσης στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας δεν πραγματοποιείται μέσω μίας μοναδικής διαδικασίας λήψης αποφάσεων, αλλά εξελίσσεται σταδιακά καθώς ολοκληρώνονται οι επιμέρους αγορές κατά τη διάρκεια της ημέρας. Για τον λόγο αυτό, το προτεινόμενο μοντέλο υιοθετεί μία πολυ-σταδιακή διαδικασία διαδοχικής βελτιστοποίησης (Sequential Optimization), κατά την οποία κάθε αγορά επιλύεται με τη σειρά που πραγματοποιείται στην πραγματική λειτουργία της ελληνικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Η διαδικασία ξεκινά με τη βελτιστοποίηση της αγοράς επόμενης ημέρας (Day-Ahead Market), κατά την οποία διαμορφώνεται το αρχικό ημερήσιο πρόγραμμα φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας. Το πρόγραμμα αυτό αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία πραγματοποιούνται όλες οι επόμενες διορθώσεις στις ενδοημερήσιες αγορές. Στη συνέχεια επιλύονται διαδοχικά οι αγορές IDA1, IDA2 και IDA3, στις οποίες το ήδη υπάρχον πρόγραμμα μπορεί να τροποποιηθεί με στόχο την καλύτερη εκμετάλλευση των νέων πληροφοριών που προκύπτουν από τις αντίστοιχες τιμές αγοράς.

Βασικό χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης μεθοδολογίας είναι ότι κάθε στάδιο δεν δημιουργεί ένα νέο πρόγραμμα λειτουργίας από την αρχή. Αντίθετα, χρησιμοποιεί ως αφετηρία το φυσικό πρόγραμμα που έχει προκύψει από την προηγούμενη αγορά και πραγματοποιεί μόνο τις απαραίτητες προσαρμογές. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η συνέχεια της λειτουργίας της μπαταρίας και αποφεύγονται ασυνέπειες μεταξύ των επιμέρους σταδίων της βελτιστοποίησης.

Στις ενδοημερήσιες αγορές το μοντέλο διαθέτει δύο διαφορετικούς μηχανισμούς λήψης αποφάσεων. Ο πρώτος αφορά την πραγματοποίηση νέων συναλλαγών, δηλαδή την αγορά ή πώληση επιπλέον ποσοτήτων ενέργειας όταν αυτό κρίνεται οικονομικά συμφέρον. Ο δεύτερος αφορά την αναθεώρηση συναλλαγών που έχουν ήδη πραγματοποιηθεί σε προηγούμενες αγορές, μέσω ειδικών μεταβλητών που επιτρέπουν το κλείσιμο υφιστάμενων θέσεων (close positions). Έτσι, το μοντέλο δεν περιορίζεται

μόνο στην προσθήκη νέων συναλλαγών, αλλά μπορεί να αναπροσαρμόζει δυναμικά το ήδη διαμορφωμένο πρόγραμμα λειτουργίας της μπαταρίας όταν οι συνθήκες της αγοράς το καθιστούν συμφέρον.

Στην πράξη, οι μεταβλητές αυτές επιτρέπουν την οικονομική αναθεώρηση προηγούμενων αποφάσεων χωρίς να παραβιάζεται η φυσική λειτουργία της μπαταρίας. Παράλληλα, η κατάσταση φόρτισης υπολογίζεται πάντοτε με βάση το τελικό φυσικό πρόγραμμα που προκύπτει μετά τις τροποποιήσεις, γεγονός που διατηρεί απόλυτη συνέπεια μεταξύ των εμπορικών συναλλαγών και της πραγματικής ενεργειακής κατάστασης του συστήματος.

Μετά την ολοκλήρωση κάθε σταδίου ενημερώνεται το φυσικό πρόγραμμα λειτουργίας της μπαταρίας, το οποίο χρησιμοποιείται ως σημείο εκκίνησης για την επόμενη αγορά. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι την ολοκλήρωση και της τρίτης ενδοημερήσιας δημοπρασίας, οπότε προκύπτει το τελικό ημερήσιο πρόγραμμα λειτουργίας. Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τον υπολογισμό του οικονομικού αποτελέσματος, της συνολικής ενεργειακής διέλευσης της μπαταρίας και των ισοδύναμων πλήρων κύκλων λειτουργίας.

Η διαδοχική αυτή προσέγγιση προσεγγίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια τον τρόπο λειτουργίας των πραγματικών αγορών ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς οι αποφάσεις δεν λαμβάνονται ταυτόχρονα για όλες τις αγορές, αλλά αναθεωρούνται σταδιακά όσο καθίστανται διαθέσιμες νέες πληροφορίες. Ως αποτέλεσμα, το τελικό πρόγραμμα λειτουργίας της μπαταρίας αντανακλά όχι μόνο τις τεχνικές δυνατότητες του συστήματος, αλλά και τη διαχρονική εξέλιξη των συνθηκών της αγοράς κατά τη διάρκεια της ημέρας.

6.7 Βελτιστοποίηση της αγοράς Day-Ahead Market (DAM)

Η αγορά επόμενης ημέρας (Day-Ahead Market – DAM) αποτελεί το πρώτο στάδιο της διαδικασίας βελτιστοποίησης και διαμορφώνει το αρχικό πρόγραμμα λειτουργίας της μπαταρίας για ολόκληρο το εικοσιτετράωρο. Στο στάδιο αυτό το μοντέλο αποφασίζει πότε είναι οικονομικά συμφέρουσα η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας για φόρτιση της μπαταρίας και πότε συμφέρει η πώληση της αποθηκευμένης ενέργειας μέσω

εκφόρτισης, χρησιμοποιώντας τις διαθέσιμες τιμές της αγοράς για κάθε δεκαπεντάλεπτο της ημέρας.

Η βελτιστοποίηση της αγοράς DAM αποτελεί τη βάση της συνολικής στρατηγικής λειτουργίας του συστήματος αποθήκευσης. Οι αποφάσεις που λαμβάνονται σε αυτό το στάδιο καθορίζουν το αρχικό φυσικό πρόγραμμα φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας, το οποίο στη συνέχεια μπορεί να αναθεωρηθεί στις ενδοημερήσιες αγορές, χωρίς όμως να αγνοείται η ήδη προγραμματισμένη λειτουργία του συστήματος. Με άλλα λόγια, το αποτέλεσμα της αγοράς DAM λειτουργεί ως σημείο αναφοράς για όλα τα επόμενα στάδια της διαδοχικής βελτιστοποίησης.

Το μαθηματικό μοντέλο περιλαμβάνει μεταβλητές απόφασης που αντιστοιχούν στη φόρτιση, στην εκφόρτιση και στην κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας σε κάθε χρονική περίοδο της ημέρας. Η εξέλιξη της κατάστασης φόρτισης υπολογίζεται μέσω του ενεργειακού ισοζυγίου, λαμβάνοντας υπόψη τις αποδόσεις φόρτισης και εκφόρτισης, ενώ ταυτόχρονα εφαρμόζονται όλοι οι τεχνικοί περιορισμοί που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Έτσι διασφαλίζεται ότι το πρόγραμμα λειτουργίας που προκύπτει είναι τεχνικά εφικτό και συμβατό με τα χαρακτηριστικά της μπαταρίας.

Στόχος της διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι η μεγιστοποίηση του οικονομικού αποτελέσματος της αγοράς DAM. Η αντικειμενική συνάρτηση περιλαμβάνει τα έσοδα που προκύπτουν από την πώληση ενέργειας κατά την εκφόρτιση της μπαταρίας και το κόστος αγοράς ενέργειας κατά τη φόρτιση. Παράλληλα, από το οικονομικό αποτέλεσμα αφαιρείται το αντίστοιχο κόστος υποβάθμισης της μπαταρίας, το οποίο είναι ανάλογο της συνολικής ενέργειας που διακινείται μέσω του συστήματος. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται στρατηγικές που αυξάνουν το πλήθος των κύκλων λειτουργίας χωρίς να αποφέρουν ουσιαστικό οικονομικό όφελος.

Μετά την επίλυση του προβλήματος εξάγονται το πρόγραμμα φόρτισης, το πρόγραμμα εκφόρτισης και η εξέλιξη της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Τα αποτελέσματα αυτά δεν χρησιμοποιούνται μόνο για τον υπολογισμό του οικονομικού αποτελέσματος της αγοράς DAM, αλλά αποτελούν και την είσοδο του επόμενου σταδίου της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, το

φυσικό πρόγραμμα που διαμορφώνεται στην αγορά επόμενης ημέρας μεταφέρεται αυτούσιο στην αγορά IDA1, όπου μπορεί να τροποποιηθεί εφόσον οι νέες συνθήκες της αγοράς το καθιστούν οικονομικά συμφέρον.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στο στάδιο αυτό όλες οι αποφάσεις λαμβάνονται χωρίς να έχει προηγηθεί κάποια άλλη αγορά κατά τη διάρκεια της ημέρας. Για τον λόγο αυτό η αγορά DAM αποτελεί το μοναδικό στάδιο στο οποίο το πρόγραμμα λειτουργίας δημιουργείται εξ ολοκλήρου από την αρχή, ενώ στις επόμενες αγορές πραγματοποιούνται μόνο στοχευμένες αναθεωρήσεις του ήδη διαμορφωμένου προγράμματος. Η φιλοσοφία αυτή ακολουθεί πιστά τη χρονική ακολουθία λειτουργίας των πραγματικών αγορών ηλεκτρικής ενέργειας και αποτελεί τη βάση της προτεινόμενης μεθοδολογίας διαδοχικής βελτιστοποίησης.

6.8 Βελτιστοποίηση της αγοράς Intraday Auction 1 (IDA1)

Μετά την ολοκλήρωση της αγοράς επόμενης ημέρας ακολουθεί η πρώτη ενδοημερήσια δημοπρασία (Intraday Auction 1 – IDA1), η οποία αποτελεί το δεύτερο στάδιο της διαδικασίας διαδοχικής βελτιστοποίησης. Σε αντίθεση με την αγορά DAM, όπου το πρόγραμμα λειτουργίας της μπαταρίας δημιουργείται από την αρχή, η αγορά IDA1 αξιοποιεί ως σημείο εκκίνησης το πρόγραμμα που έχει ήδη διαμορφωθεί και εξετάζει εάν αυτό μπορεί να βελτιωθεί με βάση τις νεότερες πληροφορίες που παρέχουν οι τιμές της συγκεκριμένης αγοράς.

Για τον σκοπό αυτό, το μαθηματικό μοντέλο διατηρεί όλες τις αποφάσεις που έχουν ληφθεί στην αγορά DAM και εισάγει ένα νέο σύνολο μεταβλητών απόφασης, οι οποίες επιτρέπουν τόσο την πραγματοποίηση νέων συναλλαγών όσο και την αναθεώρηση συναλλαγών που είχαν πραγματοποιηθεί στο προηγούμενο στάδιο. Έτσι, η μπαταρία μπορεί είτε να αγοράσει ή να πωλήσει επιπλέον ποσότητες ενέργειας είτε να τροποποιήσει μέρος του ήδη προγραμματισμένου φυσικού προγράμματος όταν αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερο οικονομικό όφελος.

Η σημαντικότερη διαφοροποίηση της αγοράς IDA1 σε σχέση με την αγορά DAM είναι η εισαγωγή των μεταβλητών *close positions*. Οι μεταβλητές αυτές δεν αντιστοιχούν σε νέους κύκλους λειτουργίας της μπαταρίας, αλλά χρησιμοποιούνται για την οικονομική αναθεώρηση συναλλαγών που πραγματοποιήθηκαν στην προηγούμενη αγορά.

Συγκεκριμένα, το μοντέλο μπορεί να κλείσει μέρος μιας θέσης πώλησης που είχε δημιουργηθεί στη DAM μέσω αγοράς στην IDA1 ή, αντίστοιχα, να κλείσει μέρος μιας θέσης αγοράς μέσω νέας πώλησης. Με τον τρόπο αυτό το πρόγραμμα λειτουργίας μπορεί να προσαρμοστεί στις νέες συνθήκες της αγοράς χωρίς να απαιτείται η πλήρης επαναδιαμόρφωσή του.

Για να εξασφαλιστεί η φυσική συνέπεια της λειτουργίας του συστήματος, η κατάσταση φόρτισης δεν υπολογίζεται απευθείας από τις οικονομικές συναλλαγές της αγοράς, αλλά από το τελικό φυσικό πρόγραμμα που προκύπτει μετά την ενσωμάτωση όλων των νέων αποφάσεων. Έτσι, η πραγματική φόρτιση της μπαταρίας προκύπτει από το πρόγραμμα της αγοράς DAM, αφού αφαιρεθούν οι συναλλαγές που ακυρώνονται και προστεθούν οι νέες φορτίσεις της αγοράς IDA1. Αντίστοιχα, η φυσική εκφόρτιση προκύπτει από το πρόγραμμα της αγοράς DAM μετά την ενσωμάτωση των νέων αποφάσεων εκφόρτισης και των αντίστοιχων διορθώσεων. Η προσέγγιση αυτή διασφαλίζει ότι η εξέλιξη της κατάστασης φόρτισης αντανακλά πάντοτε τη φυσική λειτουργία της μπαταρίας και όχι απλώς τις χρηματοοικονομικές συναλλαγές.

Επιπλέον, εφαρμόζονται πρόσθετοι περιορισμοί ώστε οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για το κλείσιμο προηγούμενων θέσεων να μην υπερβαίνουν τις αντίστοιχες ποσότητες που είχαν αρχικά προγραμματιστεί στην αγορά DAM. Με άλλα λόγια, το μοντέλο δεν επιτρέπει την αναθεώρηση συναλλαγών που δεν υπάρχουν ήδη στο πρόγραμμα της προηγούμενης αγοράς. Παράλληλα, ελέγχεται ότι η συνολική φυσική ισχύς φόρτισης και εκφόρτισης, μετά την ενσωμάτωση όλων των νέων αποφάσεων, παραμένει εντός των επιτρεπόμενων τεχνικών ορίων του συστήματος.

Η αντικειμενική συνάρτηση της αγοράς IDA1 μεγιστοποιεί το οικονομικό αποτέλεσμα που προκύπτει από τις νέες συναλλαγές και τις αναθεωρήσεις προηγούμενων θέσεων, ενώ παράλληλα λαμβάνει υπόψη το κόστος υποβάθμισης που προκαλείται αποκλειστικά από τις νέες φυσικές φορτίσεις και εκφορτίσεις της μπαταρίας. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η επιβάρυνση της αντικειμενικής συνάρτησης με κόστος φθοράς για καθαρά οικονομικές πράξεις που δεν μεταβάλλουν την πραγματική λειτουργία του συστήματος αποθήκευσης.

Μετά την επίλυση του προβλήματος δημιουργείται ένα νέο φυσικό πρόγραμμα λειτουργίας της μπαταρίας, το οποίο ενσωματώνει τόσο τις αποφάσεις της αγοράς DAM όσο και τις τροποποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην αγορά IDA1. Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιείται αυτούσιο ως σημείο εκκίνησης για τη βελτιστοποίηση της αγοράς IDA2, συνεχίζοντας τη διαδοχική διαδικασία αναθεώρησης των αποφάσεων μέχρι την ολοκλήρωση όλων των αγορών της ημέρας.

6.9 Βελτιστοποίηση της αγοράς Intraday Auction 2 (IDA2)

Η δεύτερη ενδοημερήσια δημοπρασία (Intraday Auction 2 – IDA2) αποτελεί το τρίτο στάδιο της διαδικασίας διαδοχικής βελτιστοποίησης και ακολουθεί την ίδια βασική φιλοσοφία με την αγορά IDA1. Στο στάδιο αυτό το πρόγραμμα λειτουργίας που έχει προκύψει μετά την ολοκλήρωση της πρώτης ενδοημερήσιας δημοπρασίας χρησιμοποιείται ως νέα βάση αναφοράς και εξετάζεται κατά πόσο μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω αξιοποιώντας τις επικαιροποιημένες πληροφορίες της αγοράς IDA2.

Η αγορά IDA2 δεν δημιουργεί νέο πρόγραμμα λειτουργίας, αλλά επεμβαίνει στο ήδη διαμορφωμένο φυσικό πρόγραμμα της μπαταρίας που έχει προκύψει μετά την IDA1. Για τον σκοπό αυτό εισάγονται νέες μεταβλητές απόφασης που επιτρέπουν την πραγματοποίηση επιπλέον συναλλαγών, καθώς και την αναθεώρηση συναλλαγών που έχουν πραγματοποιηθεί στις προηγούμενες αγορές. Με τον τρόπο αυτό το μοντέλο μπορεί να εκμεταλλευθεί τυχόν νέες εμπορικές ευκαιρίες χωρίς να παραβιάζει τη συνέχεια της λειτουργίας του συστήματος.

Η εξέλιξη της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας υπολογίζεται εκ νέου με βάση το φυσικό πρόγραμμα που προκύπτει μετά την ενσωμάτωση όλων των νέων αποφάσεων της αγοράς IDA2. Επομένως, το ενεργειακό ισοζύγιο δεν βασίζεται αποκλειστικά στις συναλλαγές της συγκεκριμένης αγοράς, αλλά στο συνολικό πρόγραμμα λειτουργίας που έχει διαμορφωθεί μέχρι το συγκεκριμένο στάδιο της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Η προσέγγιση αυτή διασφαλίζει ότι κάθε μεταβολή στις αποφάσεις της αγοράς αποτυπώνεται άμεσα στην πραγματική ενεργειακή κατάσταση της μπαταρίας.

Παράλληλα, διατηρούνται όλοι οι τεχνικοί περιορισμοί που εφαρμόστηκαν στα προηγούμενα στάδια. Επιπλέον, οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για το κλείσιμο προηγούμενων θέσεων εξακολουθούν να περιορίζονται από τις αντίστοιχες

συναλλαγές που υπάρχουν ήδη στο πρόγραμμα λειτουργίας, ώστε να αποτρέπεται η αναθεώρηση ανύπαρκτων εμπορικών θέσεων.

