



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Βέλτιστη Συμμετοχή Αποθηκευτικής Διάταξης στις Αγορές Ηλεκτρικής Ενέργειας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Ιωάννης Σ. Λέκκας

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2025



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Βέλτιστη Συμμετοχή Αποθηκευτικής Διάταξης στις Αγορές Ηλεκτρικής Ενέργειας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Ιωάννης Σ. Λέκκας

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 16η Οκτωβρίου 2025.

.....
Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Γεώργιος Κορρές
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Άρης-Ευάγγελος Δημέας
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2025

Ιωάννης Λέκκας

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

Copyright © Ιωάννης Λέκκας, 2025.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στον προσδιορισμό της βέλτιστης στρατηγικής συμμετοχής αυτόνομων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες (stand-alone BESS) στην ελληνική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Στόχος είναι η ποσοτικοποίηση της οικονομικής αξίας που προκύπτει από τη συνδυαστική συμμετοχή σε πολλαπλές αγορές. Η ανάγκη για τέτοια ανάλυση προκύπτει από τον σημαντικό ρόλο των BESS στο πλαίσιο της ενεργειακής μετάβασης και την αυξημένη διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, οι οποίες δημιουργούν σημαντικές ανάγκες ευελιξίας στο ηλεκτρικό σύστημα.

Αναπτύχθηκαν τέσσερα μοντέλα κλιμακούμενης πολυπλοκότητας: το Μοντέλο M1 εξετάζει αποκλειστική συμμετοχή στην Αγορά Επόμενης Ημέρας, το Μοντέλο M2 επεκτείνεται στην αγορά ενέργειας εξισορρόπησης, με τον περιορισμό ότι οι προσφορές στην αγορά εξισορρόπησης πρέπει να έχουν ίδια κατεύθυνση με αυτή των προσφορών στην προημερήσια αγορά, το Μοντέλο M3 ενσωματώνει στο M2 την αγορά ισχύος εξισορρόπησης, και το Μοντέλο M4 αίρει τον περιορισμό των δύο προηγούμενων μοντέλων, επιτρέποντας σημαντική αύξηση των κερδών μέσω της εκμετάλλευσης αλληλεπιδράσεων μεταξύ των προσφορών στις αγορές Επόμενης Ημέρας και Εξισορρόπησης. Η μεθοδολογία που υιοθετήθηκε βασίζεται στον Μικτό Ακέραιο Γραμμικό Προγραμματισμό (MILP), ο οποίος επιτρέπει τη διατύπωση μαθηματικών μοντέλων που ενσωματώνουν τεχνικούς περιορισμούς του συστήματος και ρυθμιστικές απαιτήσεις. Για την υλοποίηση χρησιμοποιήθηκε η Python σε συνδυασμό με τον επιλύτη Gurobi, με πραγματικά δεδομένα τιμών από την ελληνική αγορά για το έτος 2024.

Το εξεταζόμενο σύστημα αποθήκευσης διαθέτει ισχύ 40 MW, χωρητικότητα 160 MWh και απόδοση 90%, ενώ λειτουργεί υπό ρυθμιστικούς και τεχνικούς περιορισμούς, συμπεριλαμβανομένου ημερήσιου ορίου 1,2 κύκλων φόρτισης. Το μοντέλο βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκε εφαρμόστηκε για τη μελέτη συμμετοχής του εξεταζόμενου συστήματος αποθήκευσης στην αγορά ενέργειας (επόμενη ημέρα και εξισορρόπησης). Η ανάλυση, η οποία έγινε αρχικά για μία ενδεικτική ημέρα και επεκτάθηκε σε ετήσια αξιολόγηση για το 2024 επιβεβαιώνει τη συστηματική υπεροχή της συνδυαστικής συμμετοχής σε πολλαπλές αγορές. Πιο συγκεκριμένα, η δυνατότητα συμμετοχής στην αγορά εξισορρόπησης (Μοντέλα M2-M4), σε σχέση με αποκλειστική συμμετοχή στην αγορά επόμενης ημέρας (μοντέλο M1), επιφέρει έως και 6 φορές αύξηση των ημερήσιων κερδών, με την ενέργεια εξισορρόπησης να συνεισφέρει στο μεγαλύτερο μέρος των κερδών αυτών. Σημαντική αύξηση των κερδών παρατηρείται με τη δυνατότητα στρατηγικής κατανομής συναλλαγών και την αλληλοαντιστάθμιση θέσεων μεταξύ αγοράς ισχύος εξισορρόπησης και αγοράς επόμενης ημέρας (μοντέλο M4).

Διενεργήθηκε μελέτη ευαισθησίας για όλα τα μοντέλα ως προς τους κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης, τη διάρκεια αποθήκευσης και την ονομαστική ισχύ της αποθηκευτικής διάταξης. Σημειώνεται ότι για το Μοντέλο M4 καταγράφεται μικρή ευαισθησία στους δύο πρώτους δείκτες (κύκλοι και διάρκεια), γεγονός που υποδεικνύει ότι η βέλτιστη συμμετοχή δεν συνεπάγεται αυξημένη φυσική καταπόνηση της διάταξης. Η εργασία ολοκληρώνεται με συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντικές επεκτάσεις της έρευνας.

Λέξεις-Κλειδιά: Αποθήκευση ενέργειας, BESS, Αγορές ηλεκτρισμού, Βελτιστοποίηση, Arbitrage, Αγορές εξισορρόπησης, mFRR, Μικτός ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός

Abstract

This thesis aims to determine the optimal participation strategy of stand-alone Battery Energy Storage Systems (BESS) in the Greek electricity market, quantifying the economic value created by combined participation across multiple markets. The motivation stems from the central role of BESS in the energy transition and the increasing penetration of Renewable Energy Sources, which heighten flexibility needs in power systems.

Four models of escalating complexity are developed: Model M1 considers exclusive participation in the Day-Ahead Market (DAM); Model M2 extends to the balancing energy market *with the restriction* that balancing bids must align in direction with the day-ahead position; Model M3 augments M2 by adding participation in the balancing capacity market; and Model M4 lifts the restriction embedded in the previous two models, enabling materially higher profits through the exploitation of interactions between DAM and balancing bids. The methodology is based on Mixed-Integer Linear Programming (MILP), allowing the formulation of models that incorporate both technical system constraints and regulatory requirements. Implementation is carried out in Python using the Gurobi solver, with real Greek market price data for 2024.

The examined storage system features 40 MW of power, 160 MWh of energy capacity, and 90% efficiency, and operates under regulatory and technical constraints, including a daily limit of 1.2 charge–discharge cycles. The optimization framework is applied to participation in the energy markets (day-ahead and balancing). An analysis performed first for a representative day and then extended to a full-year evaluation for 2024 confirms the systematic superiority of combined multi-market participation. Specifically, enabling participation in balancing (Models M2–M4) versus DAM-only (Model M1) increases daily profits by up to sixfold, with balancing energy providing the largest share due to pronounced price differentials between upward and downward reserves. Additional gains arise from strategic transaction allocation and netting of positions between the balancing capacity market and the DAM (Model M4).

The annual assessment for 2024 corroborates these findings. A sensitivity study across all models with respect to charge–discharge cycles, storage duration, and nameplate power shows that Model M4 exhibits low sensitivity to the first two indicators (cycles and duration), indicating that the optimal strategy does not entail increased physical stress of the asset. The thesis concludes with key takeaways and directions for future extensions.

Keywords: Energy storage, BESS, Electricity markets, Optimization, Arbitrage, Balancing markets, mFRR, Mixed-integer linear programming

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία σηματοδοτεί το τέλος της φοίτησής μου στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους που συνέβαλαν στην ολοκλήρωσή της.

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη στον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, Ομότιμο Καθηγητή κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου, τη συνεχή καθοδήγησή του και τις πολύτιμες ακαδημαϊκές αλλά και ανθρώπινες συμβουλές του. Χωρίς τη συμβολή του, αυτό το ταξίδι δεν θα ήταν το ίδιο κι εγώ δεν θα πίστευα το ίδιο στον εαυτό μου.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Άρη-Ευάγγελο Δημέα και τον Καθηγητή κ. Γεώργιο Κορρέ, που δέχθηκαν να αποτελέσουν μέλη της τριμελούς επιτροπής της διπλωματικής μου εργασίας. Τους ευχαριστώ για τον χρόνο και το ενδιαφέρον τους.

Ένα ξεχωριστό ευχαριστώ οφείλω στον ερευνητή της ερευνητικής ομάδας SMART RUE, Δρ. Γιάννη Καρακίτσιο. Η αμέριστη υποστήριξη και η εμπειριστατωμένη καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας ήταν ανεκτίμητης αξίας. Χωρίς την πολύτιμη συμβολή του, την υπομονή του και ηρεμία του, το τελικό αποτέλεσμα δεν θα ήταν το ίδιο. Τον ευχαριστώ για τις εύστοχες συμβουλές του και το γνήσιο ενδιαφέρον που επέδειξε.

Οφείλω επίσης να ευχαριστήσω όλους εκείνους τους καθηγητές που, με τον τρόπο διδασκαλίας τους, συνέβαλαν στη διαμόρφωση και την ανάπτυξη των ενδιαφερόντων μου στον κλάδο του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και μου έδειξαν την πραγματική έννοια του να είσαι μηχανικός.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου και συναδέλφους μου στην Grant Thornton Greece για τις εποικοδομητικές συζητήσεις και την πολύτιμη ανταλλαγή απόψεων, που με βοήθησαν να δω τα πράγματα από διαφορετική οπτική γωνία, καθώς και για την εμπιστοσύνη, την κατανόηση και την αδιάλειπτη υποστήριξή τους.

Ευχαριστώ από καρδιάς τους φίλους μου, τόσο αυτούς που ήταν δίπλα μου πριν την έναρξη αυτού του ταξιδιού, όσο και αυτούς που γνώρισα κατά τη διάρκειά του. Τους ευχαριστώ για τη στήριξη, τις συμβουλές, τη βοήθεια, τις αναμνήσεις και όλες τις στιγμές που μοιραστήκαμε.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου. Ιδιαίτερα τη μητέρα μου Νατάσα και την αδερφή μου Βέρα, για τη συνεχή υποστήριξη και συμπαράστασή τους όλα αυτά τα χρόνια, που έπαιζαν καθοριστικό ρόλο σε ό,τι έχω καταφέρει μέχρι σήμερα. Τους ευχαριστώ για όλες τις θυσίες και την ανιδιοτελή αγάπη τους. Ιδιαίτερη μνεία οφείλω να κάνω στον πατέρα μου, ο οποίος μου χάραξε τον δρόμο· οι αξίες και η καθοδήγησή του παραμένουν ζωντανές και αποτελούν πυξίδα για κάθε μου βήμα.

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
Abstract	5
Ευχαριστίες	7
Περιεχόμενα	12
Κατάλογος Σχημάτων	15
Κατάλογος Πινάκων	18
Συντομογραφίες	19
1 Εισαγωγή	1
1.1 Γενικό Πλαίσιο	1
1.2 Προβληματισμός και Ερευνητικό Κενό	2
1.3 Σκοπός και Στόχοι της Εργασίας	2
1.4 Μεθοδολογική Προσέγγιση	3
1.5 Δομή της Εργασίας	4
1.6 Αναμενόμενη Συμβολή	5
2 Ρυθμιστικό Πλαίσιο και Αγορές Ενέργειας	7
2.1 Ευρωπαϊκό & Ελληνικό Πλαίσιο και Κίνητρο	7
2.1.1 Η σημασία της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στο σύγχρονο ενεργειακό σύστημα	7

2.1.2	Το ευρωπαϊκό πλαίσιο πολιτικής για την αποθήκευση ενέργειας	8
2.1.3	Το ελληνικό πλαίσιο για την αποθήκευση ενέργειας	9
2.2	Ελληνική Αγορά Ηλεκτρικής Ενέργειας	11
2.2.1	Διάρθρωση της Ελληνικής Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας	11
2.2.2	Χονδρεμπορικές Αγορές Ενέργειας (Wholesale Markets)	12
2.2.3	Αγορά Εξισορρόπησης	13
2.2.4	Ρυθμιστικό Πλαίσιο Συμμετοχής Συστημάτων Αποθήκευσης	16
3	Συστήματα BESS και Στρατηγικές Συμμετοχής στις Αγορές	21
3.1	Stand-alone BESS: Τεχνολογία και Λειτουργικά Χαρακτηριστικά	21
3.1.1	Τεχνολογικά χαρακτηριστικά και παράμετροι σχεδιασμού	21
3.1.2	Λειτουργικά χαρακτηριστικά και υπηρεσίες στο δίκτυο	22
3.1.3	Τεχνικοί περιορισμοί και επίδραση στη βελτιστοποίηση	22
3.2	Θεωρητικό Πλαίσιο Βελτιστοποίησης και Arbitrage για Συστήματα Αποθήκευσης	23
3.2.1	Προσέγγιση Μαθηματικού Προγραμματισμού στις Ηλεκτρικές Αγορές	23
3.2.2	Μηχανισμοί Δημιουργίας Εσόδων για Συστήματα Αποθήκευσης	24
4	Μοντελοποίηση και Μεθοδολογία	27
4.1	Στόχος και Πεδίο Εφαρμογής	27
4.2	Υποθέσεις και Παραδοχές Μελέτης	27
4.2.1	Αγορές Συμμετοχής	27
4.2.2	Τεχνικά Χαρακτηριστικά και Λειτουργικοί Περιορισμοί	28
4.2.3	Σύνοψη Παραμέτρων	29
4.2.4	Αποδοχή και Τιμολόγηση Προσφορών στην mFRR	30
4.3	Περιορισμοί από Ρυθμιστικό Πλαίσιο	30
4.3.1	Ελάχιστη Ποσότητα Προσφοράς στην Αγορά Εξισορρόπησης	30
4.3.2	Στατικοί Περιορισμοί Έγχυσης Ισχύος	30
4.3.3	Συνέπεια Προγραμματισμού και Ικανότητες Σταθμού	31
4.4	Αρχιτεκτονική και Ιεράρχηση Μοντέλων	31

4.4.1	Μοντέλο M1 — Συμμετοχή στην Αγορά Επόμενης Ημέρας (DAM)	32
4.4.2	Μοντέλο M2 — Συμμετοχή σε DAM και mFRR Energy	32
4.4.3	Μοντέλο M3 — Συμμετοχή σε DAM, mFRR Energy και mFRR Capacity	33
4.4.4	Μοντέλο M4 — Πλήρης συμμετοχή σε DAM, mFRR Energy και mFRR Capacity	35
4.4.5	Συγκριτική Επισκόπηση και Ιεραρχική Δομή Μοντέλων	37
4.5	Μοντέλο M1 — Συμμετοχή στην Προημερήσια Αγορά	38
4.5.1	Μαθηματικό Μοντέλο	39
4.6	Μοντέλο M2 — Συμμετοχή σε Προημερήσια Αγορά και σε Αγορά Ενέργειας Εξισορρόπησης	41
4.6.1	Λειτουργία	41
4.6.2	Μαθηματικό Μοντέλο	42
4.7	Μοντέλο M3 — Συμμετοχή σε DAM, mFRR Energy και mFRR Capacity	46
4.7.1	Μαθηματικό Μοντέλο	46
4.8	Μοντέλο M4 — Συμμετοχή στην Προημερήσια Αγορά, Αγορά Ενέργειας και Ισχύος Εξισορρόπησης χωρίς Κατευθυντική Συμβατότητα	52
4.8.1	Λειτουργία	52
4.8.2	Μαθηματικό Μοντέλο	52
4.9	Μεθοδολογία Επίλυσης και Υπολογιστική Υλοποίηση	58
4.9.1	Δεδομένα Αγορών και Προεπεξεργασία	58
4.9.2	Λύτης Βελτιστοποίησης και Υπολογιστικό Πλαίσιο	58
4.9.3	Σχήμα Επίλυσης: Ημερήσιο και Ετήσιο Επίπεδο	59
4.9.4	Σύνοψη Μεθοδολογίας και Μετάβαση στα Αποτελέσματα	59

5 Αποτελέσματα 61

5.1	Ημερήσια Αποτελέσματα (Case: 26 Αυγούστου 2024)	61
5.1.1	Ημερήσια — Μοντέλο M1 — Συμμετοχή στην Αγορά Επόμενης Ημέρας (DAM)	63
5.1.2	Ημερήσια — Μοντέλο M2 — Συμμετοχή σε DAM και Αγορά Ενέργειας Εξισορρόπησης-	65
5.1.3	Ημερήσια — Μοντέλο M3 — Συμμετοχή σε Προημερήσια, Αγορά Ενέργειας και Ισχύος Εξισορρόπησης με προσφορές ίδιας κατεύθυνσης	70

5.1.4	Ημερήσια — Μοντέλο M4 — Συμμετοχή σε DAM, mFRR Energy και mFRR Capacity με Ανεξάρτητες Προσφορές	74
5.1.5	Συγκριτική Αξιολόγηση Μοντέλων — Ημερήσιο Επίπεδο	80
5.2	Ετήσια Αποτελέσματα (2024)	81
5.2.1	Ετήσια Αποτελέσματα — Μοντέλο M1 — Συμμετοχή στην Προημερήσια Αγορά	81
5.2.2	Ετήσια Αποτελέσματα — Μοντέλο M2 — Συμμετοχή σε DAM και Αγορά Ενέργειας Εξισορρόπησης	84
5.2.3	Ετήσια Αποτελέσματα — Μοντέλο M3 — Συμμετοχή σε DAM, Αγορά Ενέργειας και Ισχύος Εξισορρόπησης με Κατευθυντική Συμβατότητα	88
5.2.4	Ετήσια Αποτελέσματα — Μοντέλο M4 — Συμμετοχή σε DAM, Αγορά Ενέργειας και Ισχύος Εξισορρόπησης με Ανεξάρτητες Προσφορές	92
5.2.5	Ετήσια Συγκριτική Αποτίμηση Μοντέλων M1–M4	97
5.3	Μελέτη Ευαισθησίας	101
5.3.1	Μελέτη Ευαισθησίας — Μοντέλο M1 — Συμμετοχή στην Προημερήσια Αγορά	101
5.3.2	Μελέτη Ευαισθησίας — Μοντέλο M2 — Συμμετοχή σε DAM και mFRR Energy	103
5.3.3	Μελέτη Ευαισθησίας — Μοντέλο M3 — Συμμετοχή σε DAM και mFRR Capacity	106
5.3.4	Μελέτη Ευαισθησίας — Μοντέλο M4 — Συμμετοχή σε DAM, mFRR Energy και mFRR Capacity με Ανεξάρτητες Προσφορές	109
5.3.5	Συγκριτική Αποτίμηση Ευαισθησίας Μοντέλων M1–M4	112
6	Σύνοψη και Συμπεράσματα	115
6.1	Σύνοψη	115
6.2	Συμπεράσματα	115
6.3	Επεκτάσεις και Μελλοντική Έρευνα	116

Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Μερίδιο ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ ανά τεχνολογία, 2000–2030. Πηγή: [1].	7
2.2	Εγκατεστημένη χωρητικότητα αποθήκευσης στην Ευρώπη και προοπτικές έως το 2030. Πηγή: [2].	9
2.3	Ευρωπαϊκή αγορά αποθήκευσης σε μπαταρίες: σενάρια ανάπτυξης 2025–2029. Πηγή: [3].	9
2.4	Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα: εγκατεστημένη ισχύς (GW) και χωρητικότητα (GWh) ανά τεχνολογία, 2022–2050. Πηγή: [4].	10
2.5	Χρονική ακολουθία αγορών ηλεκτρικής ενέργειας. Πηγή: ΑΔΜΗΕ [5]	12
2.6	Χρονική διαδοχή διαδικασιών Αγοράς Εξισορρόπησης. Πηγή: ΑΔΜΗΕ [6]	14
2.7	Παράδειγμα υποβολής προσφορών Ισχύος και Ενέργειας Εξισορρόπησης στη ΔΕΠ. Πηγή: [7].	18
2.8	Αποτελέσματα ΔΕΠ και υποβολή προσφορών στην Αγορά Ενέργειας Εξισορρόπησης (RTBM). Πηγή: [7].	19
4.1	Σχηματοποίηση του περιορισμού κατευθυντικής συμβατότητας στο Μοντέλο M2. Η θέση DAM καθορίζει την επιτρεπόμενη κατεύθυνση των προσφορών mFRR Energy.	33
4.2	Σχηματοποίηση της λογικής του Μοντέλου M3.	35
4.3	Σχηματοποίηση της λογικής του Μοντέλου M4 με ανεξάρτητες προσφορές mFRR χωρίς περιορισμό κατευθυντικής συμβατότητας. Το παράδειγμα απεικονίζει τις αντίρροπες προσφορές μέσω παροχής εφεδρείας (μετάβαση από φόρτιση σε εκφόρτιση).	37
4.4	Κλιμάκωση λειτουργικότητας και χαλάρωση περιορισμών από M1 σε M4.	38
5.1	Τιμές Προημερήσιας Αγοράς (DAM), 26 Αυγούστου 2024.	62
5.2	Τιμές ενέργειας εξισορρόπησης mFRR, 26 Αυγούστου 2024.	62
5.3	Τιμές ισχύος εξισορρόπησης mFRR, 26 Αυγούστου 2024.	62
5.4	Απαιτήσεις ενέργειας εξισορρόπησης, 26 Αυγούστου 2024.	63
5.5	Απαιτήσεις ισχύος εξισορρόπησης, 26 Αυγούστου 2024.	63

5.6	Ροές Φόρτισης/Εκφόρτιση και τιμές DAM	64
5.7	Ροές φόρτισης/εκφόρτισης με SoC	64
5.8	Εξέλιξη SoC και αθροιστικού καθαρού κέρδους	65
5.9	Ροές Φόρτισης/Εκφόρτισης με Τιμές DAM και mFRR — Μοντέλο M2	67
5.10	Ροές Φόρτισης/Εκφόρτισης mFRR με Τιμές Ενέργειας — Μοντέλο M2	67
5.11	Ροές Φόρτισης/Εκφόρτισης με Τιμή Εκκαθάρισης DAM — Μοντέλο M2	68
5.12	Ροές Φόρτισης/Εκφόρτισης με State of Charge — Μοντέλο M2	68
5.13	Καθαρό Κέρδος (σωρευτικό) με State of Charge — Μοντέλο M2	69
5.14	Κατανομή Καθαρών Κερδών ανά Αγορά — Μοντέλο M2	69
5.15	Ροές Φόρτισης/Εκφόρτισης με Τιμές DAM και mFRR — Μοντέλο M3	71
5.16	Ροές Φόρτισης/Εκφόρτισης mFRR με Τιμές Ενέργειας — Μοντέλο M3	71
5.17	Τιμές Capacity και Ενεργοποιήσεις Ενέργειας mFRR — Μοντέλο M3	72
5.18	Ροές Φόρτισης/Εκφόρτισης με Τιμή Εκκαθάρισης DAM — Μοντέλο M3	72
5.19	Ροές Φόρτισης/Εκφόρτισης με State of Charge — Μοντέλο M3	73
5.20	Καθαρό Κέρδος (σωρευτικό) με State of Charge — Μοντέλο M3	73
5.21	Κατανομή Καθαρών Κερδών ανά Αγορά — Μοντέλο M3	74
5.22	Ροές Φόρτισης/Εκφόρτισης με Τιμές DAM και mFRR — Μοντέλο M4	76
5.23	Ροές Φόρτισης/Εκφόρτισης με Τιμή Εκκαθάρισης DAM — Μοντέλο M4	76
5.24	Ροές Φόρτισης/Εκφόρτισης mFRR με Τιμές Ενέργειας — Μοντέλο M4	77
5.25	Τιμές Capacity και Ενεργοποιήσεις Ενέργειας mFRR — Μοντέλο M4	77
5.26	Ροές Φόρτισης/Εκφόρτισης (δηλωθείσες θέσεις) με State of Charge — Μοντέλο M4 . . .	78
5.27	Πραγματικές Ροές στην Πλευρά της Μπαταρίας με State of Charge — Μοντέλο M4 . . .	78
5.28	Καθαρό Κέρδος (σωρευτικό) με State of Charge — Μοντέλο M4	79
5.29	Κατανομή Καθαρών Κερδών ανά Αγορά — Μοντέλο M4	79
5.30	Μηνιαία σύνθεση εσόδων, κόστους και καθαρού κέρδους για το Μοντέλο M1 κατά το έτος 2024	82
5.31	Αθροιστική εξέλιξη καθαρού κέρδους για το Μοντέλο M1 κατά το έτος 2024	83
5.32	Μηνιαία ισορροπία φόρτισης και εκφόρτισης για το Μοντέλο M1 κατά το έτος 2024 . .	83
5.33	Συμμετοχή κάθε αγοράς στο κέρδος	85

5.34	Μηνιαία σύνθεση εσόδων, κοστών και καθαρού κέρδους για το Μοντέλο M2 κατά το έτος 2024	86
5.35	Αθροιστική εξέλιξη καθαρού κέρδους για το Μοντέλο M2 κατά το έτος 2024	86
5.36	Μηνιαία ενεργειακή ροή φόρτισης και εκφόρτισης για το Μοντέλο M2 κατά το έτος 2024	88
5.37	Συμμετοχή κάθε αγοράς στο κέρδος	89
5.38	Αθροιστική εξέλιξη καθαρού κέρδους για το Μοντέλο M3 κατά το έτος 2024	90
5.39	Μηνιαία σύνθεση εσόδων, κοστών και καθαρού κέρδους για το Μοντέλο M3 κατά το έτος 2024	91
5.40	Μηνιαία ενεργειακή ροή φόρτισης και εκφόρτισης για το Μοντέλο M3 κατά το έτος 2024	92
5.41	Συμμετοχή κάθε αγοράς στα κέρδη	94
5.42	Αθροιστική εξέλιξη καθαρού κέρδους για το Μοντέλο M4 κατά το έτος 2024	95
5.43	Μηνιαία σύνθεση εσόδων, κοστών και καθαρού κέρδους για το Μοντέλο M4 κατά το έτος 2024	96
5.44	Μηνιαία ενεργειακή ροή φόρτισης και εκφόρτισης για το Μοντέλο M4 κατά το έτος 2024	96
5.45	Συγκριτική εξέλιξη καθαρού κέρδους των τεσσάρων μοντέλων λειτουργίας	97
5.46	Ευαισθησία μηνιαίου καθαρού κέρδους ως προς το ημερήσιο όριο κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης	101
5.47	Ευαισθησία μηνιαίου καθαρού κέρδους ως προς τη διάρκεια της αποθηκευτικής διάταξης	102
5.48	Ευαισθησία μηνιαίου καθαρού κέρδους ως προς την ονομαστική ισχύ της αποθηκευτικής διάταξης	102
5.49	Ευαισθησία καθαρού κέρδους ως προς το ημερήσιο όριο κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης .	103
5.50	Ευαισθησία μηνιαίου καθαρού κέρδους ως προς τη διάρκεια της αποθηκευτικής διάταξης	104
5.51	Ευαισθησία καθαρού κέρδους ως προς την ονομαστική ισχύ της αποθηκευτικής διάταξης	105
5.52	Ευαισθησία καθαρού κέρδους ως προς το ημερήσιο όριο κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης .	106
5.53	Ευαισθησία μηνιαίου καθαρού κέρδους ως προς τη διάρκεια της αποθηκευτικής διάταξης	107
5.54	Ευαισθησία καθαρού κέρδους ως προς την ονομαστική ισχύ της αποθηκευτικής διάταξης	108
5.55	Ευαισθησία καθαρού κέρδους ως προς το ημερήσιο όριο κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης .	109
5.56	Ευαισθησία μηνιαίου καθαρού κέρδους ως προς τη διάρκεια της αποθηκευτικής διάταξης	110
5.57	Ευαισθησία καθαρού κέρδους ως προς την ονομαστική ισχύ της αποθηκευτικής διάταξης	111

Κατάλογος Πινάκων

4.1	Κοινά τεχνικά χαρακτηριστικά και παραδοχές μπαταρίας (για όλα τα μοντέλα M1–M4)	30
4.2	Στατικοί περιορισμοί έγχυσης ισχύος για stand-alone BESS [8]	31
4.3	Συγκριτική επισκόπηση χαρακτηριστικών μοντέλων M1–M4	38
5.1	Συνολικά Οικονομικά και Ενεργειακά Αποτελέσματα — Μοντέλο M1	63
5.2	Οικονομικά Αποτελέσματα ανά Κατηγορία Συναλλαγής — Μοντέλο M2, 26 Αυγούστου 2024	66
5.3	Τεχνικά Αποτελέσματα Ενεργειακών Συναλλαγών — Μοντέλο M2, 26 Αυγούστου 2024	66
5.4	Οικονομικά Αποτελέσματα ανά Κατηγορία Συναλλαγής — Μοντέλο M3, 26 Αυγούστου 2024	70
5.5	Τεχνικά Αποτελέσματα Ενεργειακών Συναλλαγών και Ισχύος — Μοντέλο M3, 26 Αυγούστου 2024	70
5.6	Οικονομικά Αποτελέσματα ανά Κατηγορία Συναλλαγής — Μοντέλο M4, 26 Αυγούστου 2024	75
5.7	Τεχνικά Αποτελέσματα Ενεργειακών Συναλλαγών και Ισχύος — Μοντέλο M4, 26 Αυγούστου 2024	75
5.8	Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Ημερήσιας Λειτουργίας BESS ανά Μοντέλο — 26 Αυγούστου 2024	80
5.9	Συγκεντρωτικά Ετήσια Αποτελέσματα — Μοντέλο M1, Έτος 2024	81
5.10	Μηνιαία Οικονομικά Αποτελέσματα — Μοντέλο M1, Έτος 2024	82
5.11	Μηνιαία Τεχνικά Αποτελέσματα — Μοντέλο M1, Έτος 2024	83
5.12	Συγκεντρωτικά Ετήσια Αποτελέσματα — Μοντέλο M2, Έτος 2024	84
5.13	Μηνιαία Οικονομικά Αποτελέσματα ανά Κατηγορία Συναλλαγής — Μοντέλο M2, Έτος 2024	86
5.14	Μηνιαία Τεχνικά Αποτελέσματα — Μοντέλο M2, Έτος 2024	87
5.15	Συγκεντρωτικά Ετήσια Αποτελέσματα — Μοντέλο M3, Έτος 2024	89

5.16 Μηνιαία Οικονομικά Αποτελέσματα ανά Κατηγορία Συναλλαγής — Μοντέλο M3, Έτος 2024	91
5.17 Μηνιαία Τεχνικά Αποτελέσματα — Μοντέλο M3, Έτος 2024	92
5.18 Συγκεντρωτικά Ετήσια Αποτελέσματα — Μοντέλο M4, Έτος 2024	93
5.19 Μηνιαία Οικονομικά Αποτελέσματα ανά Κατηγορία Συναλλαγής — Μοντέλο M4, Έτος 2024	95
5.20 Μηνιαία Τεχνικά Αποτελέσματα — Μοντέλο M4, Έτος 2024	96
5.21 Συγκριτική Ετήσια Οικονομική Απόδοση Μοντέλων M1–M4, Έτος 2024	97
5.22 Συγκριτική Ετήσια Τεχνική Απόδοση Μοντέλων M1–M4, Έτος 2024	98
5.23 Δείκτες Αποδοτικότητας και Οικονομικής Απόδοσης — Μοντέλα M1–M4	98
5.24 Συμμετοχή αγοράς στο κέρδος — Μοντέλα M1–M4	98

Συντομογραφίες

aFRR	Automatic Frequency Restoration Reserve
AGC	Automatic Generation Control
BESS	Battery Energy Storage Systems
DAM	Day-Ahead Market
FCR	Frequency Containment Reserve
HEnEx	Hellenic Energy Exchange
IDM	Intraday Market
ISP	Integrated Scheduling Process
LFP	Lithium Iron Phosphate
LP	Linear Programming
MILP	Mixed-Integer Linear Programming
mFRR	Manual Frequency Restoration Reserve
RTBM	Real-Time Balancing Market
SoC	State of Charge
TSO	Transmission System Operator
ΑΔΜΗΕ	Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΔΕΠ	Διαδικασία Ενοποιημένου Προγραμματισμού
ΕΣΕΚ	Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα
ΕΣΜΗΕ	Ελληνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΟΔΑΗΕ	Ορισθείς Διαχειριστής Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΥΠΕΝ	Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Γενικό Πλαίσιο

Η ενεργειακή μετάβαση προς ένα σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με υψηλή διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελεί κεντρικό πυλώνα της ευρωπαϊκής και ελληνικής ενεργειακής πολιτικής. Η επίτευξη των στόχων μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050 προϋποθέτει τη συστηματική αντικατάσταση των συμβατικών μονάδων ορυκτών καυσίμων με ανανεώσιμες τεχνολογίες, κυρίως φωτοβολταϊκά και αιολικά πάρκα.

Η επιταχυνόμενη διείσδυση των ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα, ωστόσο, επιφέρει θεμελιώδεις αλλαγές στη λειτουργία των ηλεκτρικών συστημάτων. Η στοχαστική φύση των φωτοβολταϊκών και αιολικών εγκαταστάσεων μεταβάλλει το ημερήσιο προφίλ λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρισμού και δημιουργεί χρονικές ασυμμετρίες μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης, οι οποίες εκδηλώνονται, συνήθως, ως περίοδοι πλεονάσματος ενέργειας κατά τις μεσημβρινές ώρες και ελλείμματος κατά τις βραδινές ώρες αιχμής. Η μεταβλητότητα αυτή καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη επαρκών μηχανισμών ευελιξίας που θα διασφαλίζουν τη σταθερότητα, την αξιοπιστία και την οικονομική αποδοτικότητα του συστήματος.

Στο εξελισσόμενο αυτό τοπίο, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, και ιδιαίτερα τα συστήματα μπαταριών (Battery Energy Storage Systems — BESS), αποτελούν κρίσιμη τεχνολογία για τη διαχείριση της χρονικής ασυμμετρίας. Τα BESS παρέχουν τη δυνατότητα μετατόπισης ενέργειας από περιόδους χαμηλού κόστους σε περιόδους υψηλής αξίας, συμβάλλοντας παράλληλα στη μείωση των περικοπών ΑΠΕ και στη βελτίωση της οικονομικής αποδοτικότητας του συστήματος. Τα συστήματα μπαταριών καλύπτουν ακριβώς την κλίμακα της ημερήσιας μετατόπισης ενέργειας, ενώ η ικανότητά τους για ταχεία απόκριση και αμφίδρομη λειτουργία τα καθιστούν κατάλληλα για την παροχή υπηρεσιών εξισορρόπησης, συμπεριλαμβανομένων της πρωτογενούς, δευτερογενούς και τριτογενούς ρύθμισης συχνότητας.

Στο επίπεδο της αγοράς, η ενεργή συμμετοχή των BESS ενισχύει τη ρευστότητα των ηλεκτρικών αγορών. Μέσω στρατηγικών arbitrage, τα συστήματα αυτά τείνουν να μειώνουν τη διακύμανση των τιμών, αγοράζοντας ενέργεια κατά τις περιόδους πλεονάσματος και πωλώντας κατά τις περιόδους ελλείμματος. Παράλληλα, η δυνατότητα «στοίβαξης» εσόδων από διαφορετικές αγορές (ενέργεια, ισχύς, επικουρικές υπηρεσίες) ενισχύει τη βιωσιμότητα των επενδύσεων και διευρύνει το φάσμα των διαθέσιμων υπηρεσιών.

1.2 Προβληματισμός και Ερευνητικό Κενό

Παρά τη σημαντική ανάπτυξη της αγοράς BESS τόσο στην Ευρώπη όσο και στην Ελλάδα, με εγκατεστημένη χωρητικότητα που αυξάνεται ταχέως, υπάρχει ανάγκη για εμβάθυνση στην κατανόηση των βέλτιστων στρατηγικών λειτουργίας και συμμετοχής των συστημάτων αυτών στις ηλεκτρικές αγορές. Η πολυπλοκότητα των σύγχρονων αγορών ενέργειας, με πολλαπλά τμήματα (ημερήσια αγορά, ενδοημερήσια αγορά, αγορές εξισορρόπησης) και διαφορετικούς μηχανισμούς τιμολόγησης, απαιτεί την ανάπτυξη ολοκληρωμένων μεθοδολογικών εργαλείων που θα επιτρέπουν τον προσδιορισμό των βέλτιστων επιχειρησιακών αποφάσεων.

Οι ιδιοκτήτες και διαχειριστές συστημάτων αποθήκευσης αντιμετωπίζουν σύνθετες αποφάσεις σχετικά με την επιλογή της αγοράς ή του συνδυασμού αγορών στις οποίες θα συμμετέχουν, τη χρονική κατανομή των κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης, τη διαχείριση της χωρητικότητας και της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας, καθώς και τη δέσμευση ισχύος για παροχή εφεδρειών έναντι της συμμετοχής σε arbitrage ενέργειας. Οι αποφάσεις αυτές επηρεάζονται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συστημάτων (χωρητικότητα, ισχύς, απόδοση, κύκλοι ζωής), τη δυναμική των τιμών στις διάφορες αγορές, τους κανονιστικούς περιορισμούς και τις απαιτήσεις του ηλεκτρικού συστήματος.

Η διεθνής βιβλιογραφία έχει αναπτύξει πολλαπλές προσεγγίσεις για τη βελτιστοποίηση των συστημάτων αποθήκευσης, από απλοποιημένα μοντέλα arbitrage σε μεμονωμένες αγορές έως σύνθετα μοντέλα στοχαστικής βελτιστοποίησης. Οι μέθοδοι γραμμικού προγραμματισμού (Linear Programming — LP) και μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (Mixed-Integer Linear Programming — MILP) έχουν εφαρμοστεί ευρέως για τον προσδιορισμό βέλτιστων στρατηγικών. Ωστόσο, η εφαρμογή των μεθοδολογιών αυτών στο συγκεκριμένο πλαίσιο της ελληνικής αγοράς, με τα ιδιαίτερα λειτουργικά της χαρακτηριστικά και τους κανόνες συμμετοχής των BESS, παραμένει περιορισμένη.

Επιπλέον, η δυνατότητα στοίβαξης εσόδων από την ταυτόχρονη συμμετοχή σε πολλαπλές αγορές — όπως η συνδυασμένη παροχή arbitrage ενέργειας στην ημερήσια αγορά και εφεδρειών στις αγορές εξισορρόπησης — αποτελεί ιδιαίτερα ενδιαφέρον ερευνητικό πεδίο με σημαντικές πρακτικές επιπτώσεις στη βιωσιμότητα των επενδύσεων σε αποθήκευση. Η αλληλεπίδραση μεταξύ διαφορετικών αγορών, οι τεχνικοί περιορισμοί που επιβάλλονται από τους κανόνες συμμετοχής και η ανάγκη για συντονισμένη βελτιστοποίηση σε πολλαπλά χρονικά ορίζοντα απαιτούν εξελιγμένα μαθηματικά μοντέλα και υπολογιστικές μεθόδους.

1.3 Σκοπός και Στόχοι της Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στον προσδιορισμό της βέλτιστης στρατηγικής συμμετοχής των stand-alone BESS στην ελληνική αγορά ηλεκτρισμού, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τους τεχνικούς περιορισμούς των συστημάτων αποθήκευσης όσο και τη δομή και τους κανόνες λειτουργίας των αγορών ενέργειας.

Συγκεκριμένα, επιδιώκεται η κατανόηση των οικονομικών κινήτρων που προκύπτουν από τη συμμετοχή σε διαφορετικές αγορές (ημερήσια αγορά, ενδοημερήσια αγορά, αγορές εξισορρόπησης) μέσω στρατηγικών arbitrage και παροχής εφεδρειών, η αξιολόγηση των τεχνικών περιορισμών που επηρεάζουν τις επιχειρησιακές αποφάσεις (χωρητικότητα, ισχύς, απόδοση) και η ανάπτυξη μεθοδολογικού πλαισίου βελτιστοποίησης που ενσωματώνει τη διασύνδεση μεταξύ τεχνικών χαρακτηριστικών, κανονιστικών περιορισμών και σημάτων τιμών της αγοράς.

Με βάση ιστορικά δεδομένα τιμών και απαιτήσεων του ελληνικού ηλεκτρικού συστήματος για το έτος 2024, αξιολογούνται εναλλακτικοί τρόποι συμμετοχής του BESS ως asset σε μεμονωμένες αγορές και σε συνδυασμούς αυτών, με κριτήριο αξιολόγησης την οικονομική αποζημίωση που λαμβάνει από τις διαφορετικές στρατηγικές.

Οι ειδικότεροι στόχοι της έρευνας περιλαμβάνουν:

1. **Ανάλυση του θεσμικού και λειτουργικού πλαισίου:** Κατανόηση της δομής και των κανόνων λειτουργίας των ελληνικών αγορών ηλεκτρικής ενέργειας (ημερήσια, ενδοημερήσια, εξισορρόπησης) και των προϋποθέσεων συμμετοχής των BESS.
2. **Μοντελοποίηση του συστήματος BESS:** Ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων που αναπαριστούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά και περιορισμούς του συστήματος αποθήκευσης (χωρητικότητα, ισχύς φόρτισης/εκφόρτισης, απόδοση, όρια λειτουργίας).
3. **Διατύπωση προβλημάτων βελτιστοποίησης:** Διαμόρφωση μαθηματικού προγραμματισμού για τον προσδιορισμό της βέλτιστης στρατηγικής λειτουργίας που μεγιστοποιεί τα έσοδα, λαμβάνοντας υπόψη τη δυνατότητα συμμετοχής σε πολλαπλές αγορές.
4. **Υλοποίηση και επίλυση των μοντέλων:** Ανάπτυξη υπολογιστικών εργαλείων για την επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης και την εξαγωγή αποτελεσμάτων.
5. **Αξιολόγηση στρατηγικών συμμετοχής:** Σύγκριση διαφορετικών σεναρίων λειτουργίας (μεμονωμένες αγορές, συνδυασμοί αγορών) και προσδιορισμός της βέλτιστης συμμετοχής.
6. **Εξαγωγή συμπερασμάτων και συστάσεων:** Διατύπωση συμπερασμάτων σχετικά με τη βέλτιστη στρατηγική συμμετοχής των BESS στην ελληνική αγορά και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

1.4 Μεθοδολογική Προσέγγιση

Η μεθοδολογία της εργασίας βασίζεται σε μαθηματική μοντελοποίηση και γραμμικό προγραμματισμό για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα:

- Αναπτύσσονται μοντέλα βελτιστοποίησης που μοντελοποιούν τη λειτουργία του BESS υπό διαφορετικά σενάρια συμμετοχής στις αγορές (Day-Ahead Market, Balancing Markets).
- Χρησιμοποιούνται ιστορικά δεδομένα από το ελληνικό ηλεκτρικό σύστημα για το έτος 2024, συμπεριλαμβανομένων χρονοσειρών τιμών ενέργειας και εφεδρειών, καθώς και πραγματικών απαιτήσεων εξισορρόπησης.
- Εφαρμόζονται τεχνικές μαθηματικού προγραμματισμού (Linear Programming — LP, Mixed-Integer Linear Programming — MILP) για την επίλυση των προβλημάτων με χρήση εξειδικευμένου λογισμικού.
- Πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας για την εξέταση της επίδρασης διαφορετικών παραμέτρων (χωρητικότητα, απόδοση, τιμές) στα αποτελέσματα.
- Συγκρίνονται εναλλακτικά σενάρια λειτουργίας και προσδιορίζονται οι συνθήκες υπό τις οποίες κάθε στρατηγική είναι βέλτιστη.

1.5 Δομή της Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία διαρθρώνεται σε 6 κύρια κεφάλαια:

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Παρουσιάζονται ο σκοπός, τα κίνητρα και οι βασικοί προβληματισμοί της έρευνας, το ευρωπαϊκό και ελληνικό πλαίσιο αναφοράς, καθώς και η συνοπτική δομή της εργασίας.

Κεφάλαιο 2: Ρυθμιστικό πλαίσιο και αγορές ενέργειας

Παρουσιάζεται το ευρύτερο πλαίσιο πολιτικής για την αποθήκευση ενέργειας σε ευρωπαϊκό και ελληνικό επίπεδο, οι στόχοι του Εθνικού Σχεδίου για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ) και οι προβλέψεις ανάπτυξης της αγοράς BESS. Αναλύεται η δομή της ελληνικής αγοράς ηλεκτρισμού, συμπεριλαμβανομένης της ημερήσιας αγοράς (Day-Ahead Market), της ενδοημερήσιας αγοράς (Intraday Market) και των αγορών εξισορρόπησης. Περιγράφονται οι κανόνες λειτουργίας, οι μηχανισμοί τιμολόγησης και οι προϋποθέσεις συμμετοχής των BESS.

Κεφάλαιο 3: Stand-alone BESS και στρατηγικές συμμετοχής στις αγορές

Περιγράφονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συστημάτων αποθήκευσης, οι διαφορετικές τεχνολογίες μπαταριών, οι λειτουργικοί περιορισμοί και οι παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση και τον κύκλο ζωής του συστήματος. Τεκμηριώνεται η σημασία της αποθήκευσης στο σύγχρονο ενεργειακό σύστημα λόγω της στοχαστικής φύσης των ΑΠΕ και των χρονικών ασυμμετριών που δημιουργούνται μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης. Παρουσιάζονται οι διάφορες στρατηγικές συμμετοχής των BESS στις αγορές ενέργειας, συμπεριλαμβανομένου του arbitrage και της παροχής υπηρεσιών εξισορρόπησης.

Κεφάλαιο 4: Μοντελοποίηση και Μεθοδολογία

Παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο των μεθόδων βελτιστοποίησης που εφαρμόζονται, καθώς και οι αρχές του arbitrage στις αγορές ενέργειας. Διατυπώνονται οι βασικές μαθηματικές αρχές και οι μέθοδοι επίλυσης προβλημάτων μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού. Παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε για τη μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση του BESS, περιγράφονται οι πηγές δεδομένων, οι παράμετροι και οι υποθέσεις της έρευνας. Παρουσιάζεται η λεπτομερής μαθηματική διατύπωση των προβλημάτων βελτιστοποίησης για τα τέσσερα μοντέλα που αναπτύχθηκαν (M1: DAM, M2: DAM με ενέργεια εξισορρόπησης, M3: DAM με ενέργεια και ισχύ εξισορρόπησης με περιορισμό κατεύθυνσης, M4: πλήρης συμμετοχή στις αγορές).

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα

Επilύονται τα μοντέλα με βάση τα δεδομένα του 2024 και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, συμπεριλαμβανομένων των οικονομικών αποδόσεων, των λειτουργικών προφίλ και των συγκρίσεων μεταξύ εναλλακτικών στρατηγικών. Πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας ως προς βασικές παραμέτρους του συστήματος (κύκλοι φόρτισης, διάρκεια, ισχύς).

Κεφάλαιο 6: Σύνοψη και Συμπεράσματα

Συνοψίζονται τα κύρια ευρήματα της έρευνας και διατυπώνονται συμπεράσματα σχετικά με τη βέλτιστη στρατηγική λειτουργίας των BESS στην ελληνική αγορά. Αναλύονται οι ευκαιρίες και η δυναμική του ελληνικού πλαισίου 2024 για την ανάπτυξη συστημάτων αποθήκευσης και προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα και επεκτάσεις του μοντέλου.

1.6 Αναμενόμενη Συμβολή

Μέσω της προσέγγισης αυτής, η παρούσα εργασία επιδιώκει να συμβάλει:

- Στην **κατανόηση των οικονομικών κινήτρων** που προκύπτουν από τη συμμετοχή των BESS σε διαφορετικές ελληνικές αγορές ηλεκτρισμού.
- Στην **ανάπτυξη μεθοδολογικών εργαλείων** που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από επενδυτές, ιδιοκτήτες και διαχειριστές συστημάτων αποθήκευσης για τη λήψη βέλτιστων επιχειρησιακών αποφάσεων.
- Στην **τεκμηρίωση της αξίας της στοίβαξης εσόδων** από πολλαπλές αγορές και την αναγνώριση των τεχνικών και θεσμικών προϋποθέσεων που τη διευκολύνουν.
- Στην **υποστήριξη στρατηγικών αποφάσεων** στον τομέα της αποθήκευσης και στην ευρύτερη κατανόηση του ρόλου των BESS στη βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας και ευστάθειας του ελληνικού ηλεκτρικού συστήματος.
- Στη **στήριξη της διαμόρφωσης πολιτικών** για την περαιτέρω ανάπτυξη της αγοράς αποθήκευσης στην Ελλάδα.

Κεφάλαιο 2

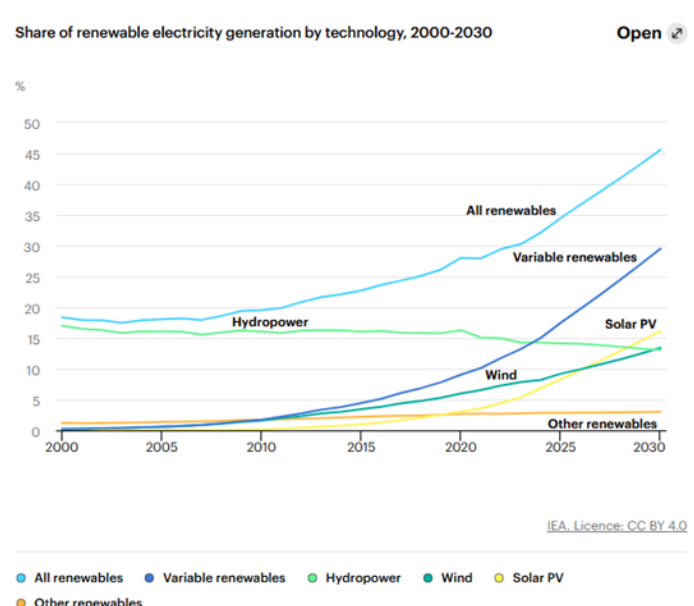
Ρυθμιστικό Πλαίσιο και Αγορές Ενέργειας

2.1 Ευρωπαϊκό & Ελληνικό Πλαίσιο και Κίνητρο

2.1.1 Η σημασία της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στο σύγχρονο ενεργειακό σύστημα

Την τελευταία δεκαετία, η ενεργειακή μετάβαση στην Ευρώπη έχει επιταχύνει τη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), επιφέροντας θεμελιώδεις αλλαγές στη λειτουργία των ηλεκτρικών συστημάτων. Η στοχαστική φύση των φωτοβολταϊκών και αιολικών εγκαταστάσεων μεταβάλλει το ημερήσιο προφίλ λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρισμού και δημιουργεί χρονικές ασυμμετρίες μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης, οι οποίες εκδηλώνονται ως περίοδοι πλεονάσματος ενέργειας κατά τις μεσημβρινές ώρες και ελλείμματος κατά τις βραδινές ώρες αιχμής.

Όπως αποτυπώνεται στο Σχήμα 2.1, έως το 2030 η άνοδος των ΑΠΕ προέρχεται κυρίως από τις μεταβλητές τεχνολογίες, με τον άνεμο και τα φωτοβολταϊκά να πολλαπλασιάζουν το μερίδιό τους, ενώ τα υδροηλεκτρικά διατηρούνται σε σχεδόν οριζόντια τροχιά.



Σχήμα 2.1: Μερίδιο ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ ανά τεχνολογία, 2000–2030. Πηγή: [1].

Η σύνθεση αυτή αυξάνει την ενδοημερήσια μεταβλητότητα της παραγωγής και εντείνει τη χρονική ασυμμετρία μεταξύ μεσημβρινών πλεονασμάτων και βραδινών ελλειμμάτων.

Σε αυτό το εξελισσόμενο τοπίο, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, και ιδιαίτερα τα συστήματα μπαταριών (Battery Energy Storage Systems — BESS), αποτελούν κρίσιμη τεχνολογία για τη διαχείριση της χρονικής ασυμμετρίας. Τα BESS παρέχουν τη δυνατότητα μετατόπισης ενέργειας από περιόδους χαμηλού κόστους σε περιόδους υψηλής αξίας, συμβάλλοντας παράλληλα στη μείωση των περικοπών ΑΠΕ και στη βελτίωση της οικονομικής αποδοτικότητας του συστήματος. Τα συστήματα μπαταριών καλύπτουν ακριβώς την κλίμακα της ημερήσιας μετατόπισης ενέργειας, ενώ τεχνολογίες μεγαλύτερης διάρκειας, όπως η αντλησιοταμίευση, συμπληρώνουν την εποχική και πολυημερή ευελιξία.