Η αντικειμενική συνάρτηση της αγοράς IDA2 ακολουθεί την ίδια λογική με εκείνη της αγοράς IDA1. Το οικονομικό αποτέλεσμα προκύπτει από τις νέες αγορές, τις νέες πωλήσεις και τις αναθεωρήσεις προηγούμενων συναλλαγών, ενώ το κόστος υποβάθμισης επιβάλλεται αποκλειστικά στις νέες φυσικές φορτίσεις και εκφορτίσεις της μπαταρίας. Με τον τρόπο αυτό το μοντέλο διαχωρίζει τις καθαρά οικονομικές πράξεις από τις πραγματικές ενεργειακές μεταβολές του συστήματος αποθήκευσης, αποφεύγοντας την τεχνητή αύξηση του κόστους φθοράς.

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας βελτιστοποίησης παράγεται ένα νέο επικαιροποιημένο φυσικό πρόγραμμα λειτουργίας, το οποίο περιλαμβάνει τις αποφάσεις της αγοράς DAM, τις τροποποιήσεις της αγοράς IDA1 και τις πρόσθετες μεταβολές που πραγματοποιήθηκαν στην αγορά IDA2. Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιείται ως είσοδος για το τελευταίο στάδιο της διαδικασίας, δηλαδή τη βελτιστοποίηση της αγοράς IDA3.

Παρατηρείται επομένως ότι η αγορά IDA2 δεν διαφοροποιείται ως προς τη μαθηματική δομή του προβλήματος σε σχέση με την αγορά IDA1. Η βασική διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι οι αποφάσεις λαμβάνονται πάνω στο ήδη αναθεωρημένο πρόγραμμα που έχει προκύψει από τα δύο προηγούμενα στάδια, επιτρέποντας τη σταδιακή προσαρμογή της στρατηγικής λειτουργίας της μπαταρίας καθώς καθίστανται διαθέσιμες νεότερες πληροφορίες της αγοράς. Η διαδοχική αυτή διαδικασία αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό του προτεινόμενου μοντέλου και αποτυπώνει με ρεαλιστικό τρόπο τη λειτουργία των διαδοχικών ενδοημερήσιων αγορών ηλεκτρικής ενέργειας.

6.10 Βελτιστοποίηση της αγοράς Intraday Auction 3 (IDA3)

Η τρίτη ενδοημερήσια δημοπρασία (Intraday Auction 3 – IDA3) αποτελεί το τελευταίο στάδιο της διαδικασίας διαδοχικής βελτιστοποίησης και ολοκληρώνει τη διαμόρφωση του ημερήσιου προγράμματος λειτουργίας της μπαταρίας. Στο στάδιο αυτό ως σημείο εκκίνησης χρησιμοποιείται το φυσικό πρόγραμμα που έχει ήδη διαμορφωθεί μετά την ολοκλήρωση της αγοράς IDA2, ενώ εξετάζεται εάν οι διαθέσιμες πληροφορίες της

τελευταίας δημοπρασίας μπορούν να οδηγήσουν σε περαιτέρω βελτίωση του οικονομικού αποτελέσματος.

Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος παραμένει ουσιαστικά ίδια με εκείνη της αγοράς IDA2. Το μοντέλο διαθέτει μεταβλητές για νέες αγορές και πωλήσεις ενέργειας, καθώς και μεταβλητές που επιτρέπουν την αναθεώρηση συναλλαγών οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί στα προηγούμενα στάδια της διαδικασίας. Όπως και στις δύο προηγούμενες ενδοημερήσιες δημοπρασίες, η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας υπολογίζεται με βάση το τελικό φυσικό πρόγραμμα λειτουργίας και όχι αποκλειστικά από τις οικονομικές συναλλαγές που πραγματοποιούνται στην αγορά IDA3.

Η βασική διαφοροποίηση της αγοράς IDA3 σε σχέση με τις προηγούμενες αγορές αφορά τη διαθεσιμότητα των δεδομένων, καθώς η αγορά λειτουργεί στο διάστημα 12:00-24:00.

Η αντικειμενική συνάρτηση της αγοράς IDA3 διατηρεί την ίδια φιλοσοφία που εφαρμόστηκε και στα προηγούμενα στάδια. Το οικονομικό αποτέλεσμα υπολογίζεται από τις νέες συναλλαγές και τις αντίστοιχες αναθεωρήσεις προηγούμενων θέσεων, ενώ το κόστος υποβάθμισης εφαρμόζεται μόνο στις νέες φυσικές φορτίσεις και εκφορτίσεις της μπαταρίας. Στα χρονικά διαστήματα όπου δεν υπάρχουν διαθέσιμες τιμές αγοράς, η συνεισφορά των συγκεκριμένων περιόδων στην αντικειμενική συνάρτηση μηδενίζεται, χωρίς όμως να επηρεάζεται η συνέχεια της συνολικής διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Μετά την ολοκλήρωση της αγοράς IDA3 προκύπτει το τελικό φυσικό πρόγραμμα λειτουργίας της μπαταρίας για ολόκληρη την ημέρα. Το πρόγραμμα αυτό αποτελεί το αποτέλεσμα της διαδοχικής ενσωμάτωσης όλων των αποφάσεων που ελήφθησαν στις αγορές DAM, IDA1, IDA2 και IDA3 και χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τον υπολογισμό του ημερήσιου οικονομικού αποτελέσματος, της συνολικής ενεργειακής διέλευσης της μπαταρίας και των ισοδύναμων πλήρων κύκλων λειτουργίας.

6.11 Οικονομική αξιολόγηση της στρατηγικής λειτουργίας

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας διαδοχικής βελτιστοποίησης πραγματοποιείται η οικονομική αξιολόγηση της στρατηγικής λειτουργίας της μπαταρίας. Στο στάδιο αυτό υπολογίζεται το οικονομικό αποτέλεσμα που προκύπτει από τη συμμετοχή του

συστήματος σε καθεμία από τις τέσσερις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και το συνολικό καθαρό ημερήσιο κέρδος.

Αν και οι αποφάσεις της βελτιστοποίησης μπορούν να βασίζονται είτε στις προβλεπόμενες είτε στις πραγματικές τιμές, η οικονομική αξιολόγηση του προτεινόμενου μοντέλου πραγματοποιείται πάντοτε με χρήση των πραγματικών ιστορικών τιμών της αγοράς. Με τον τρόπο αυτό το οικονομικό αποτέλεσμα αποτυπώνει την πραγματική απόδοση της στρατηγικής και όχι τη θεωρητική απόδοση που θα μπορούσε να επιτευχθεί εάν οι μελλοντικές τιμές ήταν γνωστές εκ των προτέρων.

Η συνολική ημερήσια κερδοφορία προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους οικονομικών αποτελεσμάτων των τεσσάρων αγορών, από το οποίο αφαιρείται το ημερήσιο κόστος υποβάθμισης της μπαταρίας. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την εκτίμηση του πραγματικού οικονομικού οφέλους της στρατηγικής λειτουργίας, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τα έσοδα από τις εμπορικές συναλλαγές όσο και την επίδραση της λειτουργικής φθοράς του συστήματος αποθήκευσης.

6.11.1 Υπολογισμός οικονομικού αποτελέσματος της αγοράς DAM

Το οικονομικό αποτέλεσμα της αγοράς επόμενης ημέρας υπολογίζεται από τις ποσότητες ενέργειας που αγοράζονται και πωλούνται στο πλαίσιο του αρχικού προγράμματος λειτουργίας της μπαταρίας. Τα έσοδα προκύπτουν από την πώληση ενέργειας κατά την εκφόρτιση της μπαταρίας, ενώ το αντίστοιχο κόστος αντιστοιχεί στην αγορά ενέργειας που απαιτείται για τη φόρτισή της. Για την αποτίμηση όλων των συναλλαγών χρησιμοποιούνται οι πραγματικές τιμές της αγοράς DAM, ανεξάρτητα από το σύνολο δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης.

6.11.2 Υπολογισμός οικονομικού αποτελέσματος της αγοράς IDA1

Στην αγορά IDA1 το οικονομικό αποτέλεσμα προκύπτει τόσο από τις νέες συναλλαγές που πραγματοποιούνται στη συγκεκριμένη αγορά όσο και από τις αναθεωρήσεις συναλλαγών που είχαν πραγματοποιηθεί προηγουμένως στην αγορά DAM. Η αποτίμηση όλων των συναλλαγών γίνεται με βάση τις πραγματικές τιμές της αγοράς IDA1, ώστε να αποτυπώνεται το πραγματικό οικονομικό αποτέλεσμα που προκύπτει από την πρώτη ενδοημερήσια δημοπρασία.

6.11.3 Υπολογισμός οικονομικού αποτελέσματος της αγοράς IDA2

Η οικονομική αξιολόγηση της αγοράς IDA2 πραγματοποιείται με αντίστοιχο τρόπο. Το οικονομικό αποτέλεσμα περιλαμβάνει τις νέες συναλλαγές της αγοράς καθώς και τις αντίστοιχες αναθεωρήσεις προηγούμενων θέσεων, οι οποίες αποτιμώνται αποκλειστικά με τις πραγματικές τιμές της δεύτερης ενδοημερήσιας δημοπρασίας. Με αυτόν τον τρόπο η συνεισφορά κάθε αγοράς στο συνολικό οικονομικό αποτέλεσμα υπολογίζεται ανεξάρτητα, διατηρώντας παράλληλα τη συνοχή της συνολικής στρατηγικής λειτουργίας.

6.11.4 Υπολογισμός οικονομικού αποτελέσματος της αγοράς IDA3

Για την αγορά IDA3 η διαδικασία υπολογισμού παραμένει ίδια με εκείνη των προηγούμενων ενδοημερήσιων αγορών. Ωστόσο, στις χρονικές περιόδους όπου δεν υπάρχουν διαθέσιμες πραγματικές τιμές αγοράς, δεν πραγματοποιείται καμία οικονομική συναλλαγή και η συνεισφορά των συγκεκριμένων περιόδων στο οικονομικό αποτέλεσμα είναι μηδενική. Έτσι, το οικονομικό αποτέλεσμα της αγοράς IDA3 προκύπτει μόνο από τα χρονικά διαστήματα στα οποία υπήρξε πραγματική δυνατότητα συμμετοχής στην αγορά.

6.11.5 Υπολογισμός του καθαρού ημερήσιου οικονομικού αποτελέσματος

Μετά τον υπολογισμό των επιμέρους οικονομικών αποτελεσμάτων των τεσσάρων αγορών προσδιορίζεται το συνολικό καθαρό ημερήσιο αποτέλεσμα της λειτουργίας του συστήματος αποθήκευσης. Αρχικά υπολογίζεται το συνολικό μικτό κέρδος ως το άθροισμα των οικονομικών αποτελεσμάτων της αγοράς DAM και των τριών ενδοημερήσιων δημοπρασιών. Στη συνέχεια αφαιρείται το ημερήσιο κόστος υποβάθμισης της μπαταρίας, το οποίο υπολογίζεται από το τελικό φυσικό πρόγραμμα λειτουργίας που έχει προκύψει μετά την ολοκλήρωση όλων των σταδίων της διαδοχικής βελτιστοποίησης.

Το καθαρό ημερήσιο οικονομικό αποτέλεσμα αποτελεί τον βασικό δείκτη αξιολόγησης της στρατηγικής λειτουργίας και αποθηκεύεται για κάθε ημέρα της προσομοίωσης. Τα ημερήσια αποτελέσματα συγκεντρώνονται σε ενιαίο πίνακα, από τον οποίο προκύπτουν στη συνέχεια τα ετήσια οικονομικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται τόσο

για την αξιολόγηση της απόδοσης του αλγορίθμου όσο και για την τεχνοοικονομική ανάλυση που παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

6.12 Υπολογισμός της ημερήσιας ενεργειακής διέλευσης και των ισοδύναμων πλήρων κύκλων λειτουργίας.

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας βελτιστοποίησης και τον υπολογισμό του ημερήσιου οικονομικού αποτελέσματος, αξιολογείται η πραγματική καταπόνηση της μπαταρίας μέσω του υπολογισμού της συνολικής ενέργειας που διακινήθηκε κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ο υπολογισμός αυτός βασίζεται αποκλειστικά στο τελικό φυσικό πρόγραμμα λειτουργίας που έχει προκύψει μετά την ολοκλήρωση όλων των σταδίων της διαδοχικής βελτιστοποίησης και όχι στις επιμέρους εμπορικές συναλλαγές κάθε αγοράς.

Η συνολική ημερήσια φόρτιση υπολογίζεται ως το άθροισμα της ενέργειας που απορροφήθηκε από την μπαταρία σε όλα τα χρονικά διαστήματα της ημέρας, ενώ η συνολική ημερήσια εκφόρτιση προκύπτει από την αντίστοιχη ενέργεια που παραδόθηκε στο δίκτυο. Το ημερήσιο ενεργειακό throughput ισούται με το άθροισμα των δύο αυτών μεγεθών και εκφράζει τη συνολική ποσότητα ενέργειας που διήλθε από την μπαταρία κατά τη διάρκεια του εικοσιτετράωρου.

Η τιμή του ημερήσιου throughput χρησιμοποιείται αρχικά για τον υπολογισμό του ημερήσιου κόστους υποβάθμισης της μπαταρίας. Παράλληλα, προστίθεται στο συνολικό ετήσιο throughput, το οποίο ενημερώνεται διαδοχικά μετά την ολοκλήρωση κάθε ημέρας προσομοίωσης. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει η συνολική ενεργειακή καταπόνηση του συστήματος αποθήκευσης σε ολόκληρο τον χρονικό ορίζοντα της μελέτης.

Για την εκτίμηση της συνολικής χρήσης της μπαταρίας υπολογίζονται επίσης οι ισοδύναμοι πλήρεις κύκλοι λειτουργίας (Equivalent Full Cycles – EFC). Ο δείκτης αυτός εκφράζει πόσους πλήρεις κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης αντιστοιχεί να έχει πραγματοποιήσει η μπαταρία, ανεξάρτητα από το αν στην πράξη οι κύκλοι ήταν πλήρεις ή μερικοί. Ο υπολογισμός πραγματοποιείται διαιρώντας τη συνολική ετήσια ενεργειακή διέλευση με το διπλάσιο της ωφέλιμης ενεργειακής χωρητικότητας της μπαταρίας. Η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιείται ευρέως στη βιβλιογραφία για την

εκτίμηση της λειτουργικής καταπόνησης συστημάτων αποθήκευσης, καθώς επιτρέπει την άμεση σύγκριση διαφορετικών στρατηγικών λειτουργίας.

Οι ισοδύναμοι πλήρεις κύκλοι αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα μεγέθη της παρούσας μελέτης, καθώς χρησιμοποιούνται στη συνέχεια ως δεδομένο εισόδου για την τεχνοοικονομική αξιολόγηση του έργου. Ειδικότερα, ο ετήσιος αριθμός κύκλων συμβάλλει στον υπολογισμό της υποβάθμισης της διαθέσιμης χωρητικότητας της μπαταρίας κατά τη διάρκεια της ζωής της και, κατά συνέπεια, επηρεάζει την εξέλιξη των μελλοντικών ταμειακών ροών και των χρηματοοικονομικών δεικτών της επένδυσης.

6.13 Επεξεργασία, αποθήκευση και οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων

Μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης τα αποτελέσματα κάθε ημέρας συγκεντρώνονται σε ενιαία δομή δεδομένων, η οποία περιλαμβάνει τα οικονομικά αποτελέσματα των επιμέρους αγορών, το συνολικό καθαρό ημερήσιο κέρδος, το ημερήσιο κόστος υποβάθμισης, καθώς και την τελική κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας. Η συγκέντρωση των δεδομένων αυτών επιτρέπει τον υπολογισμό των συνολικών ετήσιων δεικτών απόδοσης του συστήματος αποθήκευσης.

Στη συνέχεια υπολογίζονται το συνολικό ετήσιο καθαρό οικονομικό αποτέλεσμα, η συνολική ενέργεια που διακινήθηκε μέσω της μπαταρίας και οι ισοδύναμοι πλήρεις κύκλοι λειτουργίας. Τα μεγέθη αυτά αποτελούν τους βασικούς δείκτες αξιολόγησης της στρατηγικής λειτουργίας και χρησιμοποιούνται τόσο για τη σύγκριση διαφορετικών σεναρίων λειτουργίας όσο και ως δεδομένα εισόδου στην τεχνοοικονομική ανάλυση του επόμενου κεφαλαίου.

Πέρα από τους αριθμητικούς δείκτες, το μοντέλο παράγει και γραφικές απεικονίσεις που διευκολύνουν την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης. Οι γραφικές αυτές παραστάσεις παρουσιάζουν την εξέλιξη των τιμών των αγορών σε συνδυασμό με τις αποφάσεις αγοράς και πώλησης της μπαταρίας, την εξέλιξη της κατάστασης φόρτισης μετά από κάθε στάδιο της διαδοχικής βελτιστοποίησης, καθώς και το τελικό φυσικό πρόγραμμα φόρτισης και εκφόρτισης του συστήματος.

Η οπτική απεικόνιση των αποτελεσμάτων επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση της στρατηγικής που ακολουθεί το μοντέλο και διευκολύνει τον έλεγχο της ορθής λειτουργίας της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Παράλληλα, παρέχει τη δυνατότητα άμεσης σύγκρισης των αποφάσεων που λαμβάνονται στις διαφορετικές αγορές και αναδεικνύει τον τρόπο με τον οποίο το πρόγραμμα λειτουργίας της μπαταρίας μεταβάλλεται σταδιακά από την αγορά DAM έως και την ολοκλήρωση της αγοράς IDA3.