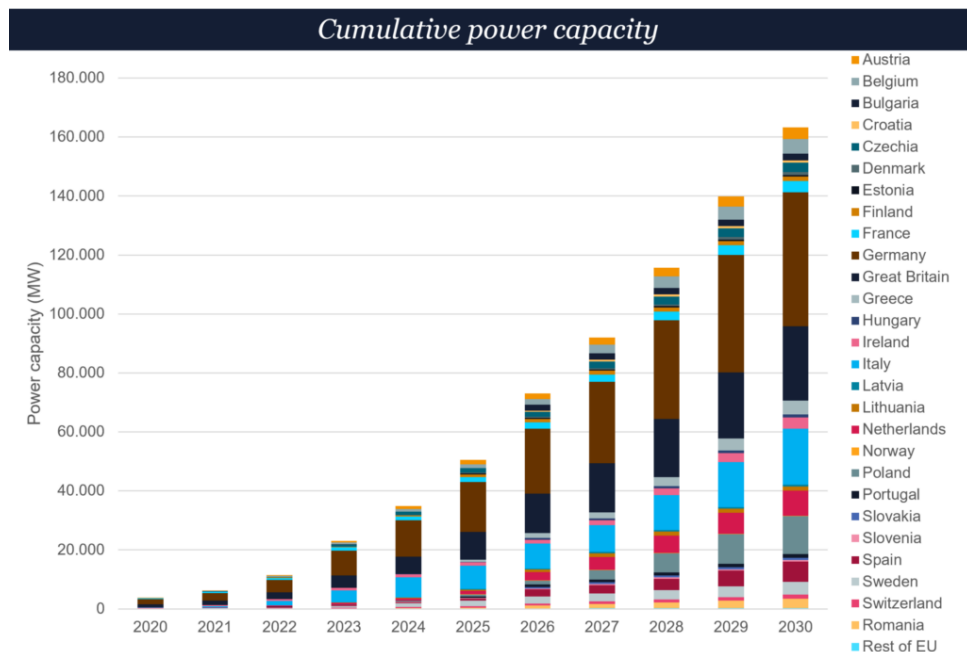
Από τεχνική άποψη, τα BESS παρουσιάζουν ιδιαίτερα πλεονεκτήματα στη βραχυπρόθεσμη και ημερήσια κλίμακα διαχείρισης. Η ικανότητά τους για ταχεία απόκριση σε χρονικό διάστημα λεπτών και η αμφίδρομη λειτουργία τα καθιστούν κατάλληλα για την παροχή υπηρεσιών εξισορρόπησης, συμπεριλαμβανομένων της πρωτογενούς (Frequency Containment Reserve — FCR), δευτερογενούς (automatic Frequency Restoration Reserve — aFRR) και τριτογενούς (manual Frequency Restoration Reserve — mFRR) ρύθμισης συχνότητας. Η παροχή αυτών των υπηρεσιών με μικρούς χρόνους ενεργοποίησης και υψηλή επαναληψιμότητα θέτει τα BESS στον πυρήνα της βραχυπρόθεσμης και ημερήσιας διαχείρισης του συστήματος.

Στο επίπεδο της αγοράς, η ενεργή συμμετοχή των BESS ενισχύει τη ρευστότητα των ηλεκτρικών αγορών. Μέσω στρατηγικών arbitrage, τα συστήματα αυτά τείνουν να μειώνουν τη διακύμανση των τιμών, αγοράζοντας ενέργεια κατά τις περιόδους πλεονάσματος και πωλώντας κατά τις περιόδους ελλείμματος. Παράλληλα, η συμμετοχή τους στις αγορές ενέργειας (ημερήσια/ενδοημερήσια) και εξισορρόπησης αυξάνει τη ρευστότητα της αγοράς, ενώ η δυνατότητα «στοίβαξης» εσόδων από διαφορετικές αγορές (ενέργεια, ισχύς, επικουρικές υπηρεσίες) ενισχύει τη βιωσιμότητα των επενδύσεων και διευρύνει το φάσμα των διαθέσιμων υπηρεσιών.

2.1.2 Το ευρωπαϊκό πλαίσιο πολιτικής για την αποθήκευση ενέργειας

Η ευρωπαϊκή ενεργειακή πολιτική διαμορφώνεται γύρω από την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (*European Green Deal*), η οποία ορίζει ως στρατηγικό στόχο την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050, με ενδιάμεσο στόχο μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 55% μέχρι το 2030 [9]. Το νομοθετικό πακέτο «Fit for 55» εξειδικεύει αυτούς τους στόχους σε μετρήσιμα αποτελέσματα [10], ενώ η αναθεωρημένη Οδηγία για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (RED III) θεσπίζει δεσμευτικό μερίδιο ΑΠΕ τουλάχιστον 42,5% έως το 2030, με φιλοδοξία επίτευξης 45% [11], και παράλληλα επιταχύνει τις αδειοδοτικές διαδικασίες, εντείνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο την ανάγκη για μηχανισμούς ευελιξίας και αποθήκευσης.

Στο επίπεδο της πραγματικής αγοράς, οι ευρωπαϊκές εγκαταστάσεις αποθήκευσης παρουσίασαν σημαντική αύξηση κατά την περίοδο 2024–2025. Σύμφωνα με τα δεδομένα του European Market Monitor on Energy Storage (EASE/LCP Delta), το έτος 2024 χαρακτηρίστηκε από την εγκατάσταση 11,9 GW νέας χωρητικότητας αποθήκευσης στην Ευρώπη, ανεβάζοντας τη συνολική λειτουργική χωρητικότητα στα 89 GW [2], ενώ οι προβλέψεις έως το 2030 υποδεικνύουν συνεχιζόμενη ισχυρή ανοδική τάση, ιδιαίτερα στα μεγάλης κλίμακας έργα (Σχήμα 2.2).

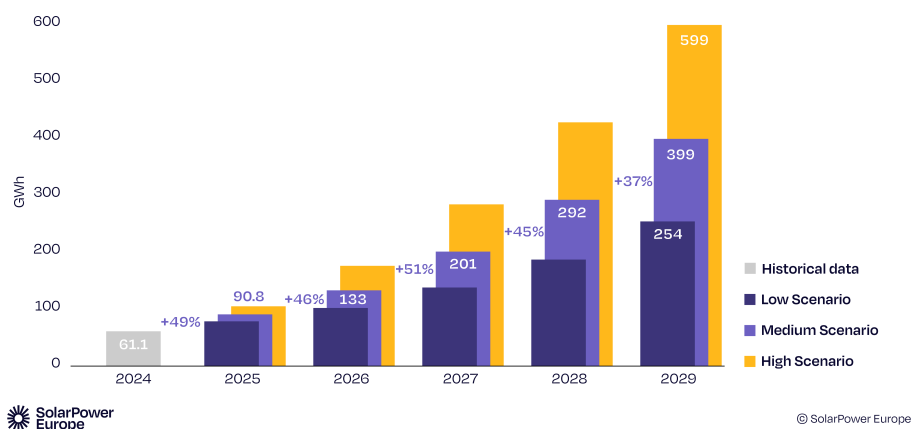


Σχήμα 2.2: Εγκατεστημένη χωρητικότητα αποθήκευσης στην Ευρώπη και προοπτικές έως το 2030. Πηγή: [2].

Η μελέτη της SolarPower Europe προσφέρει συμπληρωματική ανάλυση της αγοράς μέσω σεναριακής προσέγγισης, προβλέποντας ισχυρή αναπτυξιακή πορεία για την περίοδο 2025–2029. Το κεντρικό σενάριο εκτιμά σωρευτική χωρητικότητα περίπου 400 GWh έως το 2029, με ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης της τάξης του 45%, υποδεικνύοντας την ταχεία ωρίμανση της ευρωπαϊκής αγοράς αποθήκευσης (Σχήμα 2.3) [3].

European battery fleet on track to reach 400 GWh by 2029 but true potential lies 200 GWh above

Europe cumulative BESS market scenarios 2025–2029



Σχήμα 2.3: Ευρωπαϊκή αγορά αποθήκευσης σε μπαταρίες: σενάρια ανάπτυξης 2025–2029. Πηγή: [3].

2.1.3 Το ελληνικό πλαίσιο για την αποθήκευση ενέργειας

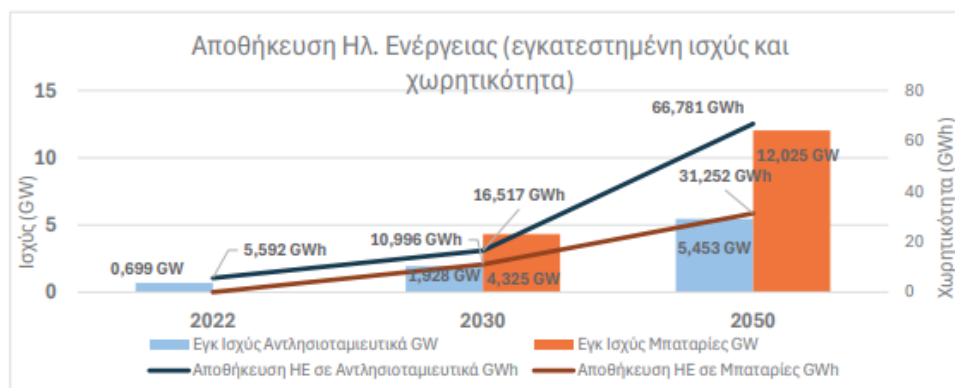
Σε συνέχεια των ευρωπαϊκών πολιτικών κατευθύνσεων, η Ελλάδα έχει διαμορφώσει ένα συγκεκριμένο εθνικό πλαίσιο για την ανάπτυξη της αποθήκευσης ενέργειας. Το αναθεωρημένο Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ) της Ελλάδας, υποβληθέν το 2024 για την περίοδο 2021–2030 με προβολές

έως το 2050, συνιστά τον βασικό προγραμματικό οδηγό για την ενεργειακή μετάβαση της χώρας [4]. Η επιταχυνόμενη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα, η οποία αναμένεται να συνοδευτεί από αυξημένη στοχαστικότητα και μεταβλητότητα στην παραγωγή, καθιστά αναγκαία την παράλληλη ανάπτυξη επαρκούς χωρητικότητας αποθήκευσης. Το ΕΣΕΚ αναγνωρίζει αυτή τη συνάφεια και μεταφράζει τις ευρωπαϊκές κατευθύνσεις σε συγκεκριμένους ποσοτικούς στόχους για την αποθήκευση, τονίζοντας τον κεντρικό της ρόλο στη διασφάλιση της ασφάλειας εφοδιασμού και τη μείωση του κόστους εξισορρόπησης.

Σε ποσοτικό επίπεδο, το ΕΣΕΚ προβλέπει σημαντική αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος και χωρητικότητας αποθήκευσης. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς αναμένεται να φτάσει τα 6.070 MW έως το 2030, με αντίστοιχη χωρητικότητα 24,94 GWh, ενώ οι μακροπρόθεσμες προβλέψεις για το 2050 είναι ακόμη πιο φιλόδοξες, με στόχο τα 17.480 MW εγκατεστημένης ισχύος και 98,02 GWh χωρητικότητας. Η προοδευτική αυτή κλιμάκωση αντανάκλα τη συστηματική ενσωμάτωση της αποθήκευσης στην αρχιτεκτονική του ελληνικού ηλεκτρικού συστήματος.

Η κατανομή της χωρητικότητας μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών αποθήκευσης ακολουθεί τη λειτουργική τους εξειδίκευση και τις χρονικές κλίμακες στις οποίες αυτές προσφέρουν ευελιξία. Για το 2030, η προβλεπόμενη χωρητικότητα κατανέμεται σε περίπου 14,0 GWh από αντλησιοταμίευση και 11,0 GWh από συστήματα μπαταριών. Έως το 2050, η κατανομή μετατοπίζεται σημαντικά προς την αντλησιοταμίευση (66,8 GWh έναντι 31,2 GWh για τις μπαταρίες), γεγονός που υπογραμμίζει την καταλληλότητα της πρώτης τεχνολογίας για μακροχρόνια αποθήκευση και εποχική ευελιξία, ενώ τα BESS διατηρούν τον κρίσιμο ρόλο τους στην ημερήσια διαχείριση και την παροχή επικουρικών υπηρεσιών.

Η εντατικότητα χρήσης των συστημάτων αποθήκευσης αποτυπώνεται στην προβλεπόμενη ετήσια ενέργεια που αναμένεται να διακινείται μέσω αυτών: 9,0 TWh το 2030 και 26,0 TWh το 2050. Οι ποσότητες αυτές υποδηλώνουν την εντατική επιχειρησιακή ενσωμάτωση της αποθήκευσης στην καθημερινή λειτουργία του ελληνικού ηλεκτρικού συστήματος και την κεντρική της συμβολή στην εξισορρόπηση προσφοράς και ζήτησης υπό συνθήκες υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ (Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4: Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα: εγκατεστημένη ισχύς (GW) και χωρητικότητα (GWh) ανά τεχνολογία, 2022–2050. Πηγή: [4].

Από θεσμικής και λειτουργικής πλευράς, το ΕΣΕΚ ευθυγραμμίζεται με την ευρωπαϊκή αρχή της τεχνολογικής ουδετερότητας και προβλέπει την πλήρη ενσωμάτωση των συστημάτων αποθήκευσης ως οντοτήτων παροχής υπηρεσιών εξισορρόπησης (Balancing Service Entities) στις αγορές ενέργειας και ισχύος. Η αναμενόμενη λειτουργική συμβολή των BESS στο ηλεκτρικό σύστημα είναι πολύπλευρη: προβλέπεται η υποκατάσταση συμβατικών μονάδων φυσικού αερίου κατά τις ώρες αιχμής μέσω απορρόφησης ενέργειας ΑΠΕ κατά τις μεσημεριανές ώρες—ενέργειας που ούτως ή άλλως πιθανώς θα απορριπτόταν λόγω περιορισμών του δικτύου. Παράλληλα, η συμμετοχή των BESS στις αγορές ενέργειας και εξισορ-

ρόπησης αναμένεται να ενισχύσει τη ρευστότητα της αγοράς και να συμβάλει στη μείωση των τιμών εξισορρόπησης, ενώ η ικανότητά τους να ελαχιστοποιούν τους περιορισμούς έγχυσης σε σταθμούς ΑΠΕ λόγω ανισορροπιών μεταξύ παραγωγής και ζήτησης αναμένεται να βελτιώσει τη συνολική αξιοποίηση των ανανεώσιμων πόρων της χώρας.

Σημαντική θεσμική καινοτομία αποτελεί η δυνατότητα παροχής εφεδρειών χωρίς ταυτόχρονη έγχυση ή απορρόφηση ενέργειας, χαρακτηριστικό που διευρύνει το φάσμα διαθέσιμων υπηρεσιών και επιτρέπει στοίβαξη εσόδων σε πολλαπλά προϊόντα. Αυτή η ευελιξία ενισχύει σημαντικά την επιχειρηματική βιωσιμότητα των επενδύσεων σε αποθήκευση.

Για την υλοποίηση των στόχων, το ΕΣΕΚ συνοδεύτηκε από σειρά ανταγωνιστικών διαδικασιών στήριξης για έργα stand-alone BESS. Οι τρεις πρώτοι γύροι προκηρύχθηκαν κατά την περίοδο 2023–2024 με στόχο την επιλογή έργων συνολικής ισχύος περίπου 900 MW. Οι διαδικασίες αυτές ολοκληρώθηκαν επιτυχώς, προσελκύοντας σημαντικό επενδυτικό ενδιαφέρον και δημιουργώντας την απαραίτητη κρίσιμη μάζα για την ανάπτυξη μιας λειτουργικής και ανταγωνιστικής αγοράς αποθήκευσης στην Ελλάδα. [12–14]

2.2 Ελληνική Αγορά Ηλεκτρικής Ενέργειας

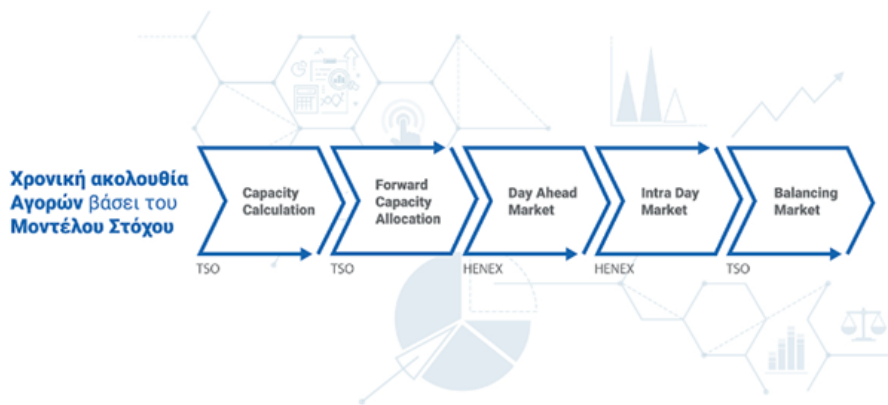
Η κατανόηση της δομής και των μηχανισμών λειτουργίας της ελληνικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση για τη μοντελοποίηση της συμμετοχής συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σε μπαταρίες (Battery Energy Storage Systems - BESS). Η ανάλυση της οργάνωσης των χονδρεμπορικών αγορών, των κανόνων συμμετοχής, των μηχανισμών τιμοδιαμόρφωσης και των μεθόδων αποζημίωσης καθιστά δυνατή την ακριβή διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης και τον προσδιορισμό των περιορισμών που διέπουν τη λειτουργία των συστημάτων BESS. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η διάρθρωση της ελληνικής αγοράς σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Μοντέλο-Στόχο, οι λειτουργικοί μηχανισμοί των επιμέρους αγορών, οι κανόνες υποβολής προσφορών και αποζημίωσης (pay-as-clear και pay-as-bid), καθώς και το ρυθμιστικό πλαίσιο που διέπει τη συμμετοχή των συστημάτων αποθήκευσης, παρέχοντας το αναγκαίο θεωρητικό υπόβαθρο για την ανάπτυξη του προτεινόμενου μοντέλου βελτιστοποίησης.

2.2.1 Διάρθρωση της Ελληνικής Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η ελληνική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας οργανώνεται σύμφωνα με το ευρωπαϊκό «Μοντέλο Στόχου» (Target Model), ένα ενοποιημένο πλαίσιο που αναπτύχθηκε με τη συμμετοχή της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, του Οργανισμού Συνεργασίας των Ρυθμιστικών Αρχών Ενέργειας (ACER), των Διαχειριστών Συστημάτων Μεταφοράς και των εθνικών Ρυθμιστικών Αρχών. Το μοντέλο αυτό στοχεύει στη βελτιστοποίηση της αξιοποίησης του δικτύου μεταφοράς, στη διαμόρφωση αξιόπιστων τιμών με επαρκή ρευστότητα, και στην αποτελεσματική λειτουργία των χονδρεμπορικών αγορών σε όλα τα χρονικά επίπεδα [15].

Η δομή της αγοράς ακολουθεί μια χρονική αλληλουχία διαδοχικών αγορών που εξασφαλίζει την προοδευτική εξισορρόπηση της προσφοράς και της ζήτησης, από το μακροπρόθεσμο επίπεδο μέχρι τον πραγματικό χρόνο λειτουργίας του συστήματος. Διακρίνονται τέσσερις οργανωμένες αγορές ενεργειακών προϊόντων χονδρικής:

- **Προθεσμιακή Αγορά (Forward Market):** διαπραγμάτευση μεσοπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων συμβάσεων παράδοσης ενέργειας



Σχήμα 2.5: Χρονική ακολουθία αγορών ηλεκτρικής ενέργειας. Πηγή: ΑΔΜΗΕ [5]

- **Αγορά Επόμενης Ημέρας (Day-Ahead Market):** κεντρικός μηχανισμός τιμοδιαμόρφωσης και προγραμματισμού για την επόμενη ημέρα
- **Ενδοημερήσια Αγορά (Intraday Market):** προσαρμογή των θέσεων των συμμετεχόντων εγγύτερα στην ώρα παράδοσης
- **Αγορά Εξισορρόπησης (Balancing Market):** διασφάλιση της ισορροπίας του συστήματος σε πραγματικό χρόνο

Η λειτουργία των τριών πρώτων αγορών έχει ανατεθεί στο Ελληνικό Χρηματιστήριο Ενέργειας (HEEnEx), το οποίο ενεργεί ως Ορισθείς Διαχειριστής Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΟΔΑΗΕ). Αντίθετα, η Αγορά Εξισορρόπησης διαχειρίζεται από τον Ανεξάρτητο Διαχειριστή Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ), εξασφαλίζοντας τον λειτουργικό διαχωρισμό μεταξύ εμπορικών δραστηριοτήτων και λειτουργίας του συστήματος, γεγονός που συμβάλλει στη διαφάνεια και στην αξιοπιστία της αγοράς [15, 16].

2.2.2 Χονδρεμπορικές Αγορές Ενέργειας (Wholesale Markets)

Οι χονδρεμπορικές αγορές ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν τον πυρήνα του ελεύθερου ανταγωνιστικού περιβάλλοντος στον ενεργειακό τομέα, επιτρέποντας τη διαπραγμάτευση μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ παραγωγών, προμηθευτών και μεγάλων καταναλωτών. Στην Ελλάδα, η λειτουργία των οργανωμένων χονδρεμπορικών αγορών ανατίθεται στο Ελληνικό Χρηματιστήριο Ενέργειας (Hellenic Energy Exchange - HEEnEx), το οποίο δρα ως Ορισθείς Διαχειριστής Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΟΔΑΗΕ) για τη Ζώνη Προσφοράς της χώρας.

Δομή και Λειτουργία της Αγοράς Η χονδρεμπορική αγορά διαρθρώνεται σε διάφορα χρονικά επίπεδα διαπραγμάτευσης, με κύριες συνιστώσες την Αγορά Επόμενης Ημέρας (Day-Ahead Market) και την Ενδοημερήσια Αγορά (Intraday Market). Οι συναλλαγές πραγματοποιούνται σε οργανωμένο πλαίσιο που διασφαλίζει τη διαφάνεια των τιμών, την αποτελεσματική εξισορρόπηση προσφοράς και ζήτησης, και τη συμμόρφωση με τα ευρωπαϊκά ρυθμιστικά πρότυπα. Η ενσωμάτωση της ελληνικής αγοράς στο πανευρωπαϊκό πλαίσιο διαπραγμάτευσης ενισχύει τη διασυνοριακή ρευστότητα και την αποδοτική κατανομή των ενεργειακών πόρων [15].

2.2.2.1 Αγορά Επόμενης Ημέρας (Day-Ahead Market)

Η Αγορά Επόμενης Ημέρας αποτελεί τον κεντρικό πυλώνα της χονδρεμπορικής αγοράς και τον κύριο μηχανισμό τιμοδιαμόρφωσης. Πραγματοποιούνται συναλλαγές αγοράς και πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας με υποχρέωση φυσικής παράδοσης την επόμενη ημέρα (Ημέρα Εκπλήρωσης Φυσικής Παράδοσης), σε ωριαία βάση. Οι προσφορές υποβάλλονται την ημερομηνία D-1 για παράδοση κατά την ημέρα D. Επιπλέον, δηλώνονται συναλλαγές που διενεργούνται επί Ενεργειακών Χρηματοπιστωτικών Μέσων με φυσική παράδοση.

Η συμμετοχή στη DAM είναι υποχρεωτική για τους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας και προαιρετική για τους λοιπούς συμμετέχοντες. Ο μηχανισμός λειτουργίας βασίζεται στη συγκέντρωση των προσφορών από το HEnEx και στην εφαρμογή του αλγορίθμου σύζευξης τιμών (price coupling), ο οποίος εξισορροπεί προσφορά και ζήτηση καθορίζοντας την τιμή εκκαθάρισης και την ποσότητα ενέργειας για κάθε ώρα της επόμενης ημέρας. Οι παραγωγοί υποχρεούνται να υποβάλλουν εντολές πώλησης για τη διαθέσιμη δυναμικότητα των μονάδων τους που δεν έχει δεσμευτεί μέσω διμερών συμβολαίων. Τα προϊόντα αντιστοιχούν σε ωριαίες συμβάσεις με φυσική παράδοση εντός της ελληνικής Ζώνης Προσφοράς, ενώ υποστηρίζονται διάφοροι τύποι εντολών, συμπεριλαμβανομένων Ωριαίων Υβριδικών Εντολών και Εντολών Πακέτου. Η διαδικασία παρέχει στους συμμετέχοντες την απαραίτητη προειδοποίηση για τον προγραμματισμό της παραγωγής και της κατανάλωσης, μειώνοντας την αβεβαιότητα και αυξάνοντας την αξιοπιστία του συστήματος [15].

2.2.2.2 Ενδοημερήσια Αγορά (Intraday Market)

Η Ενδοημερήσια Αγορά λειτουργεί συμπληρωματικά προς την Αγορά Επόμενης Ημέρας, επιτρέποντας στους συμμετέχοντες να προσαρμόζουν τις θέσεις τους μετά τη λήξη της προθεσμίας υποβολής εντολών στη DAM. Οι συναλλαγές αφορούν αγορά και πώληση ηλεκτρικής ενέργειας με υποχρέωση φυσικής παράδοσης κατά την Ημέρα Εκπλήρωσης Φυσικής Παράδοσης και πραγματοποιούνται μετά το κλείσιμο της DAM έως λίγα λεπτά πριν την πραγματική ώρα παράδοσης. Η συμμετοχή είναι προαιρετική για όλους τους συμμετέχοντες, παρέχοντας τη δυνατότητα εξισορρόπησης των χαρτοφυλακίων τους σε χρονικό ορίζοντα πλησιέστερο στην πραγματική παράδοση. Αποτελεί τον κύριο μηχανισμό διαχείρισης αποκλίσεων από τα προγράμματα της DAM, προσφέροντας ευελιξία στην αντιμετώπιση της μεταβλητότητας της παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και των μη αναμενόμενων μεταβολών της ζήτησης. Η IDM αποκτά ιδιαίτερη σημασία στο πλαίσιο της αυξανόμενης διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών, καθώς επιτρέπει την αποτελεσματικότερη ενσωμάτωση της μεταβλητής παραγωγής τους στο σύστημα [15].

2.2.3 Αγορά Εξισορρόπησης

Η Αγορά Εξισορρόπησης διασφαλίζεται σε πραγματικό χρόνο την ισορροπία παραγωγής-ζήτησης και την επιχειρησιακή ασφάλεια του συστήματος, στο πλαίσιο κεντρικής κατανομής ανά μονάδα (central dispatch). Ο ΑΔΜΗΕ, ως διαχειριστής του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΣΜΗΕ), διενεργεί τις απαιτούμενες διαδικασίες προγραμματισμού, ενεργοποίησης και εκκαθάρισης, αξιοποιώντας τις διαθέσιμες εφεδρείες και τις προσφορές των συμμετεχόντων. Η Αγορά Εξισορρόπησης περιλαμβάνει τρεις αλληλένδετες συνιστώσες: την Ισχύ Εξισορρόπησης, την Ενέργεια Εξισορρόπησης και την Εκκαθάριση Αποκλίσεων με τις σχετικές χρεώσεις και πιστώσεις [16].

2.2.3.1 Δομή και ροή λειτουργίας

Η λειτουργία της αγοράς βασίζεται στη *Διαδικασία Ενοποιημένου Προγραμματισμού (ΔΕΠ/ISP)*, η οποία επιλύει σε επαναλαμβανόμενους κύκλους το πρόβλημα ένταξης, απένταξης και δέσμευσης εφεδρειών με στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους λειτουργίας, τηρώντας παράλληλα τους τεχνικούς και συστημικούς περιορισμούς. Η ΔΕΠ χρησιμοποιεί εμπορικά και τεχνικοοικονομικά δεδομένα, συμπεριλαμβανομένων των προβλέψεων φορτίου και παραγωγής από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, των χαρακτηριστικών των μονάδων παραγωγής, καθώς και των διαζωνικών περιορισμών, προκειμένου να παράγει το πρόγραμμα κατανομής και τις δεσμεύσεις εφεδρειών. Η διαδικασία εκτελείται σύμφωνα με προκαθορισμένο χρονοδιάγραμμα που καλύπτει την προηγούμενη ημέρα (D-1) και την ημέρα λειτουργίας (D), με συγκεκριμένες προθεσμίες υποβολής προσφορών και δυνατότητα επικαιροποίησης όταν μεταβάλλονται κρίσιμες συνθήκες, όπως περιπτώσεις βλαβών μονάδων, υδροηλεκτρικές υποχρεώσεις ή όρια διασυνδέσεων. Το Σύστημα Αγοράς Εξισορρόπησης συγκεντρώνει και επεξεργάζεται το σύνολο των δεδομένων και των αποτελεσμάτων των υποαγορών, περιλαμβάνοντας υποσυστήματα για τη διαχείριση μητρώων, την υποβολή προσφορών και δηλώσεων, καθώς και τη διαλειτουργία με τις λοιπές αγορές ηλεκτρικής ενέργειας [16, 17].



Σχήμα 2.6: Χρονική διαδοχή διαδικασιών Αγοράς Εξισορρόπησης. Πηγή: ΑΔΜΗΕ [6]

2.2.3.2 Ισχύς Εξισορρόπησης (Balancing Capacity)

Η Ισχύς Εξισορρόπησης αναφέρεται στη δέσμευση διαθέσιμης ισχύος για την κάλυψη των απαιτήσεων εφεδρειών, με αντίστοιχη υποχρέωση του παρόχου να παραμένει διαθέσιμος και να υποβάλλει καθώς και να τηρεί προσφορές ενέργειας σύμφωνα με τους όρους της σύμβασης. Τα κύρια προϊόντα εφεδρειών περιλαμβάνουν την *Εφεδρεία Διατήρησης Συχνότητας (FCR)*, την *Αυτόματα Ενεργοποιούμενη Εφεδρεία Αποκατάστασης Συχνότητας (aFRR)* μέσω του συστήματος αυτόματης ρύθμισης παραγωγής (AGC), και τη *Χειροκίνητα Ενεργοποιούμενη Εφεδρεία Αποκατάστασης Συχνότητας (mFRR)*. Για κάθε προϊόν, οι προσφορές διακρίνονται σε ανοδικές (upward) και καθοδικές (downward) κατευθύνσεις. Σε επιχειρησιακό επίπεδο, η aFRR ιχνηλατεί αυτόματα σε κλίμακα δευτερολέπτων, ενώ η mFRR προορίζεται για χειροκίνητη αποκατάσταση σε κλίμακα δεκαπεντάλεπτου, με τους ειδικούς ρυθμούς και περιορισμούς να καθορίζονται κανονιστικά.

Η διαδικασία και η τιμολόγηση της Ισχύος Εξισορρόπησης διέπονται από συγκεκριμένους κανόνες. Ο Διαχειριστής ανακοινώνει τις απαιτήσεις ισχύος, προσδιορίζοντας τις ποσότητες, τις ζώνες και τις κατευθύνσεις ανά Περίοδο Κατανομής. Εν συνεχεία, οι συμμετέχοντες υποβάλλουν προσφορές διαθεσιμότητας για κάθε 30λεπτη Περίοδο Κατανομής, οι οποίες μπορεί να έχουν τη μορφή βηματικών καμπυλών ή συνδυασμού αυτών. Όταν μια προσφορά εκκαθαρίζεται και δεσμεύεται, ο πάροχος αποζημιώνεται μονοθε-

τικά για την παροχή διαθεσιμότητας εφεδρείας, ανεξαρτήτως κατεύθυνσης (ανοδική ή καθοδική) και ανεξαρτήτως εάν η εφεδρεία ενεργοποιηθεί τελικά από τον διαχειριστή, σύμφωνα με τον κανόνα *pay-as-bid*. Σημειώνεται ότι, ενώ οι προσφορές Ισχύος Εξισορρόπησης υποβάλλονται σε επίπεδο 30λεπτης Περιόδου Κατανομής, η εκκαθάριση πραγματοποιείται σε επίπεδο 15λεπτης Περιόδου Εκκαθάρισης Αποκλίσεων, λαμβάνοντας υπόψη το ποσοστό της χρονικής διάρκειας εντός της 15λεπτης περιόδου κατά την οποία η οντότητα ήταν διαθέσιμη για την παροχή του αντίστοιχου προϊόντος. Συγκεκριμένα, η τιμή της προσφοράς (εκφρασμένη σε €/MW-h) εφαρμόζεται στην εκκαθαρισμένη ποσότητα (σε MW) και στον χρόνο διαθεσιμότητας εντός της εν λόγω περιόδου. Η δέσμευση ισχύος συνεπάγεται επιπλέον την υποχρέωση υποβολής προσφορών ενέργειας για πιθανή ενεργοποίηση στην αγορά ενέργειας εξισορρόπησης. [16, 17].

2.2.3.3 Ενέργεια Εξισορρόπησης (Balancing Energy)

Η Ενέργεια Εξισορρόπησης ενεργοποιείται σε πραγματικό χρόνο για τη διατήρηση του ισοζυγίου μεταξύ παραγωγής και ζήτησης, καθώς και για τη σταθεροποίηση της συχνότητας του συστήματος. Η ενεργοποίηση της aFRR πραγματοποιείται αυτόματα από το σύστημα AGC μέσω συνεχών σημάτων ελέγχου, με ρυθμούς που ορίζονται κανονιστικά σε κλίμακα δευτερολέπτων. Αντίθετα, η ενεργοποίηση της mFRR είναι χειροκίνητη και διενεργείται κατόπιν εντολής του Διαχειριστή, λειτουργώντας σε χρονικό βήμα 15 λεπτών, με δυνατότητα άμεσης ενεργοποίησης εντός της περιόδου εφόσον τούτο απαιτηθεί από τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος.

Όσον αφορά τη διαδικασία και την τιμολόγηση, ο Διαχειριστής καθορίζει τις απαιτήσεις ενέργειας εξισορρόπησης ανά κατεύθυνση (ανοδική ή καθοδική) και περίοδο εκκαθάρισης. Οι συμμετέχοντες υποβάλλουν προσφορές ενέργειας, διακρινόμενες σε ανοδικές και καθοδικές, με τη μορφή βηματικών καμπυλών. Όταν οι προσφορές εκκαθαρίζονται και ενεργοποιούνται, η αποζημίωση πραγματοποιείται με τον κανόνα *pay-as-clear* σε επίπεδο Περιόδου Εκκαθάρισης Αποκλίσεων διάρκειας 15 λεπτών. Για κάθε δεκαπεντάλεπτο και κατεύθυνση προκύπτει μία ενιαία τιμή εκκαθάρισης (Balancing Energy Price), η οποία καθορίζεται από την οριακή (χειρότερη) ενεργοποιημένη προσφορά (marginal price) και εφαρμόζεται σε όλες τις ενεργοποιημένες ποσότητες της ίδιας κατεύθυνσης. Επισημαίνεται ότι μόνο οι ενεργοποιημένοι όγκοι ενέργειας (σε MWh) τιμολογούνται στην τιμή εκκαθάρισης του αντίστοιχου δεκαπενταλέπτου [16].

2.2.3.4 Εκκαθάριση Εξισορρόπησης και Αποκλίσεων

Η διαδικασία εκκαθάρισης περιλαμβάνει την αποζημίωση της ενεργοποιημένης Ενέργειας Εξισορρόπησης (aFRR και mFRR) με βάση τον κανόνα *pay-as-clear* σε 15λεπτη βάση, την αποζημίωση της Ισχύος Εξισορρόπησης (FCR, aFRR και mFRR) σύμφωνα με τον κανόνα *pay-as-bid* σε 30λεπτη βάση, καθώς και τον υπολογισμό της Τιμής Αποκλίσεων και των σχετικών χρεώσεων ή πιστώσεων για τα Συμβαλλόμενα Μέρη με Ευθύνη Εξισορρόπησης. Η Τιμή Αποκλίσεων (Imbalance Price) υπολογίζεται για κάθε Περίοδο Εκκαθάρισης Αποκλίσεων και εφαρμόζεται στις αποκλίσεις των Συμβαλλόμενων Μερών από τα εμπορικά τους προγράμματα. Η τιμή διαμορφώνεται με βάση την τιμή της Ενέργειας Εξισορρόπησης, λαμβάνοντας υπόψη την κατάσταση του συστήματος (έλλειμμα ή πλεόνασμα), και μπορεί να εφαρμόζεται ως ενιαία τιμολόγηση (single pricing) ή διπλή τιμολόγηση (dual pricing). Η εκκαθάριση διενεργείται σε εβδομαδιαία βάση από τον Φορέα Εκκαθάρισης, σύμφωνα με τις διατάξεις του Κανονισμού Εκκαθάρισης Θέσεων [16].

2.2.4 Ρυθμιστικό Πλαίσιο Συμμετοχής Συστημάτων Αποθήκευσης

Η ελληνική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζει πολυεπίπεδη διάρθρωση, όπως έχει ήδη αναλυθεί. Στο πλαίσιο της ένταξης των συστημάτων αποθήκευσης, έχει διαμορφωθεί ρυθμιστικό πλαίσιο—βρίσκεται σε στάδιο δημόσιας διαβούλευσης—που καθορίζει τους όρους και τις προϋποθέσεις συμμετοχής τους στις επιμέρους αγορές.

Η παρούσα ενότητα εξετάζει το προτεινόμενο πλαίσιο, αποτυπώνοντας τις δυνατότητες, τους περιορισμούς και τις υποχρεώσεις που διέπουν τη λειτουργία των συστημάτων αποθήκευσης (BESS). Η κατανόηση αυτών των παραμέτρων είναι κρίσιμη για την ανάπτυξη του μοντέλου βελτιστοποίησης που ακολουθεί, καθώς οι ρυθμιστικές απαιτήσεις μεταφράζονται σε συγκεκριμένους περιορισμούς και σε κατάλληλη διαμόρφωση της αντικειμενικής συνάρτησης.

Συνοπτικά, η συμμετοχή των BESS στις ελληνικές αγορές ηλεκτρικής ενέργειας διέπεται από ρυθμίσεις του ΑΔΜΗΕ, οι οποίες ορίζουν τις επιτρεπόμενες λειτουργίες, τα κριτήρια επιλεξιμότητας και τις επιχειρησιακές υποχρεώσεις των φορέων εκμετάλλευσης.

2.2.4.1 Μοντέλο Συμμετοχής

Τα μεγάλα συστήματα αποθήκευσης με εγκατεστημένη ισχύ μεγαλύτερη ή ίση των 40 MW λειτουργούν υπό το καθεστώς της Κεντρικής Κατανομής ανά Μονάδα (Unit-based Central Dispatch). Το μοντέλο αυτό χαρακτηρίζεται από την ανεξάρτητη λειτουργία κάθε μονάδας ως διακριτή Οντότητα Υπηρεσιών Εξισορρόπησης, η οποία υποβάλλει αυτόνομα προσφορές σε όλες τις αγορές και λαμβάνει διακριτά αποτελέσματα εκκαθάρισης και εντολές κατανομής.

2.2.4.2 Δικαιώματα Συμμετοχής και Μηχανισμοί Αγοράς

Τα συστήματα αποθήκευσης δύνανται να συμμετέχουν σε διάφορες αγορές ηλεκτρικής ενέργειας. Ο μηχανισμός λειτουργίας ακολουθεί τη διαδικασία της ανακοίνωσης απαιτήσεων εφεδρείας από τον ΑΔΜΗΕ, της υποβολής προσφορών με οικονομικές παραμέτρους και της επιλογής βάσει οικονομικότητας (merit order).

2.2.4.2.1 Αγορά Επόμενης Ημέρας και Ενδοημερήσια Αγορά Η Αγορά Επόμενης Ημέρας (Day-Ahead Market) επιτρέπει συναλλαγές ενέργειας με ωριαία διακριτοποίηση χωρίς περιορισμό ελάχιστης ποσότητας. Η Ενδοημερήσια Αγορά (Intraday Market) παρέχει τη δυνατότητα διόρθωσης θέσεων σε πραγματικό χρόνο και διαχείρισης της κατάστασης φόρτισης των συστημάτων, όπως και τα υπόλοιπα assets.

2.2.4.3 Προσφορές στη Διαδικασία Ενοποιημένου Προγραμματισμού

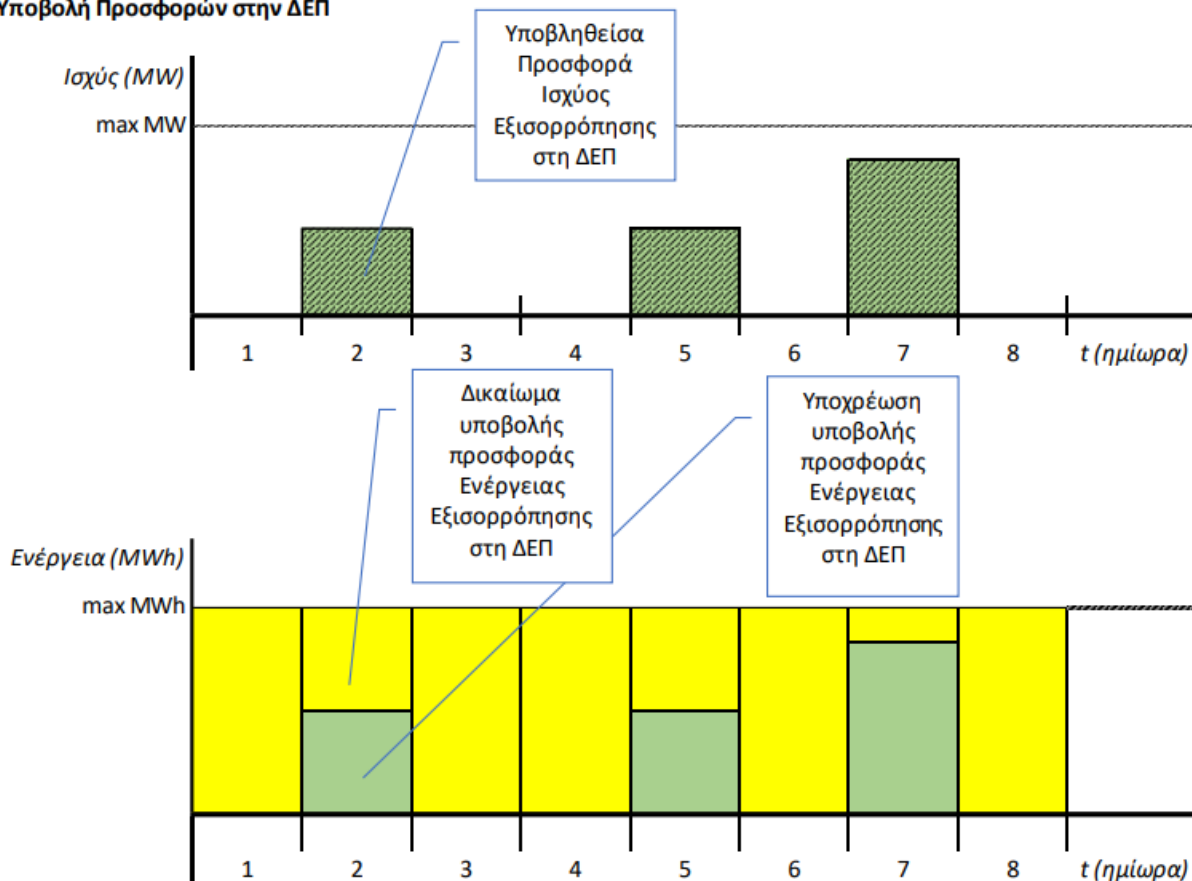
Η Διαδικασία Ενοποιημένου Προγραμματισμού αποτελεί τον κεντρικό μηχανισμό μέσω του οποίου τα συστήματα αποθήκευσης προσφέρουν υπηρεσίες εξισορρόπησης στο δίκτυο. Στη διαδικασία αυτή, ο διαχειριστής συστήματος προσδιορίζει τις ανάγκες εφεδρείας και οι πάροχοι υποβάλλουν προσφορές ισχύος και ενέργειας εξισορρόπησης για τα προϊόντα mFRR, aFRR και FCR. Οι προσφορές έχουν βηματική διάρθρωση με πλήρη διαιρετότητα και υποβάλλονται διακριτά για ανοδική και καθοδική κατεύθυνση,

επιτρέποντας στον αλγόριθμο της ΔΕΠ να επιλέγει τμήματα ή το σύνολο κάθε βήματος βάσει οικονομικότητας.

2.2.4.3.1 Προσφορά Ισχύος Εξισορρόπησης στη ΔΕΠ Οι πάροχοι υπηρεσιών εξισορρόπησης έχουν δικαίωμα να υποβάλλουν προσφορές ισχύος εξισορρόπησης διακριτά για κάθε τύπο εφεδρείας και για κάθε μισάωρη περίοδο κατανομής της ημέρας. Για κάθε προϊόν ισχύος, υποβάλλεται ανεξάρτητα μία ανοδική προσφορά για Εφεδρεία Διατήρησης Συχνότητας, μία για αυτόματη Εφεδρεία Αποκατάστασης Συχνότητας και μία για χειροκίνητη Εφεδρεία Αποκατάστασης Συχνότητας, καθώς και οι αντίστοιχες καθοδικές προσφορές. Η μέγιστη ποσότητα κάθε προσφοράς περιορίζεται από τη δηλωθείσα μέγιστη συνεισφορά της οντότητας στο αντίστοιχο προϊόν, ενώ η ελάχιστη αποδεκτή ποσότητα ορίζεται σε 1 MW. Σε περίπτωση μη συμμόρφωσης, οι προσφορές ισχύος απορρίπτονται αυτόματα από το σύστημα.

2.2.4.3.2 Προσφορά Ενέργειας Εξισορρόπησης στη ΔΕΠ Οι πάροχοι υποβάλλουν προσφορές ενέργειας εξισορρόπησης ανά οντότητα για κάθε περίοδο κατανομής, διακριτά για ανοδική και καθοδική κατεύθυνση. Η συνολική ποσότητα κάθε προσφοράς περιορίζεται από τη μέγιστη ικανότητα της οντότητας για παροχή ανοδικής ή καθοδικής ενέργειας εξισορρόπησης αντίστοιχα, ενώ η ελάχιστη αποδεκτή ποσότητα ορίζεται σε 1 MW. Υφίσταται υποχρέωση υποβολής προσφοράς ενέργειας για ποσότητα που αντιστοιχεί τουλάχιστον στην ποσότητα της υποβληθείσας προσφοράς ισχύος για την αντίστοιχη περίοδο. Η σχέση αυτή εξασφαλίζει ότι η δηλωθείσα διαθεσιμότητα ισχύος υποστηρίζεται από επαρκή ενεργειακή χωρητικότητα για την πλήρη διάρκεια της περιόδου. Σε περίπτωση ανεπαρκούς προσφοράς ενέργειας, οι αντίστοιχες προσφορές ισχύος για την περίοδο κατανομής απορρίπτονται. Στο Σχήμα 2.7 απεικονίζεται η δομή υποβολής προσφορών, όπου το ανώτερο τμήμα παρουσιάζει τις προσφορές ισχύος για συγκεκριμένες μισάωρες περιόδους, ενώ το κατώτερο τμήμα παρουσιάζει τις αντίστοιχες προσφορές ενέργειας με τη διάκριση μεταξύ υποχρεωτικής ποσότητας (υποχρέωση υποχώρησης) και προαιρετικής ποσότητας (δικαίωμα υποβολής), η οποία αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για τη διαχείριση της κατάστασης φόρτισης.

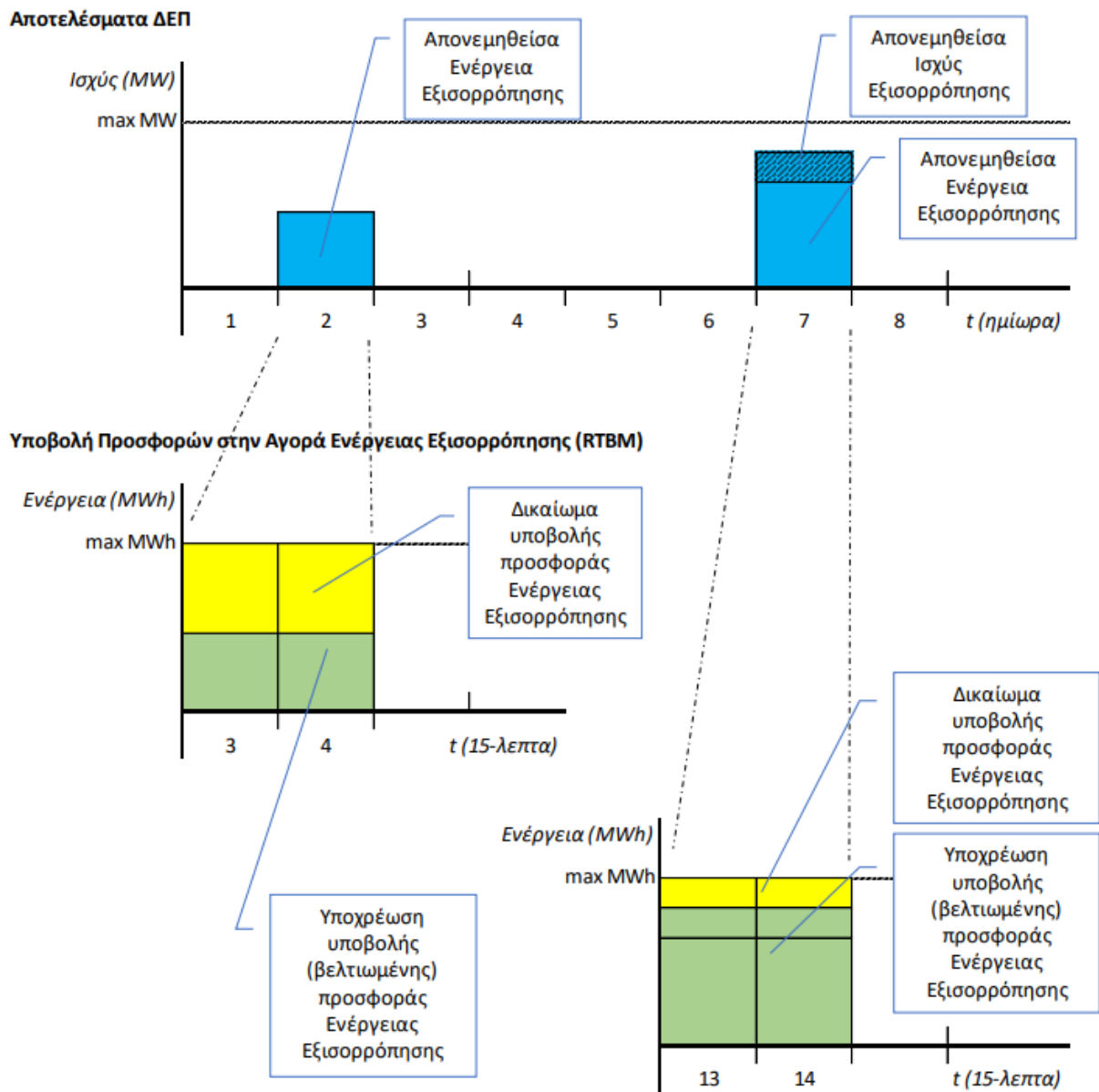
Υποβολή Προσφορών στην ΔΕΠ



Σχήμα 2.7: Παράδειγμα υποβολής προσφορών Ισχύος και Ενέργειας Εξισορρόπησης στη ΔΕΠ. Πηγή: [7].

2.2.4.4 Προσφορά στην Αγορά Ενέργειας Εξισορρόπησης (Real Time Balancing Market)

Η συμμετοχή στη διαδικασία στην Αγορά Πραγματικού Χρόνου (RTBM) είναι προαιρετική με δύο σημαντικές εξαιρέσεις. Υποχρεωτική είναι η υποβολή προσφοράς για την ποσότητα που αντιστοιχεί στην απονεμημένη ισχύ χΕΑΣ από τη ΔΕΠ, καθώς και για την ποσότητα που προκύπτει από το Πρόγραμμα ΔΕΠ της οντότητας. Κρίσιμη διαφορά αποτελεί η χρονική διακριτοποίηση των 15 λεπτών αντί των 30 λεπτών της ΔΕΠ. Για τη διασφάλιση της συνέχειας, κάθε μισάωρη προσφορά ενέργειας της ΔΕΠ μετατρέπεται αυτόματα σε δύο ισοδύναμες δεκαπεντάλεπτες προσφορές στην RTBM, διατηρώντας την ίδια μορφή, ποσότητες και τιμές. Οι αυτόματα δημιουργημένες προσφορές θεωρούνται υποβληθείσες από τον πάροχο, ο οποίος όμως διατηρεί το δικαίωμα να υποβάλει βελτιωμένες προσφορές, προσαρμόζοντας τις τιμές σύμφωνα με τις εξελισσόμενες συνθήκες της αγοράς. Ως βελτιωμένη νοείται η μικρότερη τιμή για ανοδικές προσφορές και η μεγαλύτερη για καθοδικές σε σχέση με τις αρχικές τιμές της ΔΕΠ. Στο Σχήμα 2.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ΔΕΠ και η μετάβαση στην RTBM, όπου το ανώτερο τμήμα απεικονίζει τις απονεμημένες ποσότητες ισχύος και ενέργειας, ενώ τα κατώτερα διαγράμματα απεικονίζουν την υποβολή προσφορών στην αγορά πραγματικού χρόνου με τη διαφοροποίηση μεταξύ αυτόματων και βελτιωμένων προσφορών.



Σχήμα 2.8: Αποτελέσματα ΔΕΠ και υποβολή προσφορών στην Αγορά Ενέργειας Εξισορρόπησης (RTBM). Πηγή: [7].

2.2.4.5 Περιορισμοί

2.2.4.5.1 Λειτουργικοί Περιορισμοί Η λειτουργία των συστημάτων αποθήκευσης υπόκειται σε συγκεκριμένους περιορισμούς που αφορούν τόσο τις προσφορές όσο και τις επιτρεπόμενες λειτουργικές πρακτικές. Η διαχείριση της κατάστασης φόρτισης (State of Charge) αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για τη λειτουργία των συστημάτων αποθήκευσης και υπόκειται σε αυστηρούς κανόνες που καθορίζουν τα επιτρεπόμενα μέσα προσαρμογής της. Το ρυθμιστικό πλαίσιο επιτρέπει την προσαρμογή της κατάστασης φόρτισης αποκλειστικά μέσω συναλλαγών στην Αγορά Επόμενης Ημέρας, την Ενδοημερήσια Αγορά και την Αγορά Εξισορρόπησης, απαγορεύοντας τη χρήση οποιασδήποτε άλλης μεθόδου.

Ιδιαίτερα, απαγορεύεται κατηγορηματικά η πρόκληση σκόπιμων αποκλίσεων από το Πρόγραμμα Αγοράς ως μέσο ρύθμισης της κατάστασης φόρτισης, καθώς και η φόρτιση ή εκφόρτιση του συστήματος αποθήκευσης εκτός του Προγράμματος Αγοράς. Ο περιορισμός αυτός επιβάλλει την ανάγκη προληπτικού και συστηματικού προγραμματισμού της κατάστασης φόρτισης πριν από την υποβολή προσφορών στη

Διαδικασία Ενοποιημένου Προγραμματισμού και στην αγορά εξισορρόπησης. Ο πάροχος οφείλει να λαμβάνει υπόψη τις αναμενόμενες ενεργοποιήσεις, τη διαθέσιμη ενεργειακή χωρητικότητα, τους φυσικούς περιορισμούς του συστήματος και τις πιθανές εξελίξεις της αγοράς, διασφαλίζοντας ότι το σύστημα θα διατηρεί επαρκές απόθεμα ενέργειας για την εκπλήρωση των δεσμεύσεων του καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας κατανομής.

Η Διαδικασία Ενοποιημένου Προγραμματισμού επιβάλλει περιορισμό που διασφαλίζει ότι το συνδυασμένο σύνολο προγράμματος και απονεμημένων εφεδρειών δεν υπερβαίνει τη φυσική ενεργειακή χωρητικότητα του συστήματος αποθήκευσης. Η μέγιστη ισχύς σε MW που μπορεί να προσφέρει η οντότητα e σε μία Περίοδο Κατανομής, συμβολιζόμενη ως $MaxESBSE(e)$, εκφράζεται μαθηματικά ως:

$$MaxESBSE(e) = 2 \times (SOC_{\max} - SOC_{\min}) \quad (2.1)$$

όπου ο συντελεστής 2 προκύπτει από τη μετατροπή μονάδων ενέργειας σε ισχύ για περίοδο κατανομής διάρκειας μισής ώρας. Ο τύπος αυτός καθορίζει τη μέγιστη συνολική ποσότητα ενέργειας που μπορεί να δεσμευθεί για μια συγκεκριμένη περίοδο, λαμβάνοντας υπόψη το διαθέσιμο εύρος μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης επιτρεπτής κατάστασης φόρτισης. Επιπλέον, στις προσφορές στη ΔΕΠ ισχύει ελάχιστο όριο προσφοράς 1 MW.

2.2.4.5.2 Τεχνικοί Περιορισμοί Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας υπόκεινται σε εγγενείς φυσικούς περιορισμούς που καθορίζουν τις δυνατότητές τους. Η κατάσταση φόρτισης περιορίζεται από τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές $SOC_{\max}$ και $SOC_{\min}$, οι οποίες καθορίζονται από τους κατασκευαστές για τη διασφάλιση της μακροβιότητας του συστήματος. Η ονομαστική χωρητικότητα ενέργειας και οι μέγιστες ισχείς φόρτισης και εκφόρτισης αποτελούν επίσης δεσμευτικούς τεχνικούς περιορισμούς που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον προγραμματισμό της λειτουργίας του συστήματος.

2.2.4.6 Μηχανισμός Κυρώσεων

Για τους παραπάνω λόγους και τη διασφάλιση της αξιοπιστίας του συστήματος και την αποτροπή ευκαιριακών ή αθέμιτων συμπεριφορών, το ρυθμιστικό πλαίσιο προβλέπει την επιβολή Χρεώσεων Μη Συμμόρφωσης σε συγκεκριμένες περιπτώσεις παραβίασης των κανόνων λειτουργίας. Οι Χρεώσεις Μη Συμμόρφωσης λειτουργούν ως αποτρεπτικό μέτρο που δημιουργεί ισχυρά οικονομικά κίνητρα για υπεύθυνη συμπεριφορά και συμμόρφωση με τις ρυθμιστικές απαιτήσεις, ενώ ταυτόχρονα αποζημιώνουν το σύστημα για το πρόσθετο κόστος που προκύπτει από την αναξιοπιστία ή τη μη συμμόρφωση των παρόχων. [7]

Κεφάλαιο 3

Συστήματα BESS και Στρατηγικές Συμμετοχής στις Αγορές

3.1 Stand-alone BESS: Τεχνολογία και Λειτουργικά Χαρακτηριστικά

Η επιλογή των αυτόνομων συστημάτων αποθήκευσης μπαταριών (stand-alone Battery Energy Storage Systems — BESS) ως αντικειμένου της παρούσας εργασίας δικαιολογείται από τα μοναδικά λειτουργικά χαρακτηριστικά που τα καθιστούν ιδανικά για συμμετοχή σε αγορές ηλεκτρισμού. Σε αντίθεση με τα συστήματα που συνδέονται απευθείας με σταθμούς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (co-located BESS), τα stand-alone συστήματα λειτουργούν ως ανεξάρτητα περιουσιακά στοιχεία με δυνατότητα παροχής πολλαπλών υπηρεσιών στο σύστημα [18]. Η λειτουργική αυτή ευελιξία επιτρέπει τη μεγιστοποίηση εσόδων μέσω στρατηγικών στοίβαξης (value stacking), καθώς η διαθέσιμη χωρητικότητα μπορεί να κατανέμεται δυναμικά μεταξύ διαφορετικών αγορών ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες. Η αυξανόμενη διείσδυση ΑΠΕ και η μεταβλητότητα που αυτή επιφέρει στην παραγωγή ενισχύουν περαιτέρω την αναγκαιότητα τέτοιων ευέλικτων πόρων για τη διασφάλιση της ασφάλειας και σταθερότητας του ηλεκτρικού συστήματος.

3.1.1 Τεχνολογικά χαρακτηριστικά και παράμετροι σχεδιασμού

Η ονομαστική ισχύς (rated power capacity) ενός BESS αντιπροσωπεύει τη μέγιστη δυνατή στιγμιαία ισχύ εκφόρτισης ή φόρτισης που μπορεί να επιτύχει το σύστημα ξεκινώντας από πλήρως φορτισμένη ή πλήρως αποφορτισμένη κατάσταση. Η χωρητικότητα ενέργειας (energy capacity) αντιπροσωπεύει τη μέγιστη ποσότητα αποθηκευμένης ενέργειας, με τα utility-scale συστήματα να σχεδιάζονται τυπικά με διάρκειες αποθήκευσης δύο, τεσσάρων ή οκτώ ωρών, ανάλογα με την εφαρμογή [18]. Η αναλογία ισχύος προς χωρητικότητα καθορίζει τη διάρκεια συνεχούς λειτουργίας και επηρεάζει την καταλληλότητα για διαφορετικές εφαρμογές: υψηλότερες τιμές ενδείκνυνται για υπηρεσίες εφεδρείας σύντομης διάρκειας, ενώ χαμηλότερες για εφαρμογές arbitrage μεγαλύτερης διάρκειας. Η αποδοτικότητα κύκλου (round-trip efficiency) αποτελεί κρίσιμη παράμετρο που εκφράζεται ως ο λόγος της ενέργειας που επιστρέφεται στο δίκτυο προς την ενέργεια που απορροφάται από το δίκτυο. Σύγχρονα συστήματα λιθίου-ιόντων επιτυγχάνουν τυπικά αποδοτικότητες κύκλου της τάξης του 85–90%, περιλαμβάνοντας τις απώλειες από τη μετατροπή AC/DC, την αυτοεκφόρτιση και άλλες ηλεκτρικές απώλειες του συστήματος [19]. Για τους διαχειριστές δικτύου, η AC-DC αποδοτικότητα είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς αντιπροσωπεύει την πραγματική απόδοση του συστήματος όπως αυτή παρατηρείται από το σημείο διασύνδεσης με το δί-

κτυο [18].

3.1.1.1 Διάρκεια ζωής και υποβάθμιση χωρητικότητας

Η διάρκεια ζωής των συστημάτων εκφράζεται σε αριθμό κύκλων φόρτισης–εκφόρτισης που μπορεί να παράσχει το σύστημα πριν από σημαντική υποβάθμιση της χωρητικότητας. Η απόδοση διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τη χημεία των μπαταριών: οι μπαταρίες τύπου LFP (Lithium Iron Phosphate) παρουσιάζουν τυπικά διάρκεια ζωής 4,000–8,000 κύκλων, ενώ οι μπαταρίες NMC (Nickel Manganese Cobalt) προσφέρουν 2,000–4,000 κύκλους [19].

Η υποβάθμιση (degradation) της χωρητικότητας επιταχύνεται από συγκεκριμένους λειτουργικούς παράγοντες. Υψηλά ρεύματα φόρτισης ή εκφόρτισης, λειτουργία σε ακραίες καταστάσεις φόρτισης (πολύ υψηλή ή πολύ χαμηλή SoC), και έκθεση σε θερμοκρασιακό στρες συμβάλλουν στην επιτάχυνση της φθοράς του συστήματος.

3.1.2 Λειτουργικά χαρακτηριστικά και υπηρεσίες στο δίκτυο

Τα BESS παρουσιάζουν συγκεκριμένα λειτουργικά χαρακτηριστικά που τα διαφοροποιούν από άλλες τεχνολογίες ευελιξίας. Η ταχύτητα απόκρισής τους αποτελεί το κρίσιμότερο πλεονέκτημα: τα BESS μπορούν να φορτίζουν ή να εκφορτίζουν σε κλάσματα δευτερολέπτου, σημαντικά ταχύτερα από συμβατικές θερμικές μονάδες. Αυτό τα καθιστά κατάλληλα για υπηρεσίες βραχυπρόθεσμης αξιοπιστίας όπως η πρωτογενής ρύθμιση συχνότητας και η δευτερογενής ρύθμιση. Κατάλληλα διαστασιολογημένα συστήματα μπορούν επίσης να παρέχουν υπηρεσίες μεγαλύτερης διάρκειας, όπως ακολούθηση φορτίου και υπηρεσίες ανόδου/καθόδου παραγωγής (ramping services).

Η ικανότητα των BESS να λειτουργούν διπολικά, δηλαδή τόσο ως φορτίο όσο και ως γεννήτρια, επιτρέπει την παροχή υπηρεσιών προς αμφότερες τις κατευθύνσεις. Αυτή η ευελιξία αυξάνει σημαντικά την αξία του περιουσιακού στοιχείου στις αγορές εξισορρόπησης. Τα συστήματα BESS μπορούν να μεγιστοποιήσουν την αξία τους στο δίκτυο παρέχοντας πολλαπλές υπηρεσίες ταυτόχρονα ή διαδοχικά επιτρέποντας έτσι υψηλότερη συνολική αξιοποίηση του συγκεκριμένου asset [18].

3.1.3 Τεχνικοί περιορισμοί και επίδραση στη βελτιστοποίηση

Η λειτουργία των BESS διέπεται από τεχνικούς περιορισμούς που επηρεάζουν άμεσα τις στρατηγικές βελτιστοποίησης. Η κατάσταση φόρτισης (State of Charge) εκφράζεται ως ποσοστό και αντιπροσωπεύει το τρέχον επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας, κυμαινόμενη από πλήρως αποφορτισμένη έως πλήρως φορτισμένη κατάσταση. Η SoC επηρεάζει την ικανότητα του BESS να παρέχει ενέργεια ή επικουρικές υπηρεσίες σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή, δημιουργώντας χρονική εξάρτηση μεταξύ διαδοχικών λειτουργικών αποφάσεων [18]. Οι απώλειες που προκύπτουν από τη μετατροπή AC/DC και τις ηλεκτροχημικές διεργασίες μειώνουν την ωφέλιμη ενέργεια που διατίθεται στο δίκτυο και καθορίζουν το ελάχιστο απαιτούμενο διαφορικό τιμών για κερδοφόρες στρατηγικές arbitrage. Η αποδοτικότητα του συστήματος ορίζει πόσο μεγάλη πρέπει να είναι η διαφορά μεταξύ της τιμής αγοράς και πώλησης ενέργειας ώστε η λειτουργία να είναι οικονομικά συμφέρουσα.

Η υποβάθμιση της χωρητικότητας (degradation) με την πάροδο του χρόνου αποτελεί κρίσιμη παράμετρο που πρέπει να ληφθεί υπόψη στη διαμόρφωση στρατηγικών. Η εντατική χρήση του συστήματος, ιδιαίτερα με υψηλά ρεύματα ή ακραίες καταστάσεις φόρτισης, επιταχύνει τη φθορά της μπαταρίας. Αυτό δημιουργεί

ένα οριακό κόστος χρήσης που πρέπει να εξισορροπείται με το βραχυπρόθεσμο οικονομικό όφελος από τις διάφορες υπηρεσίες. Η κατανόηση της σχέσης μεταξύ λειτουργικού προφίλ και ρυθμού γήρανσης αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για τη διαμόρφωση βιώσιμων μακροπρόθεσμα στρατηγικών.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά και οι λειτουργικοί περιορισμοί που παρουσιάστηκαν αποτελούν τη βάση για τη διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης που εξετάζεται στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας. Η κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των τεχνικών δυνατοτήτων και των περιορισμών των BESS με τη δομή και τους κανόνες των αγορών ηλεκτρισμού είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό βέλτιστων στρατηγικών συμμετοχής.

3.2 Θεωρητικό Πλαίσιο Βελτιστοποίησης και Arbitrage για Συστήματα Αποθήκευσης

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι να διαμορφώσει το απαραίτητο θεωρητικό και μεθοδολογικό υπόβαθρο για τη μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση των ηλεκτρικών αγορών, ως προπαρασκευή για τη μαθηματική διατύπωση και την υπολογιστική υλοποίηση της συμμετοχής ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες (BESS) στην ελληνική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας—που αποτελεί και το αντικείμενο της διπλωματικής. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται βασικές έννοιες του μαθηματικού προγραμματισμού, καθώς και σημαντικοί δείκτες που είναι κρίσιμοι για την αξιοποίηση ενός BESS στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας.

3.2.1 Προσέγγιση Μαθηματικού Προγραμματισμού στις Ηλεκτρικές Αγορές

Οι ηλεκτρικές αγορές ενέργειας στηρίζονται θεμελιωδώς σε μαθηματικά μοντέλα βελτιστοποίησης για την εκκαθάριση συναλλαγών, τον προγραμματισμό μονάδων και τη λήψη επιχειρησιακών αποφάσεων. Στην πράξη, προβλήματα όπως η δρομολόγηση μονάδων (Unit Commitment) και η οικονομική κατανομή φορτίου (Economic Dispatch) διατυπώνονται και επιλύονται ως προβλήματα μαθηματικού προγραμματισμού, όπου μεγιστοποιείται η κοινωνική ευημερία ή ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος λειτουργίας του συστήματος υπό τεχνικούς και λειτουργικούς περιορισμούς. Οι τεχνικές βελτιστοποίησης εφαρμόζονται σε ευρύ φάσμα προβλημάτων, συμπεριλαμβανομένων της εκκαθάρισης αγοράς, της βραχυπρόθεσμης και μεσοπρόθεσμης δρομολόγησης μονάδων, της οριακής τιμολόγησης, της βέλτιστης ροής ισχύος και της διαχείρισης συμφόρησης δικτύου. Τα προβλήματα αυτά διατυπώνονται συνήθως ως προβλήματα Γραμμικού Προγραμματισμού (Linear Programming) όταν οι αποφάσεις είναι συνεχείς, ή ως προβλήματα Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (Mixed-Integer Linear Programming) όταν περιλαμβάνουν διακριτές αποφάσεις όπως η ένταξη ή η απόσυρση μονάδων. Οι διαχειριστές συστήματος σε παγκόσμιο επίπεδο χρησιμοποιούν εξελιγμένους αλγορίθμους για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων με εκατοντάδες χιλιάδες μεταβλητές και περιορισμούς, επιτυγχάνοντας την αποδοτική εκκαθάριση των αγορών σε πραγματικό χρόνο. Η ολοκληρωμένη εφαρμογή αυτών των τεχνικών επιτρέπει τη λήψη αποφάσεων που εξισορροπούν την οικονομική αποδοτικότητα με την τεχνική αξιοπιστία, συμβάλλοντας στην αποτελεσματική λειτουργία των ενεργειακών συστημάτων.

Με την ίδια μεθοδολογική προσέγγιση, η στρατηγική συμμετοχή ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας στις διάφορες αγορές μπορεί να διατυπωθεί ως πρόβλημα βελτιστοποίησης από την πλευρά του παρόχου. Το πρόβλημα αυτό διαφέρει ουσιαστικά από τα προβλήματα εκκαθάρισης αγοράς που επιλύει ο διαχειριστής συστήματος, καθώς ο πάροχος BESS λαμβάνει τις τιμές των αγορών ως εξωγενείς παραμέτρους και αποφασίζει τη βέλτιστη κατανομή της ενεργειακής χωρητικότητας μεταξύ των διαθέσιμων

αγορών (DAM, IDM, ΔΕΠ, RTBM), τις ποσότητες και τιμές προσφορών, και τη χρονική διαχείριση της κατάστασης φόρτισης. Η μοντελοποίηση ενσωματώνει τα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος αποθήκευσης (ενεργειακή χωρητικότητα, μέγιστη ισχύς φόρτισης/εκφόρτισης, απόδοση μετατροπής, ρυθμοί μεταβολής), τους ρυθμιστικούς περιορισμούς που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο (ελάχιστες ποσότητες προσφοράς, απαγόρευση διαχείρισης SoC εκτός αγορών, υποχρεώσεις συμμόρφωσης), και την αβεβαιότητα σχετικά με τις μελλοντικές τιμές και τις ενεργοποιήσεις στις αγορές εξισορρόπησης. Η επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης επιτρέπει την εξαγωγή βέλτιστων στρατηγικών προσφοράς που μεγιστοποιούν το αναμενόμενο κέρδος του παρόχου, διασφαλίζοντας παράλληλα την τεχνική εφικτότητα και τη συμμόρφωση με το ρυθμιστικό πλαίσιο.

Για την πλήρη κατανόηση του προβλήματος βελτιστοποίησης που αντιμετωπίζει ένα σύστημα αποθήκευσης, είναι απαραίτητο να αναλυθούν οι οικονομικοί μηχανισμοί που δημιουργούν αξία στις ηλεκτρικές αγορές. Οι έννοιες του arbitrage και των spreads αποτελούν το θεμέλιο επάνω στο οποίο στηρίζεται η κερδοφορία των συστημάτων αποθήκευσης και καθορίζουν τη δομή της αντικειμενικής συνάρτησης του μαθηματικού μοντέλου.

3.2.2 Μηχανισμοί Δημιουργίας Εσόδων για Συστήματα Αποθήκευσης

Η οικονομική βιωσιμότητα ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας στηρίζεται στην ικανότητά του να αξιοποιεί τις διαφορές τιμολόγησης που εμφανίζονται στις ηλεκτρικές αγορές. Οι διαφορές αυτές, γνωστές ως spreads, αποτελούν τη θεμελιώδη πηγή εσόδων μέσω της στρατηγικής του arbitrage.

3.2.2.0.1 Spreads: Ορισμός και Κατηγορίες Ο όρος spread αναφέρεται στη διαφορά τιμής ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ δύο διαφορετικών χρονικών περιόδων ή αγορών. Μαθηματικά, το spread μεταξύ δύο καταστάσεων A και B ορίζεται ως:

$$\text{Spread}_t^{A \rightarrow B} = p_t^B - p_t^A, \quad (3.1)$$

όπου p_t^A και p_t^B αντιπροσωπεύουν τις αντίστοιχες τιμές. Διακρίνονται δύο κύριες κατηγορίες spreads που μπορεί να αξιοποιήσει ένα σύστημα αποθήκευσης.

Τα **spreads εντός της ίδιας αγοράς** (intra-market spreads) προκύπτουν από τις ενδοημερήσιες διακυμάνσεις τιμών εντός μιας συγκεκριμένης αγοράς. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η διαφορά μεταξύ ωρών αιχμής και εκτός αιχμής στην Αγορά Επόμενης Ημέρας, όπου η τιμή κατά τις μεσημβρινές ώρες μπορεί να είναι σημαντικά υψηλότερη από την τιμή τις πρωινές ή νυχτερινές ώρες. Ένα BESS μπορεί να φορτίζεται τη νύχτα όταν η ζήτηση και οι τιμές είναι χαμηλές και να εκφορτίζεται το μεσημέρι όταν αυξάνονται, αποκομίζοντας το spread αυτής της χρονικής διαφοράς.

Αντίθετα, τα **δια-αγοραστικά spreads** (cross-market spreads) αφορούν διαφορές τιμών μεταξύ διαφορετικών αγορών. Για παράδειγμα, η τιμή στην Ενδοημερήσια Αγορά μπορεί να διαφέρει από την αντίστοιχη τιμή που είχε καθοριστεί στην Αγορά Επόμενης Ημέρας για την ίδια χρονική περίοδο, λόγω νέων πληροφοριών ή μεταβολών στις συνθήκες. Επιπλέον, η τιμή εξισορρόπησης στην Αγορά Πραγματικού Χρόνου συχνά παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις από τις τιμές των προηγούμενων αγορών. Ένα BESS μπορεί να αγοράζει ενέργεια στη DAM και να την πωλεί στη RTBM αν προβλέπει ότι το spread μεταξύ των δύο αγορών θα είναι θετικό και επαρκώς μεγάλο.

3.2.2.0.2 Arbitrage: Η Βασική Στρατηγική Κερδοφορίας Το ενεργειακό arbitrage συνίσταται στην αγορά ενέργειας σε περιόδους χαμηλής τιμής και την πώλησή της σε περιόδους υψηλότερης τιμής, εκμεταλλευόμενο την ικανότητα αποθήκευσης του συστήματος. Για ένα BESS, αυτό υλοποιείται μέσω της

φόρτισης των μπαταριών όταν οι τιμές είναι χαμηλές και της εκφόρτισής τους όταν αυξάνονται. Το καθαρό κέρδος από κάθε κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης καθορίζεται από το μέγεθος του spread μείον τις απώλειες που προκύπτουν από την απόδοση του συστήματος και το κόστος γήρανσης της μπαταρίας.

Το πρόβλημα arbitrage μπορεί να διατυπωθεί μαθηματικά ως πρόβλημα βελτιστοποίησης. Η αντικειμενική συνάρτηση μεγιστοποιεί το συνολικό οικονομικό όφελος που προκύπτει από τη διαφορά μεταξύ εσόδων εκφόρτισης και κόστους φόρτισης:

$$\max_{\{e_t^{\text{ch}}, e_t^{\text{dis}}\}_t} \sum_t \left(p_t e_t^{\text{dis}} - \frac{p_t}{\eta^{\text{rt}}} e_t^{\text{ch}} \right) \quad (3.2)$$

$$\text{υπό } \text{SoC}_{t+1} = \text{SoC}_t + \eta^{\text{ch}} e_t^{\text{ch}} - \frac{1}{\eta^{\text{dis}}} e_t^{\text{dis}}, \quad (3.3)$$

όπου e_t^{ch} και e_t^{dis} αντιπροσωπεύουν την ενέργεια φόρτισης και εκφόρτισης, p_t την τιμή αγοράς, και η^{rt} τη συνολική απόδοση κύκλου. Ο περιορισμός της κατάστασης φόρτισης διασφαλίζει τη συνέχεια του ενεργειακού ισοζυγίου, ενώ συμπληρωματικοί περιορισμοί ορίζουν τα φυσικά όρια ισχύος και χωρητικότητας.

Για να είναι οικονομικά εκμεταλλεύσιμο ένα spread, το μέγεθός του πρέπει να υπερβαίνει τις συνολικές απώλειες του συστήματος. Πέραν του απλού arbitrage, τα συστήματα αποθήκευσης μπορούν να δημιουργούν έσοδα από την παροχή υπηρεσιών εξισορρόπησης, συνδυάζοντας πολλαπλές ροές εσόδων. Η ταυτόχρονη συμμετοχή σε αγορές ενέργειας και εφεδρείας απαιτεί προσεκτική κατανομή της διαθέσιμης χωρητικότητας και εξισορρόπηση μεταξύ βραχυπρόθεσμου κέρδους και μακροπρόθεσμης διατήρησης της λειτουργικής διάρκειας ζωής του συστήματος.

Συμπεράσματα

Η ανάλυση που παρουσιάστηκε στο παρόν κεφάλαιο καταδεικνύει ότι η συμμετοχή ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας στις ηλεκτρικές αγορές μπορεί να μοντελοποιηθεί και να βελτιστοποιηθεί μέσω τεχνικών μαθηματικού προγραμματισμού. Οι έννοιες των spreads και του arbitrage αποτελούν τη θεμελιώδη βάση για την κατανόηση των μηχανισμών δημιουργίας εσόδων, ενώ η μαθηματική τους διατύπωση επιτρέπει τη συστηματική αντιμετώπιση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Η ενσωμάτωση των ρυθμιστικών περιορισμών που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, των τεχνικών χαρακτηριστικών του συστήματος και της αβεβαιότητας των τιμών των αγορών στο μαθηματικό μοντέλο αποτελεί την αφετηρία για την ανάπτυξη ολοκληρωμένης στρατηγικής συμμετοχής, η οποία θα αναλυθεί στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Κεφάλαιο 4

Μοντελοποίηση και Μεθοδολογία

4.1 Στόχος και Πεδίο Εφαρμογής

Το κεφάλαιο αναπτύσσει ένα μοντέλο βελτιστοποίησης για τον προσδιορισμό της βέλτιστης στρατηγικής συμμετοχής ενός stand-alone BESS στην ελληνική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Με βάση πραγματικά δεδομένα, συνδυάζονται οι τεχνικοί περιορισμοί του συστήματος (SoC, ισχύς/ενέργεια, αποδόσεις, throughput) με τους θεσμικούς κανόνες λειτουργίας των αγορών. Στο πλαίσιο αυτό, αναπτύσσονται τέσσερα διακριτά μοντέλα (M1–M4) που καλύπτουν διαφορετικούς συνδυασμούς συμμετοχής στη χονδρεμπορική αγορά και στην αγορά εξισορρόπησης, επιτρέποντας συγκριτική αξιολόγηση.

Το μοντέλο βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκε αναλύθηκε ανάλυση ευαισθησίας σε βασικούς άξονες (κύκλοι ανά ημέρα, διάρκεια μπαταρίας, ισχύς μπαταρίας), ώστε να ελεγχθεί η ευρωστία των συμπερασμάτων και να αναδειχθούν οι συνθήκες υπό τις οποίες μεγιστοποιείται η αξία του BESS. Το αποτέλεσμα είναι ένα πρακτικό και συγκρίσιμο πλαίσιο λήψης αποφάσεων για στρατηγικές συμμετοχής, εναρμονισμένο με το ισχύον κανονιστικό πλαίσιο και επεκτάσιμο σε ρυθμίσεις με προβλέψεις/αβεβαιότητα και επιπλέον αγορές.

4.2 Υποθέσεις και Παραδοχές Μελέτης

4.2.1 Αγορές Συμμετοχής

Η μοντελοποίηση της συμμετοχής του BESS εστιάζει στην Αγορά Επόμενης Ημέρας (DAM) και στην αγορά χειροκίνητα ενεργοποιούμενης εφεδρείας (mFRR), αποκλείοντας άλλες αγορές όπως η Ενδοημερήσια Αγορά (IDM), η αυτόματα ενεργοποιούμενη εφεδρεία (aFRR) και η εφεδρεία διατήρησης συχνότητας (FCR).

4.2.1.1 Συμπεριλαμβανόμενες Αγορές

Η DAM αποτελεί την κεντρική αγορά τιμολόγησης και προγραμματισμού της ελληνικής χονδρεμπορικής αγοράς, με ωριαία εκκαθάριση και πλήρη διαφάνεια τιμών. Η συμμετοχή στην DAM είναι θεμελιώδης για κάθε στρατηγική arbitrage, καθώς παρέχει τη βάση αναφοράς για τον ενεργειακό προγραμματισμό

σε ημερήσια κλίμακα, διαθέτει τα μεγαλύτερα volumes συναλλαγών και υψηλή ρευστότητα, προσφέρει προβλέψιμα χρονικά spreads που μπορούν να αξιοποιηθούν συστηματικά, και οι τιμές εκκαθάρισης είναι πλήρως δημοσιευμένες και ιστορικά διαθέσιμες για ανάλυση.

Ο ΑΔΜΗΕ δημοσιεύει επίσημα τις 15λεπτες τιμές εκκαθάρισης για την mFRR (balancing energy prices), καθώς και τις σταθμισμένες μέσες τιμές ισχύος (weighted average capacity prices) για τα αντίστοιχα προϊόντα.

4.2.1.2 Αποκλεισμός Ενδοημερήσιας Αγοράς (IDM)

Η Ενδοημερήσια Αγορά (IDM) δεν συμπεριλαμβάνεται στην ανάλυση, παρότι παρέχει δυνατότητες προσαρμογής θέσεων εγγύτερα στην ώρα παράδοσης. Οι λόγοι αποκλεισμού είναι δύο: (i) η IDM στην Ελλάδα εμφανίζει διαχρονικά αισθητά χαμηλότερους όγκους συναλλαγών (volumes) σε σχέση με την DAM, γεγονός που περιορίζει την ικανότητα εκτέλεσης μεγάλων θέσεων με προβλέψιμη ρευστότητα, και (ii) η παρούσα μελέτη εστιάζει στη βέλτιστη ημερήσια στρατηγική βάσει προβλέψεων D-1 (DAM), όχι σε ενδοημερήσιες τακτικές αναπροσαρμογές.

4.2.1.3 Αποκλεισμός Αυτόματα Ενεργοποιούμενης Εφεδρείας (aFRR)

Ο κύριος λόγος που δεν εξετάζεται η μοντελοποίηση της aFRR (και της FCR) είναι ότι οι αντίστοιχες εντολές από τον ΑΔΜΗΕ δίνονται σε επίπεδο δευτερολέπτων. Αυτό έχει ως συνέπεια μεγάλη καταπόνηση (και επομένως και της διάρκειας ζωής) της μπαταρίας η οποία θα αναγκαζόταν να εκτελέσει πάρα πολλούς κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης. Επιπλέον, ο ΑΔΜΗΕ δεν δημοσιεύει ενιαίες τιμές εκκαθάρισης (clearing prices) για την aFRR energy—διαθέσιμα είναι μόνο τα μεγέθη ενεργοποιήσεων (activation volumes)—ενώ η αποζημίωση για capacity εφαρμόζει pay-as-bid χωρίς διαφανές ιστορικό τιμών (εξίσου δεν δημοσιεύονται weighted average prices), καθιστώντας ιδιαίτερα δύσκολη την ex-post αποτίμηση εσόδων. Επιπλέον, στην *balancing energy* οι όγκοι ενεργοποιήσεων της aFRR είναι ιστορικά της τάξης του $\sim \frac{1}{3}$ των αντίστοιχων της mFRR, ενώ οι τιμές ενέργειας τείνουν να κινούνται κοντά στις τιμές της mFRR, περιορίζοντας περαιτέρω τη δυνητική προστιθέμενη αξία από την ενσωμάτωσή της στο υπόδειγμα.

4.2.1.4 Αποκλεισμός Εφεδρείας Διατήρησης Συχνότητας (FCR)

Η FCR, αντίστοιχα με την aFRR δεν συμπεριλαμβάνεται στην ανάλυση καθώς οι εντολές ενεργοποίησης δίνονται σε επίπεδο δευτερολέπτων, προκαλώντας υπερβολική καταπόνηση και μείωση της διάρκειας ζωής των συστημάτων αποθήκευσης. Επιπλέον, η FCR παρουσιάζει ιστορικά πολύ μικρούς όγκους σε σχέση με την aFRR και mFRR.

4.2.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά και Λειτουργικοί Περιορισμοί

Προκειμένου να διασφαλιστεί η αντικειμενική σύγκριση των μοντέλων, όλα τα μοντέλα M1–M4 χρησιμοποιούν ταυτόσημες τεχνικές παραμέτρους για το σύστημα αποθήκευσης. Με αυτόν τον τρόπο, οι διαφορές που παρατηρούνται στην οικονομική απόδοση και στη στρατηγική λειτουργία οφείλονται αποκλειστικά στις διαφορές της δομής των μοντέλων (ποιες αγορές συμμετέχουν, ποιοι θεσμικοί περιορισμοί ενεργοποιούνται), και όχι σε διαφορετικές τεχνολογικές υποθέσεις.

4.2.2.1 Προδιαγραφές και Λειτουργικά Χαρακτηριστικά

Το μοντελοποιούμενο σύστημα BESS χαρακτηρίζεται από μέγιστη ισχύ φόρτισης/εκφόρτισης $P_{ch}^{max} = P_{dis}^{max} = 40$ MW και ωφέλιμη χωρητικότητα $C = 160$ MWh, αντιστοιχώντας σε διάρκεια αποθήκευσης 4 ώρες ($C/P^{max} = 4$ h). Η επιλογή αυτής της κλίμακας και της αναλογίας ισχύος προς ενέργεια (P/E ratio = 0,25) βασίζεται στα ακόλουθα κριτήρια:

- Η ισχύς των 40 MW αντιστοιχεί σε ένα τυπικό μέγεθος και επιτρέπει την ουσιαστική συμμετοχή στις αγορές εξισορρόπησης ως ξεχωριστή οντότητα (κάτω από 40 MW είναι σε χαρτοφυλάκιο) [7]
- Η διάρκεια αποθήκευσης 4 ωρών αντιπροσωπεύει, η οποία επιλέγεται συχνά σε τυπικές εφαρμογές.

Οι αποδόσεις μετατροπής ορίζονται $\eta_{ch} = \eta_{dis} = 0,90$ (τυπικές τιμές) και ενσωματώνονται στην εξίσωση ισοζυγίου της κατάστασης φόρτισης (SoC). Το σύστημα λειτουργεί εντός περιορισμένου παραθύρου $SoC \in [20\%, 80\%]$ C (τυπικές τιμές), προστατεύοντας τη μπαταρία από επιταχυνόμενη υποβάθμιση. Η αρχική κατάσταση φόρτισης ορίζεται $SoC(0) = 0,50 C$, ενώ η τελική τιμή στοχεύει στη ζώνη $SoC(T) \in [0,45, 0,55] C$, ώστε να αποφεύγεται η μετακύλιση ενέργειας εκτός ορίζοντα και να διασφαλίζεται συγκρισιμότητα στρατηγικών μεταξύ των μοντέλων.

4.2.2.2 Περιορισμοί Κύκλων Λειτουργίας και Υποβάθμισης

Εφαρμόζεται ημερήσιος περιορισμός χρήσης περίπου 1,2 κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης ανά ημέρα κατά μέσο όρο, διατυπούμενος ως:

$$\sum_t e_{ch}(t) \leq 1,2 C \quad \text{και} \quad \sum_t e_{dis}(t) \leq 1,2 C \quad (4.1)$$

όπου $e_{ch}(t)$ είναι η ενέργεια φόρτισης και $e_{dis}(t)$ η ενέργεια εκφόρτισης σε κάθε χρονική περίοδο t , ενώ C η ονομαστική χωρητικότητα του συστήματος. Η τιμή του 1,2 αντικατοπτρίζει μια ισορροπημένη συντηρητική πολιτική περιορισμού καταπόνησης. Σημειώνεται ότι ο αριθμός των επιτρεπόμενων κύκλων διαφέρει ανάλογα με τη στρατηγική λειτουργίας που επιλέγει να ακολουθήσει ο εκάστοτε πάροχος και τις συστάσεις του κατασκευαστή του BESS.

Για την απλοποίηση της ανάλυσης και την εστίαση στη σύγκριση στρατηγικών συμμετοχής στις αγορές, δεν μοντελοποιείται ρητά η γήρανση (aging/degradation) της μπαταρίας. Θεωρείται ότι τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος παραμένουν σταθερά στη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου.

4.2.3 Σύνοψη Παραμέτρων

Ο Πίνακας 4.1 συνοψίζει τα κοινά τεχνικά χαρακτηριστικά και παραδοχές που χρησιμοποιούνται σε όλα τα μοντέλα βελτιστοποίησης.

Πίνακας 4.1: Κοινά τεχνικά χαρακτηριστικά και παραδοχές μπαταρίας (για όλα τα μοντέλα M1–M4)

Παράμετρος	Τιμή / Περιγραφή
Μέγιστη ισχύς φόρτισης	$P_{ch}^{max} = 40 \text{ MW}$
Μέγιστη ισχύς εκφόρτισης	$P_{dis}^{max} = 40 \text{ MW}$
Ωφέλιμη χωρητικότητα	$C = 160 \text{ MWh}$
Ωφέλιμη διάρκεια	4 h (από C/P^{max})
Απόδοση φόρτισης	$\eta_{ch} = 0,90$
Απόδοση εκφόρτισης	$\eta_{dis} = 0,90$
Παράθυρο λειτουργίας SoC	$[20\%, 80\%] C$
Αρχική κατάσταση φόρτισης	$SoC(0) = 0,50 C$
Τελική στόχευση SoC	$SoC(T) \in [0,45, 0,55] C$
Ελάχιστο μέγεθος προσφοράς στην Αγορά Εξισορρόπησης*	1 MW (ισοδ. 0,5 MWh/30')
Ημερήσιος περιορισμός χρήσης (Battery side)	$\sum_t e_{ch}(t) \leq 1,2 C, \sum_t e_{dis}(t) \leq 1,2 C$

*Σύμφωνα με ρυθμιστικούς κανονισμούς για συμμετοχή στην Αγορά Εξισορρόπησης

όπως περιγράφηκαν στην ενότητα 2.2.4.5.1.

4.2.4 Αποδοχή και Τιμολόγηση Προσφορών στην mFRR

Στο πλαίσιο της μοντελοποίησης, υιοθετείται ότι όλες οι προσφορές του συστήματος αποθήκευσης στην αγορά mFRR γίνονται πλήρως αποδεκτές από τον Διαχειριστή. Η αποζημίωση ισχύος (capacity) αποζημιώνεται στη σταθμισμένη μέση τιμή mFRR ισχύος (weighted average capacity price, €/MW) που δημοσιεύει ο ΑΔΜΗΕ ανά 30λεπτο, ενώ η αποζημίωση ενέργειας (balancing energy) γίνεται στη clearing price (€/MWh) της mFRR για το αντίστοιχο 15λεπτο.

Στα μοντέλα (M3, M4) όπου λαμβάνεται υπόψιν η αγορά ισχύος εξισορρόπησης θεωρούμε ότι η αποδεκτή προσφορά για το μισάωρο σε Capacity μεταφράζεται σε δύο ίσες ποσότητες στα δύο τέταρτα. Υιοθετείται συνεπώς αντιστοίχιση μεταξύ 30λέπτων (ποσότητες ενέργειας) και 15λέπτων (ισχύς mFRR).

$$P^{\uparrow,\downarrow}(t) = 2 E^{\uparrow,\downarrow}(t), \quad t \in \mathcal{T}_{30\min},$$

όπου E είναι ενέργεια ανά 30λεπτο (MWh) και P η αντίστοιχη ισχύς στα 15λεπτα (MW).

4.3 Περιορισμοί από Ρυθμιστικό Πλαίσιο

4.3.1 Ελάχιστη Ποσότητα Προσφοράς στην Αγορά Εξισορρόπησης

Στα μοντέλα που περιλαμβάνουν συμμετοχή στην αγορά εξισορρόπησης (M2, M3 και M4), εφαρμόζεται η απαίτηση ελάχιστης ποσότητας προσφοράς σύμφωνα με τους κανόνες του ΑΔΜΗΕ. Συγκεκριμένα, κάθε προσφορά mFRR (είτε ανοδική είτε καθοδική) πρέπει να ξεπερνά το όριο των 1 MW ανά μισάωρη περίοδο κατανομής, ισοδύναμο με 0,5 MWh/30' σε επίπεδο ενέργειας [16].

4.3.2 Στατικοί Περιορισμοί Έγχυσης Ισχύος

Σύμφωνα με την Υ.Α. ΥΠΕΝ/ΔΑΠΕΕΚ/53563/1556 (ΦΕΚ Β' 3328/19.05.2023), για τους σταθμούς αποθήκευσης που συνδέονται στο ΕΣΜΗΕ εφαρμόζονται στατικοί περιορισμοί μέγιστης έγχυσης ισχύος σε

προκαθορισμένες ζώνες της ημέρας. Οι περιορισμοί εκφράζονται ως ποσοστό της αδειοδοτημένης μέγιστης ισχύος έγχυσης και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2: Στατικοί περιορισμοί έγχυσης ισχύος για stand-alone BESS [8]

Χρονική Ζώνη	Μέγιστη Έγχυση
09:00 – 10:00	70% της αδειοδοτημένης ισχύος
10:00 – 11:00	35% της αδειοδοτημένης ισχύος
11:00 – 15:00	0% (πλήρης απαγόρευση έγχυσης)
15:00 – 16:00	35% της αδειοδοτημένης ισχύος
16:00 – 17:00	70% της αδειοδοτημένης ισχύος
Υπόλοιπες ώρες	100% (πλήρης ισχύς)

Για το μοντελοποιούμενο σύστημα 40 MW, οι περιορισμοί γίνονται: 09:00–10:00 μέγιστη εκφόρτιση 28 MW, 10:00–11:00 14 MW, 11:00–15:00 μηδενική έγχυση, 15:00–16:00 14 MW, 16:00–17:00 28 MW, και στις υπόλοιπες ώρες 40 MW. Οι περιορισμοί αυτοί ενσωματώνονται στα μοντέλα (M1–M4) ως ανώτατα όρια εκφόρτισης/έγχυσης ανά περίοδο. Σημειώνεται ότι οι περιορισμοί της απόφασης αφορούν την έγχυση ισχύος· η λειτουργία φόρτισης διέπεται από τους λοιπούς κανόνες της αγοράς και δεν μεταβάλλεται από τον ανωτέρω πίνακα [8].

4.3.3 Συνέπεια Προγραμματισμού και Ικανότητες Σταθμού

Διασφαλίζεται ότι, σε κάθε περίοδο, η προγραμματισμένη έγχυση ή απορρόφηση δεν υπερβαίνει τις δηλωμένες τεχνικές ικανότητες του σταθμού (μέγιστη ισχύς μετατροπέα και διαθέσιμη ενέργεια):

$$-P_{ch}^{max} \leq P(t) \leq P_{dis}^{max}, \quad \forall t \quad (4.2)$$

όπου $P(t)$ είναι η καθαρή ισχύς του συστήματος (θετική για εκφόρτιση, αρνητική για φόρτιση), και P_{ch}^{max} , P_{dis}^{max} οι μέγιστες επιτρεπόμενες ισχείς φόρτισης και εκφόρτισης αντίστοιχα.

Ο συντονισμός των αποφάσεων DAM και των ενεργοποιήσεων mFRR εντός του ίδιου ημιώρου αποτρέπει την υπέρβαση των ορίων φόρτισης/εκφόρτισης:

$$-P_{ch}^{max} \leq P_{net}(t) \leq P_{dis}^{max}, \quad \forall t \quad (4.3)$$

όπου $P_{net}(t) = P_{DAM}(t) + P_{mFRR}(t)$ είναι η συνολική καθαρή ισχύς του συστήματος από τον συνδυασμό της Ημερήσιας Αγοράς και της ενεργοποίησης mFRR.

Παράλληλα, οι προσφερόμενες ποσότητες mFRR παραμένουν πάντοτε μικρότερες ή ίσες των ανακοινωμένων απαιτήσεων του Διαχειριστή, τόσο σε ενέργεια όσο και σε ισχύ:

$$P_{mFRR,bid}(t) \leq P_{mFRR,req}(t), \quad E_{mFRR,bid}(t) \leq E_{mFRR,req}(t), \quad \forall t \quad (4.4)$$

όπου $P_{mFRR,bid}(t)$ και $E_{mFRR,bid}(t)$ είναι η προσφερόμενη ισχύς και ενέργεια mFRR αντίστοιχα, ενώ $P_{mFRR,req}(t)$ και $E_{mFRR,req}(t)$ οι ανακοινωμένες απαιτήσεις του ΑΔΜΗΕ.

4.4 Αρχιτεκτονική και Ιεράρχηση Μοντέλων

Για την ολοκληρωμένη ανάλυση των δυνατοτήτων συμμετοχής των BESS στις ελληνικές αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, αναπτύχθηκαν τέσσερα διακριτά μοντέλα βελτιστοποίησης με κλιμακούμενη πολυπλοκότητα. Τα μοντέλα διαφοροποιούνται ως προς τις αγορές στις οποίες συμμετέχουν, τους λειτουργικούς

περιορισμούς που ενσωματώνουν, και το βαθμό ευελιξίας που επιτρέπουν στη συνδυαστική αξιοποίηση των αγορών. Η ιεραρχική δομή επιτρέπει τη συστηματική αξιολόγηση της προστιθέμενης αξίας κάθε επιπλέον αγοράς και της επίδρασης των λειτουργικών περιορισμών στην οικονομική απόδοση.

4.4.1 Μοντέλο M1 — Συμμετοχή στην Αγορά Επόμενης Ημέρας (DAM)

Το Μοντέλο M1 αποτελεί το σημείο αναφοράς (baseline) της ανάλυσης και περιορίζεται στην Αγορά Επόμενης Ημέρας (Day-Ahead Market, DAM). Η αγορά αυτή εκκαθαρίζεται την προηγούμενη μέρα (D-1) σε ωριαία βάση, καθορίζοντας τις τιμές ενέργειας για κάθε ώρα της ημέρας κατανομής. Το σύστημα αποθήκευσης υποβάλλει προσφορές αγοράς (φόρτιση) και πώλησης (εκφόρτιση) και αποζημιώνεται βάσει της οριακής τιμής εκκαθάρισης για κάθε ωριαία συναλλαγή.

Το μοντέλο υλοποιεί στρατηγική ενεργειακού arbitrage: το σύστημα φορτίζεται κατά τις ώρες χαμηλών τιμών και εκφορτίζεται κατά τις ώρες υψηλών τιμών, αξιοποιώντας τις ενδοημερήσιες διακυμάνσεις τιμών. Σκοπός του μοντέλου είναι η μεγιστοποίηση του καθαρού ημερήσιου κέρδους από τις συναλλαγές στη DAM, το οποίο προκύπτει από τη διαφορά μεταξύ των εσόδων από πωλήσεις (εκφόρτιση) και του κόστους αγορών (φόρτιση).

4.4.2 Μοντέλο M2 — Συμμετοχή σε DAM και mFRR Energy

Το Μοντέλο M2 επεκτείνει το M1 ενσωματώνοντας τη συμμετοχή στην Αγορά Ενέργειας Εξισορρόπησης (mFRR Energy), διατηρώντας παράλληλα τη συμμετοχή στην Αγορά Επόμενης Ημέρας. Σε αντίθεση με το M1 που περιορίζεται σε μία μόνο αγορά, το M2 αξιοποιεί δύο διαφορετικές αγορές με διαφορετικούς μηχανισμούς τιμολόγησης και χρονικά πλαίσια.

Η DAM εκκαθαρίζεται την προηγούμενη μέρα D-1 σε ωριαία βάση, ενώ η mFRR Energy λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο τη μέρα παράδοσης D με δεκαπεντάλεπτη ανάλυση, ανταποκρινόμενη σε πραγματικές ανισορροπίες του συστήματος. Το σύστημα αποζημιώνεται βάσει της οριακής τιμής εκκαθάρισης της DAM για τις ωριαίες συναλλαγές και βάσει της οριακής τιμής ενέργειας εξισορρόπησης mFRR σε δεκαπεντάλεπτη βάση για τις ενεργοποιήσεις.

Το μοντέλο υλοποιεί διπλή στρατηγική arbitrage: εκμεταλλεύεται τόσο τα ενδο-αγοραστικά spreads (intra-market) εντός της DAM και της αγοράς ενέργειας εξισορρόπησης, όσο και τα δια-αγοραστικά spreads μεταξύ DAM και mFRR (cross-market).

4.4.2.0.1 Ορισμός και Περιορισμός Κατευθυντικής Συμβατότητας. Η αλληλεπίδραση των προσφορών μεταξύ της DAM και των αγορών εξισορρόπησης υπόκειται σε συγκεκριμένους περιορισμούς στο μοντέλο M2, οι οποίοι ορίζονται στην παρούσα εργασία ως *περιορισμοί κατευθυντικής συμβατότητας*.