Με την ολοκλήρωση των παραπάνω διαδικασιών ολοκληρώνεται και η μεθοδολογία βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Τα ετήσια οικονομικά αποτελέσματα, οι ισοδύναμοι πλήρεις κύκλοι λειτουργίας και οι υπόλοιποι δείκτες που προκύπτουν από την προσομοίωση αποτελούν τη βάση για την τεχνοοικονομική αξιολόγηση του συστήματος αποθήκευσης, η οποία παρουσιάζεται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

6.14 Ανάπτυξη της γραφικής διεπαφής χρήστη

Μετά την ολοκλήρωση της ανάπτυξης και της επαλήθευσης του μοντέλου βελτιστοποίησης σε περιβάλλον Python, αναπτύχθηκε μία γραφική διεπαφή χρήστη (Graphical User Interface – GUI) με χρήση του Streamlit, με στόχο τη διευκόλυνση της αλληλεπίδρασης του χρήστη με το προτεινόμενο Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων (Decision Support Tool).

Η διεπαφή σχεδιάστηκε ώστε να παρέχει ένα εύχρηστο περιβάλλον, μέσα από το οποίο ο χρήστης μπορεί να εισάγει τα βασικά τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά του συστήματος αποθήκευσης, να εκτελεί τη διαδικασία βελτιστοποίησης και να προβάλλει τα αποτελέσματα της ανάλυσης χωρίς να απαιτείται γνώση προγραμματισμού ή χρήση του πηγαίου κώδικα.

Επιπλέον, μέσω της εφαρμογής παρέχεται η δυνατότητα οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων, όπως η εξέλιξη της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας, τα προγράμματα φόρτισης και εκφόρτισης, τα ημερήσια και μηνιαία οικονομικά αποτελέσματα, καθώς και οι βασικοί δείκτες τεχνοοικονομικής αξιολόγησης. Με τον τρόπο αυτό η διαδικασία αξιολόγησης γίνεται περισσότερο κατανοητή και φιλική προς

τον τελικό χρήστη, ενώ παράλληλα διευκολύνεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων και η σύγκριση διαφορετικών σεναρίων λειτουργίας.

Η ανάπτυξη της γραφικής διεπαφής αποτελεί ουσιαστικό βήμα για τη μετατροπή του μοντέλου βελτιστοποίησης από ένα πρόγραμμα που εκτελείται μέσω κώδικα Python σε ένα ολοκληρωμένο Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί εύκολα ακόμη και από χρήστες χωρίς εξειδικευμένες γνώσεις προγραμματισμού.

6.15 Ανάπτυξη και διαδικτυακή διάθεση της εφαρμογής

Μετά την ολοκλήρωση της ανάπτυξης της εφαρμογής σε περιβάλλον Streamlit, ακολούθησε η διαδικασία μετατροπής της σε διαδικτυακή εφαρμογή (web application), ώστε να είναι δυνατή η πρόσβασή της μέσω οποιουδήποτε σύγχρονου φυλλομετρητή (web browser), χωρίς να απαιτείται εγκατάσταση λογισμικού από τον τελικό χρήστη.

Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η τεχνολογία Docker, η οποία επιτρέπει τη δημιουργία ενός απομονωμένου περιβάλλοντος εκτέλεσης (container), μέσα στο οποίο περιλαμβάνονται όλες οι απαραίτητες βιβλιοθήκες, οι εξαρτήσεις και τα εργαλεία που απαιτούνται για τη λειτουργία της εφαρμογής. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ότι το λογισμικό εκτελείται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο ανεξάρτητα από το λειτουργικό σύστημα ή το περιβάλλον στο οποίο φιλοξενείται.

Αρχικά δημιουργήθηκε το αρχείο Dockerfile, στο οποίο καθορίστηκε το περιβάλλον εκτέλεσης της εφαρμογής. Ως βασικό περιβάλλον χρησιμοποιήθηκε η εικόνα Python 3.12 Slim, ενώ κατά τη διαδικασία κατασκευής του Docker container εγκαταστάθηκαν αυτόματα οι απαραίτητες βιβλιοθήκες Python μέσω του αρχείου requirements.txt, ο solver GLPK (GNU Linear Programming Kit), ο οποίος χρησιμοποιείται από τη βιβλιοθήκη Pyomo για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης, καθώς και ολόκληρος ο πηγαίος κώδικας της εφαρμογής.

Παράλληλα δημιουργήθηκε το αρχείο .dockerignore, μέσω του οποίου εξαιρέθηκαν από τη διαδικασία κατασκευής προσωρινά αρχεία, το εικονικό περιβάλλον Python (virtual environment), αποτελέσματα προηγούμενων εκτελέσεων και λοιπά αρχεία ανάπτυξης. Η χρήση του αρχείου αυτού συνέβαλε στη μείωση του μεγέθους του τελικού Docker image και στην επιτάχυνση της διαδικασίας δημιουργίας του.

Για τον αυτόματο εντοπισμό του εκτελέσιμου αρχείου του GLPK χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση `shutil.which()`, η οποία αναζητά δυναμικά τον solver στο λειτουργικό σύστημα χωρίς να απαιτείται η χρήση σταθερών διαδρομών αρχείων (hard-coded paths). Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται σημαντικά η φορητότητα (portability) της εφαρμογής και καθίσταται δυνατή η εκτέλεσή της σε διαφορετικά περιβάλλοντα χωρίς τροποποίηση του πηγαίου κώδικα.

Στη συνέχεια, ο πηγαίος κώδικας μεταφέρθηκε σε αποθετήριο GitHub, το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως σύστημα διαχείρισης εκδόσεων (Version Control System). Μέσω του Git πραγματοποιήθηκε η παρακολούθηση όλων των αλλαγών του έργου, η διατήρηση του ιστορικού ανάπτυξης και η ασφαλής αποθήκευση του λογισμικού σε απομακρυσμένο αποθετήριο.

Η τελική ανάπτυξη (deployment) της εφαρμογής πραγματοποιήθηκε στην πλατφόρμα Railway, η οποία συνδέθηκε απευθείας με το αποθετήριο GitHub. Με κάθε νέα έκδοση του έργου, η πλατφόρμα δημιουργεί αυτόματα νέο Docker container από το αρχείο Dockerfile, εγκαθιστά όλες τις απαραίτητες εξαρτήσεις και δημοσιεύει τη νέα έκδοση της εφαρμογής χωρίς να απαιτείται επιπλέον χειροκίνητη παρέμβαση.

Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας δημιουργήθηκε δημόσιο διαδικτυακό URL, μέσω του οποίου η εφαρμογή είναι διαθέσιμη αποκλειστικά μέσω φυλλομετρητή. Ο τελικός χρήστης δεν απαιτείται να εγκαταστήσει Python, Streamlit, Docker, GLPK ή οποιαδήποτε άλλη βιβλιοθήκη στον υπολογιστή του, καθώς ολόκληρο το περιβάλλον εκτέλεσης φιλοξενείται σε υποδομή υπολογιστικού νέφους (cloud).

Η διαδικτυακή διάθεση της εφαρμογής αποτελεί το τελικό στάδιο ανάπτυξης του προτεινόμενου Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων και επιτρέπει την άμεση αξιοποίησή του από οποιονδήποτε χρήστη μέσω μιας απλής διαδικτυακής σύνδεσης. Με τον τρόπο αυτό, η εργασία δεν περιορίζεται στην ανάπτυξη ενός ερευνητικού αλγορίθμου, αλλά οδηγεί στη δημιουργία μιας ολοκληρωμένης διαδικτυακής εφαρμογής, ικανής να υποστηρίξει τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τη λειτουργία συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας.

7. Τεχνοοικονομική αξιολόγηση του συστήματος αποθήκευσης

7.1 Εισαγωγή

Η αξιολόγηση ενός συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας δεν περιορίζεται στην τεχνική λειτουργία του ή στην οικονομική του απόδοση κατά τη συμμετοχή στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας. Για την ολοκληρωμένη αποτίμηση μιας τέτοιας επένδυσης απαιτείται η εξέταση της οικονομικής της συμπεριφοράς σε βάθος χρόνου, λαμβάνοντας υπόψη το αρχικό κόστος εγκατάστασης, τα λειτουργικά έξοδα και τη σταδιακή υποβάθμιση της μπαταρίας.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκε το μοντέλο βελτιστοποίησης της λειτουργίας του συστήματος αποθήκευσης και υπολογίστηκε το ετήσιο καθαρό οικονομικό αποτέλεσμα από τη συμμετοχή του στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας. Το αποτέλεσμα αυτό αποτελεί τη βάση για την περαιτέρω οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης, καθώς από μόνο του δεν αποτυπώνει την απόδοση του έργου σε ολόκληρη τη διάρκεια ζωής του.

Στο παρόν κεφάλαιο αναπτύσσεται ένα τεχνοοικονομικό μοντέλο με χρονικό ορίζοντα δέκα ετών. Ως δεδομένα εισόδου χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα της ετήσιας προσομοίωσης, τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μπαταρίας και οι βασικές οικονομικές παραδοχές του έργου. Η μελλοντική εξέλιξη της διαθέσιμης χωρητικότητας υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τόσο την ημερολογιακή γήρανση όσο και την υποβάθμιση λόγω των κύκλων λειτουργίας.

Παράλληλα, ενσωματώνεται μηχανισμός battery augmentation, μέσω του οποίου εξετάζεται η δυνατότητα ενίσχυσης της εγκατάστασης όταν η διαθέσιμη χωρητικότητα υποχωρήσει κάτω από ένα προκαθορισμένο επίπεδο. Με βάση την εξέλιξη της χωρητικότητας υπολογίζονται τα ετήσια οικονομικά αποτελέσματα και οι αντίστοιχες ταμειακές ροές.

Η αξιολόγηση πραγματοποιείται με βάση τρεις βασικούς χρηματοοικονομικούς δείκτες: την Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value – NPV), τον Εσωτερικό Βαθμό Απόδοσης (Internal Rate of Return – IRR) και τον Δείκτη Απόδοσης της Επένδυσης

(Return on Investment – ROI). Η ανάλυση βασίζεται αποκλειστικά στα αποτελέσματα του ρεαλιστικού σεναρίου λειτουργίας (Realistic scenario), στο οποίο η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται με προβλεπόμενες τιμές αγοράς, ενώ η οικονομική αποτίμηση της λειτουργίας γίνεται με τις πραγματικές τιμές.

7.2 Δεδομένα εισόδου της τεχνοοικονομικής αξιολόγησης

Η τεχνοοικονομική αξιολόγηση βασίζεται στα αποτελέσματα της ετήσιας προσομοίωσης του μοντέλου βελτιστοποίησης και στα τεχνικοοικονομικά χαρακτηριστικά του συστήματος αποθήκευσης.

Ως βασικό οικονομικό μέγεθος εισόδου χρησιμοποιείται το ετήσιο καθαρό οικονομικό αποτέλεσμα της λειτουργίας της μπαταρίας. Το μέγεθος αυτό περιλαμβάνει τα οικονομικά αποτελέσματα από τη συμμετοχή στις επιμέρους αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, αφού ληφθεί υπόψη το αντίστοιχο κόστος λειτουργικής υποβάθμισης. Αποτελεί τη βάση για την εκτίμηση των μελλοντικών ετήσιων εσόδων του έργου.

Επιπλέον, χρησιμοποιείται ο συνολικός αριθμός ισοδύναμων πλήρων κύκλων λειτουργίας (Equivalent Full Cycles – EFC) που προέκυψε από την ετήσια προσομοίωση. Ο αριθμός αυτός χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της υποβάθμισης της διαθέσιμης χωρητικότητας λόγω της λειτουργικής καταπόνησης της μπαταρίας.

Στα δεδομένα εισόδου περιλαμβάνονται επίσης η αρχική και η ωφέλιμη ενεργειακή χωρητικότητα, το αρχικό κόστος εγκατάστασης, το μοναδιαίο κόστος για την ενίσχυση της χωρητικότητας και η αναμενόμενη διάρκεια ζωής της μπαταρίας σε ισοδύναμους πλήρεις κύκλους. Τα μεγέθη αυτά χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς της γήρανσης και του κόστους που χρειάζεται για την ενίσχυση της χωρητικότητας της μπαταρίας.

Για κάθε έτος της δεκαετούς περιόδου αξιολόγησης υπολογίζονται η διαθέσιμη ενεργειακή χωρητικότητα, τα αντίστοιχα έσοδα, οι δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης, το ενδεχόμενο κόστος ενίσχυσης και η τελική καθαρή ταμειακή ροή. Οι υπολογισμοί αυτοί αποτελούν τη βάση για την εφαρμογή των χρηματοοικονομικών δεικτών.

7.3 Βασικές παραδοχές της οικονομικής ανάλυσης

Η τεχνοοικονομική ανάλυση πραγματοποιείται για χρονικό ορίζοντα δέκα ετών. Ως έτος αναφοράς θεωρείται το πρώτο έτος λειτουργίας του έργου και τα αποτελέσματα της ετήσιας προσομοίωσης χρησιμοποιούνται ως βάση για την εκτίμηση της μελλοντικής λειτουργίας.

Το αρχικό επενδυτικό κόστος (CAPEX) θεωρείται ίσο με 12.500.000 εκατομμύρια ευρώ και καταβάλλεται πριν από την έναρξη λειτουργίας του έργου. Το ποσό αυτό αποτελεί την αρχική αρνητική ταμειακή ροή της επένδυσης.

Οι ετήσιες δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης (Operation and Maintenance – O&M) θεωρούνται ίσες με το 2% του αρχικού CAPEX. Συνεπώς, το ετήσιο κόστος O&M παραμένει σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου αξιολόγησης και αφαιρείται από τα αντίστοιχα ετήσια οικονομικά αποτελέσματα.

Για την προεξόφληση των μελλοντικών ταμειακών ροών χρησιμοποιείται προεξοφλητικό επιτόκιο 5%. Το επιτόκιο αυτό χρησιμοποιείται για τη μετατροπή των μελλοντικών χρηματοροών σε παρούσες αξίες και αποτελεί βασική παράμετρο στον υπολογισμό της NPV.

Όσον αφορά τη μελλοντική λειτουργία του συστήματος, θεωρείται ότι η στρατηγική λειτουργίας παραμένει ουσιαστικά ίδια κατά τη διάρκεια της περιόδου αξιολόγησης. Επομένως, οι μεταβολές στα ετήσια έσοδα δεν αποδίδονται σε αλλαγές των συνθηκών της αγοράς ή της εμπορικής στρατηγικής, αλλά στη μεταβολή της διαθέσιμης χωρητικότητας λόγω γήρανσης της μπαταρίας (battery augmentation).

Η γήρανση προσεγγίζεται μέσω δύο μηχανισμών: της ημερολογιακής γήρανσης και της γήρανσης λόγω κύκλων λειτουργίας. Η επίδραση των δύο μηχανισμών υπολογίζεται για κάθε έτος και χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της διαθέσιμης χωρητικότητας και, κατ' επέκταση, των ετήσιων οικονομικών αποτελεσμάτων.

7.4 Μοντέλο γήρανσης της μπαταρίας

Η διαθέσιμη ενεργειακή χωρητικότητα της μπαταρίας αποτελεί βασικό παράγοντα της οικονομικής της απόδοσης, καθώς καθορίζει την ποσότητα ενέργειας που μπορεί να διακινηθεί στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της

εγκατάστασης, η χωρητικότητα μειώνεται λόγω της φυσικής γήρανσης των στοιχείων και της καταπόνησης που προκαλείται από τους κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης.

Στο μοντέλο της παρούσας εργασίας η υποβάθμιση υπολογίζεται διαδοχικά για κάθε έτος της περιόδου αξιολόγησης. Η χωρητικότητα που προκύπτει στο τέλος ενός έτους αποτελεί τη βάση για τον υπολογισμό του επόμενου, ώστε να αποτυπώνεται η συσσωρευτική επίδραση της γήρανσης.

Η συνολική υποβάθμιση αποτελείται από δύο επιμέρους μηχανισμούς, οι οποίοι παρουσιάζονται στις επόμενες υποενότητες.

7.4.1 Ημερολογιακή γήρανση (Calendar Degradation)

Η ημερολογιακή γήρανση (calendar degradation) εκφράζει τη φυσική απώλεια χωρητικότητας που προκαλείται από την πάροδο του χρόνου, ανεξάρτητα από τον αριθμό των κύκλων λειτουργίας της μπαταρίας. Το φαινόμενο σχετίζεται με τις φυσικοχημικές διεργασίες που πραγματοποιούνται στο εσωτερικό των κυψελών κατά τη διάρκεια της ζωής τους.

Στην παρούσα εργασία θεωρείται σταθερός ετήσιος ρυθμός ημερολογιακής υποβάθμισης ίσος με 1,5%. Η υποβάθμιση εφαρμόζεται διαδοχικά στη διαθέσιμη χωρητικότητα κάθε έτους, με αποτέλεσμα τη σταδιακή μείωσή της κατά τη διάρκεια της περιόδου αξιολόγησης.

Η χρήση σταθερού ποσοστού αποτελεί απλοποιημένη προσέγγιση της πραγματικής συμπεριφοράς μιας μπαταρίας ιόντων λιθίου. Ωστόσο, επιτρέπει την ενσωμάτωση της επίδρασης της φυσικής γήρανσης στο οικονομικό μοντέλο χωρίς την ανάγκη ανάπτυξης σύνθετου ηλεκτροχημικού μοντέλου.

7.4.2 Υποβάθμιση λόγω κύκλων λειτουργίας (Cycle Degradation)

Η υποβάθμιση λόγω κύκλων λειτουργίας (cycle degradation) συνδέεται με τη χρήση της μπαταρίας κατά τους κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης. Η επαναλαμβανόμενη λειτουργία προκαλεί σταδιακή απώλεια της διαθέσιμης ενεργειακής χωρητικότητας, η οποία εξαρτάται από τον συνολικό αριθμό των κύκλων που πραγματοποιούνται.