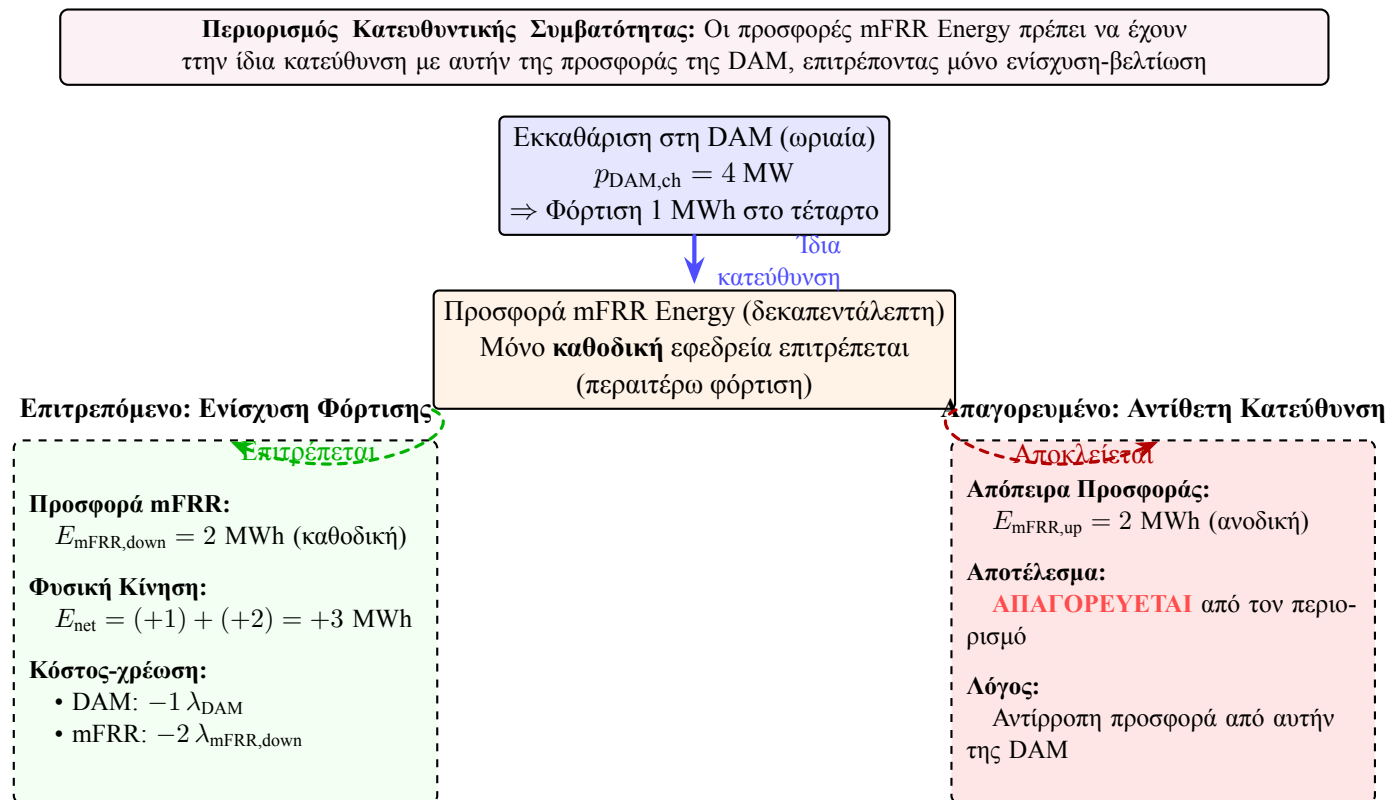
Συγκεκριμένα, στο M2 επιβάλλεται ο εξής περιορισμός: εάν το BESS έχει εκκαθαριστεί για φόρτιση στη DAM σε μία συγκεκριμένη ώρα, δεν επιτρέπεται να προσφέρει ανοδική εφεδρεία (εκφόρτιση) στην mFRR κατά τα τέσσερα 15λεπτα αυτής της ώρας. Αντίστοιχα, εάν έχει εκκαθαριστεί για εκφόρτιση στη DAM, δεν επιτρέπεται να προσφέρει καθοδική εφεδρεία (φόρτιση) στην mFRR. Ο περιορισμός αυτός επιβάλλει συμπληρωματική λειτουργία: οι προσφορές στην mFRR Energy μπορούν μόνο να ενισχύσουν την κατεύθυνση της θέσης DAM βελτιώνοντας ουσιαστικά την προσφορά της, χωρίς δυνατότητα αντίρροπης κίνησης.

Για παράδειγμα, έστω ότι κατά τη χρονική περίοδο t το BESS έχει προγραμματίσει καθαρή ισχύ $P_{\text{DAM}}(t) = +2 \text{ MW}$ στη DAM (φόρτιση από το δίκτυο). Στο πλαίσιο της κατευθυντικής συμβατότητας, η προσφερόμενη ισχύς mFRR πρέπει να ικανοποιεί $P_{\text{mFRR}}(t) \geq 0$, δηλαδή να έχει το ίδιο πρόσημο με τη θέση της DAM. Επιτρέπεται η ενίσχυση της φόρτισης (π.χ. $P_{\text{mFRR}}(t) = +2 \text{ MW}$ για συνολική φόρτιση $P_{\text{net}}(t) = +4 \text{ MW}$ σε ωριαίο επίπεδο), αλλά αποκλείεται οποιαδήποτε προσφορά εκφόρτισης

Σκοπός του μοντέλου είναι η μεγιστοποίηση του συνολικού ημερήσιου κέρδους από τις συναλλαγές σε αμφότερες τις αγορές, το οποίο προκύπτει από το άθροισμα των κερδών DAM και των κερδών mFRR Energy. Το πρόβλημα απόφασης περιλαμβάνει την κατανομή της διαθέσιμης ενεργειακής χωρητικότητας μεταξύ εσόδων από arbitrage στη DAM και δυνητικά υψηλότερων εσόδων από ενεργοποιήσεις στην mFRR. Το M2 λειτουργεί με ωριαία ανάλυση για τη DAM (24 περίοδοι) και 15λεπτη για την mFRR Energy (96 περίοδοι).

Μοντέλο M2: Κατευθυντική Συμβατότητα DAM–mFRR Energy

(Παράδειγμα αλληλεπίδρασης προσφορών)



Σχήμα 4.1: Σχηματοποίηση του περιορισμού κατευθυντικής συμβατότητας στο Μοντέλο M2. Η θέση DAM καθορίζει την επιτρεπόμενη κατεύθυνση των προσφορών mFRR Energy.

4.4.3 Μοντέλο M3 — Συμμετοχή σε DAM, mFRR Energy και mFRR Capacity

Το Μοντέλο M3 επεκτείνει το M2 ενσωματώνοντας τη συμμετοχή στην Αγορά Ισχύος Εξισορρόπησης (mFRR Capacity) μέσω της Διαδικασίας Ενοποιημένου Προγραμματισμού (ΔΕΠ), διατηρώντας παράλληλα τη συμμετοχή στην Αγορά Επόμενης Ημέρας (DAM) και στην Αγορά Ενέργειας Εξισορρόπησης (mFRR Energy). Το M3 υλοποιεί στρατηγική διπλής ροής εσόδων (revenue stacking): αποζημίωση για διαθεσιμότητα (capacity payment) και αποζημίωση για ενεργοποίηση (energy payment).

4.4.3.0.1 Μετάβαση σε Μισάωρη Χρονική Ανάλυση. Ενώ το M2 λειτουργούσε σε δεκαπεντάλεπτη βάση, το M3 υιοθετεί μισάωρη βάση (30 λεπτά), καθώς οι προσφορές capacity στη ΔΕΠ υποβάλλονται και απονέμονται ανά 30λεπτη Περίοδο Κατανομής. Η επιλογή αυτή εναρμονίζεται με τη λειτουργία της ΔΕΠ και επιτρέπει την ενοποιημένη διαχείριση της διαθέσιμης χωρητικότητας σε όλες τις αγορές. Παρότι οι ενεργοποιήσεις στην mFRR Energy εξακολουθούν να πραγματοποιούνται σε δεκαπεντάλεπτη βάση με διαφορετικές τιμές για κάθε 15λεπτο.

4.4.3.0.2 Διατήρηση Περιορισμού Κατευθυντικής Συμβατότητας. Όπως και στο M2, έτσι και το M3 ενσωματώνει την αρχή της κατευθυντικής συμβατότητας μεταξύ της θέσης DAM και των προσφορών στις αγορές εξισορρόπησης. Εάν το BESS έχει εκκαθαρίσει θέση φόρτισης στη DAM για μία συγκεκριμένη περίοδο, επιτρέπεται να προσφέρει μόνο καθοδική εφεδρεία (down-regulation) τόσο σε ισχύ (capacity) όσο και σε ενέργεια (energy), καθώς η προγραμματισμένη απορρόφηση ενέργειας παρέχει το φυσικό περιθώριο για περαιτέρω αύξηση της κατανάλωσης. Αντίστοιχα, εάν έχει εκκαθαρίσει θέση εκφόρτισης, επιτρέπεται να προσφέρει μόνο ανοδική εφεδρεία (up-regulation). Ο περιορισμός αυτός ισχύει ταυτόχρονα για τις προσφορές capacity και energy στην ίδια μισάωρη περίοδο.

4.4.3.0.3 Τριπλή συνεισφορά στο καθαρό οικονομικό αποτέλεσμα Σκοπός του μοντέλου είναι η μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία εκφράζει το συνολικό ημερήσιο κέρδος από τρεις διακριτές συνιστώσες. Η πρώτη συνιστώσα αντιπροσωπεύει τη διαφορά μεταξύ των εσόδων από πωλήσεις και του κόστους αγορών στη DAM, εκμεταλλευόμενη τις ενδοημερήσιες διακυμάνσεις τιμών. Η δεύτερη συνιστώσα περιλαμβάνει τα έσοδα από την αποζημίωση mfix capacity για τη παροχή διαθεσιμότητας ανοδικής και καθοδικής εφεδρείας στη ΔΕΠ. Η τρίτη συνιστώσα αντιστοιχεί στα καθαρά έσοδα από τις ενεργοποιήσεις στην mFRR Energy.

Μοντέλο M3: Προσθήκη Αποζημίωσης Capacity

(Ισχύει το ίδιο παράδειγμα κατευθυντικής συμβατότητας με το M2)

Ισχύει ο ίδιος περιορισμός κατευθυντικής συμβατότητας με το M2, (όπως περιγράφηκε στο Σχ. 4.1) αλλά προστίθεται αποζημίωση capacity για τη διαθεσιμότητα εφεδρείας.

Εκκαθάριση στη DAM (ωριαία)
 $p_{\text{DAM,ch}} = 4 \text{ MW}$
 $\Rightarrow$ Φόρτιση 1 MWh στο δεκαπεντάλεπτο

Ίδια
κατεύθυνση

Προσφορά Capacity (μισάωρη)
 $P_{\text{cap,down}} = 8 \text{ MW}$
(Καθοδική εφεδρεία)

Προσφορά Energy (δεκαπεντάλεπτη)
 $E_{\text{mFRR,down}} = 2 \text{ MWh}$

Αποτέλεσμα: Τριπλή συνεισφορά $\rightarrow$ το καθαρό οικονομικό αποτέλεσμα

Φυσική Κίνηση:

$$E_{\text{net}} = (+1) + (+2) = +3 \text{ MWh}$$

(συνολική φόρτιση)

Κόστος/χρέωση:

- DAM: $-1 \times \lambda_{\text{DAM}}$
- mFRR Energy: $-2 \times \lambda_{\text{mFRR,down}}$

Αποζημίωση:

- Capacity: $+8 \times \lambda_{\text{cap,down}}$
- (αποζημίωση για παροχή εφεδρείας)

Διαφορά από M2: Στο M3 προστίθεται αποζημίωση capacity για τη δέσμευση διαθεσιμότητας.

Σχήμα 4.2: Σχηματοποίηση της λογικής του Μοντέλου M3.

4.4.4 Μοντέλο M4 — Πλήρης συμμετοχή σε DAM, mFRR Energy και mFRR Capacity

Το Μοντέλο M4 αποτελεί επέκταση του M3, άρνοντας τον περιορισμό της κατευθυντικής συμβατότητας μεταξύ της θέσης DAM και της προσφοράς capacity. Ενώ το M3 επιτρέπει προσφορά capacity μόνο προς την ίδια κατεύθυνση με την εκκαθαρισμένη θέση DAM (φόρτιση $\rightarrow$ καθοδική εφεδρεία, εκφόρτιση $\rightarrow$ ανοδική εφεδρεία), το M4 αναγνωρίζει ότι το BESS μπορεί να εκκαθαρίσει θέση στην Αγορά Επόμενης Ημέρας προς μία κατεύθυνση και ταυτόχρονα να προσφέρει διαθεσιμότητα εφεδρείας προς την αντίθετη κατεύθυνση στην αγορά εξισορρόπησης εντός της ίδιας μισάωρης περιόδου.

4.4.4.0.1 Αξιοποίηση Διπλής Δυνατότητας. Η κρίσιμη καινοτομία του M4 έγκειται στην αξιοποίηση της διπλής δυνατότητας του συστήματος αποθήκευσης. Το BESS μπορεί να εκκαθαρίσει στην προηγούμενη αγορά δεσμευόμενο για συγκεκριμένη ενεργειακή κίνηση και παράλληλα να προσφέρει στην αγορά εξισορρόπησης την ικανότητα εκτέλεσης της αντίθετης κίνησης, εφόσον ο ΑΔΜΗΕ έχει ανακοινώσει ανάγκη για τέτοιες εφεδρείες.

Στην περίπτωση αυτή, η τελική ενεργειακή κίνηση που εκτελεί το σύστημα υπολογίζεται ως η διαφορά μεταξύ της εκκαθαρισμένης θέσης DAM και της ενεργοποιηθείσας mFRR energy. Εάν αυτές οι δύο ποσότητες είναι ίσες, το αποτέλεσμα είναι μηδενική καθαρή φυσική κίνηση: το σύστημα δεν εκτελεί καμία πράξη φόρτισης ή εκφόρτισης αλλά παρά ταύτα συγκεντρώνει τριπλή οικονομική συνεισφορά—από την εκκαθαρισμένη θέση στην DAM (έσοδο ή κόστος), από την capacity (αποζημίωση διαθεσιμότητας), και από την mFRR energy (αποζημίωση ή χρέωση ενεργοποίησης)—χωρίς καμία γήρανση της μπαταρίας. Εάν οι ποσότητες διαφέρουν, το σύστημα εκτελεί μόνο την κίνηση που αντιστοιχεί στη διαφορά τους, συγκεντρώνοντας πάλι τριπλή οικονομική συνεισφορά αλλά με μειωμένη φυσική καταπόνηση σε σύγκριση με την ξεχωριστή εκτέλεση και των δύο κινήσεων.

4.4.4.0.2 Θεσμικό Πλαίσιο και Τεχνική Εφικτότητα. Κρίσιμο στοιχείο του M4 είναι ότι δεν υπάρχει καμία ποινή ή χρέωση μη συμμόρφωσης (imbalance penalty) όταν το πραγματικό πρόγραμμα εκτέλεσης διαφέρει από το εκκαθαρισμένο πρόγραμμα της DAM, καθώς η απόκλιση πραγματοποιείται σε επίπεδο παροχής εφεδρειών εξισορρόπησης. Η “αντίθετη” κίνηση από την εκκαθαρισμένη θέση της DAM δεν θεωρείται απόκλιση ή μη συμμόρφωση, αλλά θεσμικά ορθή παροχή καθοδικής ή ανοδικής εφεδρείας αντίστοιχα, η οποία αποζημιώνεται πλήρως μέσω της αγοράς εξισορρόπησης. Αυτό το χαρακτηριστικό του ελληνικού κανονιστικού πλαισίου επιτρέπει στο M4 να εκμεταλλεύεται πλήρως τις ευκαιρίες στοίβαξης οικονομικών ροών χωρίς πρόσθετο κόστος συμμόρφωσης.

Ωστόσο, οι προσφορές capacity που υποβάλλονται πρέπει να είναι πάντοτε σύμφωνες με τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τους λειτουργικούς περιορισμούς του συστήματος. Η διαθεσιμότητα που προσφέρεται καθορίζεται από την τρέχουσα κατάσταση φόρτισης (SoC), τη μέγιστη ισχύ φόρτισης/εκφόρτισης, τα ανώτατα και κατώτατα όρια ενέργειας, και τους στατικούς περιορισμούς έγχυσης ισχύος. Το μοντέλο διασφαλίζει ότι, εάν η προσφερόμενη εφεδρεία πράγματι κληθεί προς ενεργοποίηση, το σύστημα θα είναι τεχνικά ικανό να την εκτελέσει χωρίς υπέρβαση των φυσικών του περιορισμών.

4.4.4.0.3 Μαθηματική Διατύπωση και Αντικειμενική Συνάρτηση. Σκοπός του μοντέλου είναι η μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία παραμένει ταυτόσημη με αυτή του M3 και εκφράζει το συνολικό ημερήσιο καθαρό οικονομικό αποτέλεσμα από τρεις διακριτές συνιστώσες: το καθαρό οικονομικό αποτέλεσμα από τη συμμετοχή στη DAM (διαφορά μεταξύ των εσόδων από πωλήσεις και του κόστους αγορών), τα έσοδα από την αποζημίωση capacity για τη δέσμευση διαθεσιμότητας ανοδικής και καθοδικής εφεδρείας, και το καθαρό οικονομικό αποτέλεσμα από τις ενεργοποιήσεις στην mFRR Energy (διαφορά εσόδων ανοδικής ενεργοποίησης και κόστους καθοδικής ενεργοποίησης).

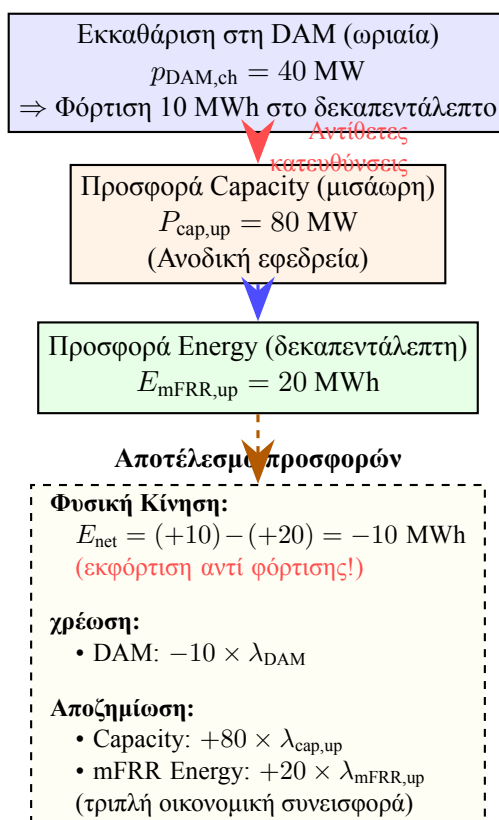
Η διαφορά του M4 από το M3 εντοπίζεται αποκλειστικά στην απουσία του περιορισμού κατευθυντικής συμβατότητας (Περιορισμός 8 του M3), επιτρέποντας πλήρη ανεξαρτησία των προσφορών capacity από την κατεύθυνση της θέσης DAM. Το M4 λειτουργεί με μισάωρη χρονική ανάλυση για τη διαχείριση των φυσικών ροών και της κατάστασης φόρτισης (48 περίοδοι), 15λεπτη για την mFRR Energy (96 περίοδοι), και ωριαία για τη DAM (24 περίοδοι). Διατυπώνεται ως Μικτό Ακέραιο Γραμμικό Πρόβλημα (MILP).

Το M4 επομένως μεγιστοποιεί το δυναμικό στοίβαξης οικονομικών ροών (revenue stacking), αξιοποιώντας πλήρως τη δυνατότητα του συστήματος να συμμετέχει ταυτόχρονα σε τρεις διακριτές ροές οικονομικών μεγεθών ανεξάρτητα από την κατεύθυνση του προγράμματος DAM. Το M4 αντιπροσωπεύει την πιο ευέλικτη και οικονομικά αποδοτική στρατηγική συμμετοχής στις εξεταζόμενες αγορές. Η σύγκριση μεταξύ M3 και M4 αναδεικνύει την οικονομική αξία της λειτουργικής ευελιξίας και της ικανότητας να αξιοποιείται πλήρως η αγορά διαθεσιμότητας χωρίς περιορισμούς κατευθυντικής συμβατότητας.

Μοντέλο M4: Άρση Κατευθυντικής Συμβατότητας

(Παράδειγμα αλληλεπίδρασης με αντίθετες κατευθύνσεις)

Άρση Κατευθυντικής Συμβατότητας: Το σύστημα αποθήκευσης δύναται να εκκαθαρίσει θέση στην Αγορά Επόμενης Ημέρας προς μία κατεύθυνση και ταυτόχρονα να προσφέρει διαθεσιμότητα εφεδρείας προς την αντίθετη κατεύθυνση στην αγορά εξισορρόπησης.



Θεσμικό Πλαίσιο: Δεν υφίσταται ποινή μη συμμόρφωσης. Η απόκλιση από το εκκαθαρισμένο πρόγραμμα DAM θεωρείται θεσμικά ορθή παροχή εφεδρείας και αποζημιώνεται πλήρως.

Σχήμα 4.3: Σχηματοποίηση της λογικής του Μοντέλου M4 με ανεξάρτητες προσφορές mFRR χωρίς περιορισμό κατευθυντικής συμβατότητας. Το παράδειγμα απεικονίζει τις αντίρροπες προσφορές μέσω παροχής εφεδρείας (μετάβαση από φόρτιση σε εκφόρτιση).

4.4.5 Συγκριτική Επισκόπηση και Ιεραρχική Δομή Μοντέλων

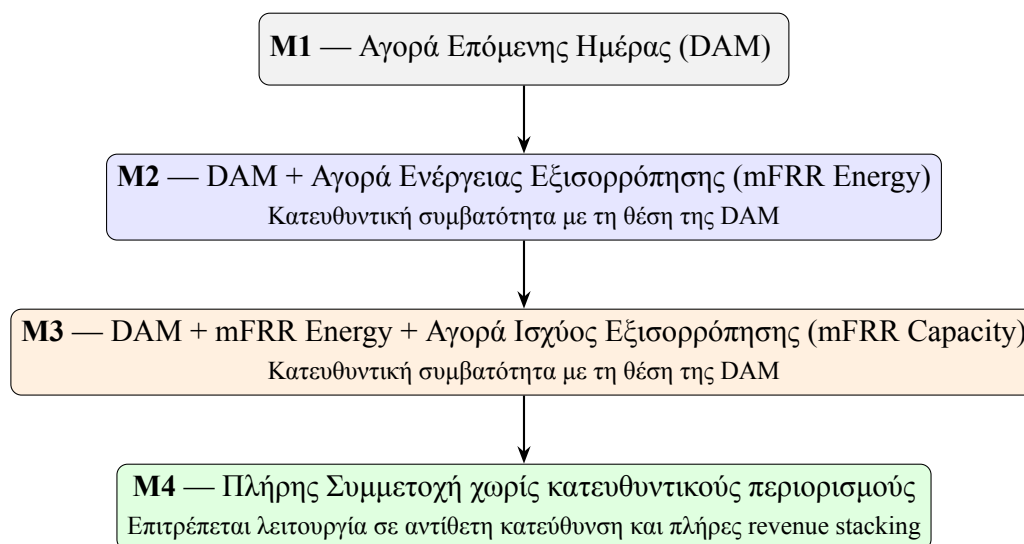
Η ανάπτυξη των τεσσάρων μοντέλων ακολουθεί μια συστηματική κλιμάκωση που επιτρέπει την αξιολόγηση της προστιθέμενης αξίας κάθε επιπλέον αγοράς και της επίδρασης των λειτουργικών περιορισμών στην οικονομική απόδοση των συστημάτων αποθήκευσης. Η ιεράρχηση των μοντέλων ακολουθεί κλιμακωτή αύξηση της πολυπλοκότητας και των ροών οικονομικών μεγεθών, με την προοδευτική εισαγωγή νέων αγορών στις οποίες συμμετέχει η αποθηκευτική διάταξη και τη σταδιακή χαλάρωση περιορισμών ως προς την κατευθυντική συμβατότητα με τη θέση (φόρτιση/εκφόρτιση) στην DAM.

Το **M1** (Προημερήσια Αγορά — DAM) αποτελεί το baseline μοντέλο με μονοαγοραστική συμμετοχή, όπου η αποθηκευτική διάταξη συμμετέχει αποκλειστικά στην Αγορά Επόμενης Ημέρας, λειτουργώντας ως βασικό μοντέλο καθαρού arbitrage που εκμεταλλεύεται τις ενδοημερήσιες διακυμάνσεις τιμών. Το **M2** εισάγει τη δια-αγοραστική αξιοποίηση, με το BESS να συμμετέχει πλέον στην *Αγορά Ενέργειας Εξισορρόπησης* (mFRR Energy) επιπλέον της DAM, χωρίς όμως να συμπεριλαμβάνει τη δυνατότητα συμμετοχής στην αγορά ισχύος (capacity). Επιπλέον, θέτει *απαγόρευση φόρτισης ή εκφόρτισης σε αντίθετη κατεύθυνση*

από τη θέση της DAM στο ίδιο χρονικό βήμα υπό περιορισμούς κατευθυντικής συμβατότητας. Δηλαδή, όταν το BESS έχει θέση αγοράς στη DAM, μπορεί να προσφέρει μόνο εφεδρεία καθόδου (down), και όταν έχει θέση πώλησης, μόνο εφεδρεία ανόδου (up).

Το **M3** επεκτείνει το μοντέλο με το BESS να συμμετέχει πλέον και στην *Αγορά Ισχύος Εξισορρόπησης* (mFRR Capacity), προσθέτοντας τη διάσταση της αποζημίωσης capacity. Το M3 αποτελεί μια απλουστευμένη περίπτωση μοντελοποίησης της αγοράς εξισορρόπησης, καθώς η αποθηκευτική διάταξη διατηρεί τους περιορισμούς κατευθυντικής συμβατότητας. Συγκεκριμένα, επιβάλλει *κατευθυντική συμβατότητα* μεταξύ της θέσης DAM και της προσφοράς capacity, περιορίζοντας τη λειτουργική ευελιξία του συστήματος. Τέλος, το **M4** μοντελοποιεί στο σύνολό της την αγορά εξισορρόπησης με τη συμμετοχή του BESS σε όλες τις διαθέσιμες αγορές (DAM, mFRR Energy, mFRR Capacity), άρνοντας τους περιορισμούς κατευθυντικής συμβατότητας και επιτρέποντας *λειτουργία σε αντίθετη κατεύθυνση* από την κίνηση στην DAM με πλήρη συνδυαστική αξιοποίηση όλων των αγορών (full revenue stacking). Το M4 αξιοποιεί πλήρως τις δυνατότητες που παρέχει το θεσμικό πλαίσιο και μεγιστοποιεί το δυναμικό στοίβαξης οικονομικών ροών χωρίς λειτουργικούς περιορισμούς κατευθυντικής συμβατότητας.

Το Σχήμα που ακολουθεί και ο Πίνακας 4.3 συνοψίζουν τα βασικά χαρακτηριστικά των τεσσάρων μοντέλων, επιτρέποντας την άμεση σύγκριση των διαφορών τους και την κατανόηση της προοδευτικής εξέλιξης από το απλό μονοαγοραστικό μοντέλο στο πλήρως ευέλικτο πολυαγοραστικό σύστημα.



Σχήμα 4.4: Κλιμάκωση λειτουργικότητας και χαλάρωση περιορισμών από M1 σε M4.

Πίνακας 4.3: Συγκριτική επισκόπηση χαρακτηριστικών μοντέλων M1–M4

Χαρακτηριστικό	M1	M2	M3	M4
Συμμετοχή DAM	✓	✓	✓	✓
Συμμετοχή mFRR Energy	–	✓	✓	✓
Συμμετοχή mFRR Capacity	–	–	✓	✓
Κατευθυντική συμβατότητα	–	✓	✓	–

4.5 Μοντέλο M1 — Συμμετοχή στην Προημερήσια Αγορά

Το Μοντέλο M1 μοντελοποιεί τη συμμετοχή του BESS αποκλειστικά στην Αγορά Επόμενης Ημέρας (DAM), υλοποιώντας στρατηγική ενεργειακού arbitrage με φόρτιση κατά τις ώρες χαμηλών τιμών και

εκφόρτιση κατά τις ώρες υψηλών τιμών, με σκοπό τη μεγιστοποίηση του καθαρού ημερήσιου κέρδους, όπως περιγράφεται στη μαθηματική διατύπωση που ακολουθεί.

4.5.1 Μαθηματικό Μοντέλο

4.5.1.1 Σύνολα και Χρονική Ανάλυση

Το μοντέλο λειτουργεί σε ωριαία βάση για ολόκληρο το 24ωρο της ημέρας κατανομής:

- $\mathcal{H} = \{0, 1, \dots, 23\}$: Σύνολο ωρών
- $\Delta t = 1$ h: Χρονικό βήμα

4.5.1.2 Παράμετροι

4.5.1.2.1 Τεχνικές Παράμετροι BESS:

- C [MWh]: Ονομαστική ενεργειακή χωρητικότητα του συστήματος αποθήκευσης.
- $P_{\text{ch}}^{\text{max}}, P_{\text{dis}}^{\text{max}}$ [MW]: Μέγιστη ισχύς φόρτισης και εκφόρτισης.
- $\eta_{\text{ch}}, \eta_{\text{dis}} \in (0, 1]$: Αποδόσεις φόρτισης και εκφόρτισης.

4.5.1.2.2 Παράμετροι Κατάστασης Φόρτισης:

- SoC_0 [MWh]: Αρχική κατάσταση φόρτισης στην αρχή της ημέρας ($h = 0$).
- $\text{SoC}_{\text{min}}, \text{SoC}_{\text{max}}$ [MWh]: Ελάχιστα και μέγιστα επιτρεπόμενα όρια κατάστασης φόρτισης, με $0 \leq \text{SoC}_{\text{min}} \leq \text{SoC}_{\text{max}} \leq C$.
- $\text{SoC}_{\text{fin}}^{\text{min}}, \text{SoC}_{\text{fin}}^{\text{max}}$ [MWh]: Επιθυμητά όρια τελικής κατάστασης φόρτισης στο τέλος της ημέρας ($h = 24$).¹

4.5.1.2.3 Παράμετροι Αγοράς (ανά ώρα $h \in \mathcal{H}$):

- $p_{\text{DA}}(h)$ [€/MWh]: Οριακή τιμή εκκαθάρισης της DAM για την ώρα h .
- $\sigma(h) \in [0, 1]$: Στατικός περιορισμός έγχυσης ισχύος στο δίκτυο για την ώρα h , εκφρασμένος ως ποσοστό της αδειοδοτημένης ισχύος εκφόρτισης, όπως αυτός ορίζεται από το ρυθμιστικό πλαίσιο και περιγράφονται στον Πίνακα 4.2. [8].

¹ Στην υλοποίηση του μοντέλου, τα όρια τελικής κατάστασης φόρτισης ορίστηκαν ως $\text{SoC}_{\text{fin}}^{\text{min}} = 0.45 \cdot C$ και $\text{SoC}_{\text{fin}}^{\text{max}} = 0.55 \cdot C$ για διασφάλιση συνέχειας λειτουργίας.

4.5.1.3 Μεταβλητές Απόφασης (ανά ώρα $h \in \mathcal{H}$)

- $e_{\text{ch}}(h) \geq 0$ [MWh]: Ποσότητα ενέργειας που αγοράζεται από τη DAM για φόρτιση του BESS.
- $e_{\text{dis}}(h) \geq 0$ [MWh]: Ποσότητα ενέργειας που πωλείται στη DAM από εκφόρτιση του BESS.
- $\text{SoC}(h) \in \mathbb{R}$ [MWh]: Κατάσταση φόρτισης στο τέλος της ώρας h . Ορίζεται για $h = 0, 1, \dots, 24$.

4.5.1.4 Αντικειμενική Συνάρτηση

$$\max Z = \sum_{h \in \mathcal{H}} p_{\text{DA}}(h) \cdot (e_{\text{dis}}(h) - e_{\text{ch}}(h)) \quad (4.5)$$

Ο όρος $p_{\text{DA}}(h) \cdot e_{\text{dis}}(h)$ αντιπροσωπεύει τα έσοδα από πώληση ενέργειας στην ώρα h . Ο όρος $p_{\text{DA}}(h) \cdot e_{\text{ch}}(h)$ αντιπροσωπεύει το κόστος αγοράς ενέργειας στην ώρα h . Η διαφορά δίνει το καθαρό κέρδος για κάθε ώρα, και το άθροισμα επί όλων των ωρών δίνει το συνολικό ημερήσιο κέρδος.

4.5.1.5 Περιορισμοί

4.5.1.5.1 1. Αρχική Κατάσταση Φόρτισης

$$\text{SoC}(0) = 0.5 \cdot C \quad (4.6)$$

Η αρχική κατάσταση φόρτισης ορίζεται στο 50% της ονομαστικής χωρητικότητας.

4.5.1.5.2 2. Δυναμική Κατάστασης Φόρτισης Για κάθε ώρα $h \in \mathcal{H}$:

$$\text{SoC}(h) = \text{SoC}(h-1) + \eta_{\text{ch}} \cdot e_{\text{ch}}(h) - \frac{1}{\eta_{\text{dis}}} \cdot e_{\text{dis}}(h) \quad (4.7)$$

Εξασφαλίζει τη συνέχεια του ενεργειακού ισοζυγίου.

4.5.1.5.3 3. Όρια Κατάστασης Φόρτισης Για κάθε $h \in \{0, 1, \dots, 24\}$:

$$\text{SoC}_{\min} \leq \text{SoC}(h) \leq \text{SoC}_{\max} \quad (4.8)$$

Η κατάσταση φόρτισης παραμένει εντός επιτρεπτών ορίων σε κάθε χρονική στιγμή.

4.5.1.5.4 4. Τελική Κατάσταση Φόρτισης

$$\text{SoC}_{\text{fin}}^{\min} \leq \text{SoC}(24) \leq \text{SoC}_{\text{fin}}^{\max} \quad (4.9)$$

Στο τέλος της ημέρας, η κατάσταση φόρτισης βρίσκεται εντός συγκεκριμένων ορίων για διασφάλιση συνέχειας λειτουργίας την επόμενη ημέρα.

4.5.1.5.5 5. Όρια Ισχύος Φόρτισης Για κάθε $h \in \mathcal{H}$:

$$e_{\text{ch}}(h) \leq P_{\text{ch}}^{\max} \cdot \Delta t \quad (4.10)$$

Η ενέργεια φόρτισης περιορίζεται από τη μέγιστη ισχύ φόρτισης.

4.5.1.5.6 6. Όρια Ισχύος Εκφόρτισης και Στατικός Περιορισμός Έγχυσης Για κάθε $h \in \mathcal{H}$:

$$e_{\text{dis}}(h) \leq \sigma(h) \cdot P_{\text{dis}}^{\max} \cdot \Delta t \quad (4.11)$$

Η ενέργεια εκφόρτισης περιορίζεται από τη μέγιστη ισχύ εκφόρτισης και τους στατικούς περιορισμούς έγχυσης στο δίκτυο διανομής, όπως αυτοί παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2. Ο συντελεστής $\sigma(h) \in [0, 1]$ εκφράζεται ως ποσοστό της αδειοδοτημένης ισχύος που επιτρέπεται να εγχυθεί ανά ώρα. Για παράδειγμα: $\sigma(9) = 0.70$, $\sigma(10) = 0.35$, $\sigma(11-14) = 0.00$ (πλήρης απαγόρευση κατά 11:00–15:00), $\sigma(15) = 0.35$, $\sigma(16) = 0.70$, υπόλοιπες ώρες $\sigma(h) = 1.00$ [8].

4.5.1.5.7 6. Όριο Ημερήσιων Κύκλων Φόρτισης και Εκφόρτισης (χωρίς αποδόσεις)

$$\sum_{h \in \mathcal{H}} e_{\text{ch}}(h) \leq 1, 2 \cdot C \quad (4.12)$$

$$\sum_{h \in \mathcal{H}} e_{\text{dis}}(h) \leq 1, 2 \cdot C \quad (4.13)$$

Οι περιορισμοί αυτοί επιβάλλουν ανώτατο όριο στη συνολική ημερήσια ενέργεια φόρτισης και εκφόρτισης, περιορίζοντας τον αριθμό των πλήρων κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης σε περίπου 1.2 ημερησίως για προστασία της διάρκειας ζωής της μπαταρίας.

4.5.1.6 Χαρακτηριστικά Μοντέλου

Το μοντέλο M1 είναι ένα Γραμμικό Πρόβλημα (Linear Programming, LP) με 24 περιόδους απόφασης.

4.6 Μοντέλο M2 — Συμμετοχή σε Προημερήσια Αγορά και σε Αγορά Ενέργειας Εξισορρόπησης

4.6.1 Λειτουργία

Το Μοντέλο M2 επεκτείνει το M1 ενσωματώνοντας τη συμμετοχή στην Αγορά Ενέργειας Εξισορρόπησης (mFRR Energy) με δεκαπεντάλεπτη ανάλυση, επιτρέποντας στο BESS να αξιοποιεί τόσο τα ενδοημερήσια spreads εντός κάθε αγοράς (intra-market) όσο και τα δια-αγοραστικά spreads μεταξύ DAM και mFRR (cross-market), υπό τον περιορισμό ότι δεν επιτρέπεται στην αγορά εξισορρόπησης ενέργειας να πραγματοποιηθεί προσφορά με αντίρροπη κατεύθυνση από εκείνη που εκκαθαρίστηκε στην DAM εντός της ίδιας ώρας, με σκοπό τη μεγιστοποίηση του συνολικού ημερήσιου κέρδους από τις συναλλαγές σε αμφότερες τις αγορές, το οποίο προκύπτει από το άθροισμα των κερδών DAM και των κερδών mFRR Energy.

4.6.2 Μαθηματικό Μοντέλο

Το μοντέλο λειτουργεί με διπλή χρονική κλίμακα:

- $\mathcal{H} = \{0, 1, \dots, 23\}$: Σύνολο ωρών (για DAM)
- $\mathcal{Q} = \{0, 1, \dots, 95\}$: Σύνολο δεκαπενταλέπτων (για mFRR Energy)
- $\Delta t_h = 1$ h: Χρονικό βήμα DAM
- $\Delta t_q = 0.25$ h: Χρονικό βήμα mFRR (15')

Η απεικόνιση από δεκαπεντάλεπτα σε ώρες δίνεται από: $h(q) = \lfloor q/4 \rfloor$

4.6.2.1 Παράμετροι

4.6.2.1.1 Τεχνικές Παράμετροι BESS:

- C [MWh]: Ονομαστική ενεργειακή χωρητικότητα.
- $P_{\text{ch}}^{\text{max}}, P_{\text{dis}}^{\text{max}}$ [MW]: Μέγιστη ισχύς φόρτισης και εκφόρτισης.
- $\eta_{\text{ch}}, \eta_{\text{dis}} \in (0, 1]$: Αποδόσεις φόρτισης και εκφόρτισης.

4.6.2.1.2 Παράμετροι Κατάστασης Φόρτισης:

- $\text{SoC}_{\text{min}}, \text{SoC}_{\text{max}}$ [MWh]: Ελάχιστα και μέγιστα όρια, με $0 \leq \text{SoC}_{\text{min}} \leq \text{SoC}_{\text{max}} \leq C$.
- $\text{SoC}_{\text{fin}}^{\text{min}}, \text{SoC}_{\text{fin}}^{\text{max}}$ [MWh]: Επιθυμητά όρια τελικής κατάστασης ($q = 96$).²

4.6.2.1.3 Παράμετροι Αγοράς: *Αγορά Επόμενης Ημέρας (ανά ώρα $h \in \mathcal{H}$):*

- $p_{\text{DA}}(h)$ [€/MWh]: Οριακή τιμή εκκαθάρισης της DAM για την ώρα h .

Αγορά Ενέργειας Εξισορρόπησης (ανά δεκαπεντάλεπτο $q \in \mathcal{Q}$):

- $\pi_{\text{en}}^{\uparrow}(q), \pi_{\text{en}}^{\downarrow}(q)$ [€/MWh]: Οριακές τιμές ενέργειας εξισορρόπησης mFRR (ανοδική/καθοδική).
- $\text{ReqEn}^{\uparrow}(q), \text{ReqEn}^{\downarrow}(q)$ [MWh]: Ζητούμενες ποσότητες ενέργειας από τον ΑΔΜΗΕ.

Περιορισμοί Δικτύου (ανά ώρα $h \in \mathcal{H}$):

- $\sigma(h) \in [0, 1]$: Στατικός περιορισμός έγχυσης ισχύος στο δίκτυο, εκφρασμένος ως ποσοστό της αδειοδοτημένης ισχύος εκφόρτισης, όπως αυτός ορίζεται από το ρυθμιστικό πλαίσιο και περιγράφονται στον Πίνακα 4.2 [8].

²Στην υλοποίηση του μοντέλου, τα όρια τελικής κατάστασης φόρτισης ορίστηκαν ως $\text{SoC}_{\text{fin}}^{\text{min}} = 0.45 \cdot C$ και $\text{SoC}_{\text{fin}}^{\text{max}} = 0.55 \cdot C$ για διασφάλιση συνέχειας λειτουργίας.

4.6.2.2 Μεταβλητές Απόφασης

4.6.2.2.1 Μεταβλητές DAM (ανά ώρα $h \in \mathcal{H}$):

- $p_{\text{DA}}^{\text{ch}}(h) \geq 0$ [MW]: Ωριαία ισχύς φόρτισης στη DAM.
- $p_{\text{DA}}^{\text{dis}}(h) \geq 0$ [MW]: Ωριαία ισχύς εκφόρτισης στη DAM.
- $y_{\text{DA}}^{\uparrow}(h) \in \{0, 1\}$: Δυαδική μεταβλητή φόρτισης στη DAM.
- $y_{\text{DA}}^{\downarrow}(h) \in \{0, 1\}$: Δυαδική μεταβλητή εκφόρτισης στη DAM.

4.6.2.2.2 Μεταβλητές mFRR Energy (ανά δεκαπεντάλεπτο $q \in \mathcal{Q}$):

- $E^{\uparrow}(q) \geq 0$ [MWh]: Ποσότητα ανοδικής ενέργειας εξισορρόπησης.
- $E^{\downarrow}(q) \geq 0$ [MWh]: Ποσότητα καθοδικής ενέργειας εξισορρόπησης.
- $d^{\uparrow}(q) \in \{0, 1\}$: Δυαδική μεταβλητή επιλογής ανοδικής κατεύθυνσης.
- $d^{\downarrow}(q) \in \{0, 1\}$: Δυαδική μεταβλητή επιλογής καθοδικής κατεύθυνσης.

4.6.2.2.3 Φυσικές Μεταβλητές (ανά δεκαπεντάλεπτο $q \in \mathcal{Q}$):

- $e_{\text{ch}}(q) \geq 0$ [MWh]: Φυσική ενέργεια φόρτισης.
- $e_{\text{dis}}(q) \geq 0$ [MWh]: Φυσική ενέργεια εκφόρτισης.
- $z_{\text{ch}}(q) \in \{0, 1\}$: Δυαδική μεταβλητή αποκλεισμού ταυτόχρονης φόρτισης-εκφόρτισης.
- $\text{SoC}(q) \in \mathbb{R}$ [MWh]: Κατάσταση φόρτισης στο τέλος του δεκαπενταλέπτου q . Ορίζεται για $q = 0, 1, \dots, 96$.

4.6.2.3 Αντικειμενική Συνάρτηση

$$\max Z = \sum_{h \in \mathcal{H}} p_{\text{DA}}(h) \cdot \Delta t_h \cdot (p_{\text{DA}}^{\text{dis}}(h) - p_{\text{DA}}^{\text{ch}}(h)) + \sum_{q \in \mathcal{Q}} \left(\pi_{\text{en}}^{\uparrow}(q) \cdot E^{\uparrow}(q) - \pi_{\text{en}}^{\downarrow}(q) \cdot E^{\downarrow}(q) \right) \quad (4.14)$$

Ο πρώτος όρος αντιπροσωπεύει τα καθαρά κέρδη από τη DAM (έσοδα εκφόρτισης μείον κόστος φόρτισης). Ο δεύτερος όρος αντιπροσωπεύει τα καθαρά κέρδη από την mFRR Energy: τα έσοδα από παροχή ανοδικής εφεδρείας μείον το κόστος παροχής καθοδικής εφεδρείας.

4.6.2.4 Περιορισμοί

4.6.2.4.1 1. Σύζευξη Φυσικών Ροών με Αποφάσεις Αγορών Για κάθε δεκαπεντάλεπτο $q \in \mathcal{Q}$:

$$e_{\text{ch}}(q) = \Delta t_q \cdot p_{\text{DA}}^{\text{ch}}(h(q)) + E^{\downarrow}(q) \quad (4.15)$$

$$e_{\text{dis}}(q) = \Delta t_q \cdot p_{\text{DA}}^{\text{dis}}(h(q)) + E^{\uparrow}(q) \quad (4.16)$$

Οι φυσικές ροές ενέργειας προκύπτουν από το άθροισμα της συνεισφοράς της DAM (μετατρεπόμενης από ισχύ σε ενέργεια για το δεκαπεντάλεπτο) και της συνεισφοράς της mFRR Energy.

4.6.2.4.2 2. Τεχνικά Όρια και Στατικός Περιορισμός Έγχυσης (α) Τεχνικά όρια φόρτισης (ανά δεκαπεντάλεπτο $q \in \mathcal{Q}$).

$$0 \leq e_{\text{ch}}(q) \leq P_{\text{ch}}^{\text{max}} \Delta t_q \quad (4.17)$$

(β) Τεχνικά όρια εκφόρτισης και στατικός περιορισμός έγχυσης (ανά δεκαπεντάλεπτο $q \in \mathcal{Q}$).

$$0 \leq e_{\text{dis}}(q) \leq \sigma(h(q)) P_{\text{dis}}^{\text{max}} \Delta t_q \quad (4.18)$$

Σχόλιο. Ο συντελεστής $\sigma(h) \in [0, 1]$ αποτυπώνει τις ρυθμιστικά οριζόμενες στατικές αποκοπές (*curtailments*) έγχυσης, όπως αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2, και εφαρμόζεται στη συνολική φυσική έγχυση ισχύος του BESS στο δίκτυο διανομής (άθροισμα των συνεισφορών από DAM και mFRR Energy) για διασφάλιση της λειτουργικής ασφάλειας του δικτύου [8].

4.6.2.4.3 3. Αμοιβαίος Αποκλεισμός Φόρτισης-Εκφόρτισης Για κάθε $q \in \mathcal{Q}$:

$$e_{\text{ch}}(q) \leq P_{\text{ch}}^{\text{max}} \cdot \Delta t_q \cdot z_{\text{ch}}(q) \quad (4.19)$$

$$e_{\text{dis}}(q) \leq P_{\text{dis}}^{\text{max}} \cdot \Delta t_q \cdot (1 - z_{\text{ch}}(q)) \quad (4.20)$$

Το σύστημα μπορεί να φορτίζει ή να εκφορτίζει σε κάθε δεκαπεντάλεπτο, αλλά όχι ταυτόχρονα.

4.6.2.4.4 4. Όρια, Ελάχιστη Προσφορά και Αποκλεισμός Κατευθύνσεων mFRR Για κάθε $q \in \mathcal{Q}$:

$$0.25 \cdot d^{\uparrow}(q) \leq E^{\uparrow}(q) \leq P_{\text{dis}}^{\text{max}} \cdot \Delta t_q \cdot d^{\uparrow}(q) \quad (4.21)$$

$$0.25 \cdot d^{\downarrow}(q) \leq E^{\downarrow}(q) \leq P_{\text{ch}}^{\text{max}} \cdot \Delta t_q \cdot d^{\downarrow}(q) \quad (4.22)$$

$$d^{\uparrow}(q) + d^{\downarrow}(q) \leq 1 \quad (4.23)$$

Το σύστημα μπορεί να προσφέρει είτε ανοδική είτε καθοδική εφεδρεία σε κάθε δεκαπεντάλεπτο, με ελάχιστη προσφορά 0.25 MWh (αντιστοιχεί σε 1 MW για 15 λεπτά), όπως περιγράφεται στην υποενότητα 4.3.1 και προκύπτει από τη σχετική διαβούλευση [16].

4.6.2.4.5 5. Ενεργοποίηση και Αποκλεισμός Κατευθύνσεων DAM Για κάθε $h \in \mathcal{H}$:

$$0 \leq p_{\text{DA}}^{\text{ch}}(h) \leq P_{\text{ch}}^{\text{max}} \cdot y_{\text{DA}}^{\uparrow}(h) \quad (4.24)$$

$$0 \leq p_{\text{DA}}^{\text{dis}}(h) \leq P_{\text{dis}}^{\text{max}} \cdot y_{\text{DA}}^{\downarrow}(h) \quad (4.25)$$

$$y_{\text{DA}}^{\uparrow}(h) + y_{\text{DA}}^{\downarrow}(h) \leq 1 \quad (4.26)$$

Το σύστημα μπορεί να φορτίζει ή να εκφορτίζει στη DAM σε κάθε ώρα, αλλά όχι ταυτόχρονα.

4.6.2.4.6 6. Αποκλεισμός Αντίθετων Κατευθύνσεων DAM-mFRR Για κάθε $h \in \mathcal{H}$ και για κάθε $i \in \{0, 1, 2, 3\}$:

$$E^\downarrow(4h + i) \leq P_{\text{ch}}^{\max} \cdot \Delta t_q \cdot (1 - y_{\text{DA}}^\downarrow(h)) \quad (4.27)$$

$$E^\uparrow(4h + i) \leq P_{\text{dis}}^{\max} \cdot \Delta t_q \cdot (1 - y_{\text{DA}}^\uparrow(h)) \quad (4.28)$$

Εάν το BESS εκφορτίζεται στη DAM κατά την ώρα h , δεν μπορεί να προσφέρει καθοδική εφεδρεία στην mFRR κατά τα αντίστοιχα δεκαπεντάλεπτα. Εάν φορτίζεται στη DAM, δεν μπορεί να προσφέρει ανοδική εφεδρεία.

4.6.2.4.7 7. Συμμόρφωση με Ζητούμενες Ποσότητες TSO Για κάθε $q \in \mathcal{Q}$:

$$E^\uparrow(q) \leq \text{ReqEn}^\uparrow(q) \quad (4.29)$$

$$E^\downarrow(q) \leq \text{ReqEn}^\downarrow(q) \quad (4.30)$$

Οι προσφερόμενες ποσότητες ενέργειας εξισορρόπησης δεν μπορούν να υπερβαίνουν τις ποσότητες που έχει ζητήσει ο ΑΔΜΗΕ.

4.6.2.4.8 8. Μη Υπερδέσμευση (Headroom) Για κάθε $q \in \mathcal{Q}$:

$$E^\uparrow(q) \leq \Delta t_q \cdot \left(P_{\text{dis}}^{\max} - p_{\text{DA}}^{\text{dis}}(h(q)) \right) \quad (4.31)$$

$$E^\downarrow(q) \leq \Delta t_q \cdot \left(P_{\text{ch}}^{\max} - p_{\text{DA}}^{\text{ch}}(h(q)) \right) \quad (4.32)$$

Η διαθέσιμη χωρητικότητα για mFRR περιορίζεται από το headroom που απομένει μετά τις δεσμεύσεις στη DAM.

4.6.2.4.9 9. Δυναμική Κατάστασης Φόρτισης Αρχική κατάσταση φόρτισης:

$$\text{SoC}(0) = 0.5 \cdot C \quad (4.33)$$

Για κάθε δεκαπεντάλεπτο $q \in \mathcal{Q}$:

$$\text{SoC}(q) = \text{SoC}(q-1) + \eta_{\text{ch}} \cdot e_{\text{ch}}(q) - \frac{1}{\eta_{\text{dis}}} \cdot e_{\text{dis}}(q) \quad (4.34)$$

Εξασφαλίζει τη συνέχεια του ενεργειακού ισοζυγίου σε δεκαπεντάλεπτη βάση, με την αρχική κατάσταση φόρτισης ορισμένη στο 50% της ονομαστικής χωρητικότητας.

4.6.2.4.10 10. Όρια Κατάστασης Φόρτισης Για κάθε $q \in \{0, 1, \dots, 96\}$:

$$\text{SoC}_{\min} \leq \text{SoC}(q) \leq \text{SoC}_{\max} \quad (4.35)$$

Η κατάσταση φόρτισης παραμένει εντός επιτρεπτών ορίων σε κάθε δεκαπεντάλεπτο.

4.6.2.4.11 11. Τελική Κατάσταση Φόρτισης

$$\text{SoC}_{\text{fin}}^{\min} \leq \text{SoC}(96) \leq \text{SoC}_{\text{fin}}^{\max} \quad (4.36)$$

Στο τέλος της ημέρας, η κατάσταση φόρτισης βρίσκεται εντός συγκεκριμένων ορίων για διασφάλιση συνέχειας λειτουργίας την επόμενη ημέρα.

4.6.2.4.12 12. Όριο Ημερήσιων Κύκλων Φόρτισης και Εκφόρτισης

$$\sum_{q \in \mathcal{Q}} e_{\text{ch}}(q) \leq 1, 2 \cdot C \quad (4.37)$$

$$\sum_{q \in \mathcal{Q}} e_{\text{dis}}(q) \leq 1, 2 \cdot C \quad (4.38)$$

Οι περιορισμοί αυτοί επιβάλλουν ανώτατο όριο στη συνολική ημερήσια ενέργεια φόρτισης και εκφόρτισης, περιορίζοντας τον αριθμό των πλήρων κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης σε περίπου 1.2 ημερησίως για προστασία της διάρκειας ζωής της μπαταρίας.

4.6.2.5 Χαρακτηριστικά Μοντέλου

Το μοντέλο M2 είναι ένα Μικτό Ακέραιο Γραμμικό Πρόβλημα (Mixed-Integer Linear Programming, MILP) με 24 ωριαίες περιόδους για τη DAM και 96 15λεπτες περιόδους για την mFRR Energy.

4.7 Μοντέλο M3 — Συμμετοχή σε DAM, mFRR Energy και mFRR Capacity

Το Μοντέλο M3 επεκτείνει το M2 ενσωματώνοντας τη συμμετοχή στην Αγορά Ισχύος Εξισορρόπησης (mFRR Capacity) μέσω της Διαδικασίας Ενοποιημένου Προγραμματισμού (ΔΕΠ) με μισάωρη χρονική ανάλυση για τη διαχείριση των φυσικών ροών, υλοποιώντας στρατηγική τριπλής ροής οικονομικών μεγεθών (αποζημίωση διαθεσιμότητας capacity, αποζημιώσεις/χρεώσεις από ενεργοποίηση mFRR Energy, και αποζημιώσεις/χρεώσεις από DAM), διατηρώντας την αρχή κατευθυντικής συμβατότητας μεταξύ της θέσης DAM και των προσφορών εξισορρόπησης, με σκοπό τη μεγιστοποίηση του συνολικού ημερήσιου κέρδους από τις τρεις διακριτές αγορές, όπως περιγράφεται στη μαθηματική διατύπωση που ακολουθεί.

4.7.1 Μαθηματικό Μοντέλο

4.7.1.1 Σύνολα και Χρονική Ανάλυση

Το μοντέλο λειτουργεί με διπλή χρονική κλίμακα:

- $\mathcal{H} = \{0, 1, \dots, 23\}$: Σύνολο ωρών (για DAM)
- $\mathcal{T} = \{0, 1, \dots, 47\}$: Σύνολο μισάωρων (για mFRR Capacity)

- $\mathcal{Q} = \{0, 1, \dots, 95\}$: Σύνολο δεκαπενταλέπτων (για mFRR Energy)
- $\Delta t_h = 1$ h: Χρονικό βήμα DAM
- $\Delta t_t = 0.5$ h: Χρονικό βήμα μισάωρων
- $\Delta t_q = 0.25$ h: Χρονικό βήμα δεκαπενταλέπτων

Οι απεικονίσεις μεταξύ διαφορετικών χρονικών κλιμάκων δίνονται από:

$$h(t) = \left\lfloor \frac{t}{2} \right\rfloor, \quad t(q) = \left\lfloor \frac{q}{2} \right\rfloor$$

4.7.1.2 Παράμετροι

4.7.1.2.1 Τεχνικές Παράμετροι BESS:

- C [MWh]: Ονομαστική ενεργειακή χωρητικότητα.
- $P_{\text{ch}}^{\text{max}}, P_{\text{dis}}^{\text{max}}$ [MW]: Μέγιστη ισχύς φόρτισης και εκφόρτισης.
- $\eta_{\text{ch}}, \eta_{\text{dis}} \in (0, 1]$: Αποδόσεις φόρτισης και εκφόρτισης.

4.7.1.2.2 Παράμετροι Κατάστασης Φόρτισης:

- $\text{SoC}_{\text{min}}, \text{SoC}_{\text{max}}$ [MWh]: Ελάχιστα και μέγιστα όρια, με $0 \leq \text{SoC}_{\text{min}} \leq \text{SoC}_{\text{max}} \leq C$.
- $\text{SoC}_{\text{fin}}^{\text{min}}, \text{SoC}_{\text{fin}}^{\text{max}}$ [MWh]: Επιθυμητά όρια τελικής κατάστασης ($t = 48$).³

4.7.1.2.3 Παράμετροι Αγοράς: Αγορά Επόμενης Ημέρας (ανά ώρα $h \in \mathcal{H}$):

- $p_{\text{DA}}(h)$ [€/MWh]: Οριακή τιμή εκκαθάρισης της DAM.

Αγορά Ισχύος Εξισορρόπησης – ΔΕΠ (ανά μισάωρο $t \in \mathcal{T}$):

- $\pi_{\text{cap}}^{\uparrow}(t), \pi_{\text{cap}}^{\downarrow}(t)$ [€/MW]: Τιμές αποζημίωσης capacity (ανοδική/καθοδική).
- $\text{ReqCap}^{\uparrow}(t), \text{ReqCap}^{\downarrow}(t)$ [MW]: Ζητούμενες ποσότητες ισχύος από τον ΑΔΜΗΕ.

Αγορά Ενέργειας Εξισορρόπησης (ανά δεκαπεντάλεπτο $q \in \mathcal{Q}$):

- $\pi_{\text{en}}^{\uparrow}(q), \pi_{\text{en}}^{\downarrow}(q)$ [€/MWh]: Οριακές τιμές ενέργειας εξισορρόπησης mFRR.
- $\text{ReqEn}^{\uparrow}(q), \text{ReqEn}^{\downarrow}(q)$ [MWh]: Ζητούμενες ποσότητες ενέργειας από τον ΑΔΜΗΕ.

³Στην υλοποίηση του μοντέλου, τα όρια τελικής κατάστασης φόρτισης ορίστηκαν ως $\text{SoC}_{\text{fin}}^{\text{min}} = 0.45 \cdot C$ και $\text{SoC}_{\text{fin}}^{\text{max}} = 0.55 \cdot C$ για διασφάλιση συνέχειας λειτουργίας.

Περιορισμοί Δικτύου (ανά ώρα $h \in \mathcal{H}$):

- $\sigma(h) \in [0, 1]$: Στατικός περιορισμός έγχυσης ισχύος στο δίκτυο, εκφρασμένος ως ποσοστό της αδειοδοτημένης ισχύος εκφόρτισης, όπως αυτός ορίζεται από το ρυθμιστικό πλαίσιο και περιγράφονται στον Πίνακα 4.2 [8].

4.7.1.3 Μεταβλητές Απόφασης

4.7.1.3.1 Μεταβλητές DAM (ανά ώρα $h \in \mathcal{H}$):

- $p_{\text{DA}}^{\text{ch}}(h) \geq 0$ [MW]: Ωριαία ισχύς φόρτισης στη DAM.
- $p_{\text{DA}}^{\text{dis}}(h) \geq 0$ [MW]: Ωριαία ισχύς εκφόρτισης στη DAM.
- $y_{\text{DA}}^{\uparrow}(h) \in \{0, 1\}$: Δυναδική μεταβλητή φόρτισης στη DAM.
- $y_{\text{DA}}^{\downarrow}(h) \in \{0, 1\}$: Δυναδική μεταβλητή εκφόρτισης στη DAM.

4.7.1.3.2 Μεταβλητές mFRR Capacity – ΔΕΠ (ανά μισάωρο $t \in \mathcal{T}$):

- $P^{\uparrow}(t) \geq 0$ [MW]: Απονεμημένη ανοδική ισχύς εξισορρόπησης.
- $P^{\downarrow}(t) \geq 0$ [MW]: Απονεμημένη καθοδική ισχύς εξισορρόπησης.

4.7.1.3.3 Μεταβλητές mFRR Energy (ανά δεκαπεντάλεπτο $q \in \mathcal{Q}$):

- $E^{\uparrow}(q) \geq 0$ [MWh]: Ποσότητα ανοδικής ενέργειας εξισορρόπησης.
- $E^{\downarrow}(q) \geq 0$ [MWh]: Ποσότητα καθοδικής ενέργειας εξισορρόπησης.
- $d^{\uparrow}(q) \in \{0, 1\}$: Δυναδική μεταβλητή επιλογής ανοδικής κατεύθυνσης energy.
- $d^{\downarrow}(q) \in \{0, 1\}$: Δυναδική μεταβλητή επιλογής καθοδικής κατεύθυνσης energy.

4.7.1.3.4 Φυσικές Μεταβλητές (ανά μισάωρο $t \in \mathcal{T}$):

- $e_{\text{ch}}(t) \geq 0$ [MWh]: Φυσική ενέργεια φόρτισης.
- $e_{\text{dis}}(t) \geq 0$ [MWh]: Φυσική ενέργεια εκφόρτισης.
- $z_{\text{ch}}(t) \in \{0, 1\}$: Δυναδική μεταβλητή αποκλεισμού ταυτόχρονης φόρτισης-εκφόρτισης.
- $\text{SoC}(t) \in \mathbb{R}$ [MWh]: Κατάσταση φόρτισης στο τέλος του μισάωρου t . Ορίζεται για $t = 0, 1, \dots, 48$.

4.7.1.4 Αντικειμενική Συνάρτηση

$$\begin{aligned}
\max Z = & \sum_{h \in \mathcal{H}} p_{\text{DA}}(h) \cdot \Delta t_h \cdot (p_{\text{DA}}^{\text{dis}}(h) - p_{\text{DA}}^{\text{ch}}(h)) \\
& + \sum_{t \in \mathcal{T}} \left(\pi_{\text{cap}}^{\uparrow}(t) \cdot P^{\uparrow}(t) + \pi_{\text{cap}}^{\downarrow}(t) \cdot P^{\downarrow}(t) \right) \\
& + \sum_{q \in \mathcal{Q}} \left(\pi_{\text{en}}^{\uparrow}(q) \cdot E^{\uparrow}(q) - \pi_{\text{en}}^{\downarrow}(q) \cdot E^{\downarrow}(q) \right)
\end{aligned} \tag{4.39}$$

Ο πρώτος όρος αντιπροσωπεύει τα καθαρά κέρδη από τη DAM. Ο δεύτερος όρος αντιπροσωπεύει τα έσοδα από την αποζημίωση capacity. Ο τρίτος όρος αντιπροσωπεύει τα καθαρά κέρδη από την mFRR Energy.

4.7.1.5 Περιορισμοί

4.7.1.5.1 1. Σύζευξη Φυσικών Ροών με Αποφάσεις Αγορών Για κάθε μισάωρο $t \in \mathcal{T}$:

$$e_{\text{ch}}(t) = \Delta t_t \cdot p_{\text{DA}}^{\text{ch}}(h(t)) + E^{\downarrow}(2t) + E^{\downarrow}(2t + 1) \tag{4.40}$$

$$e_{\text{dis}}(t) = \Delta t_t \cdot p_{\text{DA}}^{\text{dis}}(h(t)) + E^{\uparrow}(2t) + E^{\uparrow}(2t + 1) \tag{4.41}$$

Οι φυσικές ροές ενέργειας σε κάθε μισάωρο προκύπτουν από το άθροισμα της συνεισφοράς της DAM και των δύο δεκαπενταλεπτών ενεργοποιήσεων mFRR Energy.

4.7.1.5.2 2. Αμοιβαίος Αποκλεισμός Φόρτισης-Εκφόρτισης Για κάθε $t \in \mathcal{T}$:

$$e_{\text{ch}}(t) \leq P_{\text{ch}}^{\text{max}} \cdot \Delta t_t \cdot z_{\text{ch}}(t) \tag{4.42}$$

$$e_{\text{dis}}(t) \leq P_{\text{dis}}^{\text{max}} \cdot \Delta t_t \cdot (1 - z_{\text{ch}}(t)) \tag{4.43}$$

Το σύστημα μπορεί να φορτίζει ή να εκφορτίζει σε κάθε μισάωρο, αλλά όχι ταυτόχρονα.

4.7.1.5.3 3. Όρια, Ελάχιστη Προσφορά και Σύνδεση mFRR Energy με Capacity Για κάθε $q \in \mathcal{Q}$:

$$0.25 \cdot d^{\uparrow}(q) \leq E^{\uparrow}(q) \leq P_{\text{dis}}^{\text{max}} \cdot \Delta t_q \cdot d^{\uparrow}(q) \tag{4.44}$$

$$E^{\uparrow}(q) \leq \Delta t_q \cdot P^{\uparrow}(t(q)) \tag{4.45}$$

$$0.25 \cdot d^{\downarrow}(q) \leq E^{\downarrow}(q) \leq P_{\text{ch}}^{\text{max}} \cdot \Delta t_q \cdot d^{\downarrow}(q) \tag{4.46}$$

$$E^{\downarrow}(q) \leq \Delta t_q \cdot P^{\downarrow}(t(q)) \tag{4.47}$$

$$d^{\uparrow}(q) + d^{\downarrow}(q) \leq 1 \tag{4.48}$$

Το σύστημα μπορεί να προσφέρει είτε ανοδική είτε καθοδική ενεργοποίηση σε κάθε δεκαπεντάλεπτο, με ελάχιστη προσφορά 0.25 MWh, όπως περιγράφεται στην υποενότητα 4.3.1. Οι ενεργοποιήσεις περιορίζονται από την απονεμημένη ισχύ capacity του αντίστοιχου μισάωρου [16].

4.7.1.5.4 4. Συμμόρφωση με Ζητούμενες Ποσότητες TSO Για κάθε $t \in \mathcal{T}$:

$$P^\uparrow(t) \leq \text{ReqCap}^\uparrow(t) \quad (4.49)$$

$$P^\downarrow(t) \leq \text{ReqCap}^\downarrow(t) \quad (4.50)$$

Για κάθε $q \in \mathcal{Q}$:

$$E^\uparrow(q) \leq \text{ReqEn}^\uparrow(q) \quad (4.51)$$

$$E^\downarrow(q) \leq \text{ReqEn}^\downarrow(q) \quad (4.52)$$

Οι προσφερόμενες ποσότητες ισχύος και ενέργειας εξισορρόπησης δεν μπορούν να υπερβαίνουν τις ποσότητες που έχει ζητήσει ο ΑΔΜΗΕ.

4.7.1.5.5 5. Όρια mFRR Capacity Για κάθε $t \in \mathcal{T}$:

$$0 \leq P^\uparrow(t) \leq P_{\text{dis}}^{\max} \quad (4.53)$$

$$0 \leq P^\downarrow(t) \leq P_{\text{ch}}^{\max} \quad (4.54)$$

Η απονεμημένη ισχύς εξισορρόπησης περιορίζεται από τη μέγιστη ισχύ του συστήματος.

4.7.1.5.6 6. Μη Υπερδέσμευση DAM-mFRR (Headroom) Για κάθε $t \in \mathcal{T}$:

$$P^\uparrow(t) \leq P_{\text{dis}}^{\max} - p_{\text{DA}}^{\text{dis}}(h(t)) \quad (4.55)$$

$$P^\downarrow(t) \leq P_{\text{ch}}^{\max} - p_{\text{DA}}^{\text{ch}}(h(t)) \quad (4.56)$$

Η διαθέσιμη ισχύς για capacity περιορίζεται από το headroom που απομένει μετά τις δεσμεύσεις στη DAM.

4.7.1.5.7 7. Ενεργοποίηση και Αποκλεισμός Κατευθύνσεων DAM Για κάθε $h \in \mathcal{H}$:

$$0 \leq p_{\text{DA}}^{\text{ch}}(h) \leq P_{\text{ch}}^{\max} \cdot y_{\text{DA}}^\uparrow(h) \quad (4.57)$$

$$0 \leq p_{\text{DA}}^{\text{dis}}(h) \leq P_{\text{dis}}^{\max} \cdot y_{\text{DA}}^\downarrow(h) \quad (4.58)$$

$$y_{\text{DA}}^\uparrow(h) + y_{\text{DA}}^\downarrow(h) \leq 1 \quad (4.59)$$

Το σύστημα μπορεί να φορτίζει ή να εκφορτίζει στη DAM σε κάθε ώρα, αλλά όχι ταυτόχρονα.

4.7.1.5.8 8. Κατευθυντική Συμβατότητα DAM-mFRR Capacity Για κάθε $h \in \mathcal{H}$ και για κάθε $i \in \{0, 1\}$:

$$P^\uparrow(2h + i) \leq P_{\text{dis}}^{\max} \cdot (1 - y_{\text{DA}}^\uparrow(h)) \quad (4.60)$$

$$P^\downarrow(2h + i) \leq P_{\text{ch}}^{\max} \cdot (1 - y_{\text{DA}}^\downarrow(h)) \quad (4.61)$$

Εάν το BESS φορτίζεται στη DAM κατά την ώρα h , μπορεί να προσφέρει μόνο καθοδική capacity στα αντίστοιχα μισάωρα. Εάν εκφορτίζεται, μπορεί να προσφέρει μόνο ανοδική capacity.

4.7.1.5.9 9. Τεχνικά Όρια και Στατικός Περιορισμός Έγχυσης (α) Τεχνικά όρια φόρτισης (ανά μισάωρο $t \in \mathcal{T}$).

$$0 \leq e_{\text{ch}}(t) \leq P_{\text{ch}}^{\max} \Delta t_t \quad (4.62)$$

(β) Τεχνικά όρια εκφόρτισης και στατικός περιορισμός έγχυσης (ανά μισάωρο $t \in \mathcal{T}$).

$$0 \leq e_{\text{dis}}(t) \leq \sigma(h(t)) P_{\text{dis}}^{\max} \Delta t_t \quad (4.63)$$

Σχόλιο. Ο συντελεστής $\sigma(h) \in [0, 1]$ αποτυπώνει τις ρυθμιστικά οριζόμενες στατικές αποκοπές (*curtailments*) έγχυσης, όπως αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2 [8].

4.7.1.5.10 10. Δυναμική Κατάσταση Φόρτισης Αρχική κατάσταση φόρτισης:

$$\text{SoC}(0) = 0.5 \cdot C \quad (4.64)$$

Για κάθε μισάωρο $t \in \mathcal{T}$:

$$\text{SoC}(t) = \text{SoC}(t-1) + \eta_{\text{ch}} \cdot e_{\text{ch}}(t) - \frac{1}{\eta_{\text{dis}}} \cdot e_{\text{dis}}(t) \quad (4.65)$$

Εξασφαλίζει τη συνέχεια του ενεργειακού ισοζυγίου σε μισάωρη βάση, με την αρχική κατάσταση φόρτισης ορισμένη στο 50% της ονομαστικής χωρητικότητας.

4.7.1.5.11 11. Όρια Κατάστασης Φόρτισης Για κάθε $t \in \{0, 1, \dots, 48\}$:

$$\text{SoC}_{\min} \leq \text{SoC}(t) \leq \text{SoC}_{\max} \quad (4.66)$$

Η κατάσταση φόρτισης παραμένει εντός επιτρεπτών ορίων σε κάθε μισάωρο.

4.7.1.5.12 12. Τελική Κατάσταση Φόρτισης

$$\text{SoC}_{\text{fin}}^{\min} \leq \text{SoC}(48) \leq \text{SoC}_{\text{fin}}^{\max} \quad (4.67)$$

Στο τέλος της ημέρας, η κατάσταση φόρτισης βρίσκεται εντός συγκεκριμένων ορίων για διασφάλιση συνέχειας λειτουργίας την επόμενη ημέρα.

4.7.1.5.13 13. Όριο Ημερήσιων Κύκλων Φόρτισης και Εκφόρτισης

$$\sum_{t \in \mathcal{T}} e_{\text{ch}}(t) \leq 1.2 \cdot C \quad (4.68)$$

$$\sum_{t \in \mathcal{T}} e_{\text{dis}}(t) \leq 1.2 \cdot C \quad (4.69)$$

Οι περιορισμοί αυτοί επιβάλλουν ανώτατο όριο στη συνολική ημερήσια ενέργεια φόρτισης και εκφόρτισης, περιορίζοντας τον αριθμό των πλήρων κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης σε περίπου 1.2 ημερησίως για προστασία της διάρκειας ζωής της μπαταρίας.

4.7.1.6 Χαρακτηριστικά Μοντέλου

Το μοντέλο M3 είναι ένα Μικτό Ακέραιο Γραμμικό Πρόβλημα (Mixed-Integer Linear Programming, MILP) με 24 ωριαίες περιόδους για τη DAM, 48 μισάωρες περιόδους για την mFRR Capacity και τις φυσικές ροές, και 96 δεκαπεντάλεπτες περιόδους για την mFRR Energy.

4.8 Μοντέλο M4 — Συμμετοχή στην Προημερήσια Αγορά, Αγορά Ενέργειας και Ισχύος Εξισορρόπησης χωρίς Κατευθυντική Συμβατότητα

4.8.1 Λειτουργία

Το Μοντέλο M4 αποτελεί επέκταση του M3, άρνοντας τον περιορισμό της κατευθυντικής συμβατότητας μεταξύ της θέσης DAM και της προσφοράς capacity, επιτρέποντας στο BESS να εκκαθαρίσει θέση στην Αγορά Επόμενης Ημέρας προς μία κατεύθυνση και ταυτόχρονα να προσφέρει διαθεσιμότητα εφεδρείας προς την αντίθετη κατεύθυνση εντός της ίδιας μισάωρης περιόδου, μοντελοποιώντας έτσι στο σύνολό της την αγορά εξισορρόπησης για τη συμμετοχή του BESS, με τη διαφορά από το M3 να εντοπίζεται στην απουσία του περιορισμού κατευθυντικής συμβατότητας και στην εισαγωγή καθαρών ενεργειακών ροών για τη διαχείριση των αντίθετων κινήσεων μεταξύ DAM και mFRR, όπως περιγράφεται στη μαθηματική διατύπωση που ακολουθεί.

4.8.2 Μαθηματικό Μοντέλο

4.8.2.1 Σύνολα και Χρονική Ανάλυση

Όπως στο Μοντέλο M3:

- $\mathcal{H} = \{0, 1, \dots, 23\}$: Σύνολο ωρών (για DAM)
- $\mathcal{T} = \{0, 1, \dots, 47\}$: Σύνολο μισάωρων (για mFRR Capacity)
- $\mathcal{Q} = \{0, 1, \dots, 95\}$: Σύνολο δεκαπενταλέπτων (για mFRR Energy)
- $\Delta t_h = 1 \text{ h}$, $\Delta t_t = 0.5 \text{ h}$, $\Delta t_q = 0.25 \text{ h}$

Απεικονίσεις μεταξύ χρονικών κλιμάκων: $h(t) = \lfloor t/2 \rfloor$ συσχετίζει κάθε μισάωρο t με την αντίστοιχη ώρα της DAM, ενώ $t(q) = \lfloor q/2 \rfloor$ συσχετίζει κάθε δεκαπεντάλεπτο q με το αντίστοιχο μισάωρο.

4.8.2.2 Παράμετροι

4.8.2.2.1 Τεχνικές Παράμετροι BESS:

- C [MWh]: Ονομαστική ενεργειακή χωρητικότητα.

- $P_{\text{ch}}^{\text{max}}, P_{\text{dis}}^{\text{max}}$ [MW]: Μέγιστη ισχύς φόρτισης και εκφόρτισης.
- $\eta_{\text{ch}}, \eta_{\text{dis}} \in (0, 1]$: Αποδόσεις φόρτισης και εκφόρτισης.

4.8.2.2.2 Παράμετροι Κατάστασης Φόρτισης:

- $\text{SoC}_{\text{min}}, \text{SoC}_{\text{max}}$ [MWh]: Ελάχιστα και μέγιστα όρια, με $0 \leq \text{SoC}_{\text{min}} \leq \text{SoC}_{\text{max}} \leq C$.
- $\text{SoC}_{\text{fin}}^{\text{min}}, \text{SoC}_{\text{fin}}^{\text{max}}$ [MWh]: Επιθυμητά όρια τελικής κατάστασης ($t = 48$).⁴

4.8.2.2.3 Παράμετροι Αγοράς: Αγορά Επόμενης Ημέρας (ανά ώρα $h \in \mathcal{H}$):

- $p_{\text{DA}}(h)$ [€/MWh]: Οριακή τιμή εκκαθάρισης της DAM.

Αγορά Ισχύος Εξισορρόπησης – ΔΕΠ (ανά μισάωρο $t \in \mathcal{T}$):

- $\pi_{\text{cap}}^{\uparrow}(t), \pi_{\text{cap}}^{\downarrow}(t)$ [€/MW]: Τιμές αποζημίωσης capacity (ανοδική/καθοδική).
- $\text{ReqCap}^{\uparrow}(t), \text{ReqCap}^{\downarrow}(t)$ [MW]: Ζητούμενες ποσότητες ισχύος από τον ΑΔΜΗΕ.

Αγορά Ενέργειας Εξισορρόπησης (ανά τέταρτο $q \in \mathcal{Q}$):

- $\pi_{\text{en}}^{\uparrow}(q), \pi_{\text{en}}^{\downarrow}(q)$ [€/MWh]: Οριακές τιμές ενέργειας εξισορρόπησης mFRR.
- $\text{ReqEn}^{\uparrow}(q), \text{ReqEn}^{\downarrow}(q)$ [MWh]: Ζητούμενες ποσότητες ενέργειας από τον ΑΔΜΗΕ.

Περιορισμοί Δικτύου (ανά ώρα $h \in \mathcal{H}$):

- $\sigma(h) \in [0, 1]$: Στατικός περιορισμός έγχυσης ισχύος στο δίκτυο, εκφρασμένος ως ποσοστό της αδειοδοτημένης ισχύος εκφόρτισης, όπως αυτός ορίζεται από το ρυθμιστικό πλαίσιο και περιγράφονται στον Πίνακα 4.2 [8].

4.8.2.3 Μεταβλητές Απόφασης

4.8.2.3.1 Μεταβλητές DAM (ανά ώρα $h \in \mathcal{H}$):

- $p_{\text{DA}}^{\text{ch}}(h) \geq 0$ [MW]: Ωριαία ισχύς φόρτισης στη DAM.
- $p_{\text{DA}}^{\text{dis}}(h) \geq 0$ [MW]: Ωριαία ισχύς εκφόρτισης στη DAM.
- $y_{\text{DA}}^{\uparrow}(h) \in \{0, 1\}$: Δυναδική μεταβλητή φόρτισης στη DAM.
- $y_{\text{DA}}^{\downarrow}(h) \in \{0, 1\}$: Δυναδική μεταβλητή εκφόρτισης στη DAM.

⁴Στην υλοποίηση του μοντέλου, τα όρια τελικής κατάστασης φόρτισης ορίστηκαν ως $\text{SoC}_{\text{fin}}^{\text{min}} = 0.45 \cdot C$ και $\text{SoC}_{\text{fin}}^{\text{max}} = 0.55 \cdot C$ για διασφάλιση συνέχειας λειτουργίας.

4.8.2.3.2 Μεταβλητές mFRR Capacity – ΔΕΠ (ανά μισάωρο $t \in \mathcal{T}$):

- $P^\uparrow(t) \geq 0$ [MW]: Απονεμημένη ανοδική ισχύς εξισορρόπησης.
- $P^\downarrow(t) \geq 0$ [MW]: Απονεμημένη καθοδική ισχύς εξισορρόπησης.

4.8.2.3.3 Μεταβλητές mFRR Energy (ανά τέταρτο $q \in \mathcal{Q}$):

- $E^\uparrow(q) \geq 0$ [MWh]: Ποσότητα ανοδικής ενέργειας εξισορρόπησης.
- $E^\downarrow(q) \geq 0$ [MWh]: Ποσότητα καθοδικής ενέργειας εξισορρόπησης.
- $d^\uparrow(q) \in \{0, 1\}$: Δυαδική μεταβλητή επιλογής ανοδικής κατεύθυνσης energy.
- $d^\downarrow(q) \in \{0, 1\}$: Δυαδική μεταβλητή επιλογής καθοδικής κατεύθυνσης energy.

4.8.2.3.4 Φυσικές Μεταβλητές (ανά μισάωρο $t \in \mathcal{T}$):

- $e_{\text{ch}}(t) \geq 0$ [MWh]: Συνολική συνεισφορά φόρτισης, αποτελούμενη από τη φόρτιση στη DAM ($\Delta t_t \cdot p_{\text{DA}}^{\text{ch}}$) και τις καθοδικές ενεργοποιήσεις mFRR ($E^\downarrow$).
- $e_{\text{dis}}(t) \geq 0$ [MWh]: Συνολική συνεισφορά εκφόρτισης, αποτελούμενη από την εκφόρτιση στη DAM ($\Delta t_t \cdot p_{\text{DA}}^{\text{dis}}$) και τις ανοδικές ενεργοποιήσεις mFRR ($E^\uparrow$).
- $e_{\text{net}}^{\text{ch}}(t) \geq 0$ [MWh]: Καθαρή φυσική φόρτιση προς τη μπαταρία, ίση με τη θετική διαφορά $e_{\text{ch}}(t) - e_{\text{dis}}(t)$ όταν αυτή είναι μεγαλύτερη του μηδενός.
- $e_{\text{net}}^{\text{dis}}(t) \geq 0$ [MWh]: Καθαρή φυσική εκφόρτιση από τη μπαταρία, ίση με τη θετική διαφορά $e_{\text{dis}}(t) - e_{\text{ch}}(t)$ όταν αυτή είναι μεγαλύτερη του μηδενός.
- $z_{\text{net}}(t) \in \{0, 1\}$: Δυαδική μεταβλητή κατεύθυνσης καθαρής φυσικής ροής (1: καθαρή φόρτιση, 0: καθαρή εκφόρτιση).
- $\text{SoC}(t) \in \mathbb{R}$ [MWh]: Κατάσταση φόρτισης στο τέλος του μισάωρου t . Ορίζεται για $t = 0, 1, \dots, 48$.

4.8.2.4 Αντικειμενική Συνάρτηση

Όπως στο Μοντέλο M3:

$$\begin{aligned}
 \max Z = & \sum_{h \in \mathcal{H}} p_{\text{DA}}(h) \cdot \Delta t_h \cdot (p_{\text{DA}}^{\text{dis}}(h) - p_{\text{DA}}^{\text{ch}}(h)) \\
 & + \sum_{t \in \mathcal{T}} \left(\pi_{\text{cap}}^\uparrow(t) \cdot P^\uparrow(t) + \pi_{\text{cap}}^\downarrow(t) \cdot P^\downarrow(t) \right) \\
 & + \sum_{q \in \mathcal{Q}} \left(\pi_{\text{en}}^\uparrow(q) \cdot E^\uparrow(q) - \pi_{\text{en}}^\downarrow(q) \cdot E^\downarrow(q) \right)
 \end{aligned} \tag{4.70}$$

Ο πρώτος όρος αντιπροσωπεύει το καθαρό οικονομικό αποτέλεσμα από τη DAM. Ο δεύτερος όρος αντιπροσωπεύει τα έσοδα από την αποζημίωση capacity. Ο τρίτος όρος αντιπροσωπεύει το καθαρό οικονομικό αποτέλεσμα από την mFRR Energy.

4.8.2.5 Περιορισμοί

4.8.2.5.1 1. Σύζευξη Συνεισφορών Αγορών Για κάθε μισάωρο $t \in \mathcal{T}$:

$$e_{\text{ch}}(t) = \Delta t_t \cdot p_{\text{DA}}^{\text{ch}}(h(t)) + E^\downarrow(2t) + E^\downarrow(2t + 1) \quad (4.71)$$

$$e_{\text{dis}}(t) = \Delta t_t \cdot p_{\text{DA}}^{\text{dis}}(h(t)) + E^\uparrow(2t) + E^\uparrow(2t + 1) \quad (4.72)$$

Οι μεταβλητές $e_{\text{ch}}(t)$ και $e_{\text{dis}}(t)$ συγκεντρώνουν τις ενεργειακές συνεισφορές από όλες τις αγορές για το μισάωρο t :

Συνεισφορά φόρτισης $e_{\text{ch}}(t)$:

- Φόρτιση από DAM: Το μέρος της ωριαίας εκκαθαρισμένης ισχύος $p_{\text{DA}}^{\text{ch}}(h(t))$ που αντιστοιχεί στο μισάωρο t , δηλαδή $\Delta t_t \cdot p_{\text{DA}}^{\text{ch}}(h(t)) = 0.5 \cdot p_{\text{DA}}^{\text{ch}}(h(t))$ MWh.
- Φόρτιση από mFRR: Οι καθοδικές ενεργοποιήσεις $E^\downarrow(2t)$ και $E^\downarrow(2t + 1)$ των δύο τετάρτων που περιλαμβάνονται στο μισάωρο t .

Συνεισφορά εκφόρτισης $e_{\text{dis}}(t)$:

- Εκφόρτιση από DAM: Το μέρος της ωριαίας εκκαθαρισμένης ισχύος $p_{\text{DA}}^{\text{dis}}(h(t))$ που αντιστοιχεί στο μισάωρο t .
- Εκφόρτιση από mFRR: Οι ανοδικές ενεργοποιήσεις $E^\uparrow(2t)$ και $E^\uparrow(2t + 1)$ των δύο τετάρτων.

Κρίσιμη διαφορά από M2 και M3: Στο M4, λόγω της απουσίας κατευθυντικής συμβατότητας, επιτρέπεται το $e_{\text{ch}}(t)$ και το $e_{\text{dis}}(t)$ να είναι ταυτόχρονα θετικά, αντιπροσωπεύοντας αντίθετες ενεργειακές κινήσεις από διαφορετικές αγορές (π.χ. φόρτιση από DAM και εκφόρτιση από mFRR ή αντίστροφα), οι οποίες αλληλοαναιρούνται μερικώς ή πλήρως στη φυσική λειτουργία του συστήματος.

4.8.2.5.2 2. Υπολογισμός Καθαρών Φυσικών Ροών Για κάθε μισάωρο $t \in \mathcal{T}$:

$$e_{\text{net}}^{\text{ch}}(t) - e_{\text{net}}^{\text{dis}}(t) = e_{\text{ch}}(t) - e_{\text{dis}}(t) \quad (4.73)$$

Οι μεταβλητές $e_{\text{net}}^{\text{ch}}(t)$ και $e_{\text{net}}^{\text{dis}}(t)$ αντιπροσωπεύουν την πραγματική καθαρή φυσική ροή που εκτελείται από το σύστημα αποθήκευσης:

- Όταν $e_{\text{ch}}(t) > e_{\text{dis}}(t)$: Το σύστημα φορτίζει καθαρά με $e_{\text{net}}^{\text{ch}}(t) = e_{\text{ch}}(t) - e_{\text{dis}}(t) > 0$ και $e_{\text{net}}^{\text{dis}}(t) = 0$.
- Όταν $e_{\text{ch}}(t) < e_{\text{dis}}(t)$: Το σύστημα εκφορτίζει καθαρά με $e_{\text{net}}^{\text{dis}}(t) = e_{\text{dis}}(t) - e_{\text{ch}}(t) > 0$ και $e_{\text{net}}^{\text{ch}}(t) = 0$.
- Όταν $e_{\text{ch}}(t) = e_{\text{dis}}(t)$: Δεν υπάρχει καθαρή φυσική κίνηση ($e_{\text{net}}^{\text{ch}}(t) = e_{\text{net}}^{\text{dis}}(t) = 0$), παρόλο που το σύστημα λαμβάνει οικονομικές ροές από όλες τις αγορές.

4.8.2.5.3 3. Αμοιβαίος Αποκλεισμός Καθαρών Φυσικών Ροών Για κάθε $t \in \mathcal{T}$:

$$e_{\text{net}}^{\text{ch}}(t) \leq P_{\text{ch}}^{\text{max}} \cdot \Delta t_t \cdot z_{\text{net}}(t) \quad (4.74)$$

$$e_{\text{net}}^{\text{dis}}(t) \leq P_{\text{dis}}^{\text{max}} \cdot \Delta t_t \cdot (1 - z_{\text{net}}(t)) \quad (4.75)$$

Το σύστημα μπορεί να έχει καθαρή φόρτιση ή καθαρή εκφόρτιση σε κάθε μισάωρο, αλλά όχι ταυτόχρονα. Αν $z_{\text{net}}(t) = 1$, επιτρέπεται μόνο καθαρή φόρτιση. Αν $z_{\text{net}}(t) = 0$, επιτρέπεται μόνο καθαρή εκφόρτιση.

4.8.2.5.4 4. Τεχνικά Όρια Συνεισφορών Για κάθε $t \in \mathcal{T}$:

$$0 \leq e_{\text{ch}}(t) \leq P_{\text{ch}}^{\text{max}} \cdot \Delta t_t \quad (4.76)$$

$$0 \leq e_{\text{dis}}(t) \leq P_{\text{dis}}^{\text{max}} \cdot \Delta t_t \quad (4.77)$$

Οι συνεισφορές φόρτισης και εκφόρτισης περιορίζονται από τη μέγιστη ισχύ του συστήματος.

4.8.2.5.5 5. Στατικός Περιορισμός Έγχυσης Για κάθε $t \in \mathcal{T}$:

$$e_{\text{net}}^{\text{dis}}(t) \leq \sigma(h(t)) \cdot P_{\text{dis}}^{\text{max}} \cdot \Delta t_t \quad (4.78)$$

- $\sigma(h) \in [0, 1]$: Στατικός περιορισμός έγχυσης ισχύος στο δίκτυο, εκφρασμένος ως ποσοστό της αδειοδοτημένης ισχύος εκφόρτισης, όπως αυτός ορίζεται από το ρυθμιστικό πλαίσιο και περιγράφονται στον Πίνακα 4.2 [8].

4.8.2.5.6 6. Όρια, Ελάχιστη Προσφορά και Σύνδεση mFRR Energy με Capacity Για κάθε $q \in \mathcal{Q}$:

$$0.25 \cdot d^{\uparrow}(q) \leq E^{\uparrow}(q) \leq P_{\text{dis}}^{\text{max}} \cdot \Delta t_q \cdot d^{\uparrow}(q) \quad (4.79)$$

$$E^{\uparrow}(q) \leq \Delta t_q \cdot P^{\uparrow}(t(q)) \quad (4.80)$$

$$0.25 \cdot d^{\downarrow}(q) \leq E^{\downarrow}(q) \leq P_{\text{ch}}^{\text{max}} \cdot \Delta t_q \cdot d^{\downarrow}(q) \quad (4.81)$$

$$E^{\downarrow}(q) \leq \Delta t_q \cdot P^{\downarrow}(t(q)) \quad (4.82)$$

$$d^{\uparrow}(q) + d^{\downarrow}(q) \leq 1 \quad (4.83)$$

Το σύστημα μπορεί να προσφέρει είτε ανοδική είτε καθοδική ενεργοποίηση σε κάθε δεκαπεντάλεπτο, με ελάχιστη προσφορά 0.25 MWh, όπως περιγράφεται στην υποενότητα 4.3.1. Οι ενεργοποιήσεις περιορίζονται από την απονεμημένη ισχύ capacity του αντίστοιχου μισάωρου [16].

4.8.2.5.7 7. Συμμόρφωση με Ζητούμενες Ποσότητες TSO Για κάθε $t \in \mathcal{T}$:

$$P^{\uparrow}(t) \leq \text{ReqCap}^{\uparrow}(t) \quad (4.84)$$

$$P^{\downarrow}(t) \leq \text{ReqCap}^{\downarrow}(t) \quad (4.85)$$

Για κάθε $q \in \mathcal{Q}$:

$$E^{\uparrow}(q) \leq \text{ReqEn}^{\uparrow}(q) \quad (4.86)$$

$$E^{\downarrow}(q) \leq \text{ReqEn}^{\downarrow}(q) \quad (4.87)$$

Οι προσφερόμενες ποσότητες ισχύος και ενέργειας εξισορρόπησης δεν μπορούν να υπερβαίνουν τις ποσότητες που έχει ζητήσει ο ΑΔΜΗΕ.

4.8.2.5.8 8. Όρια mFRR Capacity Για κάθε $t \in \mathcal{T}$:

$$0 \leq P^\uparrow(t) \leq P_{\text{dis}}^{\text{max}} \quad (4.88)$$

$$0 \leq P^\downarrow(t) \leq P_{\text{ch}}^{\text{max}} \quad (4.89)$$

Η απονεμημένη ισχύς εξισορρόπησης περιορίζεται από τη μέγιστη ισχύ του συστήματος.

4.8.2.5.9 9. Μη Υπερδέσμευση DAM-mFRR (Headroom) Για κάθε $t \in \mathcal{T}$:

$$P^\uparrow(t) \leq P_{\text{dis}}^{\text{max}} - p_{\text{DA}}^{\text{dis}}(h(t)) \quad (4.90)$$

$$P^\downarrow(t) \leq P_{\text{ch}}^{\text{max}} - p_{\text{DA}}^{\text{ch}}(h(t)) \quad (4.91)$$

Η διαθέσιμη ισχύς για capacity περιορίζεται από το headroom που απομένει μετά τις δεσμεύσεις στη DAM.

4.8.2.5.10 10. Ενεργοποίηση και Αποκλεισμός Κατευθύνσεων DAM Για κάθε $h \in \mathcal{H}$:

$$0 \leq p_{\text{DA}}^{\text{ch}}(h) \leq P_{\text{ch}}^{\text{max}} \cdot y_{\text{DA}}^\uparrow(h) \quad (4.92)$$

$$0 \leq p_{\text{DA}}^{\text{dis}}(h) \leq P_{\text{dis}}^{\text{max}} \cdot y_{\text{DA}}^\downarrow(h) \quad (4.93)$$

$$y_{\text{DA}}^\uparrow(h) + y_{\text{DA}}^\downarrow(h) \leq 1 \quad (4.94)$$

Το σύστημα μπορεί να φορτίζει ή να εκφορτίζει στη DAM σε κάθε ώρα, αλλά όχι ταυτόχρονα.

4.8.2.5.11 11. Δυναμική Κατάστασης Φόρτισης Αρχική κατάσταση φόρτισης:

$$\text{SoC}(0) = 0.5 \cdot C \quad (4.95)$$

Για κάθε μισάωρο $t \in \mathcal{T}$:

$$\text{SoC}(t) = \text{SoC}(t-1) + \eta_{\text{ch}} \cdot e_{\text{net}}^{\text{ch}}(t) - \frac{1}{\eta_{\text{dis}}} \cdot e_{\text{net}}^{\text{dis}}(t) \quad (4.96)$$

Η δυναμική του SoC υπολογίζεται από τις καθαρές φυσικές ροές. Μόνο η καθαρή φόρτιση ή η καθαρή εκφόρτιση επηρεάζει την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας, με την αρχική κατάσταση ορισμένη στο 50% της ονομαστικής χωρητικότητας.

4.8.2.5.12 12. Όρια Κατάστασης Φόρτισης Για κάθε $t \in \{0, 1, \dots, 48\}$:

$$\text{SoC}_{\text{min}} \leq \text{SoC}(t) \leq \text{SoC}_{\text{max}} \quad (4.97)$$

Η κατάσταση φόρτισης παραμένει εντός επιτρεπτών ορίων σε κάθε μισάωρο.

4.8.2.5.13 13. Τελική Κατάσταση Φόρτισης

$$\text{SoC}_{\text{fin}}^{\min} \leq \text{SoC}(48) \leq \text{SoC}_{\text{fin}}^{\max} \quad (4.98)$$

Στο τέλος της ημέρας, η κατάσταση φόρτισης βρίσκεται εντός συγκεκριμένων ορίων για διασφάλιση συνέχειας λειτουργίας την επόμενη ημέρα.

4.8.2.5.14 14. Όριο Ημερήσιων Κύκλων Φόρτισης και Εκφόρτισης

$$\sum_{t \in \mathcal{T}} e_{\text{net}}^{\text{ch}}(t) \leq 1,2 \cdot C \quad (4.99)$$

$$\sum_{t \in \mathcal{T}} e_{\text{net}}^{\text{dis}}(t) \leq 1,2 \cdot C \quad (4.100)$$

Οι περιορισμοί αυτοί επιβάλλουν ανώτατο όριο στη συνολική ημερήσια ενέργεια φόρτισης και εκφόρτισης, περιορίζοντας τον αριθμό των πλήρων κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης σε περίπου 1.2 ημερησίως για προστασία της διάρκειας ζωής της μπαταρίας.

4.9 Μεθοδολογία Επίλυσης και Υπολογιστική Υλοποίηση

4.9.1 Δεδομένα Αγορών και Προεπεξεργασία

Τα δεδομένα των ελληνικών αγορών ηλεκτρικής ενέργειας για το έτος 2024 αντλήθηκαν από δύο θεσμικούς φορείς. Από το Ελληνικό Χρηματιστήριο Ενέργειας (HEnEx) συλλέχθηκαν οι ωριαίες οριακές τιμές εκκαθάρισης της Αγοράς Επόμενης Ημέρας σε €/MWh [20]. Από τον ΑΔΜΗΕ συλλέχθηκαν τα δεδομένα της χειροκίνητα ενεργοποιούμενης εφεδρείας (mFRR), συμπεριλαμβανομένων των 15λεπτων τιμών ενέργειας εξισορρόπησης (€/MWh), των μισάωρων σταθμισμένων τιμών ισχύος (€/MW), και των ανακοινωθείσων απαιτήσεων του Διαχειριστή σε ποσοότητες εφεδρείας [21, 22].

Σε επίπεδο έτους τα αποτελέσματα συλλέχθηκαν από την πλατφόρμα DIEM που έχει αναπτυχθεί από την ερευνητική ομάδα SmartRue του ΕΜΠ [23]. Η συγκεκριμένη πλατφόρμα δίνει τη δυνατότητα εύκολης συγκέντρωσης δεδομένων για την Ελλάδα και Ευρωπαϊκές αγορές για ένα επιθυμητό χρονικό διάστημα.

4.9.2 Λύτης Βελτιστοποίησης και Υπολογιστικό Πλαίσιο

Τα μαθηματικά μοντέλα βελτιστοποίησης που διατυπώθηκαν απαιτούν εξειδικευμένους υπολογιστικούς λύτες (solvers) για την εύρεση βέλτιστων λύσεων υπό περιορισμούς. Για την παρούσα εργασία επιλέχθηκε ο λύτης Gurobi Optimizer [24, 25], του οποίου τα χαρακτηριστικά τον καθιστούν κατάλληλο για την αντιμετώπιση τόσο προβλημάτων Γραμμικού Προγραμματισμού (LP) όσο και Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (MILP).

Συγκεκριμένα, ο Gurobi διαθέτει προηγμένους αλγορίθμους branch-and-bound με εξελιγμένες τεχνικές cutting planes και presolve για την επιτάχυνση σύγκλισης σε προβλήματα MILP, κρίσιμο στοιχείο για τα μοντέλα M2–M4 που περιλαμβάνουν δυαδικές μεταβλητές για διακριτές αποφάσεις (ενεργοποίηση κατεύθυνσης, αποκλειστικότητα φόρτισης/εκφόρτισης, επιλογές mFRR).

Η υλοποίηση πραγματοποιήθηκε σε Python, επιλογή που υπαγορεύεται από τον συνδυασμό ωριμότητας των βιβλιοθηκών διαχείρισης δεδομένων (pandas, numpy) και της άμεσης διασύνδεσης με τον Gurobi μέσω του API gurobipy. Η αντικειμενοστρεφής δομή του gurobipy επιτρέπει τη σαφή χαρτογράφηση μεταξύ μαθηματικής διατύπωσης (μεταβλητές, περιορισμοί, αντικειμενική συνάρτηση) και υλοποίησης κώδικα, διευκολύνοντας την παραμετροποίηση και την αναπαραγωγικότητα των πειραμάτων. Η Python παρέχει επίσης ευελιξία στη διαχείριση ετερογενών χρονοσειρών και στην αυτοματοποίηση της ακολουθιακής επίλυσης.

4.9.3 Σχήμα Επίλυσης: Ημερήσιο και Ετήσιο Επίπεδο

Η μεθοδολογία επίλυσης διακρίνεται σε δύο επίπεδα ανάλυσης που αντιστοιχούν στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες.

Ημερήσια Επίλυση. Κάθε ημέρα του 2024 αντιμετωπίζεται ως ανεξάρτητο πρόβλημα βελτιστοποίησης με χρονικό ορίζοντα 24 ωρών. Η ημερήσια επίλυση επιτρέπει τη λεπτομερή ανάλυση της βέλτιστης λειτουργίας υπό συγκεκριμένες συνθήκες αγοράς (τιμές, ζητήσεις TSO, περιορισμοί δικτύου) και την εξαγωγή ωριαίων/μισάωρων/δεκαπεντάλεπτων προφίλ λειτουργίας. Τα ημερήσια αποτελέσματα παρέχουν εικόνα της τυπικής συμπεριφοράς του συστήματος και επιτρέπουν την ανάλυση ακραίων περιπτώσεων (π.χ. ημέρες υψηλής μεταβλητότητας τιμών).

Ετήσια Ανάλυση. Η ετήσια προσομοίωση υλοποιείται μέσω ακολουθιακής επίλυσης 366 διαδοχικών ημερών (2024 δίσεκτο), όπου η τελική κατάσταση φόρτισης (SoC) κάθε ημέρας τίθεται ως αρχική συνθήκη της επόμενης, διασφαλίζοντας ενεργειακή συνέχεια. Η ετήσια ανάλυση επιτρέπει την εξαγωγή συγκεκριμένων μετρικών απόδοσης (συνολικά έσοδα, κατανομή συμμετοχής ανά αγορά), τον εντοπισμό εποχικών τάσεων, και την αξιολόγηση των διαφόρων στρατηγικών συμμετοχής ενός BESS στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας.

4.9.4 Σύννοψη Μεθοδολογίας και Μετάβαση στα Αποτελέσματα

Το παρόν κεφάλαιο παρουσίασε το ολοκληρωμένο μεθοδολογικό πλαίσιο για την ανάλυση της βέλτιστης στρατηγικής συμμετοχής stand-alone BESS στην ελληνική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Η μεθοδολογία βασίζεται σε τέσσερα ιεραρχικά μοντέλα βελτιστοποίησης (M1–M4) με κοινή τεχνική βάση, επιτρέποντας την αποσύνθεση της συνολικής αξίας και την απομόνωση της οριακής συνεισφοράς κάθε νέου χαρακτηριστικού.

Η συστηματική προσέγγιση που ακολουθήθηκε περιλαμβάνει τη συλλογή και προεπεξεργασία πραγματικών δεδομένων αγοράς από επίσημες πηγές (ΑΔΜΗΕ και HEnEx), τη χρονική ευθυγράμμιση και μετατροπή σε UTC, τη διαμόρφωση των μοντέλων βελτιστοποίησης με διαφορετικές στρατηγικές συμμετοχής στις αγορές, και την επίλυσή τους σε ημερήσια και ετήσια βάση.

Το επόμενο κεφάλαιο (Κεφ. 6) παρουσιάζει την πλήρη μαθηματική διατύπωση κάθε μοντέλου και τα υπολογιστικά αποτελέσματα της ανάλυσης για το έτος 2024, επιτρέποντας τη λεπτομερή αξιολόγηση των στρατηγικών συμμετοχής και την εξαγωγή συμπερασμάτων για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των BESS στην ελληνική αγορά.

Κεφάλαιο 5

Αποτελέσματα

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει τα αποτελέσματα της εφαρμογής των τεσσάρων μοντέλων βελτιστοποίησης (M1–M4) για τη συμμετοχή stand-alone διάταξης BESS στην ελληνικές αγορά ηλεκτρικής ενέργειας κατά το έτος 2024. Η ανάλυση οργανώνεται σε δύο επίπεδα: (i) **ημερήσιο**, με λεπτομερή παρουσίαση της λειτουργίας για αντιπροσωπευτική ημέρα (26/08/2024)

Πριν από την ημερήσια ανάλυση παρουσιάζονται τα σήματα αγοράς (DAM, mFRR energy/capacity) και οι ανακοινωθείσες απαιτήσεις του ΑΔΜΗΕ που αποτελούν τις εισόδους των μοντέλων. Ακολουθεί η ανάλυση των ετήσιων αποτελεσμάτων και η μελέτη ευαισθησίας επί βασικών τεχνικών παραμέτρων (κύκλοι/ημέρα, διάρκεια/χωρητικότητα, ισχύς) για την καλύτερη αξιολόγηση των αυτών. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με συγκριτική αξιολόγηση των τεσσάρων μοντέλων, αναδεικνύοντας τη συνεισφορά κάθε αγοράς στα έσοδα και την επίδραση ορισμένων περιορισμών.

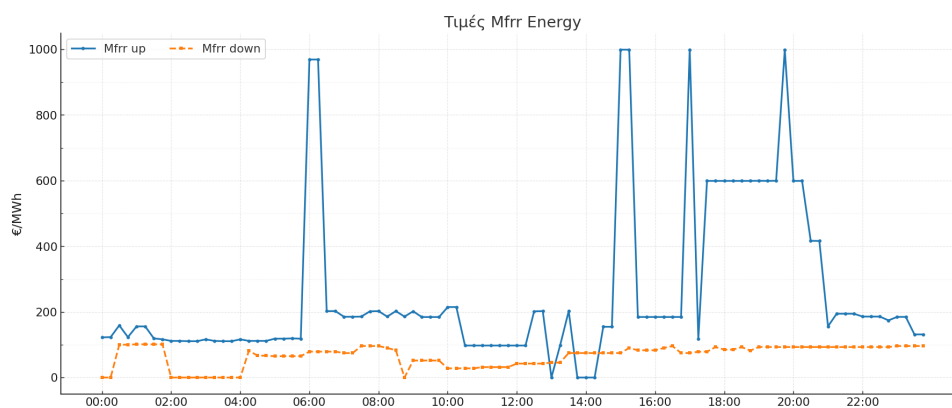
5.1 Ημερήσια Αποτελέσματα (Case: 26 Αυγούστου 2024)

5.1.0.0.1 Τιμές Αγορών και Απαιτήσεις Διαχειριστή Οι τιμές των αγορών που χρησιμοποιούνται ως είσοδοι των μοντέλων βελτιστοποίησης περιλαμβάνουν τις ωριαίες τιμές εκκαθάρισης της Αγοράς Επόμενης Ημέρας, τις 15λεπτες mFRR τιμές ενέργειας εξισορρόπησης (ανοδικής και καθοδικής κατεύθυνσης), τις μισάωρες mFRR σταθμισμένες μέσες τιμές ισχύος εξισορρόπησης, και τις ανακοινωθείσες απαιτήσεις του ΑΔΜΗΕ σε όρους ποσοτήτων εφεδρείας για ισχύ και ενέργεια. Για την αναλυτική παρουσίαση της λειτουργίας των μοντέλων, επιλέχθηκε η 26η Αυγούστου 2024 ως αντιπροσωπευτική ημέρα. Η επιλογή αυτής της ημέρας για την αναλυτική παρουσίαση των μοντέλων βελτιστοποίησης βασίζεται σε συγκεκριμένα κριτήρια που διασφαλίζουν την καταλληλότητά της ως case study.