Για την εκτίμηση της συγκεκριμένης υποβάθμισης χρησιμοποιείται ο ετήσιος αριθμός ισοδύναμων πλήρων κύκλων (Equivalent Full Cycles – EFC) που προέκυψε από την

προσομοίωση του προηγούμενου κεφαλαίου. Η μπαταρία θεωρείται ότι έχει αναμενόμενη διάρκεια ζωής 10.000 ισοδύναμων πλήρων κύκλων.

Η ετήσια υποβάθμιση υπολογίζεται επομένως σε συνάρτηση με το ποσοστό των κύκλων που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του αντίστοιχου έτους σε σχέση με τη συνολική αναμενόμενη διάρκεια ζωής.

Με τον τρόπο αυτό η λειτουργική καταπόνηση συνδέεται άμεσα με τη στρατηγική λειτουργίας της μπαταρίας. Η πραγματοποίηση περισσότερων κύκλων μπορεί να αυξήσει τα βραχυπρόθεσμα οικονομικά οφέλη, αλλά ταυτόχρονα οδηγεί σε ταχύτερη υποβάθμιση της χωρητικότητας και επηρεάζει την οικονομική απόδοση των επόμενων ετών.

7.4.3 Υπολογισμός της διαθέσιμης ενεργειακής χωρητικότητας

Η διαθέσιμη ενεργειακή χωρητικότητα υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τη συνδυασμένη επίδραση της ημερολογιακής γήρανσης και της υποβάθμισης λόγω κύκλων λειτουργίας.

Για κάθε έτος, η χωρητικότητα που έχει απομείνει από το προηγούμενο έτος αποτελεί την αρχική τιμή του υπολογισμού. Στη συνέχεια εφαρμόζονται οι αντίστοιχοι μηχανισμοί υποβάθμισης και προκύπτει η νέα διαθέσιμη χωρητικότητα.

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται διαδοχικά για ολόκληρη την περίοδο αξιολόγησης. Η χωρητικότητα που προκύπτει χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την προσαρμογή των ετήσιων οικονομικών αποτελεσμάτων, καθώς θεωρείται ότι η μείωση της ενεργειακής ικανότητας περιορίζει αντίστοιχα την ποσότητα ενέργειας που μπορεί να διακινηθεί στις αγορές.

Σε περίπτωση ενεργοποίησης της διαδικασίας battery augmentation, η νέα διαθέσιμη χωρητικότητα μετά την ενίσχυση χρησιμοποιείται ως βάση για τους υπολογισμούς των επόμενων ετών.

7.5 Διαδικασία ενίσχυσης της χωρητικότητας της μπαταρίας (Battery Augmentation)

Η σταδιακή μείωση της διαθέσιμης χωρητικότητας περιορίζει τη λειτουργική ικανότητα της εγκατάστασης και, συνεπώς, την ποσότητα ενέργειας που μπορεί να διακινηθεί στις αγορές. Για τον περιορισμό αυτής της επίδρασης ενσωματώνεται στο μοντέλο η δυνατότητα ενίσχυσης της χωρητικότητας της μπαταρίας.

Η διαδικασία ενεργοποιείται όταν η διαθέσιμη χωρητικότητα της μπαταρίας μειωθεί κάτω από το 80% της αρχικής ονομαστικής χωρητικότητας. Στην περίπτωση αυτή υπολογίζεται η απαιτούμενη πρόσθετη χωρητικότητα ώστε το σύστημα να επανέλθει στο προκαθορισμένο επίπεδο λειτουργίας.

Η νέα χωρητικότητα που προστίθεται ισούται με τη διαφορά μεταξύ της διαθέσιμης χωρητικότητας και του επιθυμητού επιπέδου λειτουργίας. Με τον τρόπο αυτό πραγματοποιείται στοχευμένη ενίσχυση της εγκατάστασης χωρίς πλήρη αντικατάσταση του συστήματος.

Το κόστος της ενίσχυσης υπολογίζεται με βάση την πρόσθετη χωρητικότητα και το μοναδιαίο κόστος εγκατάστασης, το οποίο θεωρείται ίσο με 75 €/kWh. Η αντίστοιχη δαπάνη καταγράφεται ως πρόσθετη επενδυτική εκροή στο έτος κατά το οποίο πραγματοποιείται και αφαιρείται από την ετήσια ταμειακή ροή.

Μετά την ολοκλήρωση της ενίσχυσης, η διαδικασία γήρανσης συνεχίζεται κανονικά για τα επόμενα έτη, με τη νέα διαθέσιμη χωρητικότητα να αποτελεί τη βάση των επόμενων υπολογισμών. Η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί κατά τη διάρκεια της δεκαετούς περιόδου, κάθε φορά που η διαθέσιμη χωρητικότητα υποχωρεί κάτω από το προκαθορισμένο όριο.

Με τον τρόπο αυτό το μοντέλο λαμβάνει υπόψη όχι μόνο τη φυσιολογική υποβάθμιση της μπαταρίας, αλλά και μία πιθανή στρατηγική διατήρησης της λειτουργικής της ικανότητας μέσω περιοδικών επενδύσεων ενίσχυσης.

7.6 Υπολογισμός των ετήσιων εσόδων και των ταμειακών ροών

Οι ετήσιες ταμειακές ροές αποτελούν το βασικό οικονομικό αποτέλεσμα του τεχνοοικονομικού μοντέλου και χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τον υπολογισμό των χρηματοοικονομικών δεικτών.

Ως βάση για το πρώτο έτος χρησιμοποιείται το ετήσιο καθαρό οικονομικό αποτέλεσμα που προέκυψε από την ετήσια προσομοίωση του προηγούμενου κεφαλαίου. Για τα επόμενα έτη, το αποτέλεσμα προσαρμόζεται σύμφωνα με τη διαθέσιμη ενεργειακή χωρητικότητα της μπαταρίας. Επομένως, η μείωση της χωρητικότητας λόγω γήρανσης οδηγεί σε αντίστοιχη μείωση της δυνατότητας δημιουργίας εσόδων.

Από τα ετήσια οικονομικά αποτελέσματα αφαιρούνται οι δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης, οι οποίες αντιστοιχούν στο 2% του αρχικού CAPEX. Στα έτη κατά τα οποία πραγματοποιείται ενίσχυση χωρητικότητας αφαιρείται επιπλέον το αντίστοιχο κόστος της ενίσχυσης.

Η πρώτη ταμειακή ροή της επένδυσης αντιστοιχεί στο αρχικό CAPEX και λαμβάνει αρνητική τιμή. Οι επόμενες ταμειακές ροές προκύπτουν από τη διαφορά μεταξύ των ετήσιων οικονομικών αποτελεσμάτων και των αντίστοιχων λειτουργικών και επενδυτικών δαπανών.

Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ο πίνακας των ετήσιων ταμειακών ροών για ολόκληρη τη δεκαετή περίοδο αξιολόγησης. Ο πίνακας αυτός αποτελεί τη βάση για τον υπολογισμό της NPV, του IRR και του ROI.

7.7 Υπολογισμός των χρηματοοικονομικών δεικτών αξιολόγησης

Η οικονομική βιωσιμότητα του έργου αξιολογείται με βάση τις ετήσιες καθαρές ταμειακές ροές και τρεις βασικούς χρηματοοικονομικούς δείκτες: την Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV), τον Εσωτερικό Βαθμό Απόδοσης (IRR) και τον Δείκτη Απόδοσης της Επένδυσης (ROI).

Οι τρεις δείκτες εξετάζουν διαφορετικές πλευρές της οικονομικής απόδοσης. Η NPV λαμβάνει υπόψη τη χρονική αξία του χρήματος, ο IRR εκφράζει την απόδοση που αντιστοιχεί σε μηδενική καθαρή παρούσα αξία, ενώ ο ROI αποτυπώνει τη συνολική οικονομική απόδοση σε σχέση με το αρχικό επενδυμένο κεφάλαιο.

7.7.1 Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value – NPV)

Η Καθαρή Παρούσα Αξία αποτελεί βασικό δείκτη αξιολόγησης της οικονομικής βιωσιμότητας μιας επένδυσης, καθώς λαμβάνει υπόψη τόσο το μέγεθος των ταμειακών ροών όσο και τη χρονική στιγμή κατά την οποία πραγματοποιούνται.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται προεξοφλητικό επιτόκιο 5%. Η αρχική επένδυση αποτελεί την πρώτη αρνητική ταμειακή ροή, ενώ οι μελλοντικές καθαρές ταμειακές ροές προεξοφλούνται στην παρούσα χρονική στιγμή και αθροίζονται.

Θετική NPV σημαίνει ότι, με βάση το επιλεγμένο προεξοφλητικό επιτόκιο, η επένδυση δημιουργεί αξία μεγαλύτερη από την απαιτούμενη απόδοση του επενδυτή. Αντίθετα, αρνητική NPV υποδηλώνει ότι οι προεξοφλημένες μελλοντικές ταμειακές ροές δεν επαρκούν για την κάλυψη του αρχικού επενδυτικού κόστους με την απαιτούμενη απόδοση.

7.7.2 Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (Internal Rate of Return – IRR)

Ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης εκφράζει το προεξοφλητικό επιτόκιο για το οποίο η Καθαρή Παρούσα Αξία της επένδυσης ισούται με μηδέν.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας ο IRR υπολογίζεται από το σύνολο των ετήσιων καθαρών ταμειακών ροών του τεχνοοικονομικού μοντέλου. Η τιμή του μπορεί να συγκριθεί με το προεξοφλητικό επιτόκιο που έχει επιλεγεί για την αξιολόγηση της επένδυσης.

Υψηλότερη τιμή του IRR υποδηλώνει μεγαλύτερη απόδοση του επενδυμένου κεφαλαίου, ενώ η σύγκρισή του με το απαιτούμενο ποσοστό απόδοσης παρέχει ένδειξη σχετικά με την οικονομική ελκυστικότητα του έργου.

7.7.3 Δείκτης Απόδοσης της Επένδυσης (Return on Investment – ROI)

Ο Δείκτης Απόδοσης της Επένδυσης χρησιμοποιείται για την αποτίμηση της συνολικής οικονομικής απόδοσης του έργου σε σχέση με το αρχικό επενδυτικό κόστος.

Στην παρούσα εργασία ο ROI υπολογίζεται με βάση το συνολικό οικονομικό αποτέλεσμα της δεκαετούς περιόδου αξιολόγησης και το αρχικό κόστος εγκατάστασης. Ο δείκτης εκφράζεται ως ποσοστό και παρέχει μία συνοπτική εικόνα της κερδοφορίας της επένδυσης σε σχέση με το κεφάλαιο που απαιτήθηκε για την υλοποίησή της.

Η παράλληλη χρήση των NPV, IRR και ROI επιτρέπει την αξιολόγηση της επένδυσης τόσο από την άποψη της χρονικής αξίας του χρήματος όσο και από την άποψη της συνολικής οικονομικής απόδοσης.

7.8 Σύνοψη της τεχνοοικονομικής αξιολόγησης

Στο παρόν κεφάλαιο αναπτύχθηκε το τεχνοοικονομικό μοντέλο αξιολόγησης του συστήματος αποθήκευσης σε χρονικό ορίζοντα δέκα ετών. Ως βάση χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της ετήσιας βελτιστοποίησης και τα τεχνικοοικονομικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης. Η μελλοντική εξέλιξη της διαθέσιμης χωρητικότητας υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη την ημερολογιακή και την κυκλική υποβάθμιση, ενώ ενσωματώθηκε και μηχανισμός ενίσχυσης της χωρητικότητας της μπαταρίας για τη διατήρηση της λειτουργικής ικανότητας της εγκατάστασης.

Με βάση την εξέλιξη της χωρητικότητας υπολογίστηκαν τα ετήσια οικονομικά αποτελέσματα, οι λειτουργικές και επενδυτικές δαπάνες και οι καθαρές ταμειακές ροές. Τέλος, η οικονομική βιωσιμότητα του έργου αξιολογήθηκε μέσω των δεικτών NPV, IRR και ROI. Τα τελικά αποτελέσματα της τεχνοοικονομικής ανάλυσης και η οικονομική τους ερμηνεία παρουσιάζονται σε επόμενο κεφάλαιο της εργασίας.

8. Αποτελέσματα προβλέψεων

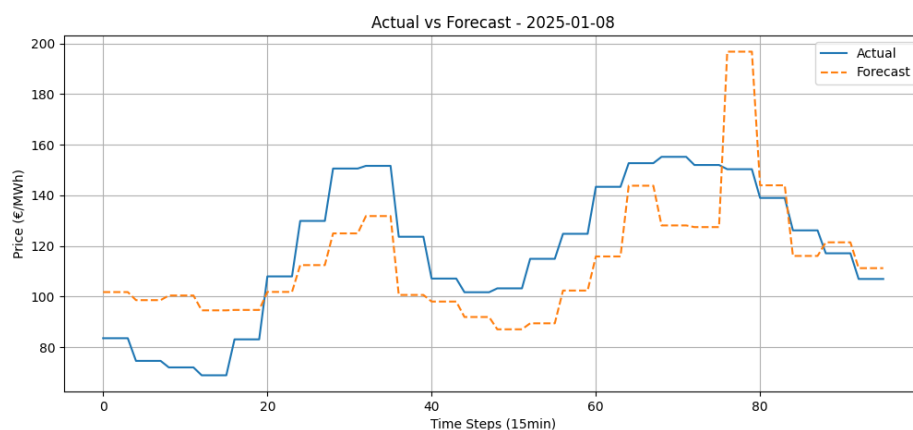
8.1 Συγκριτικά αποτελέσματα DAM

Τρέχοντας τον κώδικα με τις προβλέψεις της day ahead market παίρνουμε τις παρακάτω μετρικές και τα διαγράμματα για 2 τυχαίες ημέρες μέσα στο έτος.

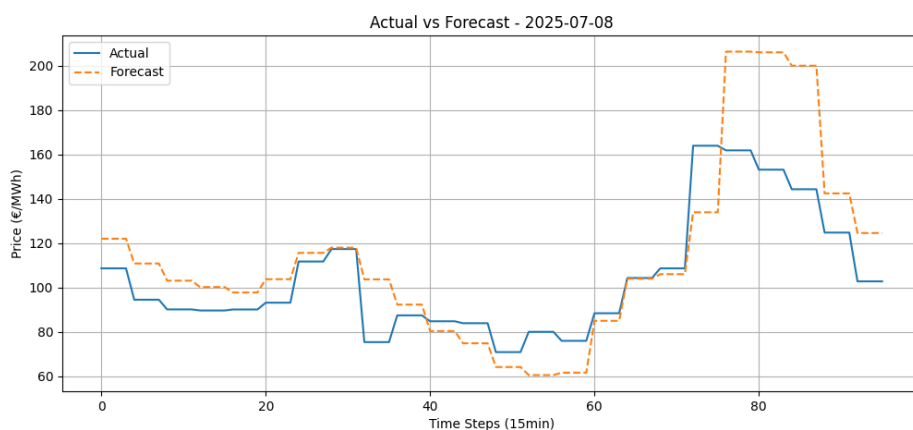
DAY AHEAD METRICS

MAE: 26.06902251149895

RMSE: 38.5651904653774



Εικόνα 8.1 Συγκριτικό διάγραμμα DAM τιμών πρόβλεψης με πραγματικές (2025/01/08)



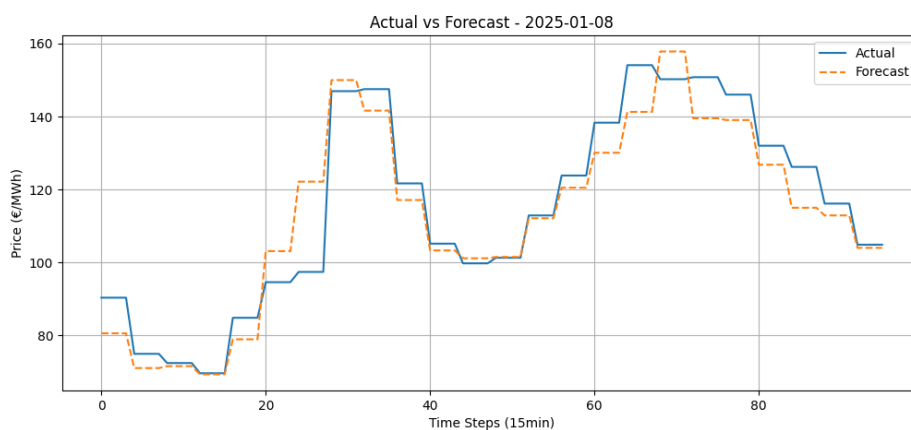
Εικόνα 8.2 Συγκριτικό διάγραμμα DAM τιμών πρόβλεψης με πραγματικές (2025/07/08)

8.2 Συγκριτικά αποτελέσματα IDA1

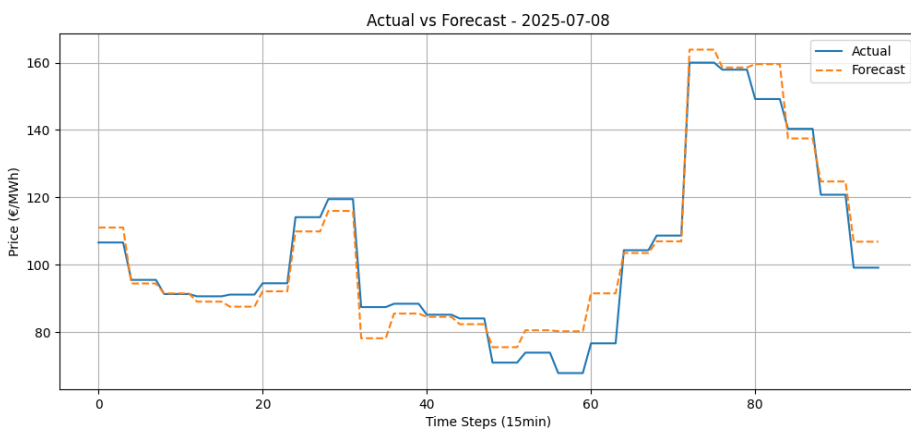
IDA1 METRICS

MAE : 8.903061266886203

RMSE: 17.329994296448003



Εικόνα 8.3 Συγκριτικό διάγραμμα IDA1 τιμών πρόβλεψης με πραγματικές (2025/01/08)