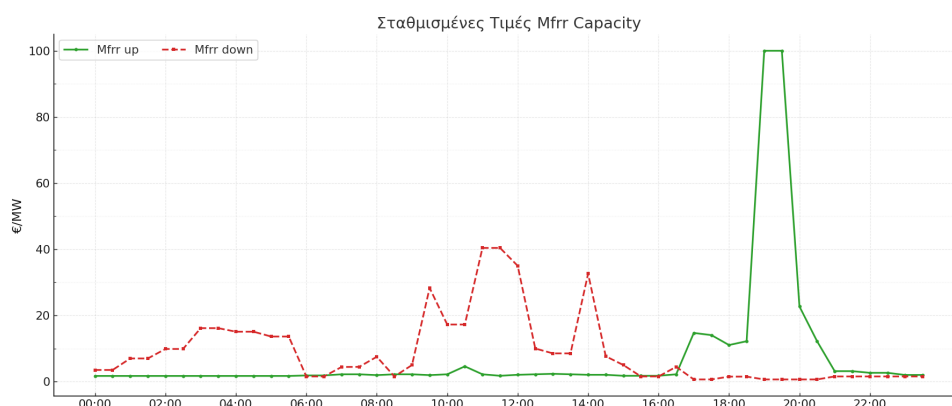
Η ημέρα παρουσιάζει τυπικό καλοκαιρινό προφίλ τιμών DAM με μεσημβρινή κοιλάδα, Σχήμα 5.1. Στην αγορά εξισορρόπησης, mFRR εμφανίζει σαφείς διακυμάνσεις: ορισμένες πολύ υψηλές τιμές ανοδικής εφεδρείας και κατά κύριο λόγο σταθερά χαμηλές τιμές καθοδικής εφεδρείας 5.2 . Επιπλέον, οι σταθμισμένες τιμές ισχύος εξισορρόπησης παρουσιάζουν ουσιώδη διαφοροποίηση up/down, επιτρέποντας την αξιολόγηση στρατηγικών 5.3 . Οι ανακοινωθείσες απαιτήσεις 5.4 και 5.5 του ΑΔΜΗΕ είναι αυξημένες, ιδίως για καθοδική εφεδρεία ισχύος από τις 5 το πρωί και μετά, ενώ η ανοδική πέφτει κατά τις μεσημβρινές ώρες.



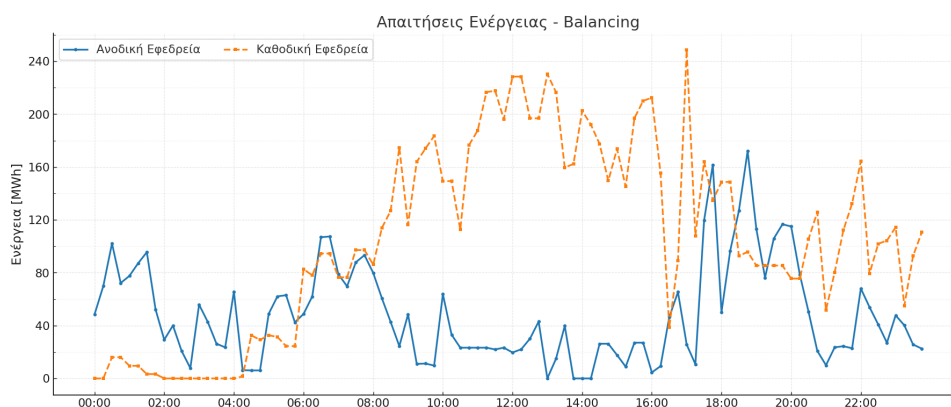
Σχήμα 5.1: Τιμές Προμερήσιας Αγοράς (DAM), 26 Αυγούστου 2024.



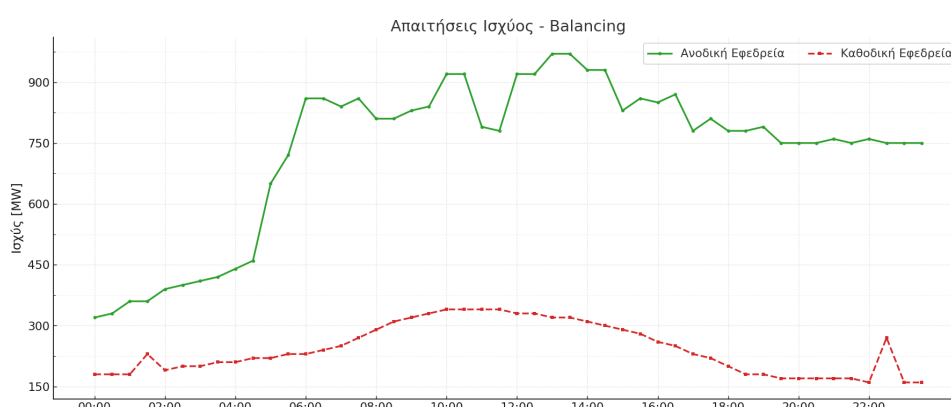
Σχήμα 5.2: Τιμές ενέργειας εξισορρόπησης mFRR, 26 Αυγούστου 2024.



Σχήμα 5.3: Τιμές ισχύος εξισορρόπησης mFRR, 26 Αυγούστου 2024.



Σχήμα 5.4: Απαιτήσεις ενέργειας εξισορρόπησης, 26 Αυγούστου 2024.



Σχήμα 5.5: Απαιτήσεις ισχύος εξισορρόπησης, 26 Αυγούστου 2024.

5.1.1 Ημερήσια — Μοντέλο M1 — Συμμετοχή στην Αγορά Επόμενης Ημέρας (DAM)

Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης συμμετοχής ενός BESS 40 MW, με χωρητικότητα 160 MWh, που εκτελεί έως 1.2 κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης τη μέρα για την 26η Αυγούστου 2024 συνοψίζονται στον Πίνακα 5.1. Το μοντέλο επιτυγχάνει καθαρό κέρδος 22,582.15 €.

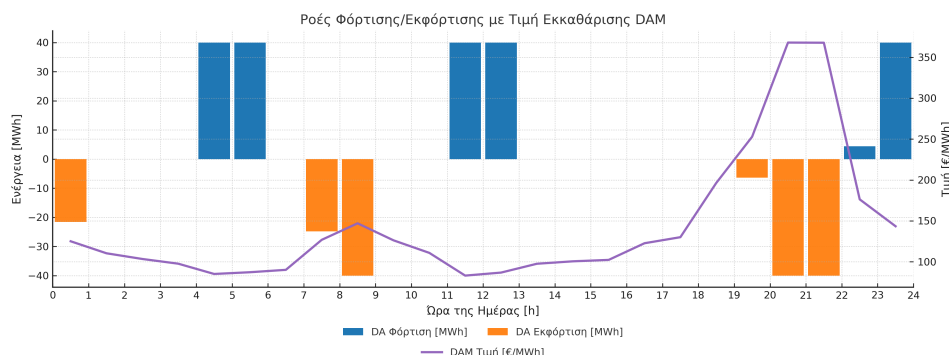
Πίνακας 5.1: Συνολικά Οικονομικά και Ενεργειακά Αποτελέσματα — Μοντέλο M1

Περιγραφή	Τιμή	(μονάδες)
Συνολική Εκφόρτιση	192.00	MWh
Συνολική Φόρτιση	184.00	MWh
Κύκλοι φόρτισης/εκφόρτισης	1.175	—
Αποζημίωση Μπαταρίας	42,773.49	€
Χρέωση Απορρόφησης Ενέργειας	20,191.33	€
Καθαρό Κέρδος	22,582.15	€

Η συνολική ενέργεια εκφόρτισης ανέρχεται σε 192.00 MWh και η φόρτιση σε 184.00 MWh. Δεδομένης της χωρητικότητας (160 MWh) και του ημερήσιου ορίου 1.2 κύκλων, η μέγιστη επιτρεπόμενη ενέργεια

είναι 192 MWh. Ο βαθμός απόδοσης 90% επηρεάζει τη δυναμική του SoC μέσω των περιορισμών ενεργειακού ισοζυγίου. Το σύστημα αξιοποιεί σχεδόν πλήρως τη διαθέσιμη δυνατότητα, πραγματοποιώντας 1.175 κύκλους για τη συγκεκριμένη μέρα.

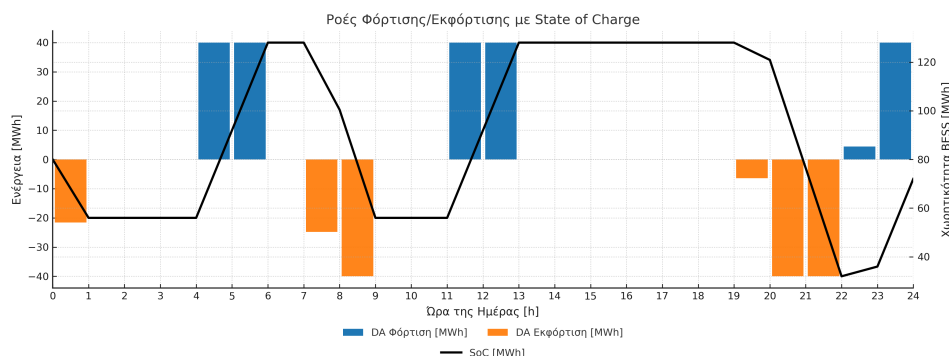
Το Σχήμα 5.6 απεικονίζει τη χρονική κατανομή φόρτισης και εκφόρτισης σε ωριαία βάση.



Σχήμα 5.6: Ροές Φόρτισης/Εκφόρτιση και τιμές DAM

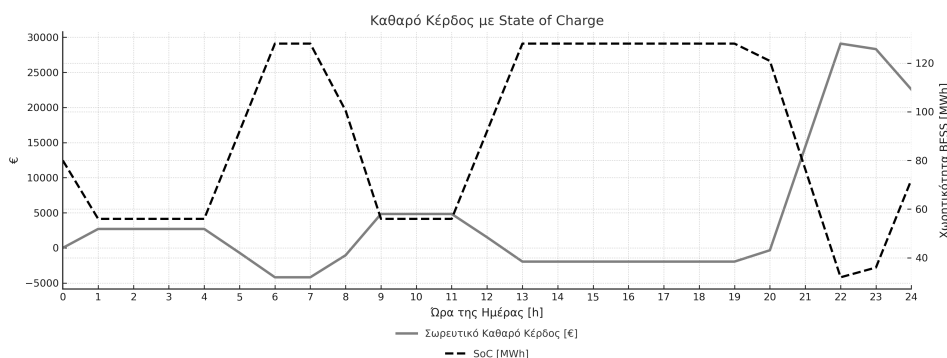
Στο Σχήμα 5.6 παρουσιάζονται οι χρονικές στιγμές κατά τις οποίες το σύστημα αποθήκευσης αποφασίζει να φορτίσει ή να εκφορτίσει για τη συγκεκριμένη ημέρα, σε συνδυασμό με τις ωριαίες τιμές της Αγοράς Επόμενης Ημέρας (DAM). Από το διάγραμμα είναι εμφανές ότι η εκφόρτιση της μπαταρίας πραγματοποιείται κατά τις ώρες με τις υψηλότερες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας, ειδικότερα μεταξύ 8:00-10:00 το βράδυ. Παρατηρείται επίσης μία ακόμη εκφόρτιση στις πρωινές ώρες 7:00-9:00, όπου οι τιμές είναι σχετικά υψηλές σε σύγκριση με τις γειτονικές χρονικές περιόδους. Αντίστοιχα, η φόρτιση της μπαταρίας λαμβάνει χώρα κατά τις περιόδους με τις χαμηλότερες τιμές ενέργειας, συγκεκριμένα στις 4:00-6:00 το πρωί και στις 11:00-13:00. Παρατηρείται επιπλέον μία φόρτιση στις 23:00-00:00, η οποία συνδέεται με τον περιορισμό του τελικού SoC που πρέπει να διατηρηθεί μεταξύ 45-55%.

Συνοψίζοντας, στο μοντέλο M1 επιλέγει να λειτουργεί (φόρτιση/εκφόρτιση) κατά τις χρονικές στιγμές με τις πιο συμφέρουσες τιμές ενέργειας, μεγιστοποιώντας έτσι το οικονομικό όφελος της λειτουργίας του συστήματος αποθήκευσης. (Να σημειωθεί ότι ο βαθμός απόδοσης 90% επηρεάζει τη δυναμική του SoC μέσω των περιορισμών ενεργειακού ισοζυγίου, ενώ οι οικονομικές συναλλαγές πραγματοποιούνται στις ονομαστικές στην πλευρά του δικτύου)



Σχήμα 5.7: Ροές φόρτισης/εκφόρτισης με SoC

Στο Σχήμα 5.7 παρουσιάζονται οι ροές φόρτισης/εκφόρτισης της μπαταρίας και η αντίστοιχη εξέλιξη του επιπέδου φόρτισης (SoC). Όπως φαίνεται καθαρά από το σχήμα, το επίπεδο φόρτισης (SoC) της μπαταρίας παραμένει εντός των επιτρεπτών ορίων (20%-80% της ονομαστικής χωρητικότητας), τηρώντας τις τεχνικές προδιαγραφές ασφαλούς λειτουργίας. Επιπλέον, το σύστημα υπακούει στους στατικούς περιορισμούς ισχύος έγχυσης που επιβάλλονται από το ρυθμιστικό πλαίσιο, ειδικά κατά τις μεσημβρινές ώρες. Η μπαταρία διατηρεί υψηλό SoC κατά τη διάρκεια του μεσημεριού (13:00-20:00), αναμένοντας την περίοδο βραδινής αιχμής για να εκφορτίσει όταν οι τιμές της ενέργειας είναι μεγιστοποιημένες. Η συσχέτιση μεταξύ των χρονικών στιγμών εκφόρτισης και των υψηλών τιμών DAM είναι εμφανής, επιβεβαιώνοντας την αποτελεσματικότητα της στρατηγικής arbitrage.



Σχήμα 5.8: Εξέλιξη SoC και αθροιστικού καθαρού κέρδους

Στο Σχήμα 5.8 παρουσιάζεται η εξέλιξη του σωρευτικού καθαρού κέρδους σε συνδυασμό με το επίπεδο φόρτισης (SoC) της μπαταρίας. Από το διάγραμμα προκύπτει ότι η βραδινή εκφόρτιση (20:00-22:00) αποτελεί τη σημαντικότερη πηγή εσόδων για το σύστημα. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, το σωρευτικό καθαρό κέρδος αυξάνεται απότομα από περίπου 5.000€ σε 30.000€, προσθέτοντας περίπου 25.000€ στο συνολικό ημερήσιο κέρδος. Αυτό αντιστοιχεί στο 80-85% των συνολικών εσόδων της ημέρας και επιβεβαιώνει ότι η εκμετάλλευση της βραδινής αιχμής, όπου οι τιμές DAM είναι μεγιστοποιημένες, αποτελεί τον κρίσιμο παράγοντα οικονομικής απόδοσης. Η πρωινή εκφόρτιση (6:00-9:00) συνεισφέρει επίσης στο κέρδος, αλλά σε σημαντικά μικρότερο βαθμό (περίπου 10.000€). Η στρατηγική διατήρησης υψηλού SoC κατά τη μεσημβρινή περίοδο (12:00-20:00), όπου δεν παρατηρείται καμία μεταβολή στο κέρδος, επιτρέπει τη μεγιστοποίηση της εκφόρτισης κατά την πιο κερδοφόρα χρονική περίοδο του βράδυ.

5.1.2 Ημερήσια — Μοντέλο M2 — Συμμετοχή σε DAM και Αγορά Ενέργειας Εξισορρόπησης-

Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης για την 26η Αυγούστου 2024 παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.2 και 5.3. Το Μοντέλο M2 επιτυγχάνει καθαρό κέρδος 103,585.00 €, σημειώνοντας αύξηση 359% σε σχέση με το Μοντέλο M1 (22,582.15 €), αποδεικνύοντας τη σημαντική προστιθέμενη αξία της συμμετοχής στην αγορά ενέργειας εξισορρόπησης.

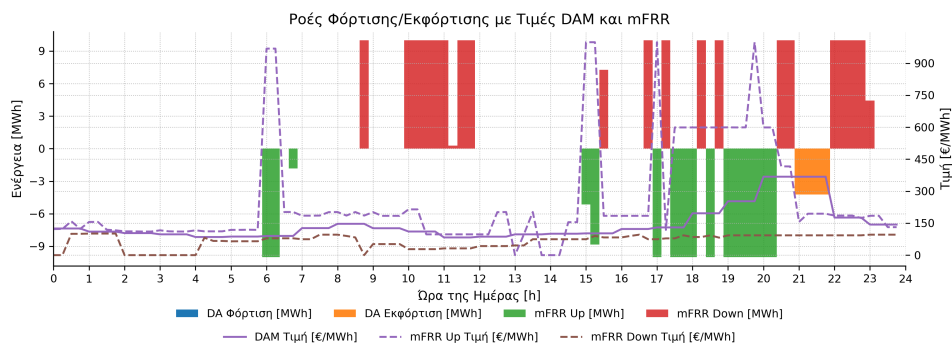
Πίνακας 5.2: Οικονομικά Αποτελέσματα ανά Κατηγορία Συναλλαγής — Μοντέλο M2, 26 Αυγούστου 2024

Κατηγορία	Αποζημίωση Μπαταρίας (€)	Χρέωση Απορρόφησης Ενέργειας (€)
Φόρτιση DA	0.00	0.00
Εκφόρτιση DA	6,216.33	0.00
Ανοδική Εφεδρεία mFRR (Ενέργεια)	109,681.70	0.00
Καθοδική Εφεδρεία mFRR (Ενέργεια)	0.00	12,313.11
Σύνολο	115,898.10	12,313.11
Καθαρό Κέρδος	103,585.00 €	

Πίνακας 5.3: Τεχνικά Αποτελέσματα Ενεργειακών Συναλλαγών — Μοντέλο M2, 26 Αυγούστου 2024

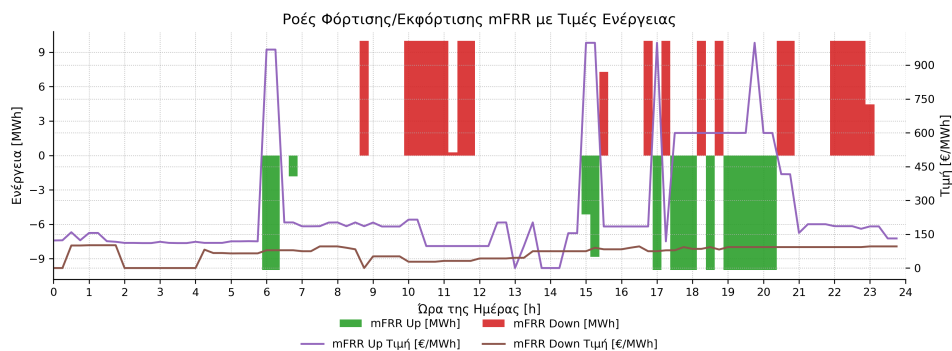
Κατηγορία	Ενέργεια (MWh)	Ποσοστό (%)
Φόρτιση DA	0.00	0.0
Εκφόρτιση DA	16.90	9.78
Ανοδική Εφεδρεία mFRR	155.90	90.21
Καθοδική Εφεδρεία mFRR	204.44	100.0
Συνολική Φόρτιση	184.00	—
Συνολική Εκφόρτιση	192.00	—
Κύκλοι	1.175	—

Από τους πίνακες προκύπτει ότι το σύστημα προτιμά σχεδόν αποκλειστικά τη συμμετοχή στην αγορά ενέργειας εξισορρόπησης έναντι της DAM. Συγκεκριμένα, η φόρτιση πραγματοποιείται εξ ολοκλήρου μέσω καθοδικής εφεδρείας mFRR (204.44 MWh, 100% της συνολικής φόρτισης) με κόστος 12,313.11 €, ενώ η εκφόρτιση γίνεται κατά 90.21% μέσω ανοδικής εφεδρείας mFRR (155.90 MWh) με έσοδα 109,681.70 € και μόλις κατά 8.8% μέσω DAM (16.90 MWh) με έσοδα 6,216.33 €. Η συνολική ενέργεια φόρτισης (battery-side) ανέρχεται σε 184.00 MWh και εκφόρτισης σε 192.00 MWh, τηρώντας τον περιορισμό 1.2 κύκλων. Η κατανομή αυτή αντικατοπτρίζει τα σημαντικά υψηλότερα spreads που εμφανίζονται στην αγορά εξισορρόπησης (mffr up energy), με τις τιμές ανοδικής εφεδρείας να υπερβαίνουν κατά πολύ τις τιμές DAM κατά τις ώρες αιχμής και τις τιμές καθοδικής εφεδρείας να είναι εξαιρετικά χαμηλές και στην ουσία πιο συμφέρουσες.



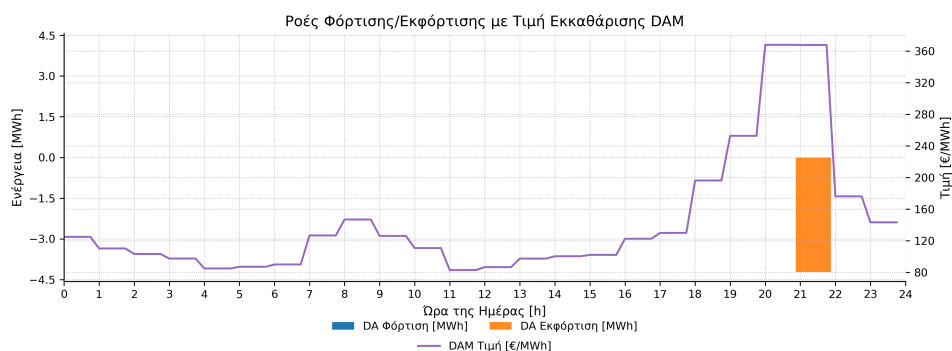
Σχήμα 5.9: Ροές Φόρτισης/Εκφόρτισης με Τιμές DAM και mFRR — Μοντέλο M2

Στο Σχήμα 5.9 παρατηρείται ότι το σύστημα αποθήκευσης επιλέγει σχεδόν αποκλειστικά τη συμμετοχή στην αγορά εξισορρόπησης λόγω των εξαιρετικά ευνοϊκών τιμών mFRR. Η φόρτιση (κόκκινες ράβδοι) γίνεται αποκλειστικά μέσω καθοδικής εφεδρείας κατά τις πρωινές και βραδινές κυρίως ώρες και λιγότερο τις μεσημβρινές. Αντίστοιχα, η εκφόρτιση (πράσινες και πορτοκαλί ράβδοι) γίνεται κυρίως μέσω ανοδικής εφεδρείας κατά τις μεσημβρινές και απογευματινές ώρες (06:00-09:00) και βραδινές ώρες αιχμής (17:00-22:00), όπου οι τιμές mFRR Up ανέρχονται έως και στα 800-900 €/MWh. Η ελάχιστη χρήση της DAM (μπλε και πορτοκαλί ράβδοι στις 21:00-22:00) επιβεβαιώνει ότι οι η αγορά ενέργειας εξισορρόπησης έχει προτιμώτερες τιμές για ένα BESS.



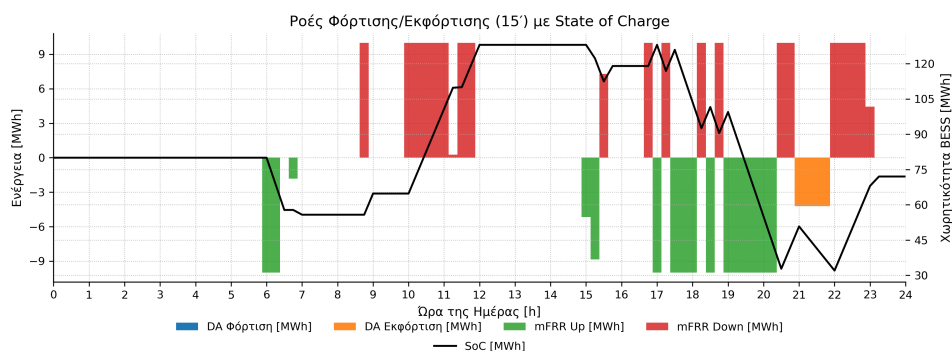
Σχήμα 5.10: Ροές Φόρτισης/Εκφόρτισης mFRR με Τιμές Ενέργειας — Μοντέλο M2

Στο Σχήμα 5.10 απομονώνονται οι συναλλαγές στην αγορά εξισορρόπησης. Φαίνεται ότι το BESS, έχει εκμεταλλευθεί κάθε υψηλή τιμή που παρουσιάστηκε στην αγορά. Οι τιμές ανοδικής εφεδρείας κατά την εκφόρτιση φτάνουν τα 800-900 €/MWh, ενώ οι τιμές καθοδικής εφεδρείας κατά τη φόρτιση είναι εξαιρετικά χαμηλές (0-100 €/MWh). Η μέγιστη διαφορά τιμών (spread) μεταξύ ανοδικής και καθοδικής εφεδρείας ξεπερνά τα 800 €/MWh, δικαιολογώντας πλήρως την επιλογή του συστήματος να συναλλάσσεται σχεδόν αποκλειστικά στην αγορά αυτή.



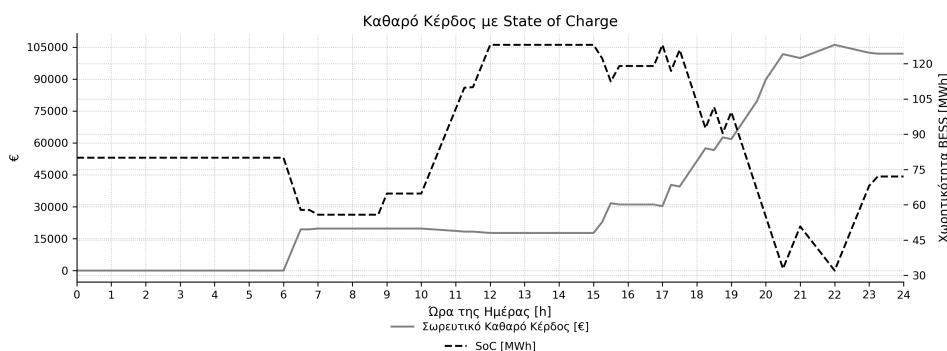
Σχήμα 5.11: Ροές Φόρτισης/Εκφόρτισης με Τιμή Εκκαθάρισης DAM — Μοντέλο M2

Στο Σχήμα 5.11 φαίνεται ότι η περιορισμένη χρήση της DAM συμβαίνει αποκλειστικά κατά τις ώρες με τη μέγιστη τιμή εκκαθάρισης. Η εκφόρτιση των 16.90 MWh μέσω DAM πραγματοποιείται στις 21:00-22:00, όπου η τιμή φτάνει περίπου τα 360 €/MWh, που αποτελεί τη μέγιστη τιμή DAM της ημέρας. Δεν παρατηρείται φόρτιση μέσω DAM, καθώς το σύστημα προτιμά την οικονομικότερη καθοδική εφεδρεία mFRR.



Σχήμα 5.12: Ροές Φόρτισης/Εκφόρτισης με State of Charge — Μοντέλο M2

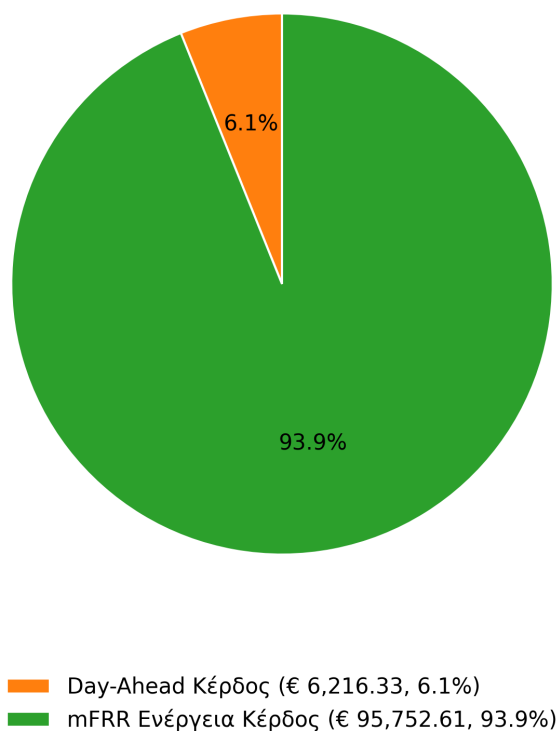
Στο Σχήμα 5.12 το SoC ξεκινά από 80 MWh (50%), αυξάνεται φτάνοντας τα 128 MWh (80%) κατά τη μεσημβρινή φόρτιση (10:00-12:00), μειώνεται στα 32 MWh (20%) κατά την βραδινή εκφόρτιση (19:00-20:00), και επιστρέφει στα 72 MWh (45%) στο τέλος της ημέρας, παραμένοντας εντός των επιτρεπτών ορίων 20-80%. Οι μεταβολές τηρούν όλους τους τεχνικούς και λειτουργικούς περιορισμούς.



Σχήμα 5.13: Καθαρό Κέρδος (σωρευτικό) με State of Charge — Μοντέλο M2

Στο Σχήμα 5.13 η εξέλιξη του σωρευτικού κέρδους αποκαλύπτει ότι η βραδινή εκφόρτιση (17:00-22:00) συνεισφέρει περίπου 70,000 €, αντιστοιχώντας στο 68% του συνολικού κέρδους των 103,585 €, λόγω των υψηλών τιμών. Η πρωινή εκφόρτιση (06:00-09:00) προσθέτει περίπου 50,000 €, ενώ το κόστος φόρτισης κατά τις μεσημβρινές ώρες μειώνει προσωρινά το σωρευτικό κέρδος.

Κατανομή Καθαρών Κερδών ανά Αγορά



Σχήμα 5.14: Κατανομή Καθαρών Κερδών ανά Αγορά — Μοντέλο M2

Στο Σχήμα 5.14 η κατανομή καθαρών κερδών επιβεβαιώνει ότι όταν το σύστημα αποθήκευσης έχει τη δυνατότητα επιλογής μεταξύ αγορών, η συμμετοχή στην αγορά ενέργειας εξισορρόπησης (balancing energy market) αποδεικνύεται σαφώς πιο συμφέρουσα. Η αγορά mFRR συνεισφέρει το 93.9% των καθαρών κερδών (97,368.56 €), ενώ η DAM μόλις το 6.1% (6,216.33 €). Το αποτέλεσμα αυτό αποδεικνύει την

εξαιρετική προστιθέμενη αξία της συμμετοχής στην αγορά εξισορρόπησης και τη θεμελιώδη μεταβολή στρατηγικής σε σχέση με το Μοντέλο M1.

5.1.3 Ημερήσια — Μοντέλο M3 — Συμμετοχή σε Προημερήσια, Αγορά Ενέργειας και Ισχύος Εξισορρόπησης με προσφορές ίδιας κατεύθυνσης

Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης για την 26η Αυγούστου 2024 παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.4 και 5.5. Το Μοντέλο M3 επιτυγχάνει καθαρό κέρδος 109,479.30 €, σημειώνοντας αύξηση 5.7% σε σχέση με το Μοντέλο M2 (103,585.00 €) και 385% σε σχέση με το Μοντέλο M1 (22,582.15 €). Η κρίσιμη διαφοροποίηση του M3 έγκειται στην εισαγωγή της αγοράς ισχύος εξισορρόπησης, επιτρέποντας τη στρατηγική στοίβαξης εσόδων μέσω του συνδυασμού αποζημιώσεων ενέργειας και ισχύος (capacity).

Πίνακας 5.4: Οικονομικά Αποτελέσματα ανά Κατηγορία Συναλλαγής — Μοντέλο M3, 26 Αυγούστου 2024

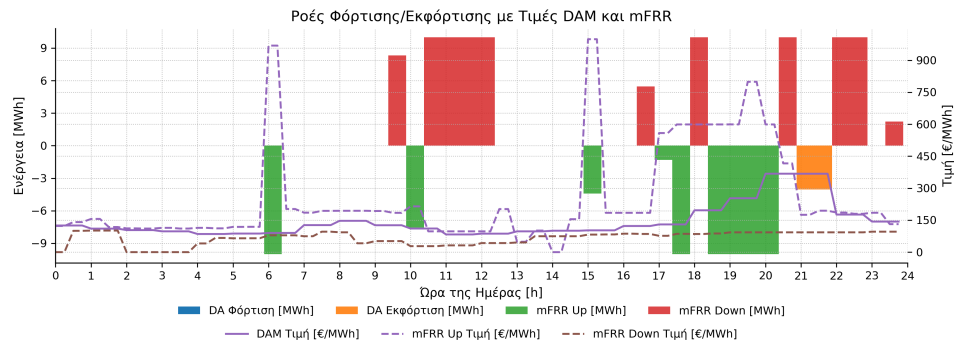
Κατηγορία	Αποζημίωση Μπαταρίας (€)	Χρέωση Απορρόφησης Ενέργειας (€)
Φόρτιση DA	0.00	0.00
Εκφόρτιση DA	5,958.85	0.00
Ανοδική Εφεδρεία mFRR (Ενέργεια)	98,926.84	0.00
Καθοδική Εφεδρεία mFRR (Ενέργεια)	0.00	13,024.21
Ανοδική Ισχύς mFRR (Capacity)	10,250.08	0.00
Καθοδική Ισχύς mFRR (Capacity)	7,367.77	0.00
Σύνολο	122,503.50	13,024.21
Καθαρό Κέρδος	109,479.30 €	

Πίνακας 5.5: Τεχνικά Αποτελέσματα Ενεργειακών Συναλλαγών και Ισχύος — Μοντέλο M3, 26 Αυγούστου 2024

Κατηγορία	Ποσότητα
Φόρτιση DA (MWh)	0.00
Εκφόρτιση DA (MWh)	16.20
Ανοδική Εφεδρεία mFRR (MWh)	156.60
Καθοδική Εφεδρεία mFRR (MWh)	204.44
Συνολική Φόρτιση	184.00 MWh
Συνολική Εκφόρτιση	192.00 MWh
Κύκλοι φόρτισης/εκφόρτισης	1.175

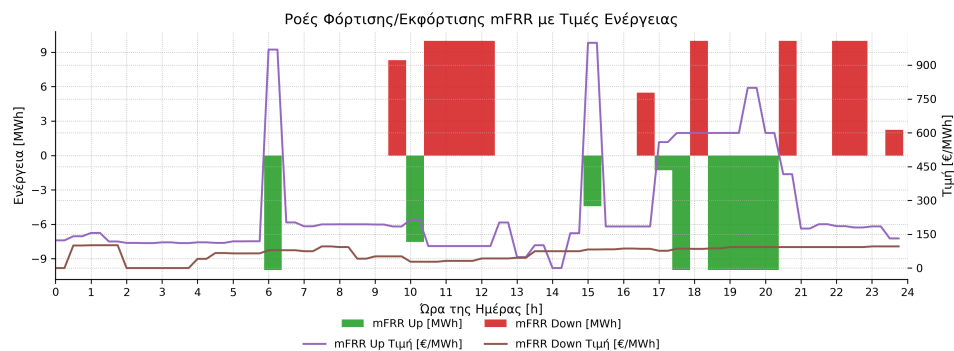
Από τους πίνακες προκύπτει ότι το σύστημα αποθήκευσης όταν συμμετέχει και στην αγορά εξισορρόπησης ισχύος (Mfrr capacity) πλέον διατηρεί την προτίμησή του στην αγορά εξισορρόπησης, με τη φόρτιση να πραγματοποιείται εξ ολοκλήρου μέσω καθοδικής εφεδρείας mFRR (204.44 MWh, 100% της φόρτισης) με κόστος 13,024.21 € και την εκφόρτιση να γίνεται κατά κύριο λόγο μέσω ανοδικής εφεδρείας mFRR (156.60 MWh) με έσοδα 98,926.84 € και λιγότερο μέσω DAM (16.20 MWh) με έσοδα 5,958.85 €. Η θεμελιώδης διαφορά του M3 είναι η συμμετοχή της απθηκευτικής διάταξης στην αγορά ισχύος εξισορρόπησης, η οποία προσθέτει 17,617.85 € επιπλέον έσοδα (10,250.08 € από ανοδική ισχύ και 7,367.77 €

από καθοδική ισχύ). Αυτή η πρόσθετη ροή εσόδων από την capacity αυξάνει το καθαρό κέρδος κατά 5.7% σε σχέση με το M2, χωρίς να επηρεάζει τους ενεργειακούς κύκλους του συστήματος (1.175 κύκλοι). Η συνολική ενέργεια φόρτισης ανέρχεται σε 184.00 MWh και εκφόρτισης σε 192.00 MWh, παραμένοντας εντός του ορίου 1.2 κύκλων.



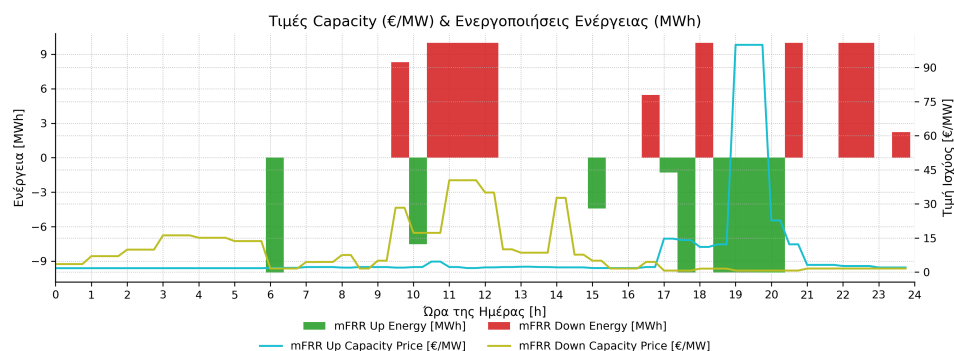
Σχήμα 5.15: Ροές Φόρτισης/Εκφόρτισης με Τιμές DAM και mFRR — Μοντέλο M3

Στο Σχήμα 5.15 φαίνεται ότι το σύστημα επιλέγει σχεδόν αποκλειστικά τις συναλλαγές mFRR, φορτίζοντας μέσω καθοδικής εφεδρείας καθόλη τη διάρκεια τη μέρας και κυρίως τις ώρες (10:00-13:00) και εκφορτίζει παρέχοντας ανοδική εφεδρεία τις ώρες όπου οι τιμές mFRR Up φτάνουν μέχρι και τα 900 €/MWh. Η DAM έχει αντίστοιχα και με το προηγούμενο μοντέλο ελάχιστη συμμετοχή (16.20 MWh στις 21:00-22:00).



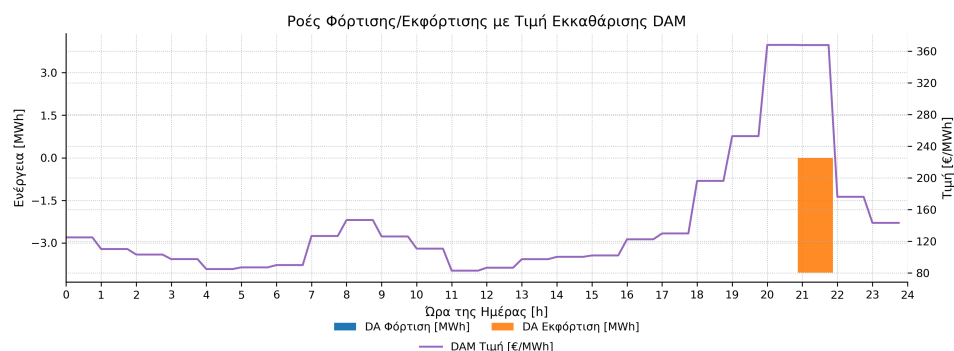
Σχήμα 5.16: Ροές Φόρτισης/Εκφόρτισης mFRR με Τιμές Ενέργειας — Μοντέλο M3

Στο Σχήμα 5.16 οι συναλλαγές mFRR παρατηρείται εκμετάλλευση των τιμών εξισορρόπησης ενέργειας. Το spread μεταξύ ανοδικής και καθοδικής εφεδρείας υπερβαίνει τα 800 €/MWh κατά τις κρίσιμες ώρες, επιβεβαιώνοντας γιατί το σύστημα προτιμά την αγορά εξισορρόπησης και παρατηρείται ότι εκμεταλλεύεται σχεδόν κάθε μέγιστη και ελάχιστη τιμή για εκφόρτιση και φόρτιση ενέργειας αντίστοιχα.



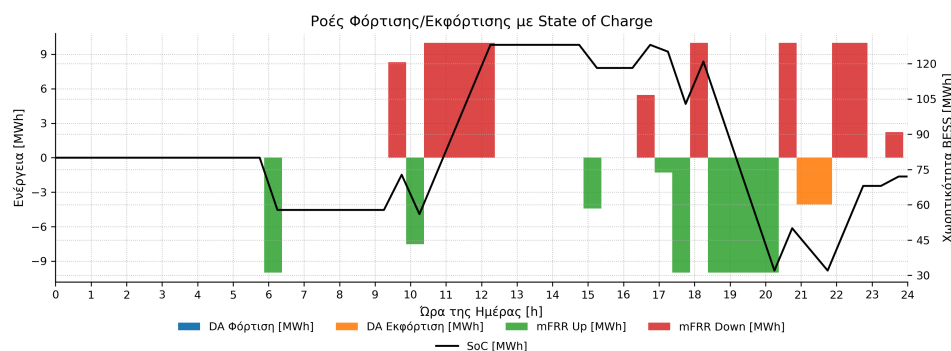
Σχήμα 5.17: Τιμές Capacity και Ενεργοποιήσεις Ενέργειας mFRR — Μοντέλο M3

Στο Σχήμα 5.17 παρουσιάζονται οι τιμές αποζημίωσης ισχύος (Mfrr capacity) σε συνδυασμό με τις ενεργοποιήσεις ενέργειας. Οι τιμές για εφεδρείες ανοδικής ισχύος (γαλάζια γραμμή) φτάνουν τα 80-100 €/MW κατά τις βραδινές ώρες αιχμής (19:00-20:00), όπου παρατηρούνται και οι μέγιστες ενεργοποιήσεις ανοδικής ενέργειας (πράσινες ράβδοι). Οι τιμές εφεδρείας καθοδικής ισχύος (κίτρινη γραμμή) κυμαίνονται στα 25-40 €/MW κατά τις μεσημβρινές ώρες (10:00-13:00), συμπίπτοντας με τις ενεργοποιήσεις καθοδικής ενέργειας (κόκκινες ράβδοι). Άρα φαίνεται ότι το σύστημα εκμεταλλεύθηκε και την υψηλότερη τιμή καθοδικής και ανοδικής εφεδρείας με αποτέλεσμα να αποζημιωθεί για την παροχή εφεδρειών.



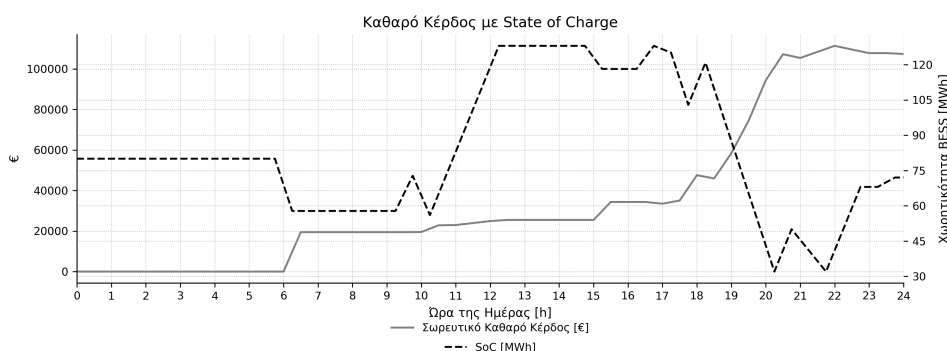
Σχήμα 5.18: Ροές Φόρτισης/Εκφόρτισης με Τιμή Εκκαθάρισης DAM — Μοντέλο M3

Στο Σχήμα 5.18 η περιορισμένη χρήση της DAM επικεντρώνεται στις ώρες μέγιστης τιμής. Η εκφόρτιση των 16.20 MWh συμβαίνει στις 21:00-22:00, όπου η τιμή DAM φτάνει τα 360 €/MWh (μέγιστη τιμή της ημέρας). Δεν υπάρχει φόρτιση μέσω DAM, καθώς η καθοδική εφεδρεία mFRR παρέχει χαμηλότερο κόστος.



Σχήμα 5.19: Ροές Φόρτισης/Εκφόρτισης με State of Charge — Μοντέλο M3

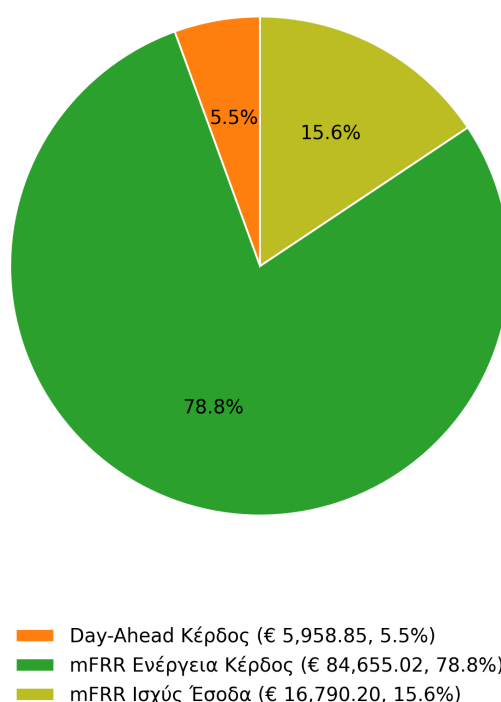
Στο Σχήμα 5.19 το SoC ξεκινά από 80 MWh (50%), μειώνεται κατά την πρωινή εκφόρτιση, αυξάνεται στα 128 MWh (80%) κατά τη μεσημβρινή φόρτιση, και επιστρέφει στα 72 MWh (45%) στο τέλος της ημέρας. Οι μεταβολές είναι ομαλές και το SoC παραμένει εντός των ορίων 20-80% καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας.



Σχήμα 5.20: Καθαρό Κέρδος (σωρευτικό) με State of Charge — Μοντέλο M3

Στο Σχήμα 5.20 η εξέλιξη του σωρευτικού κέρδους αναδεικνύει τη διπλή πηγή εσόδων που παρέχεται στο σύστημα αποθήκευσης στο μοντέλο M3. Κατά την πρωινή εκφόρτιση (06:00-09:00) το κέρδος αυξάνεται από 10,000 € σε 50,000 €, ενώ κατά τη βραδινή εκφόρτιση (17:00-22:00) το κέρδος αυξάνεται από 40,000 € σε περίπου 120,000 €, προσθέτοντας περίπου 80,000 €. Η συνεχής αύξηση του κέρδους ακόμη και κατά τις ώρες φόρτισης αντικατοπτρίζει τα έσοδα από την capacity.

Κατανομή Καθαρών Κερδών ανά Αγορά



Σχήμα 5.21: Κατανομή Καθαρών Κερδών ανά Αγορά — Μοντέλο M3

Στο Σχήμα 5.21 η κατανομή καθαρών κερδών ανά αγορά αποδεικνύει την υπεροχή της αγοράς εξισορρόπησης. Η αγορά ενέργειας mFRR συνεισφέρει το 78.8% των συνολικών εσόδων (84,655.02 €), η αγορά ισχύος mFRR (capacity) το 15.6% (16,790.20 €), και η DAM μόλις το 5.5% (5,958.85 €). Το σύστημα αποθήκευσης επιλέγει τη συμμετοχή στην αγορά εξισορρόπησης (balancing market) ως σαφώς πιο συμφέρουσα. Η εισαγωγή της capacity προσθέτει 15.6% επιπλέον κέρδος χωρίς πρόσθετες ενεργειακές συναλλαγές, επιβεβαιώνοντας τη σημαντική αξία της στρατηγικής στοίβαξης εσόδων. Τα έσοδα από την ανοδική ισχύ (10,250.08 €) και την καθοδική ισχύ (7,367.77 €) αντικατοπτρίζουν την αποζημίωση για τη διαθεσιμότητα του συστήματος να παρέχει υπηρεσίες εξισορρόπησης.

5.1.4 Ημερήσια — Μοντέλο M4 — Συμμετοχή σε DAM, mFRR Energy και mFRR Capacity με Ανεξάρτητες Προσφορές

Τα αποτελέσματα της συμμετοχής του συστήματος αποθήκευσης για την 26η Αυγούστου 2024 παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.6 και 5.7. Στο Μοντέλο M4 επιτυγχάνει καθαρό κέρδος 163,267.06 €, σημειώνοντας αύξηση 49.2% σε σχέση με το Μοντέλο M3 (109,479.30 €) και 623% σε σχέση με το Μοντέλο M1 (22,582.15 €). Η κρίσιμη διαφοροποίηση του M4 έγκειται στην άρση του περιορισμού κατευθυντικής συμβατότητας, επιτρέποντας στο σύστημα να προσφέρει ανοδική ή καθοδική εφεδρεία στην αγορά εξισορρόπησης ανεξάρτητα από την κατεύθυνση της θέσης που έχει δηλώσει στη DAM.