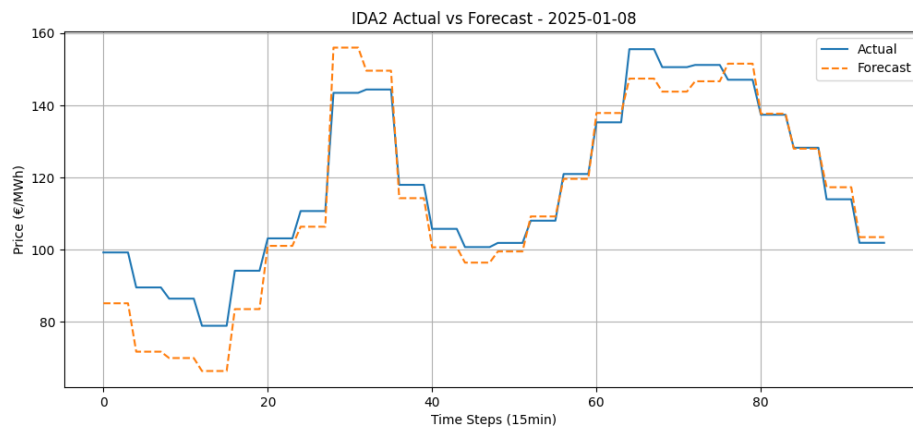
Εικόνα 8.4 Συγκριτικό διάγραμμα IDA1 τιμών πρόβλεψης με πραγματικές (2025/07/08)

8.3 Συγκριτικά αποτελέσματα IDA2

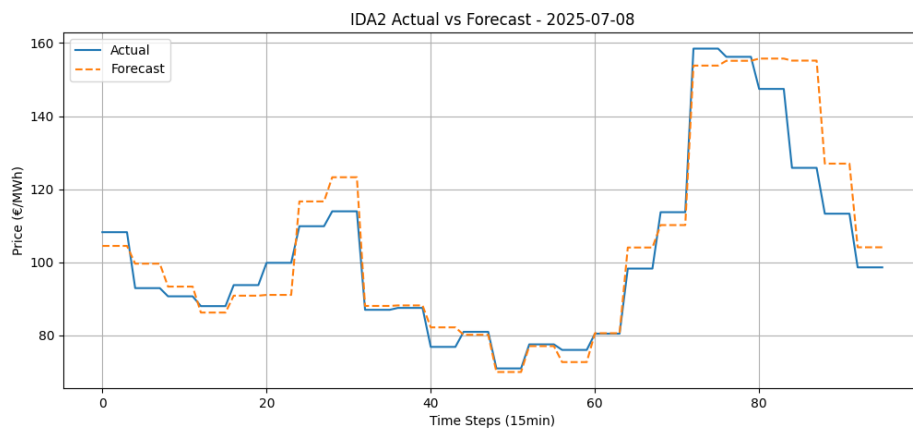
IDA2 METRICS

MAE : 12.119371997435522

RMSE: 20.852580391822606



Εικόνα 8.5 Συγκριτικό διάγραμμα IDA2 τιμών πρόβλεψης με πραγματικές (2025/01/08)



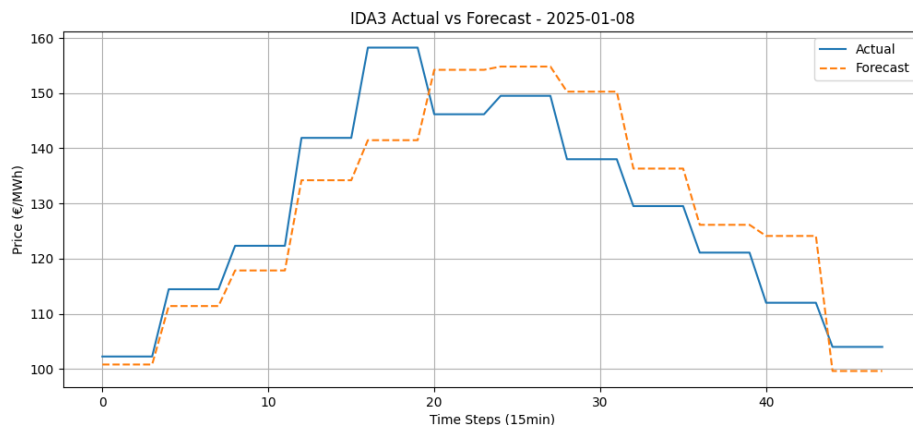
Εικόνα 8.6 Συγκριτικό διάγραμμα IDA2 τιμών πρόβλεψης με πραγματικές (2025/07/08)

8.4 Συγκριτικά αποτελέσματα IDA3

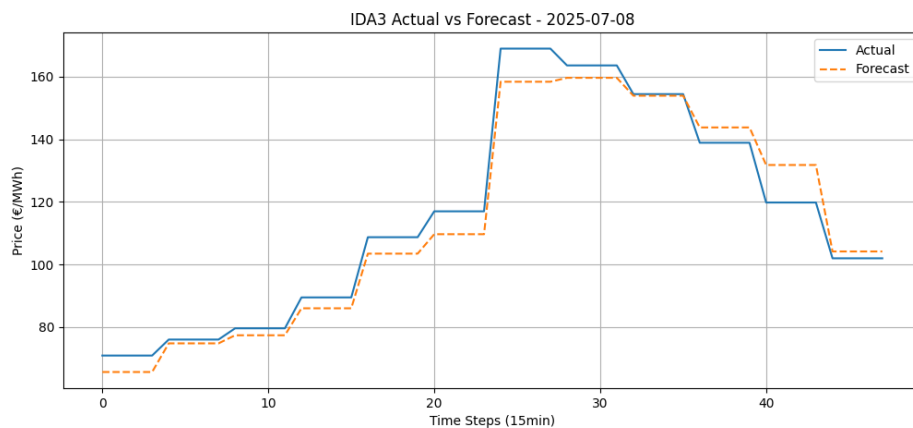
IDA3 METRICS

MAE : 14.385349440492913

RMSE: 24.025063958277844



Εικόνα 8.7 Συγκριτικό διάγραμμα IDA3 τιμών πρόβλεψης με πραγματικές (2025/01/08)



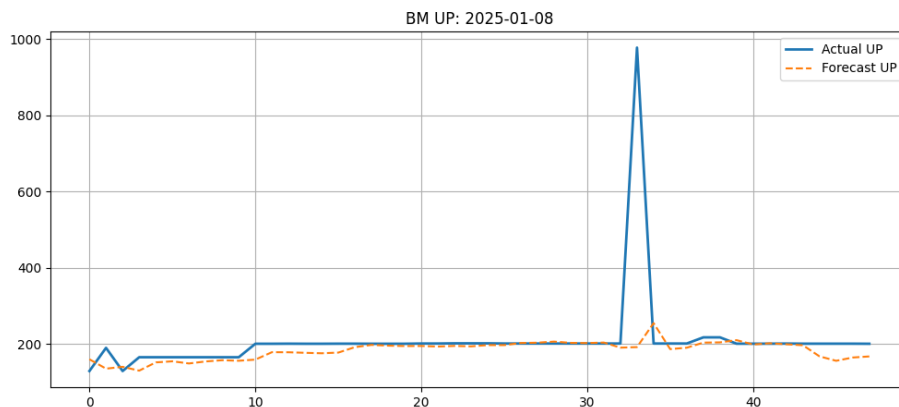
Εικόνα 8.8 Συγκριτικό διάγραμμα IDA3 τιμών πρόβλεψης με πραγματικές (2025/07/08)

8.5 Συγκριτικά αποτελέσματα BM

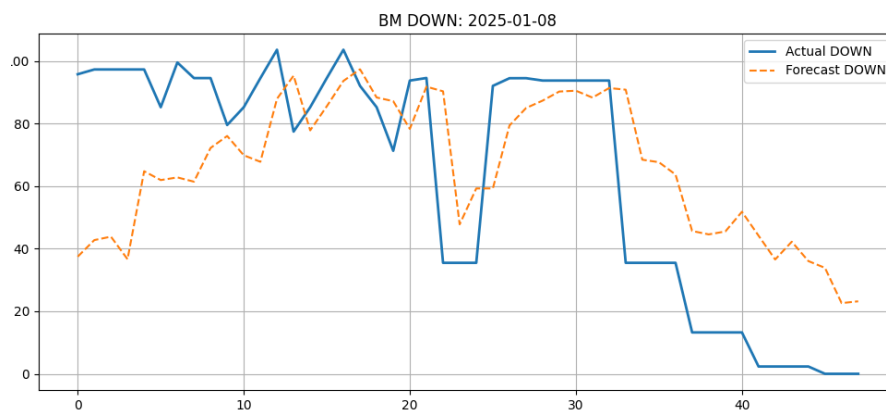
BM METRICS

UP mae: 45.74078062492043 rmse: 115.16790127872315

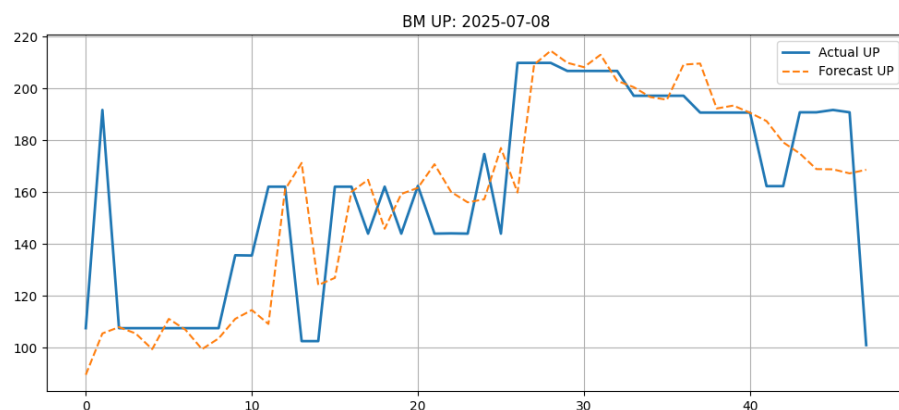
DOWN mae: 14.982621059626865 rmse: 23.708659402461052



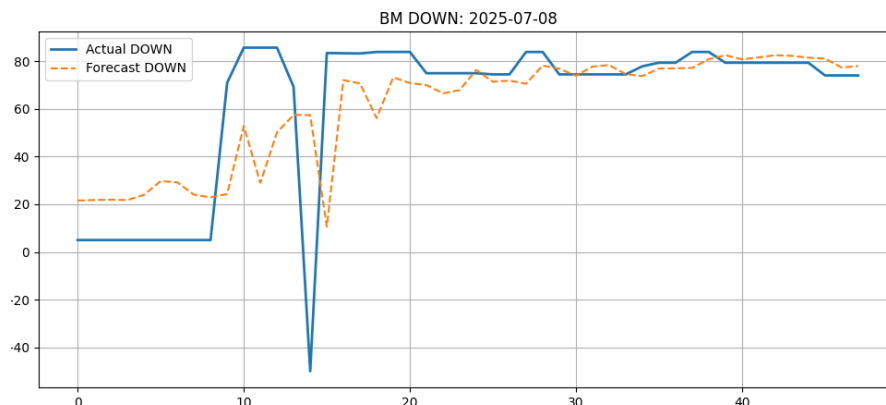
Εικόνα 8.9 Συγκριτικό διάγραμμα BM UP τιμών πρόβλεψης με πραγματικές (2025/01/08)



Εικόνα 8.10 Συγκριτικό διάγραμμα BM DOWN τιμών πρόβλεψης με πραγματικές (2025/01/08)



Εικόνα 8.11 Συγκριτικό διάγραμμα BM UP τιμών πρόβλεψης με πραγματικές (2025/07/08)



Εικόνα 8.12 Συγκριτικό διάγραμμα BM DOWN τιμών πρόβλεψης με πραγματικές (2025/07/08)

8.6 Αξιολόγηση μοντέλων πρόβλεψης

Τα αποτελέσματα των μοντέλων πρόβλεψης αξιολογήθηκαν με βάση τις μετρικές Mean Absolute Error (MAE) και Root Mean Square Error (RMSE), οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως στην αξιολόγηση μοντέλων πρόβλεψης χρονοσειρών. Το MAE εκφράζει τη μέση απόλυτη απόκλιση μεταξύ πραγματικών και προβλεπόμενων τιμών, ενώ το RMSE δίνει μεγαλύτερη βαρύτητα στις μεγάλες αποκλίσεις, καθιστώντας το ιδιαίτερα χρήσιμο σε αγορές ηλεκτρικής ενέργειας όπου εμφανίζονται έντονες διακυμάνσεις και αιχμές τιμών.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι το μοντέλο παρουσιάζει την υψηλότερη ακρίβεια στις ενδοημερήσιες δημοπρασίες (IDA). Συγκεκριμένα, η IDA1 εμφανίζει την καλύτερη συνολική απόδοση με $MAE = 8.90 \text{ €/MWh}$ και $RMSE = 17.33 \text{ €/MWh}$, ακολουθούμενη από την IDA2 ($MAE = 12.12 \text{ €/MWh}$, $RMSE = 20.85 \text{ €/MWh}$) και την IDA3 ($MAE = 14.38 \text{ €/MWh}$, $RMSE = 24.02 \text{ €/MWh}$). Η σταδιακή αύξηση του σφάλματος από την IDA1 προς την IDA3 είναι αναμενόμενη, καθώς οι μεταγενέστερες ενδοημερήσιες δημοπρασίες επηρεάζονται περισσότερο από απρόβλεπτες μεταβολές στη ζήτηση, στην παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και στις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος.

Αντίθετα, στην Αγορά Επόμενης Ημέρας (DAM) το μοντέλο εμφανίζει μεγαλύτερο σφάλμα ($MAE = 26.07 \text{ €/MWh}$, $RMSE = 38.56 \text{ €/MWh}$). Η επίδοση αυτή σχετίζεται κυρίως με τη μεγαλύτερη χρονική απόσταση μεταξύ της στιγμής υποβολής της πρόβλεψης και της πραγματικής παράδοσης της ενέργειας.

Όσον αφορά την Αγορά Εξισορρόπησης (Balancing Market – BM), παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των δύο κατευθύνσεων ενεργοποίησης. Οι προβλέψεις για την καθοδική εξισορρόπηση (Down Regulation) παρουσιάζουν ικανοποιητική απόδοση ($MAE = 14.98 \text{ €/MWh}$, $RMSE = 23.70 \text{ €/MWh}$), ενώ η ανοδική εξισορρόπηση (Up Regulation) εμφανίζει αισθητά υψηλότερα σφάλματα ($MAE = 45.74 \text{ €/MWh}$, $RMSE = 115.16 \text{ €/MWh}$). Η διαφορά αυτή αποδίδεται στη φύση της αγοράς εξισορρόπησης, όπου οι ανοδικές ενεργοποιήσεις χαρακτηρίζονται από έντονες αιχμές τιμών, περιορισμένη ρευστότητα και αυξημένη μεταβλητότητα, στοιχεία που δυσχεραίνουν σημαντικά την πρόβλεψή τους.

Συνολικά, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία επιτυγχάνει ικανοποιητική προγνωστική ικανότητα στις περισσότερες αγορές, με τις καλύτερες επιδόσεις να καταγράφονται στις ενδοημερήσιες δημοπρασίες και τις μεγαλύτερες δυσκολίες να εμφανίζονται στην αγορά εξισορρόπησης, ιδιαίτερα στην ανοδική ενεργοποίηση. Τα ευρήματα αυτά είναι συνεπή με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε αγοράς και επιβεβαιώνουν ότι η αυξανόμενη αβεβαιότητα και η ένταση των διακυμάνσεων επηρεάζουν άμεσα την ακρίβεια των μοντέλων πρόβλεψης. Επιπλέον, η μετάβαση των αγορών DAM και IDA σε δεκαπεντάλεπτη χρονική ανάλυση από την 1η Οκτωβρίου 2025 αποτελεί έναν δομικό μετασχηματισμό ο οποίος εξηγεί μέρος της απόκλισης μεταξύ προβλεπόμενων και πραγματικών τιμών κατά το τελευταίο τρίμηνο του έτους και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Σε γενικές γραμμές, η πρόβλεψη των τιμών στην ελληνική αγορά είναι πιο δύσκολη από ό,τι σε μεγαλύτερες ευρωπαϊκές αγορές, γιατί η αγορά είναι μικρότερη και πιο «νευρική». Αυτό σημαίνει ότι οι τιμές μπορούν να επηρεαστούν πιο έντονα από ξαφνικές αλλαγές, όπως μια απότομη πτώση της αιολικής παραγωγής, ένα λάθος στην πρόβλεψη της ζήτησης ή την ανάγκη ενεργοποίησης μονάδων στην αγορά εξισορρόπησης. Για τον λόγο αυτό, οι ελληνικές DAM, IDA και ιδιαίτερα η BM εμφανίζουν μεγαλύτερη μεταβλητότητα και είναι πιο δύσκολο να προβλεφθούν με την ίδια ακρίβεια όπως σε πιο ώριμες και πιο σταθερές αγορές.

9. Αποτελέσματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης

9.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια για τη λειτουργία ενός συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στις διαδοχικές αγορές της ελληνικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Η αξιολόγηση πραγματοποιείται για το χρονικό διάστημα από 1 Ιανουαρίου έως 30 Δεκεμβρίου 2025 και βασίζεται σε δύο διαφορετικά σενάρια λειτουργίας.