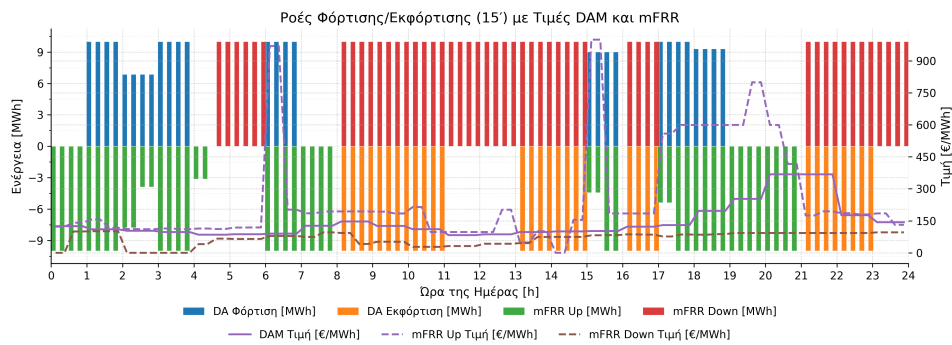
Πίνακας 5.6: Οικονομικά Αποτελέσματα ανά Κατηγορία Συναλλαγής — Μοντέλο M4, 26 Αυγούστου 2024

Κατηγορία	Αποζημίωση Μπαταρίας (€)	Χρέωση Απορρόφησης Ενέργειας (€)
Προσφορά Εκφόρτισης DA	49,943.20	0.00
Προσφορά όρτισης DA	0.00	30,954.97
Προσφορά Ανοδικής Εφεδρείας mFRR (Ενέργεια)	152,313.17	0.00
Προσφορά Καθοδικής Εφεδρείας mFRR (Ενέργεια)	0.00	32,876.80
Προσφορά Ανοδικής Ισχύος mFRR (Capacity)	12,137.65	0.00
Προσφορά Καθοδικής Ισχύος mFRR (Capacity)	12,704.80	0.00
Σύνολο	227,098.82	63,831.77
Καθαρό Κέρδος	163,267.06 €	

Πίνακας 5.7: Τεχνικά Αποτελέσματα Ενεργειακών Συναλλαγών και Ισχύος — Μοντέλο M4, 26 Αυγούστου 2024

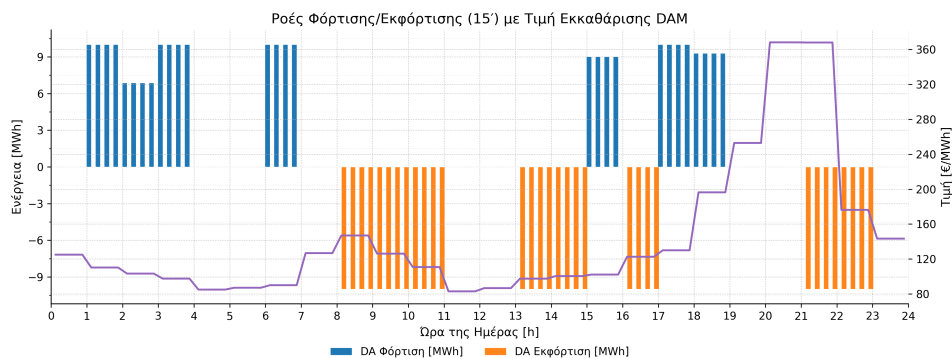
Κατηγορία	Ποσότητα	Μονάδα
Συνολική Προσφορά Φόρτισης DA	260.82	MWh
Συνολική Προσφορά Εκφόρτισης DA	320	MWh
Συνολική Προσφορά Ανοδικής Εφεδρείας mFRR (Ενέργεια)	409.18	MWh
Συνολική Προσφορά Καθοδικής Εφεδρείας mFRR (Ενέργεια)	500.00	MWh
Φόρτιση	184.00	MWh
Εκφόρτιση	192.00	MWh
Κύκλοι Φόρτισης/Εκφόρτισης	1.175	—

Από τους πίνακες προκύπτει η θεμελιώδης αλλαγή του M4: το σύστημα αποθήκευσης μπορεί να δηλώνει ταυτόχρονα προσφορές και στη DAM και στην mFRR. Συγκεκριμένα, δηλώνει φόρτιση στη DAM (260,82 MWh) με έσοδα 49,943.20 € και εκφόρτιση (320 MWh) με κόστος 30,954.97 €, οδηγώντας σε καθαρό κέρδος DAM 18,988.23 €. Ταυτόχρονα, προσφέρει διαθεσιμότητα με παροχή ανοδικής εφεδρείας mFRR (409.18 MWh) που αποφέρει 152,313.17 € και καθοδική εφεδρεία (500.00 MWh) με κόστος 32,876.80 €, οδηγώντας σε καθαρό κέρδος mFRR Energy 119,436.37 €. Η συμμετοχή στην αγορά ισχύος προσθέτει 24,842.45 € (12,137.65 € ανοδική + 12,704.80 € καθοδική). Οι συνολικές ποσότητες (1490 MWh) υπερβαίνουν κατά πολύ τις πραγματικές φυσικές κινήσεις της μπαταρίας (184.00 MWh φόρτιση, 192.00 MWh εκφόρτιση, 1.175 κύκλοι), καθώς οι προσφορές από διαφορετικές αγορές αλληλοαντισταθμίζονται αλλά παράγουν σημαντικό οικονομικό κέρδος από τα spreads μεταξύ αγορών.



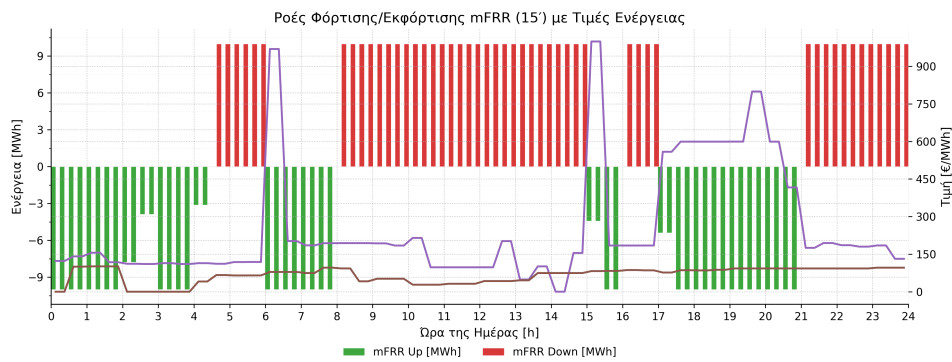
Σχήμα 5.22: Ροές Φόρτισης/Εκφόρτισης με Τιμές DAM και mFRR — Μοντέλο M4

Στο Σχήμα 5.22 αποκαλύπτεται η πολυπλοκότητα του M4. Σε σχεδόν κάθε τέταρτο της ημέρας το σύστημα δηλώνει ταυτόχρονα θέσεις στη DAM (μπλε ράβδοι για φόρτιση, πορτοκαλί για εκφόρτιση) και προσφορές στην mFRR (πράσινες ράβδοι για ανοδική εφεδρεία, κόκκινες για καθοδική). Οι αντίθετες κινήσεις αλληλοαντισταθμίζονται, αλλά το σύστημα αποζημιώνεται από όλες τις αγορές. Για παράδειγμα, κατά τις πρώτες πρωινές ώρες (00:00-04:00) παρατηρούνται ταυτόχρονα μεγάλες δηλώσεις φόρτισης DAM και ανοδικής εφεδρείας mFRR, ενώ στις βραδινές ώρες (21:00-23:00) συνυπάρχουν εκφόρτιση DAM και καθοδική εφεδρεία mFRR. Η στρατηγική εκμεταλλεύεται τις διαφορές τιμών μεταξύ των δύο αγορών, με τις τιμές mFRR να φτάνουν τα 900 €/MWh κατά την ανοδική εφεδρεία και να πέφτουν χαμηλά κατά την καθοδική, αλλά και μεταξύ των αγορών είναι σημαντική κάθε ώρα η διαφορά των τιμών.



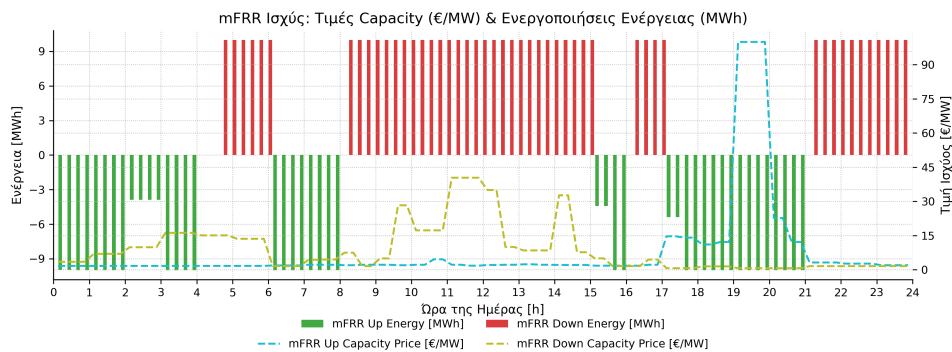
Σχήμα 5.23: Ροές Φόρτισης/Εκφόρτισης με Τιμή Εκκαθάρισης DAM — Μοντέλο M4

Στο Σχήμα 5.23 η χρήση της DAM έχει αλλάξει ριζικά σε σχέση με τα προηγούμενα μοντέλα. Αντί να εκφορτίζει μόνο κατά τις υψηλές τιμές, το σύστημα τώρα δηλώνει προσφορές φόρτισης κατά τις χαμηλές τιμές (01:00-4:00, 6:00-7:00, 15:00-17:00) και εκφόρτιση κατά τις υψηλές (08:00-11:00, 21:00-23:00), με μέγιστη τιμή DAM περίπου 360 €/MWh. Η ενεργή διμερής συμμετοχή στη DAM (και φόρτιση και εκφόρτιση) αυξάνει το καθαρό κέρδος από τη DAM στα 18,988.23 €, έναντι μόλις 5,958.85 € στο M3.



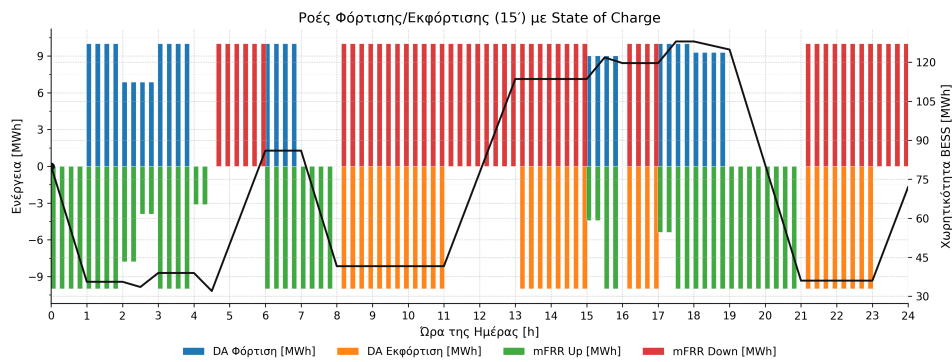
Σχήμα 5.24: Ροές Φόρτισης/Εκφόρτισης mFRR με Τιμές Ενέργειας — Μοντέλο M4

Στο Σχήμα 5.24 οι συναλλαγές mFRR δείχνουν συνεχή εκμετάλλευση των υψηλών spreads. Η ανοδική εφεδρεία (πράσινες ράβδοι) συγκεντρώνεται στις πρωινές (00:00-04:00, 06:00-09:00) και βραδινές ώρες (18:00-21:00) όπου οι τιμές φτάνουν τα 700-900 €/MWh, ενώ η καθοδική εφεδρεία (κόκκινες ράβδοι) κυριαρχεί κατά τις μεσημβρινές ώρες (08:00-14:00, 22:00-24:00) με τιμές αρκετά χαμηλές. Το καθαρό κέρδος από την ενέργεια mFRR ανέρχεται σε 119,436.37 €, αποτελώντας το 73.1% του συνολικού κέρδους.



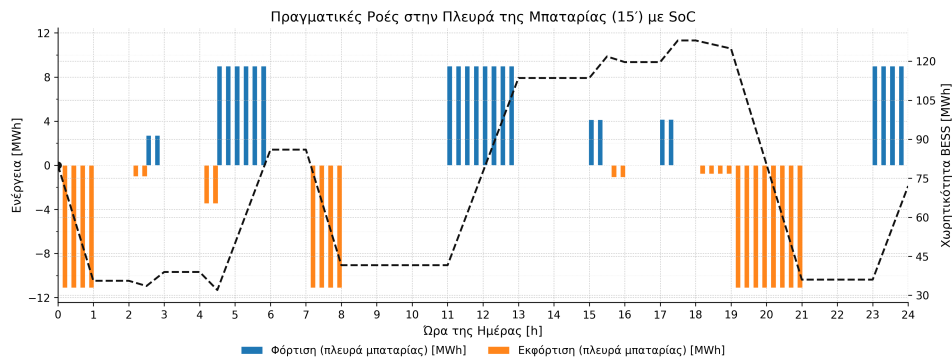
Σχήμα 5.25: Τιμές Capacity και Ενεργοποιήσεις Ενέργειας mFRR — Μοντέλο M4

Στο Σχήμα 5.25 οι τιμές capacity εμφανίζουν σημαντική διακύμανση. Οι τιμές ανοδικής ισχύος (γαλάζια γραμμή) φτάνουν τα 80-100 €/MW κατά τις βραδινές ώρες (17:00-20:00), ενώ οι τιμές καθοδικής ισχύος (κίτρινη γραμμή) κυμαίνονται στα 30-50 €/MW κατά τις μεσημβρινές ώρες (10:00-13:00). Η αποθηκευτική διάταξη αποζημιώνεται για κάθε ώρα της ημέρας από τις προσφορές που έχει υποβάλλει.



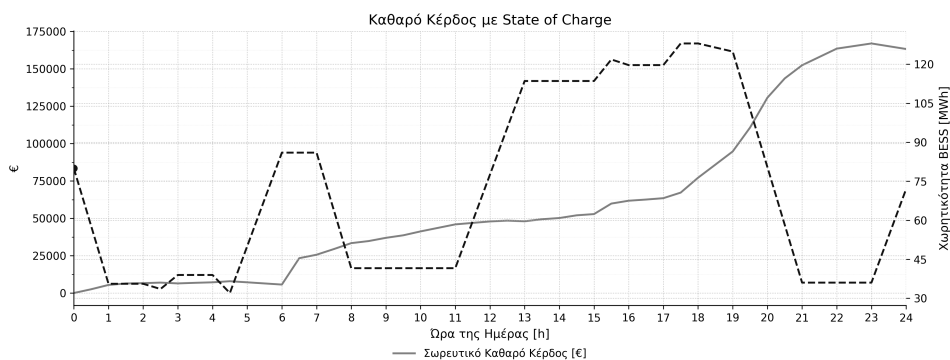
Σχήμα 5.26: Ροές Φόρτισης/Εκφόρτισης (δηλωθείσες θέσεις) με State of Charge — Μοντέλο M4

Στο Σχήμα 5.26 απεικονίζονται όλες οι δηλωθείσες θέσεις σε συνδυασμό με την εξέλιξη του SoC. Παρατηρείται ότι σε σχεδόν κάθε περίοδο υπάρχουν πολλαπλές αντίθετες κινήσεις που αλληλοαντισταθμίζονται.



Σχήμα 5.27: Πραγματικές Ροές στην Πλευρά της Μπαταρίας με State of Charge — Μοντέλο M4

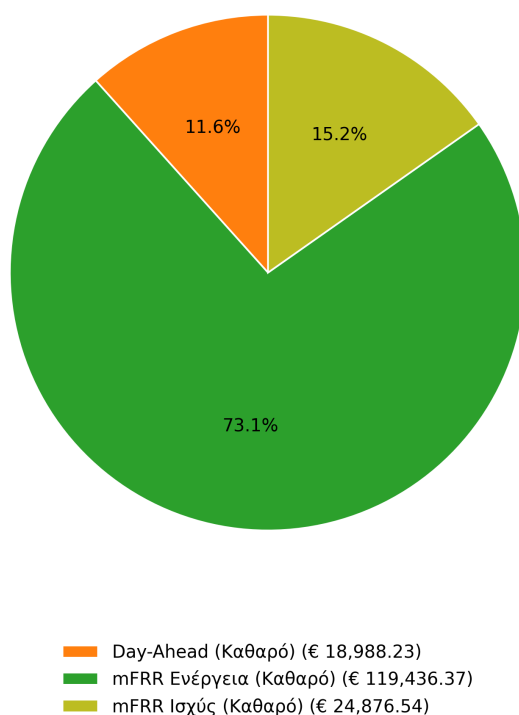
Στο Σχήμα 5.27 αποκαλύπτεται το κρίσιμο σημείο του M4: οι πραγματικές φυσικές κινήσεις της μπαταρίας (μπλε ράβδοι για φόρτιση, πορτοκαλί για εκφόρτιση) είναι πολύ μικρότερες από τις συνολικές δηλωθείσες θέσεις του προηγούμενου σχήματος. Σε πολλές περιόδους, ενώ υπάρχουν μεγάλες δηλώσεις στις δύο αγορές, η καθαρή επίδραση είναι ελάχιστη λόγω αλληλοαντιστάθμισης. Οι πραγματικοί κύκλοι είναι μόλις 1.175, ενώ οι δηλωθείσες συναλλαγές αντιστοιχούν σε πολλαπλάσιες ενέργειες (1490 MWh συνολικά δηλωθέντα έναντι 376.00 MWh πραγματικών κινήσεων).



Σχήμα 5.28: Καθαρό Κέρδος (σωρευτικό) με State of Charge — Μοντέλο M4

Στο Σχήμα 5.28 η εξέλιξη του σωρευτικού κέρδους βοηθάει να παρατηρήσουμε ότι το κέρδος αυξάνεται συνεχώς σχεδόν σε όλη τη διάρκεια της ημέρας. Η διαρκής αύξηση αντανακλά τη συνεχή ροή εσόδων από capacity, ενέργεια, και arbitrage μεταξύ αγορών σε κάθε τέταρτο της μέρας.

Κατανομή Καθαρών Κερδών ανά Αγορά



Σχήμα 5.29: Κατανομή Καθαρών Κερδών ανά Αγορά — Μοντέλο M4

Στο Σχήμα 5.29 η mFRR Ενέργεια συνεισφέρει το 73.1% (119,436.37 €), η mFRR Ισχύς το 15.2% (24,842.45 €), και η DAM το 11.6% (18,988.23 €). Σε σύγκριση με το M3 όπου η DAM συνέβαλε μόλις 5.5%, η σημαντική αύξηση στο 11.6% αποδεικνύει ότι όταν το σύστημα αποθήκευσης έχει την ευελιξία ανεξάρτητων προσφορών, αξίζει να συμμετέχει ενεργά και στη DAM εκτός από την αγορά εξισορρόπησης. Σε αυτό το πιο σύνθετο μοντέλο επιτρέπεται η μεγιστοποίηση εσόδων από όλες τις πηγές ταυτόχρονα, χωρίς επιπλέον φθορά της μπαταρίας.

5.1.5 Συγκριτική Αξιολόγηση Μοντέλων — Ημερήσιο Επίπεδο

Η παρούσα ενότητα αναλύει συγκριτικά την απόδοση των τεσσάρων μοντέλων βελτιστοποίησης για τη λειτουργία συστήματος αποθήκευσης ενέργειας (BESS) κατά την 26η Αυγούστου 2024. Τα μοντέλα διαφοροποιούνται ως προς το φάσμα των αγορών στις οποίες συμμετέχει το σύστημα και ορισμένους περιορισμούς που τίθενται προκειμένου να αναλυθεί η σημασία της εκάστοτε αγοράς.

Πίνακας 5.8: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Ημερήσιας Λειτουργίας BESS ανά Μοντέλο — 26 Αυγούστου 2024

Μέγεθος	M1	M2	M3	M4
<i>Οικονομικά Αποτελέσματα</i>				
Καθαρό Κέρδος (€)	22,582.15	103,585.00	109,479.30	163,267.06
Αύξηση από M1 (%)	—	359%	385%	623%
Αύξηση από προηγούμενο (%)	—	359%	5.7%	49.2%
<i>Φυσικές Κινήσεις Μπαταρίας</i>				
Φόρτιση (MWh)	184.00	184.00	184.00	184.00
Εκφόρτιση (MWh)	192.00	192.00	192.00	192.00
Πλήρεις Κύκλοι	1.175	1.175	1.175	1.175
<i>Κατανομή Καθαρών Κερδών</i>				
DAM (€)	22,582.15	6,216.33	5,958.85	18,988.23
mFRR Energy (€)	—	97,368.67	85,902.63	119,436.37
mFRR Capacity (€)	—	—	17,617.85	24,842.45
<i>Ποσοστιαία Κατανομή (%)</i>				
DAM	100%	6.0%	5.4%	11.6%
mFRR Energy	—	94.0%	78.5%	73.2%
mFRR Capacity	—	—	16.1%	15.2%

Από τη συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτουν οι ακόλουθες κρίσιμες παρατηρήσεις:

Η εισαγωγή της αγοράς ενέργειας εξισορρόπησης (μετάβαση από M1 σε M2) συνιστά τη σημαντικότερη μεμονωμένη βελτίωση, τετραπλασιάζοντας την οικονομική απόδοση του συστήματος. Αυτό αποδεικνύει την κρίσιμη σημασία της πρόσβασης στην αγορά εξισορρόπησης για τη βιωσιμότητα των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Η κυριαρχία της mFRR Energy στη σύνθεση των εσόδων οφείλεται στα εξαιρετικά υψηλά spreads μεταξύ τιμών ανοδικής και καθοδικής εφεδρείας, τα οποία υπερβαίνουν κατά πολύ τις διακυμάνσεις της DAM.

Η προσθήκη της αγοράς ισχύος εξισορρόπησης στο Μοντέλο M3 δημιουργεί μία νέα ροή εσόδων που αντιστοιχεί σε περίπου το ένα έκτο του συνολικού κέρδους. Η σημασία αυτής της προσθήκης έγκειται στο γεγονός ότι τα έσοδα από την capacity προκύπτουν χωρίς πρόσθετες ενεργειακές κινήσεις, υλοποιώντας τη στρατηγική στοίβαξης εσόδων. Το σύστημα αποζημιώνεται για τη διαθεσιμότητα παροχής υπηρεσιών εξισορρόπησης παρέχοντας είτε καθοδική είτε ανοδική εφεδρεία.

Η άρση του περιορισμού που απαγόρευε στο BESS να συμμετέχει ελεύθερα σε όλες τις αγορές ανεξάρτητα από την προσφορά στην DAM στο Μοντέλο M4 επιφέρει την μεγαλύτερη απόλυτη αύξηση κέρδους μεταξύ διαδοχικών μοντέλων. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ταυτόχρονης υποβολής προσφορών σε πολλαπλές αγορές με αντίθετες κατευθύνσεις, εκμεταλλευόμενο τα spreads μεταξύ αγορών. Η στρατηγική αυτή οδηγεί επίσης σε αύξηση του ρόλου της DAM, με τη συνεισφορά της να τριπλασιάζεται σε σύγκριση με τα μοντέλα M2 και M3.

Η ενέργεια φόρτισης, η ενέργεια εκφόρτισης και οι πλήρεις κύκλοι παραμένουν ταυτόσημα σε όλες τις στρατηγικές, επιβεβαιώνοντας ότι η διαφοροποίηση των εσόδων προκύπτει αποκλειστικά από τη βελτιστοποιημένη κατανομή των συναλλαγών μεταξύ αγορών και όχι από αυξημένη λειτουργική ένταση. Το γεγονός ότι όλα τα μοντέλα χρησιμοποιούν την ίδια ενεργειακή χωρητικότητα σημαίνει ότι η αύξηση των κερδών επιτυγχάνεται χωρίς πρόσθετη φθορά του συστήματος αποθήκευσης.

5.2 Ετήσια Αποτελέσματα (2024)

5.2.1 Ετήσια Αποτελέσματα — Μοντέλο M1 — Συμμετοχή στην Προημερήσια Αγορά

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της συμμετοχής του συστήματος αποθήκευσης BESS στην Αγορά Επόμενης Ημέρας για το έτος 2024 παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.9. Το σύστημα επιτυγχάνει συνολικό καθαρό κέρδος 4,321,382.67 €, με συνολικά έσοδα 8,516,236.12 € και κόστος 4,194,853.45 €.

Πίνακας 5.9: Συγκεντρωτικά Ετήσια Αποτελέσματα — Μοντέλο M1, Έτος 2024

Μέγεθος	Τιμή
<i>Οικονομικά Αποτελέσματα</i>	
Συνολικά Έσοδα (€)	8,516,236.12
Συνολικό Κόστος (€)	4,194,853.45
Καθαρό Κέρδος (€)	4,321,382.67
Συνολική Φόρτιση (MWh)	58,469.33
Συνολική Εκφόρτιση (MWh)	58,477.33
Πλήρεις Κύκλοι Ετησίως	366
Μέσος Όρος Κύκλων Ημερησίως	1.00

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.9 καταδεικνύουν την υψηλή οικονομική απόδοση του συστήματος αποθήκευσης BESS στην Αγορά Επόμενης Ημέρας κατά το έτος 2024.

Η ανάλυση της ενεργειακής διακίνησης αποκαλύπτει ότι η εκφόρτιση DA καταγράφεται στα 58,477.33 MWh, ενώ η φόρτιση φθάνει τα 58,469.33 MWh.

Από τεχνικής απόψεως, παρατηρείται ότι το σύστημα λειτουργεί με μέσο όρο 1.00 πλήρη κύκλο ημερησίως και αντιστοιχεί σε 366 πλήρεις κύκλους ετησίως. Αυτό υποδηλώνει ότι η βέλτιστη στρατηγική δεν συνεπάγεται την εντατική εκμετάλλευση της χωρητικότητας, αλλά την επιλεκτική συμμετοχή σε ώρες με τη μεγαλύτερη διαφορά τιμών. Η προσέγγιση αυτή εξισορροπεί τη μεγιστοποίηση της οικονομικής απόδοσης με τη διατήρηση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας, αποφεύγοντας την υπερβολική φθορά που θα προκαλούσε η συστηματική λειτουργία στο ανώτατο επιτρεπόμενο όριο των 1.2 κύκλων ημερησίως.

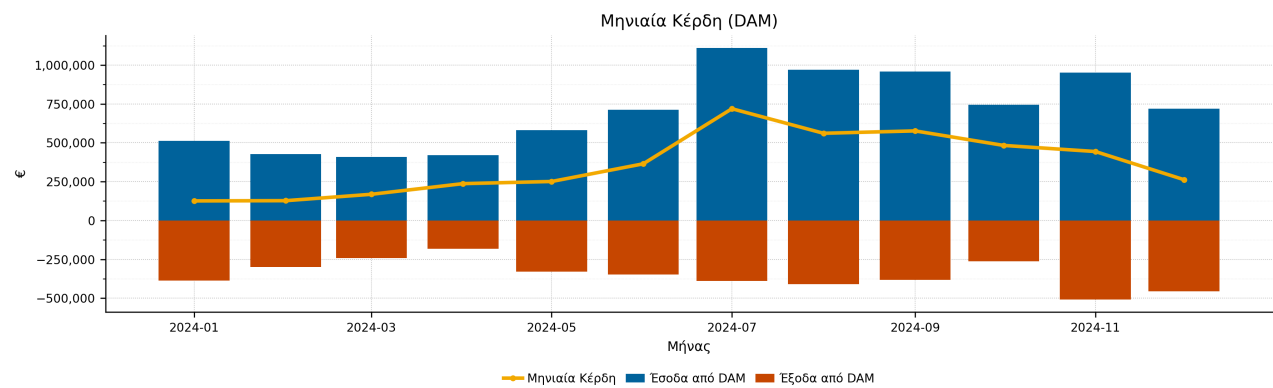
5.2.1.1 Μηνιαία Ανάλυση Οικονομικών και Τεχνικών Αποτελεσμάτων

Το υπό εξέταση σύστημα αποθήκευσης BESS λειτουργεί στην Αγορά Επόμενης Ημέρας (DAM) με στόχο την κεφαλαιοποίηση των ενδοημερήσιων διαφορών τιμών. Το κέρδος που έχει έχει ίδιο trend με τα DAM Spreads όπως αυτά υπολογίστηκαν παραπάνω ανά μήνα για το 2024.

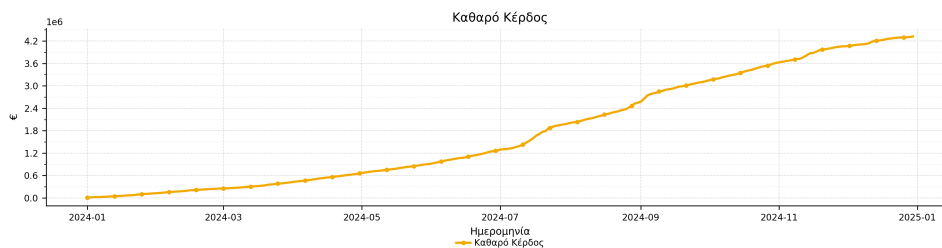
Η μηνιαία κατανομή των οικονομικών αποτελεσμάτων για το έτος 2024 παρουσιάζει σημαντική μεταβλητότητα με τιμές καθαρού κέρδους που κυμαίνονται από 126,006.49 € (Ιανουάριος) έως 719,184.03 € (Ιούλιος). Το τρίμηνο Ιουλίου–Σεπτεμβρίου συγκεντρώνει το 43.4% του συνολικού ετήσιου καθαρού κέρδους (1,857,864.83 €), ενώ αντιπροσωπεύει μόλις το 25% της χρονικής περιόδου. Η ασυμμετρία αυτή αποδίδεται στη διεύρυνση του ενδομερήσιου spread κατά τους θερινούς μήνες, λόγω της μεγάλης μεταβλητότητας των τιμών, με τον Ιούλιο να εμφανίζει απόλυτη διαφορά εσόδων-κόστους.

Πίνακας 5.10: Μηνιαία Οικονομικά Αποτελέσματα — Μοντέλο M1, Έτος 2024

Μήνας	Συνολικά Έσοδα (€)	Συνολικό Κόστος (€)	Καθαρό Κέρδος (€)
Ιανουάριος	511,931.20	385,924.71	126,006.49
Φεβρουάριος	426,484.00	298,941.70	127,542.34
Μάρτιος	409,307.50	240,634.85	168,672.65
Απρίλιος	419,991.50	182,780.99	237,210.50
Μάϊος	580,882.34	329,894.45	250,987.89
Ιούνιος	712,282.88	347,555.47	364,727.41
Ιούλιος	1,109,193.00	390,009.40	719,184.00
Αύγουστος	970,735.96	409,538.80	561,197.19
Σεπτέμβριος	959,159.21	382,675.57	576,483.64
Οκτώβριος	745,484.50	262,505.80	482,978.70
Νοέμβριος	951,859.73	508,071.21	443,788.52
Δεκέμβριος	718,923.84	456,320.56	262,603.30
Ετήσιο Σύνολο	8,516,236.12	4,194,853.45	4,321,382.67



Σχήμα 5.30: Μηνιαία σύνθεση εσόδων, κόστους και καθαρού κέρδους για το Μοντέλο M1 κατά το έτος 2024

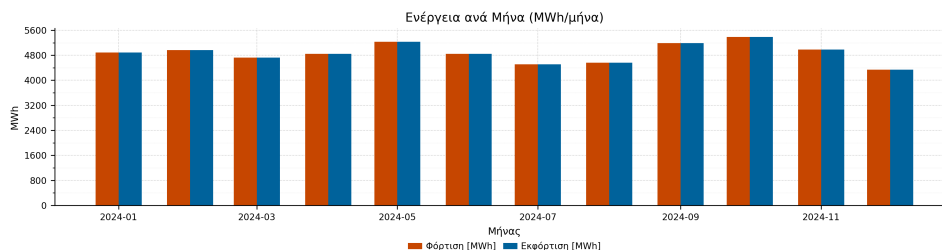


Σχήμα 5.31: Αθροιστική εξέλιξη καθαρού κέρδους για το Μοντέλο M1 κατά το έτος 2024

Το Σχήμα 5.31 απεικονίζει την αθροιστική εξέλιξη του καθαρού κέρδους κατά τη διάρκεια του έτους, καταδεικνύοντας τη συνεχή δημιουργία αξίας με χαρακτηριστική επιτάχυνση κατά τους θερινούς μήνες. Η καμπύλη παρουσιάζει σταθερή ανοδική τάση με εμφανώς εντονότερη κλίση κατά το τρίμηνο Ιουλίου–Σεπτεμβρίου, υπογραμμίζοντας την κρισιμότητα αυτής της περιόδου για τη συνολικά οικονομική βιωσιμότητα του συστήματος.

Πίνακας 5.11: Μηνιαία Τεχνικά Αποτελέσματα — Μοντέλο M1, Έτος 2024

Μήνας	Φόρτιση (MWh)	Εκφόρτιση (MWh)
Ιανουάριος	4,883.56	4,891.56
Φεβρουάριος	4,964.89	4,964.89
Μάρτιος	4,728.00	4,728.00
Απρίλιος	4,844.44	4,844.44
Μάιος	5,232.89	5,232.89
Ιούνιος	4,844.00	4,844.00
Ιούλιος	4,508.00	4,508.00
Αύγουστος	4,565.33	4,565.33
Σεπτέμβριος	5,183.56	5,183.56
Οκτώβριος	5,388.00	5,388.00
Νοέμβριος	4,984.89	4,984.89
Δεκέμβριος	4,341.78	4,341.78
Ετήσιο Σύνολο	58,469.33	58,477.33



Σχήμα 5.32: Μηνιαία ισορροπία φόρτισης και εκφόρτισης για το Μοντέλο M1 κατά το έτος 2024

Η τεχνική λειτουργία του συστήματος, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.11 και το Σχήμα 5.32, παρουσιάζει συνέπεια με σχεδόν πλήρη ισορροπία φόρτισης-εκφόρτισης επιτυγχάνοντας συνολικά 366 πλήρεις

κύκλους ετησίως, που αντιστοιχεί σε μέσο ημερήσιο cycle depth 1.00. Η ενεργειακή διακίνηση κυμαίνεται μεταξύ 4,300–5,400 MWh μηνιαίως, επιβεβαιώνοντας την ισορροπημένη και συνεπή λειτουργία του συστήματος αποθήκευσης.

Η ανάλυση της σχέσης μεταξύ οικονομικών και τεχνικών μεγεθών δείχνει αποσύζευξη μεταξύ ενεργειακής διακίνησης και απόδοσης. Ο Ιούλιος για παράδειγμα έχει τα περισσότερα έσοδα, παρά την καταγραφή της ελάχιστης μηνιαίας ενεργειακής δραστηριότητας παρουσιάζει τη μέγιστη κερδοφορία, επιβεβαιώνοντας ότι η οικονομική αποτελεσματικότητα προσδιορίζεται κυρίως από το μέγεθος του spread και όχι απαραίτητα από τον απόλυτο όγκο συναλλαγών.

5.2.2 Ετήσια Αποτελέσματα — Μοντέλο M2 — Συμμετοχή σε DAM και Αγορά Ενέργειας Εξισορρόπησης

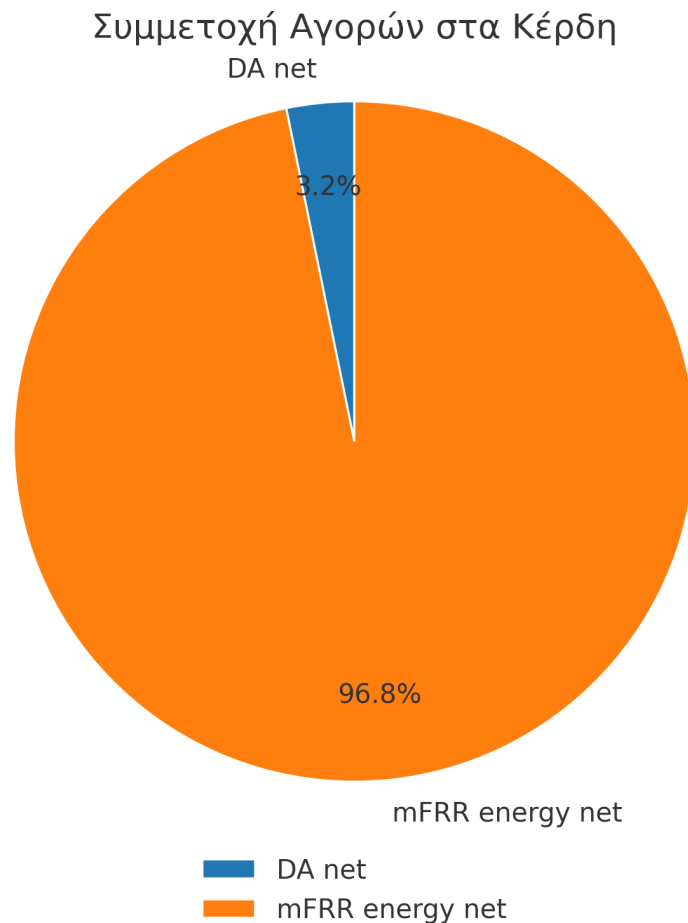
Το Μοντέλο M2 αντιπροσωπεύει στρατηγική συμμετοχής του συστήματος αποθήκευσης BESS σε δύο διακριτές αγορές ηλεκτρικής ενέργειας: την Προημερήσια Αγορά (DAM) και την Αγορά Ενέργειας Εξισορρόπησης (mFRR).

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του Μοντέλου M2 για το έτος 2024 παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.12. Το σύστημα επιτυγχάνει συνολικό καθαρό κέρδος 17,493,441 €, με συνολικά έσοδα 19,628,498 € και κόστος 2,135,078 €. Η αποσύνθεση των εσόδων αποκαλύπτει ότι το 97.0% προέρχεται από την mFRR Up Energy (19,040,590 €), ενώ μόλις το 3.0% προέρχεται από την εκφόρτιση στη DAM (587,908 €). Αντίστοιχα, το κόστος κατανέμεται με 98.7% στην mFRR Down Energy (2,107,927 €) και 1.3% στη φόρτιση DA (27,151 €). Η ασυμμετρία αυτή υποδηλώνει ότι η οικονομική απόδοση του M2 εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από τη δυναμική των τιμών εξισορρόπησης, με περιορισμένη συνεισφορά του ενδοημερήσιου arbitrage της DAM.

Πίνακας 5.12: Συγκεντρωτικά Ετήσια Αποτελέσματα — Μοντέλο M2, Έτος 2024

Μέγεθος	Τιμή
<i>Οικονομικά Αποτελέσματα</i>	
Συνολικά Έσοδα (€)	19,628,498
Συνολικό Κόστος (€)	2,135,078
Καθαρό Κέρδος (€)	17,493,441
<i>Ανάλυση Εσόδων</i>	
Έσοδα Εκφόρτισης DA (€)	587,908
Έσοδα mFRR Up Ενέργεια (€)	19,040,590
<i>Ανάλυση Κόστους</i>	
Κόστος Φόρτισης DA (€)	27,151
Κόστος mFRR Down Ενέργεια (€)	2,107,927
Συνολική Φόρτιση (MWh)	70,084
Συνολική Εκφόρτιση (MWh)	70,920
Πλήρεις Κύκλοι Ετησίως	439.2
Μέσος Όρος Κύκλων Ημερησίως	1.20

Η ανάλυση της ενεργειακής διακίνησης αναδεικνύει την κυριαρχία της αγοράς εξισορρόπησης στη λειτουργία του συστήματος. Η συνολική ενέργεια που διακινήθηκε ανέρχεται σε περίπου 70,000 MWh, με την πλειοψηφία των συναλλαγών να πραγματοποιείται μέσω της αγοράς mFRR.



Σχήμα 5.33: Συμμετοχή κάθε αγοράς στο κέρδος

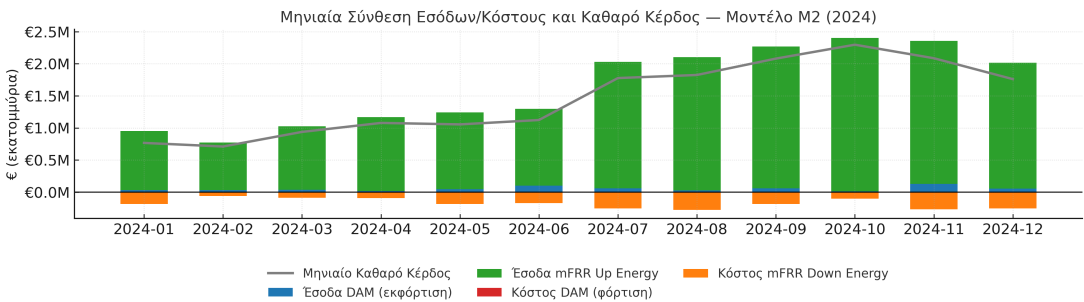
Το Σχήμα 5.33 απεικονίζει την κατανομή του κέρδους ανά κατηγορία συναλλαγής, επιβεβαιώνοντας την κυριαρχία της αγοράς εξισορρόπησης στο συνολικό αποτέλεσμα. Το 96.8% του καθαρού κέρδους (16,932,663 €) προέρχεται από τις συναλλαγές mFRR (Up Energy μείον Down Energy), ενώ η DAM συνεισφέρει μόλις 3.2%(560,757 €). Η διαφοροποίηση αυτή από το Μοντέλο M1, όπου το σύνολο του κέρδους προέρχεται από τη DAM, αποδεικνύει τη στρατηγική μετατόπιση προς την εκμετάλλευση των διαφορών τιμών μεταξύ αγορών.

5.2.2.1 Μηνιαία Αποτελεσμάτων

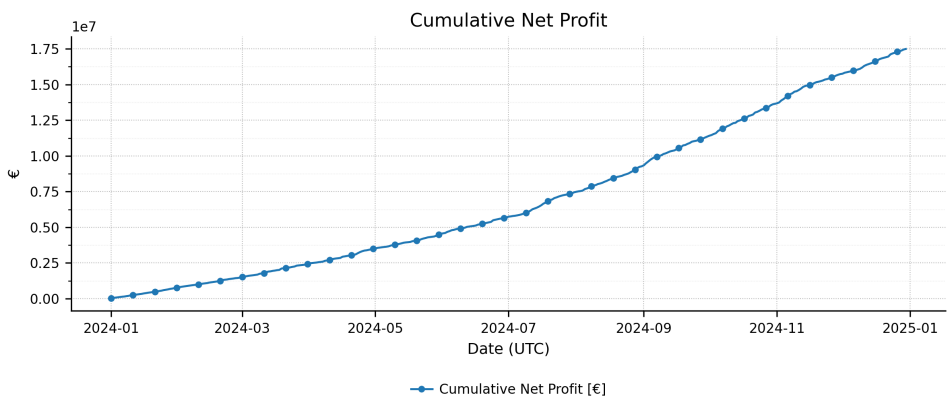
Η μηνιαία ανάλυση των αποτελεσμάτων αποκαλύπτει έντονη εποχική μεταβλητότητα, με το καθαρό κέρδος να κυμαίνεται από 709,788 € (Φεβρουάριος) έως 2,296,771 € (Οκτώβριος). Ο Πίνακας 5.13 παρουσιάζει αναλυτικά τη μηνιαία κατανομή εσόδων και κόστων ανά κατηγορία συναλλαγής. Ο Οκτώβριος καταγράφει τη μέγιστη μηνιαία απόδοση με έσοδα 2,401,530 € και κόστος 104,759 €, επιτυγχάνοντας λόγο εσόδων προς κόστος 22.9. Ακολουθούν ο Νοέμβριος (2,085,945 €, λόγος 8.7) και ο Σεπτέμβριος (2,080,126 €, λόγος 12.1). Οι χειμερινοί μήνες Φεβρουάριος και Ιανουάριος παρουσιάζουν τα χαμηλότερα μηνιαία κέρδη με 709,788 € και 766,077 € αντίστοιχα.

Πίνακας 5.13: Μηνιαία Οικονομικά Αποτελέσματα ανά Κατηγορία Συναλλαγής — Μοντέλο M2, Έτος 2024

Μήνας	Κόστος Φόρτισης DA	Έσοδα Εκφόρτισης DA	Έσοδα mFRR Up Ενέργεια	Κόστος mFRR Down Ενέργεια	Συνολικά Έσοδα	Συνολικός Κόστος	Καθαρό Κέρδος
	(€)	(€)	(€)	(€)	(€)	(€)	(€)
Ιαν.	2,224	30,632	920,769	183,100	951,401	185,324	766,077
Φεβ.	0	32,513	738,180	60,905	770,693	60,905	709,788
Μάρ.	2,195	33,237	992,693	86,260	1,025,930	88,455	937,475
Απρ.	689	18,330	1,151,797	91,859	1,170,127	92,548	1,077,579
Μάι.	4,334	45,338	1,195,246	181,505	1,240,585	185,839	1,054,746
Ιούν.	2,610	99,259	1,197,098	170,807	1,296,357	173,418	1,122,949
Ιούλ.	0	56,051	1,975,464	254,733	2,031,515	254,733	1,776,781
Αύγ.	7,105	24,219	2,078,206	270,403	2,102,425	277,508	1,824,927
Σεπ.	2,161	56,118	2,210,589	184,420	2,266,707	186,581	2,080,126
Οκτ.	2,025	10,887	2,390,643	102,734	2,401,530	104,759	2,296,771
Νοέ.	3,807	127,489	2,228,714	266,451	2,356,203	270,258	2,085,945
Δεκ.	0	53,834	1,961,191	254,750	2,015,025	254,750	1,760,275
Σύνολο	27,151	587,908	19,040,590	2,107,927	19,628,498	2,135,078	17,493,441



Σχήμα 5.34: Μηνιαία σύνθεση εσόδων, κοστών και καθαρού κέρδους για το Μοντέλο M2 κατά το έτος 2024



Σχήμα 5.35: Αθροιστική εξέλιξη καθαρού κέρδους για το Μοντέλο M2 κατά το έτος 2024

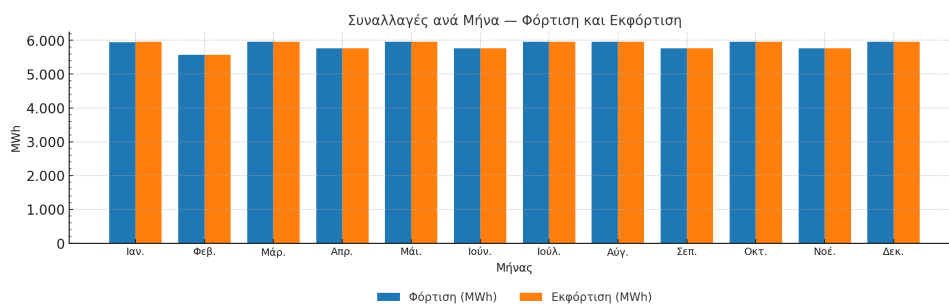
Το Σχήμα 5.34 απεικονίζει γραφικά τη μηνιαία διάρθρωση των οικονομικών μεγεθών. Τα έσοδα από την mFRR Up Energy (πράσινο χρώμα) κυριαρχούν σε όλους τους μήνες, κυμαινόμενα από 738,180 € (Φεβρουάριος) έως 2,390,643 € (Οκτώβριος), με εμφανή αύξηση κατά τους θερινούς και φθινοπωρινούς μήνες. Τα έσοδα από εκφόρτιση στη DAM (μπλε χρώμα) παραμένουν περιορισμένα σε όλη τη διάρκεια του έτους, με μέγιστη τιμή 127,489 € τον Νοέμβριο και ελάχιστη 10,887 € τον Οκτώβριο. Το κόστος από την mFRR Down Energy (πορτοκαλί χρώμα) εμφανίζει επίσης εποχικότητα, κυμαινόμενο από 60,905 € (Φεβρουάριος) έως 270,403 € (Αύγουστος), ενώ το κόστος φόρτισης DA (κόκκινο χρώμα) είναι αμελητέο, με τρεις μήνες (Φεβρουάριος, Ιούλιος, Δεκέμβριος) να μην καταγράφουν καθόλου κόστος φόρτισης από τη DAM. Η καμπύλη του καθαρού κέρδους (γκρι γραμμή) ακολουθεί στενά την πορεία των εσόδων mFRR Up, επιβεβαιώνοντας την κυρίαρχη συνεισφορά της αγοράς εξισορρόπησης στη συνολική απόδοση.

Το Σχήμα 5.35 απεικονίζει την αθροιστική εξέλιξη του καθαρού κέρδους κατά τη διάρκεια του έτους. Η καμπύλη εμφανίζει σταθερά ανοδική τάση χωρίς σημαντικές διακοπές, φθάνοντας στα 17.5 εκατομμύρια ευρώ στο τέλος του έτους. Παρατηρείται σχετικά ομοιόμορφη κλίση κατά τους πρώτους έξι μήνες, με το αθροιστικό κέρδος να φθάνει περίπου τα 6.0 εκατομμύρια ευρώ μέχρι το τέλος Ιουνίου, αντιπροσωπεύοντας το 34.3% του ετήσιου αποτελέσματος. Από τον Ιούλιο και έπειτα, η κλίση της καμπύλης εντείνεται σημαντικά, με το τρίμηνο Ιουλίου–Σεπτεμβρίου να συνεισφέρει 5,681,834 € (32.5% του ετήσιου κέρδους) και το τρίμηνο Οκτωβρίου–Δεκεμβρίου να προσθέτει 6,142,991 € (35.1%). Η έντονη εποχικότητα με κορύφωση κατά τη θερινή και φθινοπωρινή περίοδο αντανακλά τη διεύρυνση των δια-αγοραστικών spreads λόγω αυξημένης μεταβλητότητας στην παραγωγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και στη ζήτηση κατά τους μήνες αυτούς.

Η ανάλυση της σχέσης μεταξύ οικονομικών και τεχνικών μεγεθών παρουσιάζει διαφορετική δυναμική από το Μοντέλο M1, αντανακλώντας τα μεγαλύτερα spreads που διατίθενται μεταξύ των τιμών DAM και mFRR συγκριτικά με τη μεταβλητότητα των τιμών της mftt. Ωστόσο, το υψηλότερο κέρδος συνοδεύεται και από υψηλότερη ένταση χρήσης της μπαταρίας (1.20 έναντι 1.00 κύκλων ημερησίως).

Πίνακας 5.14: Μηνιαία Τεχνικά Αποτελέσματα — Μοντέλο M2, Έτος 2024

Μήνας	Πραγματική Φόρτιση (MWh)	Πραγματική Εκφόρτιση (MWh)	Κύκλοι ανά Μήνα (cycles)
Ιαν.	5,944	5,952	37.2
Φεβ.	5,568	5,568	34.8
Μάρ.	5,952	5,952	37.2
Απρ.	5,760	5,760	36.0
Μάι.	5,952	5,952	37.2
Ιούν.	5,760	5,760	36.0
Ιούλ.	5,952	5,952	37.2
Αύγ.	5,952	5,952	37.2
Σεπ.	5,760	5,760	36.0
Οκτ.	5,952	5,952	37.2
Νοέ.	5,760	5,760	36.0
Δεκ.	5,952	5,952	37.2
Σύνολο	70,084	70,092	438



Σχήμα 5.36: Μηνιαία ενεργειακή ροή φόρτισης και εκφόρτισης για το Μοντέλο M2 κατά το έτος 2024

Ο Πίνακας 5.14 και το Σχήμα 5.36 παρουσιάζουν τη μηνιαία ενεργειακή ροή και τους κύκλους λειτουργίας του συστήματος. Η ενεργειακή διακίνηση παρουσιάζει εξαιρετική σταθερότητα, με την φόρτιση και εκφόρτιση να ισορροπούν σχεδόν απόλυτα σε μηνιαία. Η μηνιαία ενεργειακή ροή κυμαίνεται από 5,568 MWh (Φεβρουάριος, 29 ημέρες) έως 5,952 MWh (μήνες με 31 ημέρες), με τη διακύμανση να οφείλεται αποκλειστικά στον αριθμό ημερών του μήνα και όχι σε εποχική μεταβολή της στρατηγικής λειτουργίας. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνει ότι το σύστημα λειτουργεί με σταθερό ημερήσιο πρότυπο 1.20 κύκλων σε όλη τη διάρκεια του έτους. Η σταθερή αυτή ένταση χρήσης υποδηλώνει λειτουργία στο ανώτατο επιτρεπόμενο όριο για συστήματα που στοχεύουν στην εξισορρόπηση μεταξύ μεγιστοποίησης εσόδων και διατήρησης αποδεκτής διάρκειας ζωής μπαταρίας. Αυτό συμβαίνει καθώς σε επίπεδο τετάρτου στην αγορά ενέργειας εξισορρόπησης εκμεταλλεύεται το BESS κάθε τέταρτο, σε αντίθεση με την DAM στο μοντέλο M1, όπου οι συναλλαγές γίνονται σε επίπεδο ώρας.

5.2.3 Ετήσια Αποτελέσματα — Μοντέλο M3 — Συμμετοχή σε DAM, Αγορά Ενέργειας και Ισχύος Εξισορρόπησης με Κατευθυντική Συμβατότητα

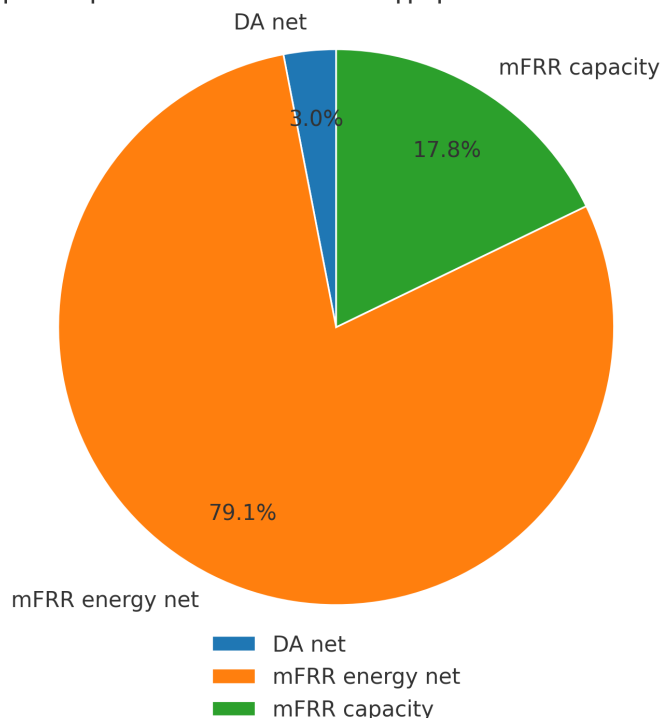
Το Μοντέλο M3 αντιπροσωπεύει στρατηγική συμμετοχής του συστήματος αποθήκευσης BESS σε τρεις διακριτές αγορές: την Προημερήσια Αγορά (DAM), την Αγορά Ενέργειας Εξισορρόπησης (mFRR Energy), και την Αγορά Ισχύος Εξισορρόπησης (mFRR Capacity). Το χαρακτηριστικό γνώρισμα του M3 είναι ο περιορισμός που αναφέρει ότι οι προσφορές mFRR Up Capacity συντονίζονται με την εκφόρτιση στη DAM, ενώ οι προσφορές mFRR Down Capacity με τη φόρτιση,

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το έτος 2024 παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.15. Το σύστημα επιτυγχάνει συνολικό καθαρό κέρδος 18,700,398 €.