Στο Realistic scenario, η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τις προβλέψεις των τιμών των αγορών, ενώ η οικονομική εκκαθάριση βασίζεται στις πραγματικές ιστορικές τιμές. Αντίθετα, στο Deterministic Scenario θεωρείται ότι οι πραγματικές τιμές είναι γνωστές εκ των προτέρων και χρησιμοποιούνται τόσο κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης όσο και κατά την οικονομική εκκαθάριση. Το δεύτερο σενάριο δεν αντιστοιχεί σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, αλλά χρησιμοποιείται ως θεωρητικό σημείο αναφοράς για την εκτίμηση της μέγιστης δυνατής οικονομικής απόδοσης του συστήματος.

Για κάθε σενάριο παρουσιάζονται τα συνολικά οικονομικά αποτελέσματα, η μηνιαία κατανομή του καθαρού οικονομικού αποτελέσματος και οι βασικοί δείκτες αξιοποίησης της μπαταρίας. Στο τέλος του κεφαλαίου πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση των δύο σεναρίων με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης της ακρίβειας των προβλέψεων στην οικονομική απόδοση του συστήματος.

9.2 Αποτελέσματα του Realistic scenario

9.2.1 Συνολικά αποτελέσματα βελτιστοποίησης

Το Realistic scenario προσομοιώνει τις συνθήκες λειτουργίας ενός συστήματος αποθήκευσης, όπου οι αποφάσεις φόρτισης και εκφόρτισης βασίζονται στις διαθέσιμες προβλέψεις των τιμών των αγορών, ενώ η οικονομική εκκαθάριση πραγματοποιείται με τις πραγματικές ιστορικές τιμές.

Τα συνολικά αποτελέσματα της ετήσιας βελτιστοποίησης παρουσιάζονται παρακάτω:

Total DAM Profit : 3,707,475.57 €

Total IDA1 Profit : 816,143.46 €

Total IDA2 Profit : 26,660.01 €

Total IDA3 Profit : -19,739.70 €

Total Net Profit : 3,986,512.38 €

Total Throughput : 116,059.09 MWh

Equivalent Full Cycles : 725.37

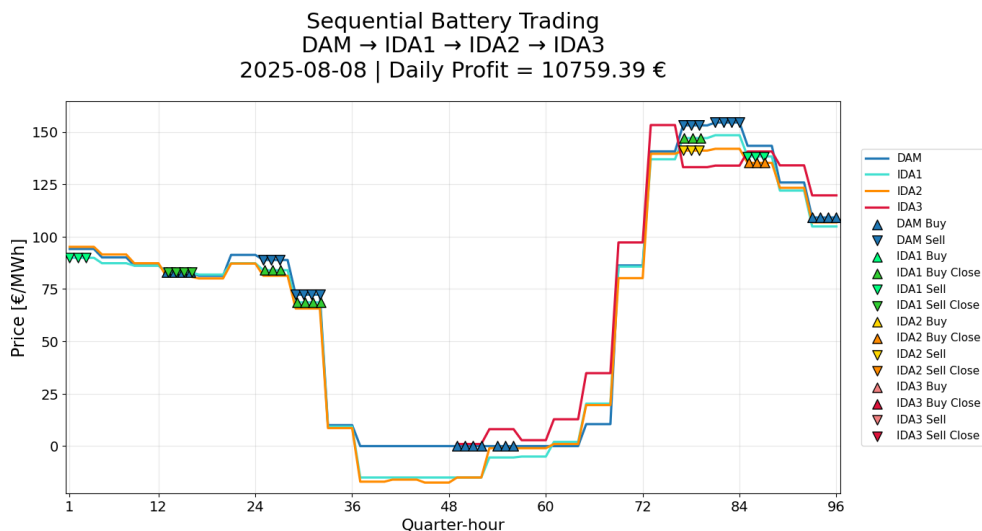
Τα παραπάνω αποτελέσματα δείχνουν ότι η μεγαλύτερη συνεισφορά στα συνολικά έσοδα προέρχεται από την Day-Ahead Market (DAM), η οποία αποφέρει περίπου 3,7 εκατ. €. Σημαντική είναι επίσης η συνεισφορά της πρώτης ενδοημερήσιας δημοπρασίας IDA1, με περίπου 816 χιλ. €, ενώ η συνεισφορά των IDA2 και IDA3 είναι αισθητά μικρότερη. Ειδικότερα, η IDA3 παρουσιάζει μικρή αρνητική οικονομική συνεισφορά, ύψους περίπου -19,7 χιλ. €.

Το συνολικό μικτό οικονομικό αποτέλεσμα από τις συναλλαγές ανέρχεται σε 4,530,539.34€, ενώ μετά την αφαίρεση των σχετικών επιβαρύνσεων προκύπτει καθαρό ετήσιο κέρδος 3,986,512.38 €.

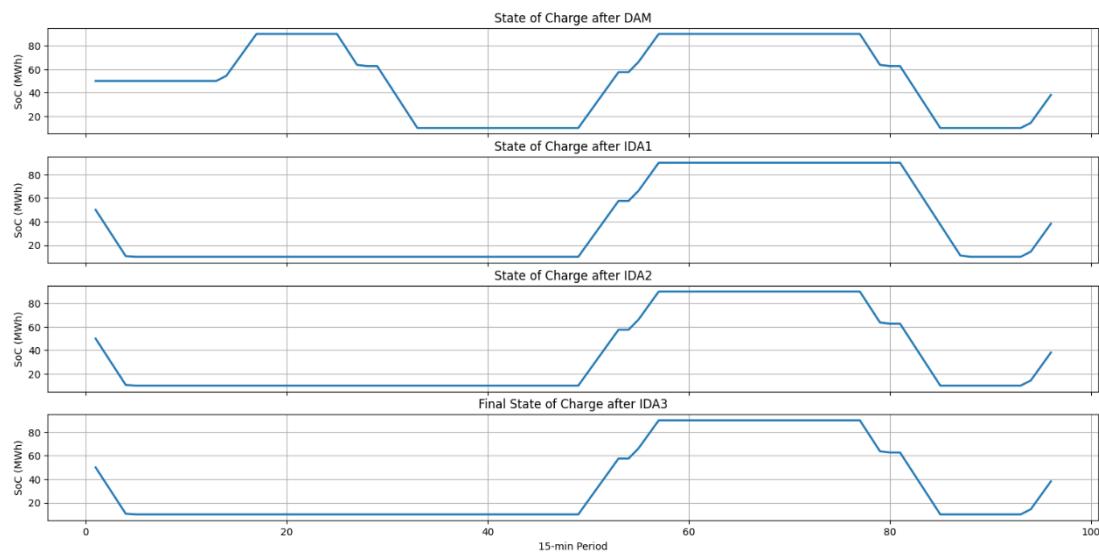
Παράλληλα, η συνολική ενεργειακή διακίνηση της μπαταρίας ανέρχεται σε 116,059.09 MWh, που αντιστοιχεί σε 725.37 ισοδύναμους πλήρεις κύκλους λειτουργίας κατά τη διάρκεια του έτους.

Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι, ακόμη και όταν οι αποφάσεις λαμβάνονται με βάση προβλεπόμενες και όχι πραγματικές τιμές, η διαδοχική συμμετοχή στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικό θετικό οικονομικό αποτέλεσμα.

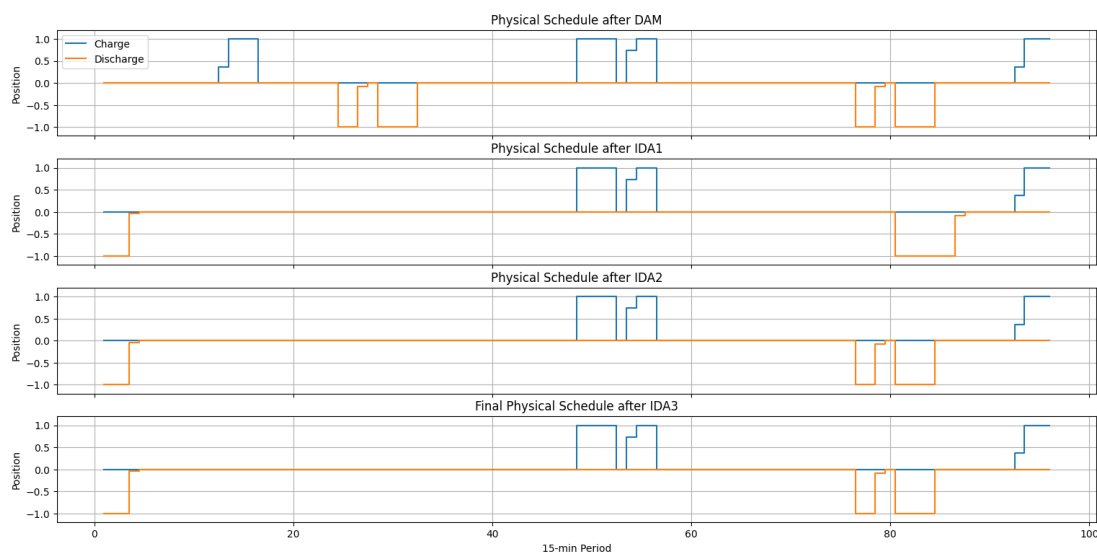
Επίσης παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για μία ενδεικτική ημέρα βελτιστοποίησης.



Εικόνα 9.1 Διάγραμμα optimization Realistic scenario (2025/10/21)



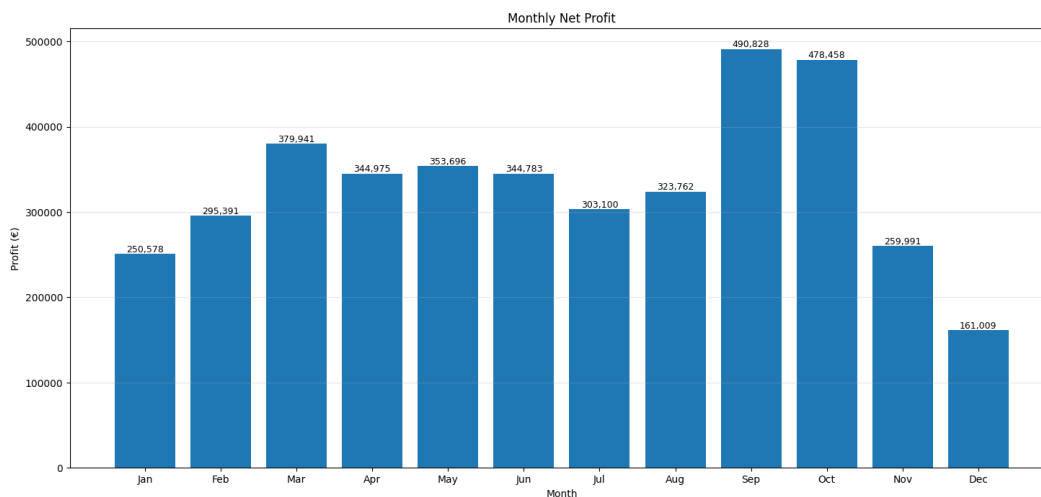
Εικόνα 9.2 Διάγραμμα state of charge Realistic scenario (2025/10/21)



Εικόνα 9.3 Διάγραμμα του τελικού προγράμματος λειτουργίας της μπαταρίας. Realistic scenario (2025/10/21)

9.2.2 Μηνιαία κατανομή του καθαρού οικονομικού αποτελέσματος

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η μηνιαία κατανομή του καθαρού οικονομικού αποτελέσματος για το Realistic scenario.



Εικόνα 9.4 Μηνιαία κατανομή του καθαρού οικονομικού αποτελέσματος. Realistic scenario

Από το διάγραμμα προκύπτει ότι το σύστημα παρουσιάζει θετικό καθαρό οικονομικό αποτέλεσμα σε όλους τους μήνες του έτους. Ωστόσο, παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις στην κερδοφορία μεταξύ των επιμέρους μηνών.

Η υψηλότερη μηνιαία κερδοφορία καταγράφεται τον Σεπτέμβριο, με καθαρό κέρδος περίπου 490,8 χιλ. €, ενώ πολύ κοντά βρίσκεται ο Οκτώβριος, με περίπου 478,5 χιλ. €. Ακολουθούν ο Μάρτιος, με περίπου 379,9 χιλ. € και ο Μάιος με 353,7 χιλ. €

Αντίθετα, η χαμηλότερη μηνιαία κερδοφορία εμφανίζεται τον Δεκέμβριο, όπου το καθαρό αποτέλεσμα περιορίζεται περίπου στις 161 χιλ. €. Χαμηλότερες αποδόσεις σε σχέση με το μεγαλύτερο μέρος του έτους εμφανίζονται επίσης τον Ιανουάριο, με περίπου 250 χιλ. €, και τον Νοέμβριο, με περίπου 260 χιλ. €.

Συνολικά, η μηνιαία κατανομή δείχνει ότι η οικονομική απόδοση του συστήματος δεν παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια του έτους, αλλά επηρεάζεται από τη χρονική μεταβολή των συνθηκών της αγοράς και τις διαθέσιμες ευκαιρίες ενεργειακού αρμπιτράζ. Ιδιαίτερα αυξημένες αποδόσεις παρατηρούνται κατά τους μήνες Σεπτέμβριο και Οκτώβριο, ενώ προς το τέλος του έτους η κερδοφορία εμφανίζει σημαντική υποχώρηση.

Το γεγονός ότι το καθαρό αποτέλεσμα παραμένει θετικό σε όλους τους μήνες αποτελεί ένδειξη ότι η στρατηγική διατηρεί θετική οικονομική απόδοση ακόμη και όταν οι αποφάσεις βασίζονται σε προβλέψεις και όχι σε πλήρη γνώση των μελλοντικών τιμών.

9.3 Αποτελέσματα του Deterministic Scenario

9.3.1 Συνολικά αποτελέσματα βελτιστοποίησης

Το Deterministic Scenario χρησιμοποιείται ως θεωρητικό σημείο αναφοράς για την αξιολόγηση της οικονομικής απόδοσης του συστήματος σε συνθήκες πλήρους γνώσης των τιμών. Στο συγκεκριμένο σενάριο θεωρείται ότι οι πραγματικές τιμές των αγορών είναι γνωστές εκ των προτέρων και χρησιμοποιούνται τόσο κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης όσο και κατά την οικονομική εκκαθάριση.

Τα συνολικά αποτελέσματα της ετήσιας βελτιστοποίησης είναι:

Total DAM Profit : 5,031,873.04 €

Total IDA1 Profit : 112,044.71 €

Total IDA2 Profit : 315,686.47 €

Total IDA3 Profit : 117,491.21 €

Total Net Profit : 4,983,036.92 €

Total Throughput : 126,732.48 MWh

Equivalent Full Cycles : 792.08

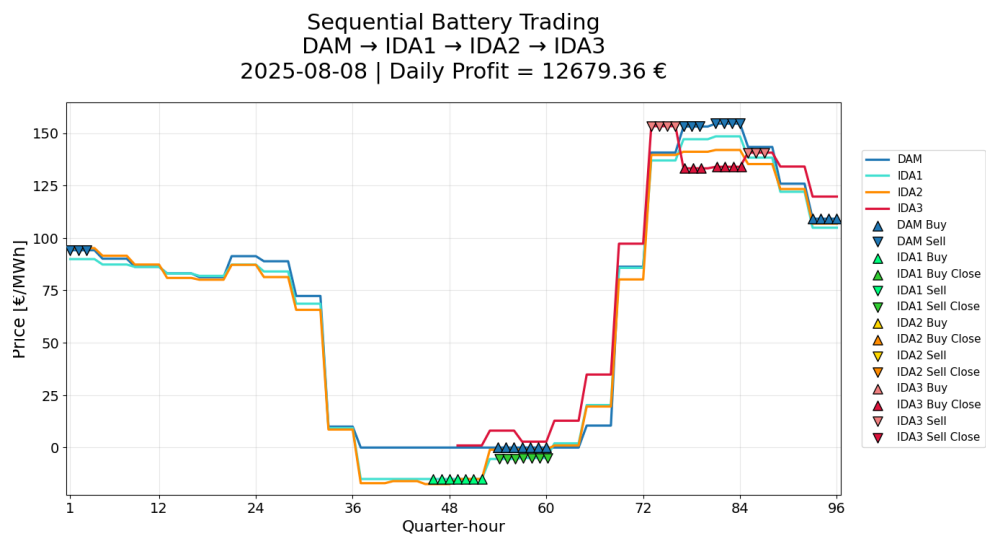
Η DAM αποτελεί και στο Deterministic Scenario τη σημαντικότερη πηγή οικονομικών εσόδων, με συνολικό κέρδος περίπου 5 εκατ. €. Η IDA2 και η IDA3 παρουσιάζουν επίσης θετική συνεισφορά, ενώ η συνεισφορά της IDA1 είναι αισθητά μικρότερη σε σχέση με το Realistic Scenario.

Το συνολικό μικτό οικονομικό αποτέλεσμα ανέρχεται σε 5,577,095.43 €, ενώ το τελικό καθαρό οικονομικό αποτέλεσμα ανέρχεται σε 4,983,036.92 €.

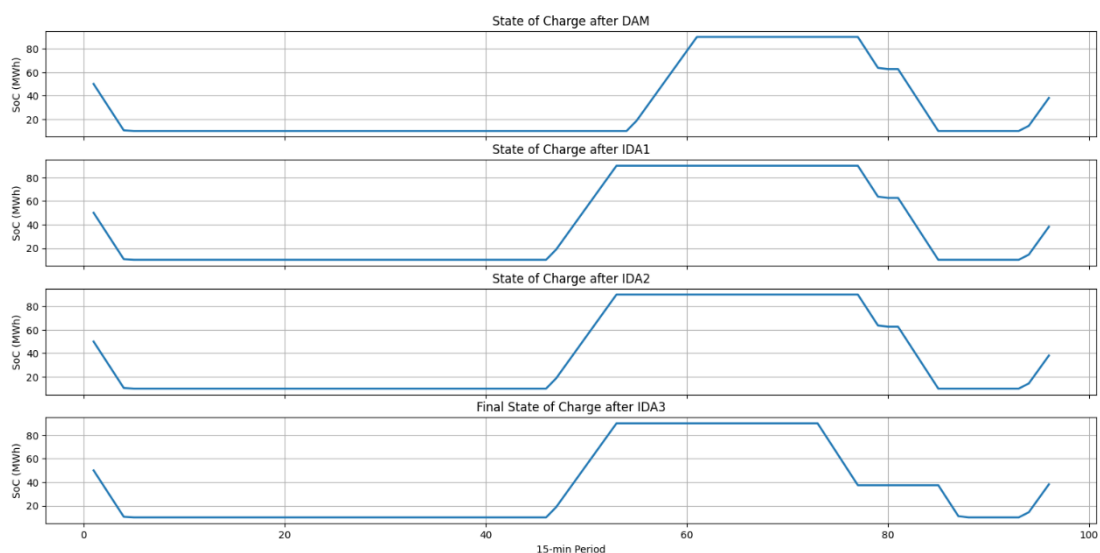
Η συνολική ενεργειακή διακίνηση ανέρχεται σε 126,732.48 MWh, ενώ οι ισοδύναμοι πλήρεις κύκλοι ανέρχονται σε 792.08.

Σε σύγκριση με το Realistic Scenario, παρατηρείται υψηλότερη αξιοποίηση της μπαταρίας, καθώς τόσο το συνολικό throughput όσο και οι ισοδύναμοι πλήρεις κύκλοι είναι αυξημένοι. Το αποτέλεσμα αυτό είναι συμβατό με το γεγονός ότι η πλήρης γνώση των μελλοντικών τιμών επιτρέπει στον optimizer να εντοπίζει περισσότερες και αποτελεσματικότερες ευκαιρίες φόρτισης και εκφόρτισης.

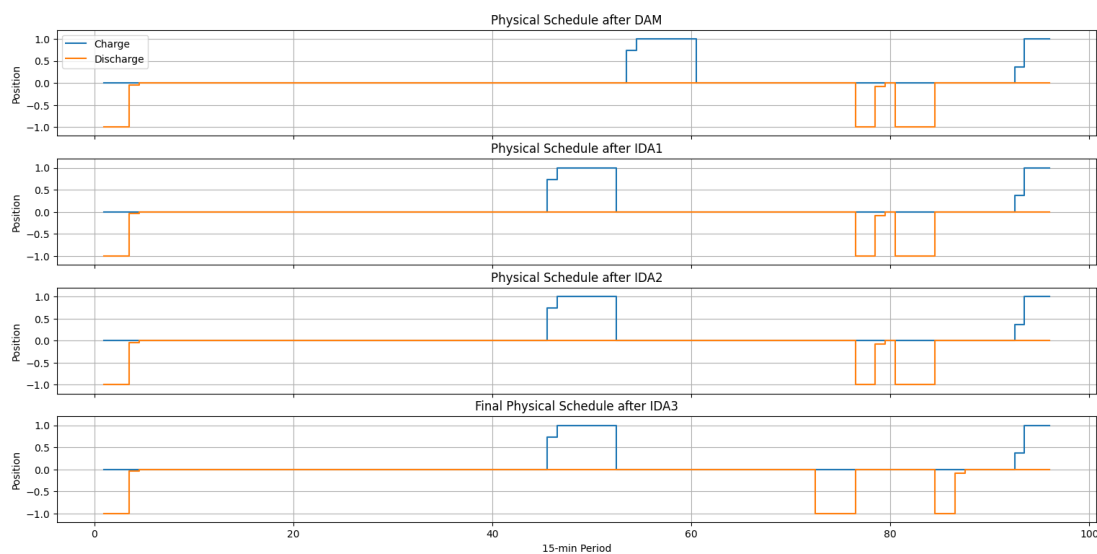
Επίσης παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για μία ενδεικτική ημέρα βελτιστοποίησης.



Εικόνα 9.5 Διάγραμμα optimization Deterministic scenario (2025/10/21)



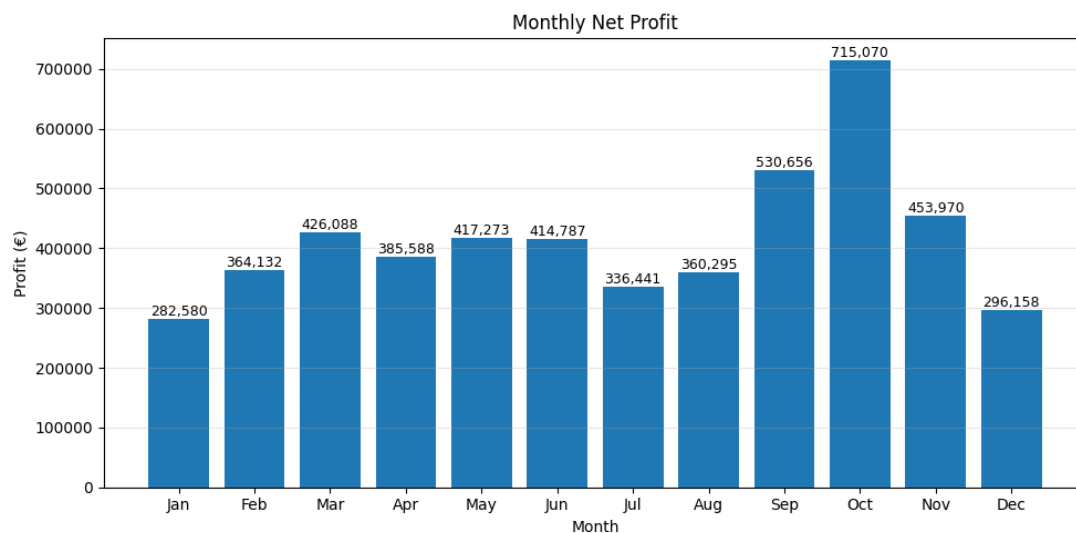
Εικόνα 9.6 Διάγραμμα state of charge Deterministic scenario (2025/10/21)



Εικόνα 9.7 Διάγραμμα του τελικού προγράμματος λειτουργίας της μπαταρίας. Deterministic scenario (2025/10/21)

9.3.2 Μηνιαία κατανομή του καθαρού οικονομικού αποτελέσματος

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η μηνιαία κατανομή του καθαρού οικονομικού αποτελέσματος για το Deterministic Scenario.



Εικόνα 9.8 Μηνιαία κατανομή του καθαρού οικονομικού αποτελέσματος. Deterministic scenario

Και στο συγκεκριμένο σενάριο παρατηρείται θετικό καθαρό οικονομικό αποτέλεσμα σε όλους τους μήνες του έτους, ωστόσο η συνολική κερδοφορία είναι υψηλότερη και οι μηνιαίες διακυμάνσεις εντονότερες.

Η υψηλότερη μηνιαία κερδοφορία καταγράφεται τον Οκτώβριο, με περίπου 715 χιλ. €, αποτελώντας τον μήνα με τη μεγαλύτερη οικονομική απόδοση ολόκληρου του έτους. Ακολουθεί ο Σεπτέμβριος, με περίπου 531 χιλ. €, ενώ σημαντική κερδοφορία παρατηρείται επίσης τον Νοέμβριο, με περίπου 454 χιλ. €, και τον Μάρτιο, με περίπου 426 χιλ. €.

Αντίθετα, η χαμηλότερη μηνιαία κερδοφορία εμφανίζεται τον Ιανουάριο, με περίπου 283 χιλ. €, ενώ πολύ κοντά βρίσκεται ο Δεκέμβριος, με περίπου 296 χιλ. €. Οι μήνες Ιούλιος και Αύγουστος εμφανίζουν επίσης σχετικά χαμηλότερες αποδόσεις, με περίπου 336 και 360 χιλ. €, αντίστοιχα.

Η σημαντικά υψηλότερη απόδοση κατά τον Οκτώβριο υποδηλώνει την ύπαρξη ιδιαίτερα ευνοϊκών συνθηκών για την αξιοποίηση των διαφορών των τιμών μέσω ενεργειακού αρμπιτράζ. Παράλληλα, η θετική κερδοφορία καθ' όλη τη διάρκεια του έτους δείχνει ότι, υπό ιδανικές συνθήκες πληροφόρησης, το σύστημα μπορεί να αξιοποιεί αποτελεσματικά τις χρονικές διακυμάνσεις των τιμών.

Σε αντίθεση με το Realistic Scenario, όπου η βέλτιστη απόφαση επηρεάζεται από τα σφάλματα πρόβλεψης, στο Deterministic Scenario ο αλγόριθμος έχει πλήρη πληροφόρηση για τις μελλοντικές τιμές. Ως αποτέλεσμα, μπορεί να επιλέγει με μεγαλύτερη ακρίβεια τα χρονικά σημεία φόρτισης και εκφόρτισης και να αποφεύγει λανθασμένες τοποθετήσεις της μπαταρίας.

9.4 Σύγκριση της συνεισφοράς των επιμέρους αγορών

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων δείχνει ότι η Day-Ahead Market (DAM) αποτελεί τη σημαντικότερη πηγή εσόδων και στα δύο σενάρια.

Στο Deterministic Scenario τα συνολικά κέρδη από την DAM ανέρχονται σε 5,031,873.04 €, ενώ στο Realistic Scenario διαμορφώνονται σε 3,707,475.57 €. Η διαφορά των περίπου 1,3 εκατ. € καταδεικνύει τη σημαντική επίδραση της γνώσης των πραγματικών μελλοντικών τιμών στις αποφάσεις του αρχικού ημερήσιου προγραμματισμού.

Η IDA1 παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά μεταξύ των δύο σεναρίων. Στο Realistic Scenario αποφέρει 816,143.46 €, ενώ στο Deterministic Scenario μόλις 112,044.71 €.

Η διαφοροποίηση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική και δείχνει ότι η πλήρης γνώση των τιμών δεν οδηγεί απαραίτητα σε μεγαλύτερο επιμέρους κέρδος σε κάθε αγορά ξεχωριστά. Στο Deterministic Scenario, οι βέλτιστες αποφάσεις που λαμβάνονται ήδη στο στάδιο της DAM μπορούν να περιορίσουν τις πρόσθετες δυνατότητες αναπροσαρμογής στις επόμενες αγορές. Επομένως, η αξιολόγηση των επιμέρους αγορών θα πρέπει να γίνεται στο πλαίσιο της συνολικής διαδοχικής στρατηγικής και όχι μεμονωμένα.

Η IDA2 παρουσιάζει συνολικό κέρδος 26,660.01 € στο Realistic Scenario και 315,686.47 € στο Deterministic Scenario. Η αυξημένη συνεισφορά της IDA2 στο Deterministic Scenario υποδηλώνει ότι η ακριβέστερη γνώση των τιμών επιτρέπει την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση πρόσθετων ευκαιριών αναπροσαρμογής του προγράμματος.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η IDA3. Στο Realistic Scenario η αγορά εμφανίζει μικρή ζημία ύψους 19,739.70 €, ενώ στο Deterministic Scenario αποφέρει κέρδος 117,491.21 €.

Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι η τελευταία ενδοημερήσια δημοπρασία είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στην αβεβαιότητα των προβλέψεων. Επειδή η IDA3 αποτελεί το τελευταίο στάδιο της διαδοχικής διαδικασίας, οι διαθέσιμες δυνατότητες τροποποίησης του προγράμματος είναι πιο περιορισμένες. Επομένως, σφάλματα στις προβλέψεις μπορούν να οδηγήσουν σε αποφάσεις οι οποίες, όταν εκκαθαριστούν με τις πραγματικές τιμές, δεν αποφέρουν θετικό οικονομικό αποτέλεσμα.

Συνολικά, τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι η DAM αποτελεί τον βασικό πυλώνα της οικονομικής απόδοσης, ενώ οι ενδοημερήσιες αγορές λειτουργούν συμπληρωματικά, επιτρέποντας την αναπροσαρμογή του αρχικού προγράμματος και την αξιοποίηση πρόσθετων ευκαιριών.

9.5 Συνολική αξιολόγηση

Η συνολική σύγκριση των δύο σεναρίων επιβεβαιώνει ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία διαδοχικής βελτιστοποίησης μπορεί να επιτύχει σημαντική οικονομική απόδοση τόσο υπό ρεαλιστικές όσο και υπό ιδανικές συνθήκες πληροφόρησης.

Το Realistic Scenario οδηγεί σε καθαρό ετήσιο κέρδος 3,986,512.38 €, ενώ το αντίστοιχο αποτέλεσμα του Deterministic Scenario ανέρχεται σε 4,983,036.92 €.

Επομένως, η χρήση προβλεπόμενων τιμών οδηγεί σε χαμηλότερη οικονομική απόδοση σε σχέση με το θεωρητικό σενάριο πλήρους γνώσης των τιμών. Η διαφορά του καθαρού αποτελέσματος ανέρχεται σε περίπου 1 εκ. €, γεγονός που αντιστοιχεί σε περίπου 20% χαμηλότερη κερδοφορία στο Realistic Scenario σε σχέση με το Deterministic Scenario.

Παρά τη διαφορά αυτή, το Realistic Scenario παραμένει σαφώς κερδοφόρο, με καθαρό ετήσιο οικονομικό αποτέλεσμα μεγαλύτερο από 3,9 εκατ. €. Το αποτέλεσμα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς καταδεικνύει ότι η οικονομική βιωσιμότητα της στρατηγικής δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την υπόθεση τέλει γνώσης των μελλοντικών τιμών.

Παράλληλα, το Deterministic Scenario παρουσιάζει μεγαλύτερη αξιοποίηση της μπαταρίας. Η συνολική ενεργειακή διέλευση αυξάνεται από 116,059.09 MWh στο Realistic Scenario σε 126,732.48 MWh στο Deterministic Scenario, ενώ οι ισοδύναμοι πλήρεις κύκλοι αυξάνονται από 725.37 σε 792.08.

Η μηνιαία ανάλυση έδειξε επίσης ότι και στα δύο σενάρια η κερδοφορία παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια του έτους. Στο Realistic Scenario, οι υψηλότερες αποδόσεις καταγράφονται τον Σεπτέμβριο και τον Οκτώβριο, ενώ στο Deterministic Scenario ο Οκτώβριος παρουσιάζει τη μεγαλύτερη οικονομική απόδοση, με καθαρό κέρδος περίπου 715 χιλ. €. Αντίθετα, οι χαμηλότερες μηνιαίες αποδόσεις παρατηρούνται κυρίως τον Δεκέμβριο και τον Ιανουάριο.

Η σύγκριση των επιμέρους αγορών δείχνει επίσης ότι η επίδραση της αβεβαιότητας των προβλέψεων δεν είναι ίδια σε όλα τα στάδια της διαδοχικής βελτιστοποίησης. Η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των δύο σεναρίων εμφανίζεται στην DAM, ενώ στις

ενδοημερήσιες αγορές η διαφοροποίηση είναι μικρότερη και παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά ανά αγορά. Ειδικότερα, η IDA3 εμφανίζει αρνητικό αποτέλεσμα στο Realistic Scenario και θετικό αποτέλεσμα στο Deterministic Scenario, γεγονός που αναδεικνύει την ευαισθησία του τελευταίου σταδίου στις αποκλίσεις μεταξύ προβλεπόμενων και πραγματικών τιμών.

Συνολικά, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η ποιότητα των προβλέψεων αποτελεί σημαντικό παράγοντα της οικονομικής απόδοσης ενός συστήματος αποθήκευσης που συμμετέχει διαδοχικά στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, η χρήση προβλέψεων δεν αναιρεί την οικονομική αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης στρατηγικής. Αντίθετα, το Realistic Scenario εξακολουθεί να παρουσιάζει σημαντικό θετικό οικονομικό αποτέλεσμα σε ετήσια βάση και σε όλους τους επιμέρους μήνες.

Παράλληλα, η διαδοχική συμμετοχή στις αγορές DAM, IDA1, IDA2 και IDA3 επιτρέπει τη σταδιακή αναπροσαρμογή του προγράμματος λειτουργίας της μπαταρίας και την αξιοποίηση διαφορετικών ευκαιριών ενεργειακού αρμπιτράζ. Το Deterministic Scenario καταδεικνύει το πρόσθετο οικονομικό δυναμικό που μπορεί να επιτευχθεί όταν η αβεβαιότητα των τιμών εξαλειφθεί, ενώ το Realistic Scenario παρέχει μια περισσότερο αντιπροσωπευτική εικόνα της απόδοσης υπό συνθήκες πρόβλεψης.

Συνεπώς, η σύγκριση των δύο σεναρίων επιβεβαιώνει ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι σε θέση να παράγει σημαντική οικονομική αξία ακόμη και υπό ρεαλιστικές συνθήκες αβεβαιότητας, ενώ η βελτίωση της ακρίβειας των προβλέψεων αποτελεί βασική κατεύθυνση για την περαιτέρω ενίσχυση της οικονομικής απόδοσης του συστήματος.

10. Αποτελέσματα της τεχνοοικονομικής αξιολόγησης

10.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της τεχνοοικονομικής αξιολόγησης του συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας για χρονικό ορίζοντα δέκα ετών. Η αξιολόγηση βασίζεται στις ετήσιες ταμειακές ροές που προέκυψαν από το μοντέλο βελτιστοποίησης και πραγματοποιείται ανεξάρτητα για το Realistic Scenario και το Deterministic Scenario.

Για κάθε σενάριο υπολογίζονται οι βασικοί χρηματοοικονομικοί δείκτες αξιολόγησης της επένδυσης, δηλαδή η Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value – NPV), ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (Internal Rate of Return – IRR) και ο Δείκτης Απόδοσης της Επένδυσης (Return on Investment – ROI). Οι δείκτες αυτοί επιτρέπουν την εκτίμηση της οικονομικής βιωσιμότητας του έργου, λαμβάνοντας υπόψη το αρχικό επενδυτικό κόστος, τις ετήσιες ταμειακές ροές, το κόστος λειτουργίας, τη γήρανση της μπαταρίας και τις ενδεχόμενες επεμβάσεις battery augmentation.

10.2 Αποτελέσματα του Realistic Scenario

Η τεχνοοικονομική αξιολόγηση εφαρμόστηκε αρχικά στο Realistic Scenario, στο οποίο οι αποφάσεις λειτουργίας της μπαταρίας βασίζονται στις προβλεπόμενες τιμές των αγορών, ενώ η οικονομική αξιολόγηση πραγματοποιείται με βάση τις πραγματικές τιμές.

Τα αποτελέσματα της δεκαετούς αξιολόγησης συνοψίζονται ως εξής:

Net Present Value (NPV) : €12,728,600.85

Internal Rate of Return : 23.75%

Return on Investment : 159.18%

Παράλληλα, ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης ανέρχεται σε 23,75% , γεγονός που υποδηλώνει ικανοποιητική οικονομική απόδοση της επένδυσης. Επιπλέον, ο δείκτης ROI, ίσος με 159.18%, επιβεβαιώνει ότι η συνολική οικονομική απόδοση της επένδυσης επαρκεί κατά πολύ για την κάλυψη του αρχικού επενδυτικού κόστους.

10.3 Αποτελέσματα του Deterministic Scenario

Η ίδια διαδικασία εφαρμόστηκε και στο Deterministic Scenario, στο οποίο η διαδικασία βελτιστοποίησης πραγματοποιείται με πλήρη γνώση των πραγματικών τιμών των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα αποτελέσματα της οικονομικής αξιολόγησης είναι τα ακόλουθα:

Net Present Value (NPV) : €19,891,079.65

Internal Rate of Return : 32.60%

Return on Investment : 233.62%

Η Θετική Καθαρή Παρούσα Αξία, ύψους 19,891,079.65€, δείχνει ότι τα προεξοφλημένα μελλοντικά οικονομικά οφέλη υπερβαίνουν κατά πολύ τα συνολικά έξοδα συμπεριλαμβανομένου και του αρχικού κεφαλαίου (CAPEX). Αυτό γίνεται σε βαθμό που η κερδοφορία είναι σχεδόν 20 εκ. ευρώ.

Παράλληλα, ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης ανέρχεται σε 32.60%, τιμή η οποία βρίσκεται σημαντικά υψηλότερα από το προεξοφλητικό επιτόκιο του 5%. Επομένως, στην περίπτωση όπου οι μελλοντικές τιμές των αγορών θεωρούνται πλήρως γνωστές, η επένδυση επιτυγχάνει την απαιτούμενη απόδοση σε ακόμη μεγαλύτερο βαθμό συγκριτικά με το Realistic Scenario.

Αντίστοιχα, ο δείκτης ROI ανέρχεται σε 233.62% επιβεβαιώνοντας τα μεγάλα οικονομικά οφέλη της επένδυσης.

10.4 Συγκριτική αξιολόγηση

Η σύγκριση των δύο σεναρίων επιβεβαιώνει ότι η ακρίβεια των προβλέψεων αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την οικονομική απόδοση της επένδυσης σε βάθος χρόνου. Παρότι και στα δύο σενάρια χρησιμοποιούνται οι ίδιες τεχνικές και οικονομικές παραδοχές, η διαφοροποίηση στον τρόπο λήψης των αποφάσεων οδηγεί σε διαφορετικά επίπεδα οικονομικής απόδοσης.

Το Deterministic Scenario, στο οποίο θεωρείται ότι υπάρχει πλήρης γνώση των μελλοντικών τιμών της αγοράς, παρουσιάζει σαφώς υψηλότερη οικονομική επίδοση σε σχέση με το Realistic Scenario, στο οποίο οι αποφάσεις λαμβάνονται με βάση τις προβλεπόμενες τιμές. Συγκεκριμένα, η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV) ανέρχεται σε 19.891.079,65 € στο Deterministic Scenario, έναντι 12.728.600,85 € στο Realistic Scenario. Αντίστοιχα, ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (IRR) διαμορφώνεται σε 32,60% και 23,75%, ενώ ο δείκτης ROI ανέρχεται σε 233,62% και 159,18%, αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η χρήση προβλεπόμενων τιμών περιορίζει την οικονομική απόδοση σε σχέση με το θεωρητικό σενάριο πλήρους γνώσης των μελλοντικών τιμών. Παρά τη διαφορά αυτή, το Realistic Scenario εξακολουθεί να παρουσιάζει θετική οικονομική επίδοση, γεγονός που αποτελεί σημαντικό αποτέλεσμα της μελέτης. Ειδικότερα, η θετική NPV υποδεικνύει ότι, υπό τις συγκεκριμένες τεchnικοοικονομικές παραδοχές, οι αναμενόμενες προεξοφλημένες ταμειακές ροές της επένδυσης υπερκαλύπτουν το αρχικό επενδυτικό κόστος.

Παράλληλα, ο IRR του 23,75% στο Realistic Scenario υπερβαίνει το χρησιμοποιούμενο προεξοφλητικό επιτόκιο της μελέτης, ενώ η θετική τιμή του ROI καταδεικνύει ότι η επένδυση δημιουργεί επίσης θετική συνολική οικονομική απόδοση σε σχέση με το αρχικό κεφάλαιο. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα του Deterministic Scenario είναι ακόμη υψηλότερα, γεγονός που αποτυπώνει τη θεωρητική αξία της πλήρους γνώσης των μελλοντικών τιμών και λειτουργεί ως σημείο αναφοράς για την αξιολόγηση της επίδρασης της πρόβλεψης.

Η διαφορά μεταξύ των δύο σεναρίων αναδεικνύει, επομένως, δύο σημαντικά συμπεράσματα. Από τη μία πλευρά, η ακρίβεια των προβλέψεων επηρεάζει ουσιαστικά την οικονομική απόδοση της λειτουργίας της μπαταρίας, καθώς οι αποκλίσεις μεταξύ προβλεπόμενων και πραγματικών τιμών οδηγούν σε λιγότερο αποδοτικές αποφάσεις αγοράς και πώλησης. Από την άλλη πλευρά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η αβεβαιότητα που εισάγεται μέσω της πρόβλεψης δεν αναιρεί την οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης υπό τις συγκεκριμένες παραδοχές της μελέτης.

Συνολικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία βελτιστοποίησης μπορεί να αξιοποιήσει αποτελεσματικά τις διαθέσιμες ευκαιρίες στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας και να οδηγήσει σε θετική οικονομική απόδοση ακόμη και όταν οι αποφάσεις λαμβάνονται με βάση προβλεπόμενες και όχι εκ των προτέρων γνωστές τιμές. Το Deterministic Scenario μπορεί να θεωρηθεί ως ένα θεωρητικό άνω σημείο αναφοράς για την οικονομική επίδοση της συγκεκριμένης στρατηγικής, ενώ το Realistic Scenario παρέχει μια περισσότερο αντιπροσωπευτική εκτίμηση της απόδοσης υπό συνθήκες αβεβαιότητας.

Η θετική NPV και ο IRR που υπερβαίνει το προεξοφλητικό επιτόκιο στο Realistic Scenario υποδεικνύουν ότι, με βάση τις παραδοχές της παρούσας μελέτης, η συγκεκριμένη επένδυση παρουσιάζει οικονομική βιωσιμότητα σε ορίζοντα δέκα ετών.

Τέλος, η οικονομική βιωσιμότητα που προκύπτει δεν οφείλεται αποκλειστικά στην αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου βελτιστοποίησης, αλλά αποτελεί αποτέλεσμα της συνδυασμένης επίδρασης της στρατηγικής συμμετοχής στις αγορές, των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας, του αρχικού επενδυτικού κόστους, των λειτουργικών δαπανών, της υποβάθμισης της μπαταρίας και των λοιπών τεχνικοοικονομικών παραμέτρων που ενσωματώθηκαν στο μοντέλο. Συνεπώς, τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι, υπό τις συγκεκριμένες παραδοχές, ένα σύστημα αποθήκευσης 100 MWh μπορεί να αποτελέσει οικονομικά βιώσιμη επένδυση ακόμη και σε ρεαλιστικές συνθήκες πρόβλεψης των τιμών της αγοράς.

11. Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η παρούσα εργασία εξέτασε τη λειτουργία και την οικονομική αξιολόγηση ενός συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας που συμμετέχει στις αγορές DAM και στις διαδοχικές ενδοημερήσιες δημοπρασίες IDA1, IDA2 και IDA3 της ελληνικής αγοράς. Η προσέγγιση συνδύασε την πρόβλεψη των τιμών, τη διαδοχική βελτιστοποίηση της λειτουργίας της μπαταρίας και τη μακροχρόνια τεχνοοικονομική αξιολόγηση, επιτρέποντας την εξέταση της απόδοσης του συστήματος τόσο σε επίπεδο καθημερινής λειτουργίας όσο και σε επίπεδο επένδυσης.

Ένα από τα βασικά συμπεράσματα της μελέτης είναι ότι η διαδοχική συμμετοχή στις αγορές μπορεί να δημιουργήσει πρόσθετες οικονομικές ευκαιρίες για ένα σύστημα αποθήκευσης. Η δυνατότητα αναπροσαρμογής του αρχικού προγράμματος στις επόμενες αγορές επιτρέπει στο σύστημα να προσαρμόζεται στις μεταβολές των τιμών και να αξιοποιεί νέες ευκαιρίες που δεν ήταν διαθέσιμες κατά τον αρχικό προγραμματισμό. Παράλληλα, η ενσωμάτωση του κόστους υποβάθμισης στη διαδικασία βελτιστοποίησης επιτρέπει μια περισσότερο ολοκληρωμένη αποτίμηση της λειτουργίας, λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο τα άμεσα οικονομικά αποτελέσματα αλλά και το κόστος που συνδέεται με την έντονη χρήση της μπαταρίας.

Η σύγκριση των δύο σεναρίων λειτουργίας ανέδειξε επίσης την επίδραση της αβεβαιότητας που εισάγεται μέσω της πρόβλεψης των τιμών. Το Deterministic Scenario, στο οποίο χρησιμοποιούνται οι πραγματικές τιμές κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης, παρουσίασε καθαρό ετήσιο αποτέλεσμα αρκετά μεγαλύτερο του Realistic Scenario. Η απόκλιση αυτή καταδεικνύει ότι η ποιότητα των προβλέψεων αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την αποτελεσματικότητα της στρατηγικής λειτουργίας, καθώς οι αποκλίσεις μεταξύ προβλεπόμενων και πραγματικών τιμών μπορούν να οδηγήσουν σε επιλογές που δεν αντιστοιχούν εκ των υστέρων στις πλέον αποδοτικές συνθήκες της αγοράς. Ως εκ τούτου, το Deterministic Scenario μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σημείο αναφοράς για την αξιολόγηση της επίδρασης της

αβεβαιότητας, ενώ το Realistic Scenario αποτυπώνει με μεγαλύτερη πληρότητα τις συνθήκες υπό τις οποίες θα λειτουργούσε ένα πραγματικό σύστημα.

Σε ευρύτερο επίπεδο, η εργασία ανέδειξε ότι η αξιοποίηση ενός BESS στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα, στο οποίο αλληλεπιδρούν τεχνικοί, οικονομικοί και λειτουργικοί παράγοντες. Η διαθέσιμη χωρητικότητα και ισχύς της μπαταρίας, οι περιορισμοί φόρτισης και εκφόρτισης, η απόδοση του συστήματος, η υποβάθμιση, η αβεβαιότητα των τιμών και η χρονική αλληλουχία των αγορών επηρεάζουν από κοινού τις αποφάσεις λειτουργίας. Επομένως, η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου πλαισίου που συνδέει την πρόβλεψη, τη βελτιστοποίηση και την οικονομική αξιολόγηση αποτελεί σημαντικό στοιχείο για την ορθότερη αποτίμηση τέτοιων επενδύσεων.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για μελλοντική έρευνα παρουσιάζει η διεύρυνση του εξεταζόμενου πλαισίου σε πρόσθετες πηγές εσόδων. Μια σημαντική κατεύθυνση είναι η ενσωμάτωση της αγοράς εξισορρόπησης, ώστε να διερευνηθεί κατά πόσο η παροχή υπηρεσιών ευελιξίας και η συμμετοχή σε μηχανισμούς balancing μπορούν να επηρεάσουν τη συνολική οικονομική απόδοση του συστήματος. Παράλληλα, θα μπορούσε να εξεταστεί η συνεχής ενδοημερήσια αγορά, η οποία παρέχει τη δυνατότητα συνεχούς προσαρμογής των θέσεων του συστήματος σε μεταβολές των συνθηκών της αγοράς. Η επέκταση αυτή θα επέτρεπε μια πληρέστερη αποτύπωση των πιθανών πηγών εσόδων ενός BESS πέρα από τις δημοπρασίες που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία.

Μια δεύτερη σημαντική κατεύθυνση αφορά τη βελτίωση του μοντέλου πρόβλεψης. Η χρήση πιο προηγμένων μεθόδων μηχανικής μάθησης, και η ενσωμάτωση περισσότερων μεταβλητών που επηρεάζουν τη διαμόρφωση των τιμών θα μπορούσαν να επιτρέψουν την καλύτερη αντιμετώπιση της αβεβαιότητας.

Τέλος, μελλοντικές μελέτες θα μπορούσαν να εξετάσουν διαφορετικές διαστάσεις και τεχνικά χαρακτηριστικά συστημάτων αποθήκευσης, καθώς και διαφορετικές χρονικές περιόδους και συνθήκες αγοράς. Η εξέταση διαφορετικών λόγων ισχύος προς χωρητικότητα, διαφορετικών ορίων λειτουργίας και διαφορετικών παραδοχών σχετικά με τη διάρκεια ζωής και το κόστος των μπαταριών θα επέτρεπε την αξιολόγηση της επίδρασης των τεχνικών χαρακτηριστικών στην οικονομική απόδοση. Με τον τρόπο

αυτό, το πλαίσιο που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία θα μπορούσε να αποτελέσει βάση για περαιτέρω μελέτες σχετικά με τον βέλτιστο σχεδιασμό και τη συμμετοχή συστημάτων αποθήκευσης στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας.

12. Βιβλιογραφία

- Abramova, E., & Bunn, D. (2021). *Forecasting electricity price spreads for battery storage arbitrage*. *Energies*, 14(16), 4931.
- ACER. (2021). *The European Union electricity market design*. European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators.
- ACER. (2022). *Market Monitoring Report – Electricity Wholesale Markets*.
- Andreotti, D., Spiller, M., Scrocca, A., Bovera, F., & Rancilio, G. (2024). *Modeling and analysis of BESS operations in electricity markets*. *Sustainability*, 16, 7940.
- Business Daily. (2020). *Σε εφαρμογή το Target Model για την αγορά ηλεκτρισμού*.
- Conejo, A. J., Carrión, M., & Morales, J. M. (2010). *Decision Making Under Uncertainty in Electricity Markets*. Springer.
- ENTSO-E. (2022). *Electricity Market Report 2022*. European Network of Transmission System Operators for Electricity.
- ENTSO-E. (2023). *Single Intraday Coupling (SIDC/XBID) Overview*.
- Envinow. (2024). *Οι 4 νέες αγορές ηλεκτρικής ενέργειας για την Ελλάδα*.
- European Commission. (2019). *Clean Energy for All Europeans Package*. Brussels.
- Grant Thornton. (2023). *BESS Profitability Analysis in Greece*.
- Grant Thornton. (2025). *Επερχόμενες προκλήσεις στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας*.
- Grimaldi, A., Minuto, F. D., Brouwer, J., & Lanzini, A. (2024). *Profitability of energy arbitrage for grid-scale battery energy storage*. *Journal of Energy Storage*, 95, 112380.
- Hannan, M. A., et al. (2021). *Battery Energy Storage System: A Review of Technologies and Optimization Approaches*. *Journal of Energy Storage*, 42, 103023.
- Hellenic Energy Exchange. (2022). *Spot Trading Rulebook*. Athens.
- Hellenic Energy Exchange. (2023). *Day-Ahead Market Timeline Procedures*. Athens.
- HEnEx. (2023). *Greek Electricity Market Rulebook*.

- HEnEx. (2023). *Intra-Day Market Operation and Trading Rules*. Hellenic Energy Exchange.
- HEnEx. (2023). *Hellenic Energy Exchange: Intra-Day Market Operation*. Athens.
- IEA. (2022). *Electricity Market Report 2022*. International Energy Agency.
- IPTO (ΑΔΜΗΕ). (2023). *Balancing Market Operation in Greece*.
- IRENA. (2017). *Electricity Storage and Renewables*.
- Lund, H., et al. (2015). *Smart Energy Systems*.
- Makrygiorgou, J., et al. (2023). *Electricity Market Reforms and Operation in Greece. Energy Policy*.
- Peng, C.-Y., Kuo, C.-C., & Tsai, C.-T. (2021). *Optimal Configuration of PV-Plus-BESS for Behind-the-Meter Application. Applied Sciences, 11*, 7851.
- RAAEY. (2024). *Electricity Wholesale Market Design and Day-Ahead Market Operation in Greece*. Athens.
- Renewable Energy Focus. (2025). *Optimizing Grid-Connected Battery Energy Storage Systems*.
- Weron, R. (2014). *Electricity Price Forecasting: A Review of the State-of-the-Art. International Journal of Forecasting, 30(4)*, 1030–1081.
- Zakeri, B., & Syri, S. (2015). *Electrical Energy Storage Systems Review*.

«Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/ δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.»