Πίνακας 5.15: Συγκεντρωτικά Ετήσια Αποτελέσματα — Μοντέλο M3, Έτος 2024

Μέγεθος	Τιμή
<i>Οικονομικά Αποτελέσματα</i>	
Συνολικά Έσοδα (€)	20,787,058
Συνολικό Κόστος (€)	2,086,660
Καθαρό Κέρδος (€)	18,700,398
<i>Ανάλυση Εσόδων</i>	
Έσοδα Εκφόρτισης DA (€)	629,202
Έσοδα mFRR Up Ισχύς (€)	927,059
Έσοδα mFRR Down Ισχύς (€)	2,406,931
Έσοδα mFRR Up Ενέργεια (€)	16,823,866
<i>Ανάλυση Κόστους</i>	
Κόστος Φόρτισης DA (€)	60,408
Κόστος mFRR Down Ενέργεια (€)	2,026,253
<i>Τεχνικά Αποτελέσματα</i>	
Συνολική Φόρτιση (MWh)	63,073
Συνολική Εκφόρτιση (MWh)	63,081
Πλήρεις Κύκλοι Ετησίως	394
Μέσος Όρος Κύκλων Ημερησίως	1.08

Κατανομή καθαρών εσόδων ανά κατηγορία — Μοντέλο M3 (2024)

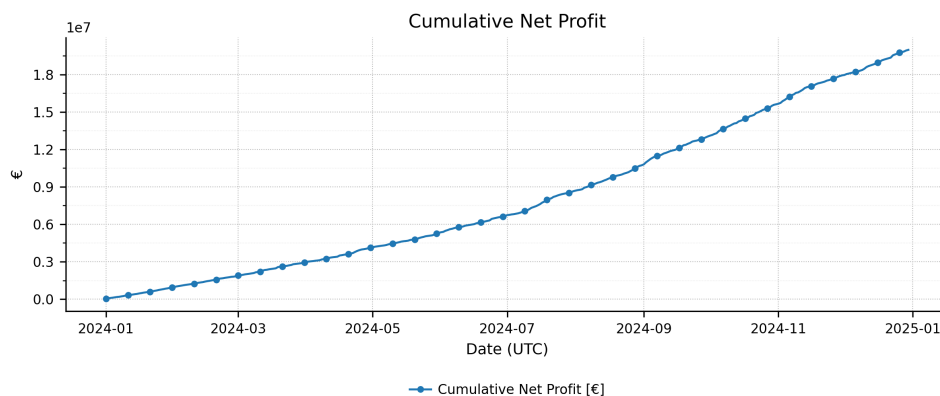


Σχήμα 5.37: Συμμετοχή κάθε αγοράς στο κέρδος

Το Σχήμα 5.37 απεικονίζει την συμμετοχή των καθαρών εσόδων από κάθε αγορά: 79.1% από mFRR Energy (14,797,613 €), 17.8% από capacity payments (3,333,990 €), και 3.0% από DAM (568,794 €).

Η προσθήκη της αγοράς ισχύος εξισορρόπησης ως τρίτης πηγής εσόδων ενισχύει τα έσοδα παρέχοντας σταθερή αποζημίωση είτε για up είτε για down εφεδρείες.

Από τεχνικής απόψεως, το σύστημα πραγματοποιεί 394 πλήρεις κύκλους ετησίως (1.08 κύκλοι/ημέρα), μείωση 10% συγκριτικά με το M2 (1.20 κύκλοι/ημέρα). Η μείωση αποδίδεται στις πληρωμές για capacity, όπου πλέον το μοντέλο λύνεται λαμβάνοντας υπόψιν και τα έσοδα από την αγορά ισχύος, με αποτέλεσμα να μην χρειάζεται η αποθηκευτική διάταξη να κάνει όλους τους επιτρεπόμενους κύκλους προκειμένου να βελτιστοποιήσει τα κέρδη της. Η ενεργειακή διακίνηση των 63,073 MWh είναι 10.2% χαμηλότερη από το M2, επιβεβαιώνοντας την αποτελεσματικότερη εκμετάλλευση.



Σχήμα 5.38: Αθροιστική εξέλιξη καθαρού κέρδους για το Μοντέλο M3 κατά το έτος 2024

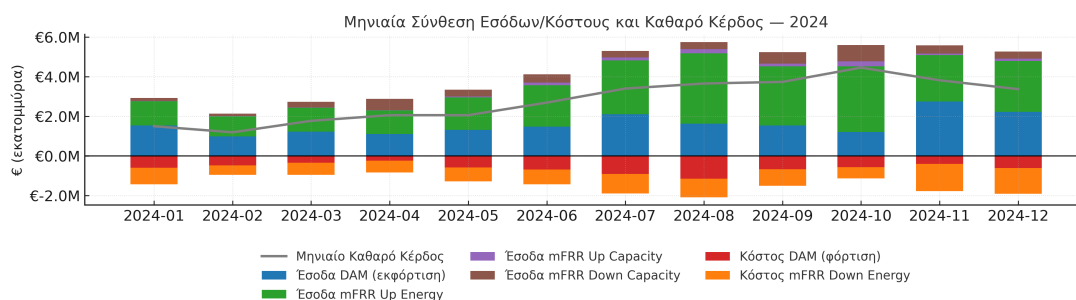
Το Σχήμα 5.38 απεικονίζει την αθροιστική εξέλιξη του καθαρού κέρδους. Η καμπύλη εμφανίζει σταθερά ανοδική τάση, φθάνοντας στα 18.7 εκατ. €. Το πρώτο εξάμηνο συνεισφέρει 34.2

5.2.3.1 Μηνιαία Ανάλυση Οικονομικών και Τεχνικών Αποτελεσμάτων

Ο Πίνακας 5.16 παρουσιάζει τη μηνιαία κατανομή εσόδων και κοστών. Το καθαρό κέρδος κυμαίνεται από 633,186 € (Φεβρουάριος) έως 2,623,433 € (Οκτώβριος).

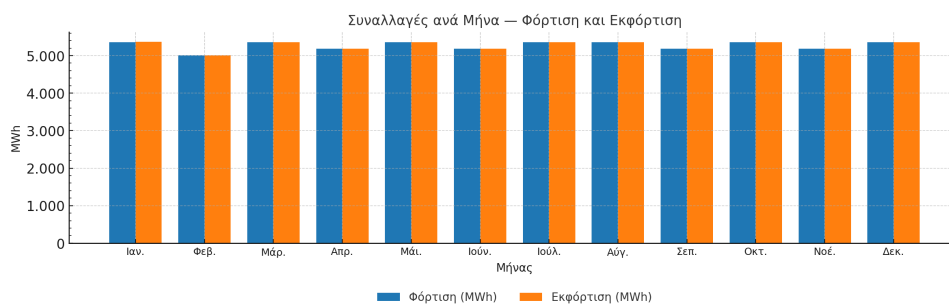
Πίνακας 5.16: Μηνιαία Οικονομικά Αποτελέσματα ανά Κατηγορία Συναλλαγής — Μοντέλο M3, Έτος 2024

Μήνας	Κόστος Φόρτισης DA	Έσοδα Εκφόρτισης DA	Έσοδα mFRR Up Ισχύς	Έσοδα mFRR Down Ισχύς	Έσοδα mFRR Up Ενέργεια	Κόστος mFRR Down Ενέργεια	Συνολικά Έσοδα	Συνολικό Κόστος	Καθαρό Κέρδος
	(€)	(€)	(€)	(€)	(€)	(€)	(€)	(€)	(€)
Ιαν.	23,530	36,651	11,987	87,134	798,088	208,173	933,859	231,704	702,156
Φεβ.	16,948	60,299	10,729	74,933	600,556	96,382	746,517	113,331	633,186
Μάρ.	234	44,002	18,084	140,219	878,363	90,416	1,080,667	90,650	990,017
Απρ.	1,289	39,354	8,153	258,461	938,695	77,900	1,244,662	79,188	1,165,474
Μάι.	2,679	49,153	32,345	181,683	1,050,320	158,602	1,313,500	161,280	1,152,220
Ιούν.	0	103,608	100,484	210,797	1,065,012	153,171	1,479,901	153,171	1,326,730
Ιουλ.	0	63,359	120,174	166,733	1,790,082	231,791	2,140,348	231,791	1,908,557
Αύγ.	7,038	16,503	174,283	187,736	1,884,969	247,990	2,263,491	255,028	2,008,462
Σεπ.	2,246	78,502	105,874	304,498	1,923,837	174,343	2,412,711	176,589	2,236,122
Οκτ.	2,395	11,170	168,266	428,088	2,120,420	102,116	2,727,945	104,511	2,623,433
Νοέ.	4,048	84,019	81,535	189,456	2,035,686	255,219	2,390,697	259,267	2,131,430
Δεκ.	0	42,583	95,146	177,193	1,737,838	230,149	2,052,760	230,149	1,822,610
Σύνολο	60,408	629,202	927,059	2,406,931	16,823,866	2,026,253	20,787,058	2,086,660	18,700,398



Σχήμα 5.39: Μηνιαία σύνθεση εσόδων, κοστών και καθαρού κέρδους για το Μοντέλο M3 κατά το έτος 2024

Το Σχήμα 5.39 απεικονίζει τη μηνιαία διάρθρωση των οικονομικών μεγεθών. Τα έσοδα mFRR Up Energy κυριαρχούν (600,556 € έως 2,120,420 €), ενώ τα capacity payments συνεισφέρουν 15–25% των μηνιαίων εσόδων με κορύφωση τον Οκτώβριο (596,354 €). Τα έσοδα DAM παραμένουν περιορισμένα, αντανakλώντας τη στρατηγική εστίαση στις αγορές εξισορρόπησης.



Σχήμα 5.40: Μηνιαία ενεργειακή ροή φόρτισης και εκφόρτισης για το Μοντέλο M3 κατά το έτος 2024

Πίνακας 5.17: Μηνιαία Τεχνικά Αποτελέσματα — Μοντέλο M3, Έτος 2024

Μήνας	Πραγματική Φόρτιση (MWh)	Πραγματική Εκφόρτιση (MWh)	Κύκλοι ανά Μήνα (cycles)
Ιαν.	5,357	5,365	33.5
Φεβ.	5,011	5,011	31.3
Μάρ.	5,357	5,357	33.5
Απρ.	5,184	5,184	32.4
Μάι.	5,357	5,357	33.5
Ιούν.	5,184	5,184	32.4
Ιούλ.	5,357	5,357	33.5
Αύγ.	5,357	5,357	33.5
Σεπ.	5,184	5,184	32.4
Οκτ.	5,357	5,357	33.5
Νοέ.	5,184	5,184	32.4
Δεκ.	5,357	5,357	33.5
Σύνολο	63,073	63,081	394

Ο Πίνακας 5.17 και το Σχήμα 5.40 παρουσιάζουν τη μηνιαία ενεργειακή ροή. Η ενεργειακή διακίνηση παρουσιάζει σταθερότητα, κυμαινόμενη από 5,011 MWh (Φεβρουάριος) έως 5,357 MWh (μήνες με 31 ημέρες), με τη διακύμανση να οφείλεται αποκλειστικά στον αριθμό ημερών. Οι κύκλοι κυμαίνονται από 31.3 έως 33.5, αντιστοιχώντας κατά μέσο όρο σε 1.08 κύκλους ημερησίως

5.2.4 Ετήσια Αποτελέσματα — Μοντέλο M4 — Συμμετοχή σε DAM, Αγορά Ενέργειας και Ισχύος Εξισορρόπησης με Ανεξάρτητες Προσφορές

Το Μοντέλο M4 αντιπροσωπεύει το σύνολο των δυνατοτήτων που παρέχονται σε ένα BESS να συμμετέχει στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, με καθοριστικό χαρακτηριστικό τη δυνατότητα υποβολής ανεξάρτητων προσφορών ισχύος εφεδρείας που δεν συνδέονται με την κατεύθυνση των προσφορών ενέργειας της DAM.

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.18. Το σύστημα επιτυγχάνει καθαρό κέρδος 33,745,997 €.

Πίνακας 5.18: Συγκεντρωτικά Ετήσια Αποτελέσματα — Μοντέλο M4, Έτος 2024

Μέγεθος	Τιμή
<i>Οικονομικά Αποτελέσματα</i>	
Συνολικά Έσοδα (€)	50,924,312
Συνολικό Κόστος (€)	17,178,315
Καθαρό Κέρδος (€)	33,745,997
<i>Ανάλυση Εσόδων</i>	
Έσοδα Εκφόρτισης DA (€)	19,167,373
Έσοδα mFRR Up Ισχύς (€)	1,163,711
Έσοδα mFRR Down Ισχύς (€)	4,740,706
Έσοδα mFRR Up Ενέργεια (€)	25,852,523
<i>Ανάλυση Κόστους</i>	
Κόστος Φόρτισης DA (€)	7,236,262
Κόστος mFRR Down Ενέργεια (€)	9,942,053
<i>Προσφορές</i>	
Φόρτιση DA (MWh)	68,722.16
Εκφόρτιση DA (MWh)	166,821.04
Ενέργεια mFRR Up (MWh)	110,277.64
Ενέργεια mFRR Down (MWh)	208,367.63
Συνολική Φόρτιση (MWh - battery side)	42,149.67
Συνολική Εκφόρτιση (MWh - battery side)	42,157.67
Πλήρεις Κύκλοι Ετησίως	263
Μέσος Όρος Κύκλων Ημερησίως	0.72

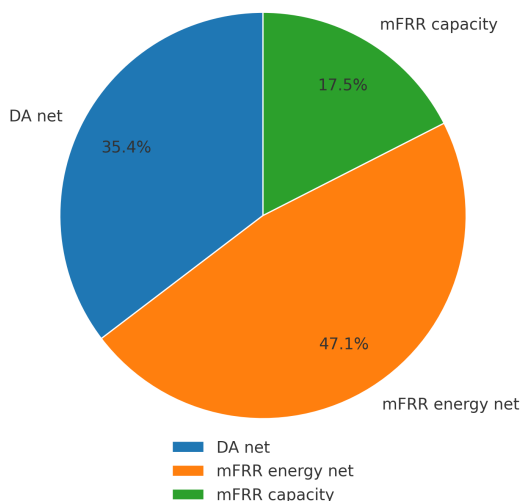
Η ανάλυση της ενεργειακής διακίνησης του Μοντέλου M4 αποκαλύπτει το πλέον χαρακτηριστικό γνώρισμα της στρατηγικής ανεξάρτητων προσφορών: τη δυνατότητα ταυτόχρονων αντίρροπων συναλλαγών στις τρεις αγορές. Η συνολική φόρτιση DA ανέρχεται σε 68,722.16 MWh, ενώ η πραγματική φόρτιση (battery side) είναι μόλις 42,149.67 MWh, διαφορά που αντιστοιχεί σε απώλειες απόδοσης 38.6%. Αντίστοιχα, η συνολική εκφόρτιση DA καταγράφεται στα 166,821.04 MWh, ενώ η πραγματική εκφόρτιση (battery side) είναι 42,157.67 MWh. Το κρίσιμο εύρημα είναι ότι το σύστημα συναλλάσσεται συνολικά 554,188.46 MWh στις αγορές (68,722 MWh φόρτιση DA + 166,821 MWh εκφόρτιση DA + 110,278 MWh mFRR Up + 208,368 MWh mFRR Down), αλλά η πραγματική ενεργειακή διακίνηση στην μπαταρία είναι μόλις 84,307.34 MWh (42,150 MWh φόρτιση + 42,158 MWh εκφόρτιση), ήτοι το 15.2% των συναλλακτικών όγκων. Αυτό σημαίνει ότι το 84.8% των συναλλαγών αντισταθμίζονται μεταξύ τους μέσω ταυτόχρονων αντίρροπων προσφορών: το σύστημα αποζημιώνεται ή χρεώνεται ταυτόχρονα σε πολλαπλές αγορές για το ίδιο χρονικό διάστημα, αλλά η καθαρή ενεργειακή ροή που επιβαρύνει τη μπαταρία είναι σημαντικά μικρότερη.

Συγκριτικά με το M3, η στρατηγική αυτή επιτυγχάνει δραματική διαφοροποίηση. Παρά την εκρηκτική αυτή αύξηση των συναλλακτικών όγκων, η πραγματική ενεργειακή διακίνηση μειώνεται από 126,154 MWh (M3) σε 84,307 MWh (M4), μείωση 33.2%. Αυτό αποδεικνύει ότι ο βέλτιστος τρόπος συμμετοχής ενός BESS στη μοντελοποίηση αυτή είναι μέσω ταυτόχρονων αντίρροπων προσφορών, όπου το σύστημα εκμεταλλεύεται τις διαφορές τιμών μεταξύ των αγορών χωρίς να επιβαρύνει ανάλογα την μπαταρία.

Σε αντίθεση με τα M2 και M3, η DAM αποκτά ουσιαστικό ρόλο στην ενεργειακή στρατηγική του M4. Η αύξηση της συμμετοχής της DAM επιβεβαιώνει ότι η αποσύζευξη των περιορισμών κατευθυντικής

συμβατότητας απελευθερώνει το σύστημα να αξιοποιεί πλήρως το arbitrage της προημερήσιας αγοράς παράλληλα με τις αγορές εξισορρόπησης.

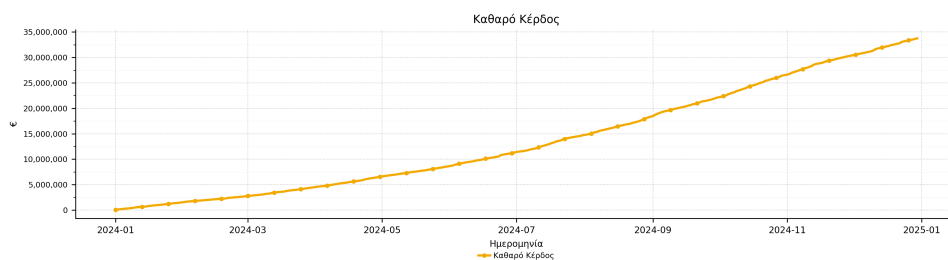
Κατανομή καθαρών εσόδων ανά κατηγορία συναλλαγής — Μοντέλο M4 κατά το έτος 2024



Σχήμα 5.41: Συμμετοχή κάθε αγοράς στα κέρδη

Το Σχήμα 5.41 απεικονίζει την κατανομή του κέρδους: mFRR Energy 47.1% (15,910,470 €), DAM 35.4% (11,931,111 €), capacity 17.5% (5,904,417 €). Η δραματική αύξηση της συμμετοχής της DAM (από 3.0% στο M3 σε 35.4% στο M4) αποδεικνύει ότι η αποσύζευξη των προσφορών capacity απελευθερώνει το σύστημα να εκμεταλλεύεται πλήρως τα spreads μεταξύ των τιμών της DAM και της εφεδρείας, με το να αποζημιώνεται ή να χρεώνεται για το ίδιο χρονικό διάστημα από τρεις αγορές (DAM + mFRR energy and capacity) ανάλογα με το ποια έχει πιο συμφέρουσα τιμή. Συγκριτικά με το M3, όπου τα capacity payments συνεισφέρουν 17.8%, το M4 διατηρεί παρόμοια συμμετοχή (17.5%), αλλά η κύρια μετατόπιση συντελείται στην αύξηση της DAM και τη σχετική μείωση της mFRR Energy από 79.1% (M3) σε 47.1% (M4), υποδηλώνοντας μια πιο ισορροπημένη διαφοροποίηση πηγών κέρδους.

Το σύστημα πραγματοποιεί 263 πλήρεις κύκλους ετησίως (0.72 κύκλοι/ημέρα), μείωση 33.3% έναντι του M3 (1.08 κύκλοι/ημέρα) και 40.0% έναντι του M2 (1.20 κύκλοι/ημέρα), επιτυγχάνοντας να έχει πολλαπλάσια έσοδα από τα προηγούμενα μοντέλα με τους λιγότερους κύκλους ανά ημέρα. Συγκεκριμένα, το καθαρό κέρδος του M4 (33,745,997 €) είναι 80.4% υψηλότερο από το M3 (18,700,398 €) και 92.9% υψηλότερο από το M2 (17,493,441 €), ενώ η ένταση χρήσης της μπαταρίας είναι 40% χαμηλότερη από το M2. Η πραγματική ενεργειακή διακίνηση των 42,149.67 MWh είναι 33.2% χαμηλότερη από το M3 (63,073 MWh) και 39.9% χαμηλότερη από το M2 (70,084 MWh). Αυτό το εύρημα καταδεικνύει τη στρατηγική υπεροχή του M4: η μέγιστη οικονομική απόδοση επιτυγχάνεται όχι μέσω της εντατικής χρήσης της μπαταρίας, αλλά μέσω της έξυπνης αξιοποίησης των ταυτόχρονων διαφορών τιμών μεταξύ πολλαπλών αγορών, μειώνοντας παράλληλα τη φθορά και επεκτείνοντας τη διάρκεια ζωής του συστήματος.



Σχήμα 5.42: Αθροιστική εξέλιξη καθαρού κέρδους για το Μοντέλο M4 κατά το έτος 2024

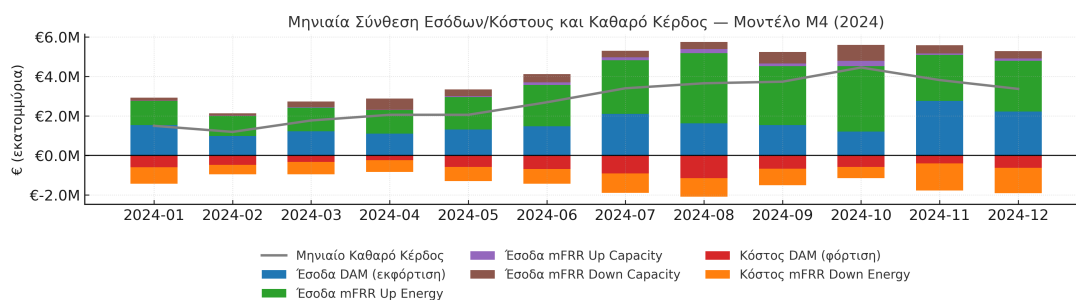
Το Σχήμα 5.42 απεικονίζει εξαιρετικά ομαλή ανοδική τάση, φθάνοντας στα 33.7 εκατ. €. Το πρώτο εξάμηνο συνεισφέρει 31.1%, το τρίμηνο Ιουλίου–Σεπτεμβρίου 32.0%, και το τελευταίο τρίμηνο 34.5%. Η κορύφωση κατά τους φθινοπωρινούς μήνες (Οκτώβριος 4,456,238 €) αντανακλά τη διεύρυνση όλων των τύπων spreads. Η καμπύλη παρουσιάζει διπλάσια κλίση από το M3, διατηρώντας παρόμοια ομαλότητα, επιβεβαιώνοντας τη σταθερότητα και την αξιοπιστία της στρατηγικής ανεξάρτητων προσφορών καθ’ όλη τη διάρκεια του έτους.

5.2.4.1 Μηνιαία Ανάλυση Οικονομικών και Τεχνικών Αποτελεσμάτων

Ο Πίνακας 5.19 παρουσιάζει τη μηνιαία κατανομή. Το καθαρό κέρδος κυμαίνεται από 1,195,476 € (Φεβρουάριος) έως 4,456,238 € (Οκτώβριος). Οι φθινοπωρινοί μήνες εμφανίζουν την υψηλότερη κερδοφορία, με τον Οκτώβριο να επιτυγχάνει λόγο εσόδων προς κόστος 4.87. Το M4 παρουσιάζει κατά μέσο όρο 81.5% υψηλότερα μηνιαία κέρδη συγκριτικά με το M3.

Πίνακας 5.19: Μηνιαία Οικονομικά Αποτελέσματα ανά Κατηγορία Συναλλαγής — Μοντέλο M4, Έτος 2024

Μήνας	Κόστος Φόρτισης DA (€)	Έσοδα Εκφόρτισης DA (€)	Έσοδα mFRR Up Ισχύς (€)	Έσοδα mFRR Down Ισχύς (€)	Έσοδα mFRR Up Ενέργεια (€)	Κόστος mFRR Down Ενέργεια (€)	Συνολικά Έσοδα (€)	Συνολικό Κόστος (€)	Καθαρό Κέρδος (€)
Ιαν.	597,280	1,539,359	13,692	140,963	1,232,718	826,378	2,926,731	1,423,658	1,503,073
Φεβ.	467,436	994,444	14,933	115,854	1,016,289	478,609	2,141,520	946,045	1,195,476
Μάρ.	329,661	1,227,986	21,122	280,973	1,198,914	624,448	2,728,995	954,108	1,774,887
Απρ.	234,972	1,110,497	9,677	570,096	1,197,241	591,535	2,887,512	826,507	2,061,005
Μάι.	581,644	1,318,481	36,870	350,734	1,646,650	709,279	3,352,734	1,290,924	2,061,810
Ιούν.	686,599	1,479,860	123,903	417,005	2,098,554	737,624	4,119,322	1,424,223	2,695,099
Ιούλ.	913,304	2,110,922	140,106	331,070	2,716,777	980,949	5,298,875	1,894,253	3,404,622
Αύγ.	1,151,181	1,629,965	216,065	349,873	3,549,948	935,814	5,745,851	2,086,994	3,658,856
Σεπ.	674,194	1,537,336	137,741	579,695	2,987,621	829,212	5,242,392	1,503,406	3,738,986
Οκτ.	581,484	1,217,943	259,518	817,555	3,313,968	571,262	5,608,984	1,152,747	4,456,238
Νοέ.	398,145	2,768,878	66,490	424,598	2,328,045	1,368,092	5,588,012	1,766,237	3,821,775
Δεκ.	620,362	2,231,700	123,595	362,290	2,565,798	1,288,851	5,283,383	1,909,213	3,374,170
Σύνολο	7,236,262	19,167,373	1,163,711	4,740,706	25,852,523	9,942,053	50,924,312	17,178,315	33,745,997

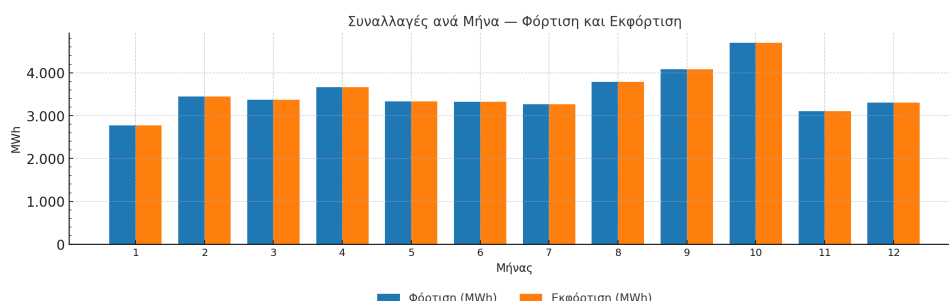


Σχήμα 5.43: Μηνιαία σύνθεση εσόδων, κοστών και καθαρού κέρδους για το Μοντέλο M4 κατά το έτος 2024

Το Σχήμα 5.43 απεικονίζει τη μηνιαία διάρθρωση. Τα έσοδα mFRR Up Energy κυμαίνονται από 1,016,289 € έως 3,549,948 €, ενώ τα έσοδα DAM παρουσιάζουν συστηματική συνεισφορά (994,444 € έως 2,768,878 €). Τα capacity payments εμφανίζουν σημαντική μεταβλητότητα, με κορύφωση τον Οκτώβριο (1,077,073 €).

Πίνακας 5.20: Μηνιαία Τεχνικά Αποτελέσματα — Μοντέλο M4, Έτος 2024

Μήνας	Πραγματική Φόρτιση (MWh)	Πραγματική Εκφόρτιση (MWh)	Κύκλοι ανά Μήνα (cycles)
Ιαν.	2,767	2,775	17.3
Φεβ.	3,443	3,443	21.5
Μάρ.	3,373	3,373	21.1
Απρ.	3,668	3,668	22.9
Μάι.	3,334	3,334	20.8
Ιούν.	3,324	3,324	20.8
Ιούλ.	3,267	3,267	20.4
Αύγ.	3,791	3,791	23.7
Σεπ.	4,083	4,083	25.5
Οκτ.	4,696	4,696	29.3
Νοέ.	3,103	3,103	19.4
Δεκ.	3,300	3,300	20.6
Σύνολο	42,150	42,158	263



Σχήμα 5.44: Μηνιαία ενεργειακή ροή φόρτισης και εκφόρτισης για το Μοντέλο M4 κατά το έτος 2024

Ο Πίνακας 5.20 και το Σχήμα 5.44 παρουσιάζουν τη μηνιαία ενεργειακή ροή. Η διακίνηση κυμαίνεται από 2,767 MWh (Ιανουάριος) έως 4,696 MWh (Οκτώβριος). Οι κύκλοι κυμαίνονται από 17.3 (Ιανουά-

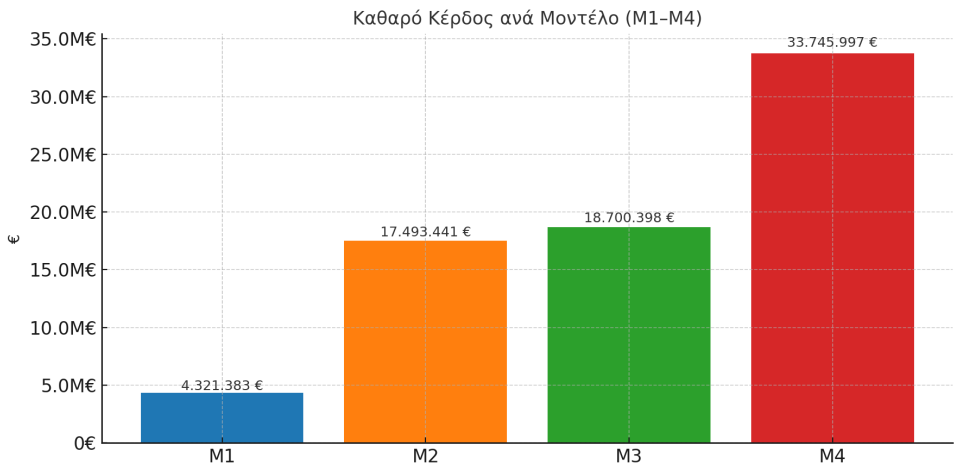
ριος, 0.56 κύκλοι/ημέρα) έως 29.3 (Οκτώβριος, 0.95 κύκλοι/ημέρα), με αύξηση κατά τους φθινοπωρινούς μήνες. Αυτά αποδίδονται στην ενσωμάτωση των ανεξάρτητων προσφορών capacity, οι οποίες παράγουν 5,904,417 € ετησίως (17.5% του καθαρού κέρδους) χωρίς να απαιτούν φυσική εκτέλεση στο σύνολο τους.

5.2.5 Ετήσια Συγκριτική Αποτίμηση Μοντέλων M1–M4

Στο πλαίσιο της παρούσας ανάλυσης εξετάζεται η λειτουργία ενός αυτόνομου συστήματος αποθήκευσης ενέργειας BESS (Battery Energy Storage System) υπό τέσσερα διακριτά επιχειρησιακά μοντέλα συμμετοχής στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας. Τα μοντέλα διαφοροποιούνται ως προς το εύρος των αγορών στις οποίες συμμετέχει το αυτόνομο σύστημα BESS (Προμηρησία Αγορά, Αγορά Ενέργειας Εξισορρόπησης, Αγορά Ισχύος Εξισορρόπησης) και τους λειτουργικούς περιορισμούς που διέπουν τη στρατηγική βελτιστοποίησης. Η συγκριτική αξιολόγηση των ετήσιων αποτελεσμάτων για το έτος 2024 αποκαλύπτει τη σταδιακή αύξηση της οικονομικής απόδοσης μέσω της προοδευτικής ενσωμάτωσης πρόσθετων αγορών και της άρσης λειτουργικών περιορισμών. Ο Πίνακας 5.21 παρουσιάζει τη συγκεντρωτική σύγκριση οικονομικών μεγεθών, ενώ ο Πίνακας 5.22 τα τεχνικά χαρακτηριστικά λειτουργίας.

Πίνακας 5.21: Συγκριτική Ετήσια Οικονομική Απόδοση Μοντέλων M1–M4, Έτος 2024

Μέγεθος	M1	M2	M3	M4
<i>Έσοδα ανά Αγορά (€)</i>				
Έσοδα Εκφόρτισης DAM	8,516,236	587,908	629,202	19,167,373
Έσοδα mFRR Up Energy	—	19,040,590	16,823,866	25,852,523
Έσοδα mFRR Up Capacity	—	—	927,059	1,163,711
Έσοδα mFRR Down Capacity	—	—	2,406,931	4,740,706
Συνολικά Έσοδα	8,516,236	19,628,498	20,787,058	50,924,312
<i>Κόστη ανά Αγορά (€)</i>				
Κόστος Φόρτισης DAM	4,194,853	27,151	60,408	7,236,262
Κόστος mFRR Down Energy	—	2,107,927	2,026,253	9,942,053
Συνολικό Κόστος	4,194,853	2,135,078	2,086,660	17,178,315
Καθαρό Κέρδος (€)	4,321,383	17,493,441	18,700,398	33,745,997
<i>Συγκριτικές Μεταβολές</i>				
Αύξηση έναντι προηγ. μοντέλου (%)	—	+304.8	+6.9	+80.4
Αύξηση έναντι M1 (%)	—	+304.8	+332.6	+680.6



Σχήμα 5.45: Συγκριτική εξέλιξη καθαρού κέρδους των τεσσάρων μοντέλων λειτουργίας

Πίνακας 5.22: Συγκριτική Ετήσια Τεχνική Απόδοση Μοντέλων M1–M4, Έτος 2024

Μέγεθος	M1	M2	M3	M4
<i>Ενεργειακή Διακίνηση</i>				
Συνολική Φόρτιση (MWh)	58,469	70,084	63,073	42,150
Συνολική Εκφόρτιση (MWh)	58,477	70,092	63,081	42,158
Μεταβολή έναντι προηγ. (%)	—	+19.9	-10.0	-33.2
Μεταβολή έναντι M1 (%)	—	+19.9	+7.9	-27.9
<i>Κύκλοι Λειτουργίας</i>				
Μέσος Όρος Κύκλων/Ημέρα	1.00	1.20	1.08	0.72
Μεταβολή έναντι προηγ. (%)	—	+20.0	-10.0	-33.3
Μεταβολή έναντι M1 (%)	—	+20.0	+8.0	-28.0

Πίνακας 5.23: Δείκτες Αποδοτικότητας και Οικονομικής Απόδοσης — Μοντέλα M1–M4

Δείκτης	M1	M2	M3	M4
<i>Αποδοτικότητα Ενεργειακής Διακίνησης</i>				
Κέρδος ανά MWh Throughput (€/MWh)	73.9	249.5	296.5	800.6
<i>Αποδοτικότητα Κύκλων Λειτουργίας</i>				
Κέρδος ανά Κύκλο (€/cycle)	11,810	39,939	47,462	128,312

Πίνακας 5.24: Συμμετοχή αγοράς στο κέρδος — Μοντέλα M1–M4

Πηγή Κέρδους	M1	M2	M3	M4
<i>Απόλυτες Τιμές (€)</i>				
DAM Net Profit	4,321,383	560,757	568,794	11,931,111
mFRR Energy Net Profit	—	16,932,663	14,797,613	15,910,470
mFRR Capacity Payments	—	—	3,333,990	5,904,417
<i>Ποσοστιαία Συμμετοχή (%)</i>				
DAM (%)	100.0	3.2	3.0	35.4
mFRR Energy (%)	—	96.8	79.1	47.1
mFRR Capacity (%)	—	—	17.8	17.5

5.2.5.1 Οικονομική Απόδοση και Κατανομή Εσόδων

Το Μοντέλο M1 αποτελεί τη βάση σύγκρισης, επιτυγχάνοντας ετήσιο καθαρό κέρδος 4,321,383 € μέσω αποκλειστικής συμμετοχής του αυτόνομου BESS στην Προμερήσια Αγορά. Η στρατηγική βασίζεται στην εκμετάλλευση των ενδοημερήσιων διαφορών τιμών, με φόρτιση κατά τις περιόδους χαμηλών τιμών (κόστος 4,194,853 €) και εκφόρτιση κατά τις ώρες αιχμής (έσοδα 8,516,236 €).

Η εισαγωγή της Αγοράς Ενέργειας Εξισορρόπησης (mFRR Energy) στο Μοντέλο M2 προκαλεί θεμελιώδη μετατόπιση της στρατηγικής συμμετοχής του αυτόνομου BESS, επιτυγχάνοντας ετήσιο κέρδος 17,493,441 €, αύξηση 304.8% έναντι του M1. Παρατηρείται ότι το σύστημα εγκαταλείπει σχεδόν πλήρως τη DAM (έσοδα μόλις 587,908 €, 3.0% των συνολικών εσόδων) και στρέφεται στην εκμετάλλευση των τιμών της mFRR. Το 97.0% των εσόδων προέρχεται από την mFRR Up Energy (19,040,590 €). Η αύξηση οφείλεται σε δύο συνδυαστικούς παράγοντες: (α) τα spreads μεταξύ τιμών mFRR Up Energy και

mFRR Down Energy μοιάζουν να είναι συστηματικά υψηλότερα από τα ενδοημερήσια spreads της DAM, (β) τη δυνατότητα βελτιστοποίησης σε επίπεδο τετάρτου (15 λεπτά) αντί ωριαίας διακριτοποίησης, επιτρέποντας τετραπλασιασμό των διαθέσιμων χρονικών παραθύρων συναλλαγών εντός κάθε ημέρας (από 24 σε 96 παράθυρα).

Το Μοντέλο M3 προσθέτει την Αγορά Ισχύος Εξισορρόπησης (mFRR Capacity) στη στρατηγική συμμετοχής του αυτόνομου BESS, διατηρώντας ίδια κατεύθυνση προσφορών με αυτή των προσφορών στην DAM, επιτυγχάνοντας ετήσιο κέρδος 18,700,398 €, αύξηση 6.9% έναντι του M2 (προηγούμενο μοντέλο) και 332.6% έναντι του M1. Τα capacity payments συνεισφέρουν 3,333,990 € (17.8% του καθαρού κέρδους), παρέχοντας σταθερή αποζημίωση. Η προσθήκη αυτού επιτρέπει στο μοντέλο βελτιστοποίησης να μειώσει την ένταση λειτουργίας της αποθηκευτικής διάταξης, καθώς δεν απαιτείται πλέον η μεγιστοποίηση φυσικών συναλλαγών για επίτευξη βέλτιστου κέρδους.

Το Μοντέλο M4 άρει τον περιορισμό κατευθυντικής συμβατότητας, επιτρέποντας ανεξάρτητες προσφορές capacity από το αυτόνομο BESS, και επιτυγχάνει ετήσιο κέρδος 33,745,997 €, αύξηση 80.4% έναντι του M3 (προηγούμενο μοντέλο), 92.9% έναντι του M2, και 680.6% έναντι του M1. Η αποσύζευξη απελευθερώνει το σύστημα να εκμεταλλεύεται ταυτόχρονα spreads μεταξύ όλων των αγορών. Το αυτόνομο BESS μπορεί πλέον να δηλώνει Up Capacity (δέσμευση να παρέχει ανοδική εφεδρεία) ενώ ταυτόχρονα φορτίζει στη DAM, ή να δηλώνει Down Capacity ενώ εκφορτίζει στη DAM. Αυτές οι αντίρροπες θέσεις αλληλοαντισταθμίζονται φυσικά στο επίπεδο της μπαταρίας—η καθαρή ενεργειακή ροή είναι μηδενική ή ελάχιστη—αλλά παράγουν θετικό οικονομικό αποτέλεσμα μέσω των διαφορών των τιμών μεταξύ αγορών. Παρατηρείται σημαντική μεταβολή στην κατανομή εσόδων: η DAM επανέρχεται ως κύρια πηγή με 19,167,373 € (37.6% συνολικών εσόδων), αύξηση 2,947% από το M3, ενώ η mFRR Up Energy παρέχει 25,852,523 € (50.8%, αύξηση 53.7% από το M3) και τα capacity payments 5,904,417 € (11.6%, αύξηση 77.1% από το M3).

5.2.5.2 Τεχνική Λειτουργία και Ενεργειακή Διακίνηση

Η φυσική δραστηριότητα του αυτόνομου BESS παρουσιάζει σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των μοντέλων. Η αποθηκευτική διάταξη στο M1 λειτουργεί με 366 πλήρεις κύκλους ετησίως (1.00 κύκλοι/ημέρα), διακινώντας 58,469 MWh φόρτισης και 58,477 MWh εκφόρτισης. Στο M2 το αυτόνομο BESS εντατικοποιεί τη λειτουργία στο ανώτατο επιτρεπόμενο όριο με 438 κύκλους (1.20 κύκλοι/ημέρα), αύξηση 20.0% έναντι του M1, και ενεργειακή διακίνηση 70,084 MWh, αύξηση 19.9% έναντι του M1. Η αύξηση οφείλεται στη βελτιστοποίηση σε επίπεδο τετάρτου που επιτρέπει πολλαπλές συναλλαγές εντός κάθε ώρας, καθώς το σύστημα εκμεταλλεύεται συστηματικά την υψηλότερη συχνότητα ευκαιριών arbitrage που παρέχει η αγορά εξισορρόπησης.

Στο M3 το αυτόνομο BESS μειώνει τους κύκλους του σε 394 (1.08 κύκλοι/ημέρα), μείωση 10.0% έναντι του M2 (προηγούμενο μοντέλο) αλλά αύξηση 8.0% έναντι του M1, και τη διακίνηση σε 63,073 MWh, μείωση 10.0% έναντι του M2 αλλά αύξηση 7.9% έναντι του M1. Η μείωση έναντι του M2 οφείλεται στις πληρωμές capacity που επιτρέπουν στο σύστημα να επιτυγχάνει βέλτιστη οικονομική απόδοση χωρίς την ανάγκη μεγιστοποίησης των φυσικών κινήσεων, καθώς η αποζημίωση capacity παρέχει βασικό εισόδημα ακόμα και χωρίς ενεργοποίηση.

Το M4 επιτυγχάνει την υψηλότερη κερδοφορία με τη χαμηλότερη φυσική δραστηριότητα: το αυτόνομο BESS πραγματοποιεί 263 κύκλους (0.72 κύκλοι/ημέρα), μείωση 33.3% έναντι του M3 (προηγούμενο μοντέλο), 40.0% έναντι του M2, και 28.0% έναντι του M1, με πραγματική ενεργειακή διακίνηση 42,150 MWh, μείωση 33.2% έναντι του M3, 39.9% έναντι του M2, και 27.9% έναντι του M1. Η μείωση αυτή αποτελεί κρίσιμο εύρημα: το M4 επιτυγχάνει 7.81 φορές το κέρδος του M1 με 28.0% λιγότερους κύκλους, αποδεικνύοντας ότι η αύξηση απόδοσης επιτυγχάνεται μέσω εξυπνότερης αξιοποίησης

πολλαπλών δια-αγοραστικών spreads και όχι μέσω εντατικοποίησης λειτουργίας. Η δέσμευση capacity παράγει σημαντικά έσοδα (5,904,417 €), επιτρέποντας επιλεκτική συμμετοχή μόνο στις υψηλότερης αξίας ενεργειακές συναλλαγές, ενώ οι αντίρροπες θέσεις μειώνουν την πραγματική φυσική καταπόνηση της μπαταρίας.

5.2.5.3 Αποδοτικότητα και Οικονομικοί Δείκτες

Ο Πίνακας 5.23 παρουσιάζει κρίσιμους δείκτες αποδοτικότητας που αποκαλύπτουν τη σχέση μεταξύ φυσικής λειτουργίας και οικονομικής απόδοσης του αυτόνομου BESS. Το κέρδος ανά MWh ενεργειακής διακίνησης αυξάνεται από 73.9 €/MWh (M1) σε 249.5 €/MWh (M2), σε 296.5 €/MWh (M3), και τελικά σε 800.6 €/MWh (M4), επιτυγχάνοντας πολλαπλασιαστή 10.83 έναντι του M1. Αντίστοιχα, το κέρδος ανά κύκλο λειτουργίας αυξάνεται από 11,810 €/cycle (M1) σε 39,939 €/cycle (M2), σε 47,462 €/cycle (M3), και σε 128,312 €/cycle (M4), πολλαπλασιαστής 10.86 έναντι του M1.

5.2.5.4 Επίδραση στη Διάρκεια Ζωής

Από πλευράς διάρκειας ζωής μπαταρίας, το M4 αναδεικνύεται ως βέλτιστη επιλογή: επιτυγχάνει την υψηλότερη κερδοφορία με τη χαμηλότερη γήρανση, συνδυάζοντας μέγιστη οικονομική απόδοση με ελαχιστοποίηση φθοράς. Το M2 και M3, παρά την υψηλή κερδοφορία, λειτουργούν στο ή κοντά στο μέγιστο όριο κύκλων (1.20 και 1.08 κύκλοι/ημέρα αντίστοιχα), επιταχύνοντας τη γήρανση της μπαταρίας. Το M1 παρουσιάζει ισορροπημένη λειτουργία (1.00 κύκλοι/ημέρα).

Συμπερασματικά, η εξέλιξη από το M1 στο M4 αποδεικνύει την εκθετική αύξηση οικονομικής αξίας αυτόνομων συστημάτων BESS μέσω της ενσωμάτωσης πρόσθετων αγορών και της άρσης λειτουργικών περιορισμών. Το M4 αποτελεί το βέλτιστο μοντέλο συμμετοχής αυτόνομου BESS, επιτυγχάνοντας μειωμένη καταπόνηση, αποδεικνύοντας την κρισιμότητα της πλήρους λειτουργικής ευελιξίας, των ανεξάρτητων προσφορών και της αλληλοαντιστάθμισης αυτών ανάμεσα σε mFRR και DAM για μεγιστοποίηση της οικονομικής αξίας αυτόνομων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας.

5.2.5.5 Συμπερασματική Αξιολόγηση

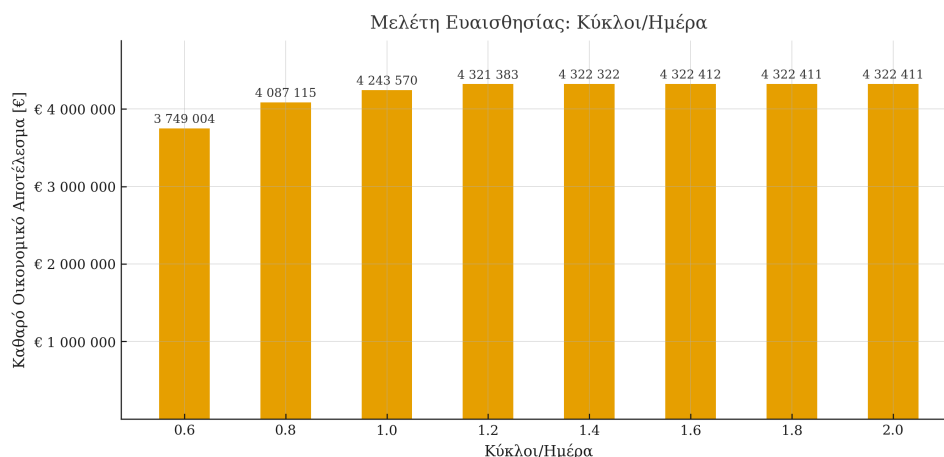
Η συγκριτική ανάλυση των τεσσάρων μοντέλων αποδεικνύει ότι η συμμετοχή του αυτόνομου BESS στο Μοντέλο M4 αποτελεί τη βέλτιστη στρατηγική, επιτυγχάνοντας ετήσιο κέρδος 33,745,997 € με σημαντικά μειωμένη φυσική καταπόνηση (0.72 κύκλοι/ημέρα). Η άρση του περιορισμού κατευθυντικής συμβατότητας και η δυνατότητα αλληλοαντιστάθμισης θέσεων μεταξύ DAM και mFRR αποτελούν τους καθοριστικούς παράγοντες της υπεροχής του M4, προσφέροντας αύξηση 80.4% έναντι του M3 και 680.6% έναντι του M1. Αξιοσημείωτο είναι ότι η προσθήκη της αγοράς ισχύος εξισορρόπησης (capacity market) στο Μοντέλο M3 παρήγαγε περιορισμένη οικονομική βελτίωση (+6.9% έναντι του M2), υποδηλώνοντας ότι τα capacity payments από μόνα τους δεν επαρκούν για σημαντική αύξηση της κερδοφορίας όταν υπάρχουν περιορισμοί στην επιχειρησιακή ευελιξία. Αντίθετα, η συνδυαστική εκμετάλλευση όλων των αγορών χωρίς λειτουργικούς περιορισμούς (M4) ξεκλειδώνει την πλήρη οικονομική αξία του συστήματος αποθήκευσης, επιτρέποντας στο αυτόνομο BESS να μεγιστοποιεί τα κέρδη μέσω στρατηγικής κατανομής συναλλαγών και ελαχιστοποίησης της φθοράς της μπαταρίας.

5.3 Μελέτη Ευαισθησίας

5.3.1 Μελέτη Ευαισθησίας — Μοντέλο M1 — Συμμετοχή στην Προημερήσια Αγορά

Η ανάλυση ευαισθησίας για το σενάριο αποκλειστικής συμμετοχής στην DAM δείχνει ότι η κερδοφορία εξαρτάται πρωτίστως από τη *διάρκεια/χωρητικότητα* (h) και την *ονομαστική ισχύ* (MW), ενώ το *ημερήσιο όριο κύκλων* είναι, εκτός ακραίων τιμών, μη δεσμευτικό.

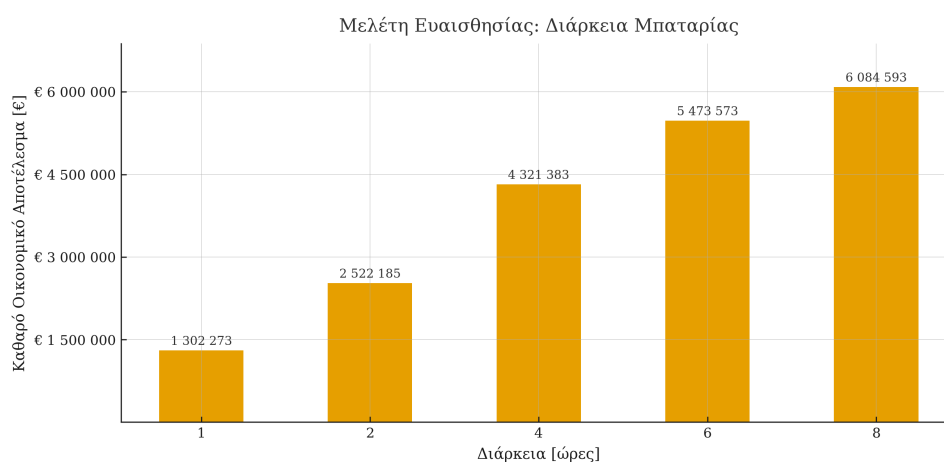
5.3.1.1 Επίδραση Ημερήσιου Ορίου Κύκλων



Σχήμα 5.46: Ευαισθησία μηνιαίου καθαρού κέρδους ως προς το ημερήσιο όριο κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης

Στο Σχήμα 5.46 παρατηρείται ασθενής εξάρτηση της κερδοφορίας από το ημερήσιο όριο κύκλων. Για το εύρος 0.6–2.0 κύκλοι/ημέρα, το ετήσιο καθαρό κέρδος κυμαίνεται από 3.75 M€ (0.6 κύκλοι/ημέρα) έως 4.32 M€ (≥ 1.2 κύκλοι/ημέρα). Οι καμπύλες για το εύρος 1.2–2.0 κύκλοι/ημέρα είναι σχεδόν συνεπίπεδες, με οριακή βελτίωση 13.2% κατά τη μετάβαση από 0.6 σε 1.0 κύκλοι/ημέρα. Για τιμές ≥ 1.2 κύκλοι/ημέρα, οι διαφορές είναι ελάχιστες ($< 0.02\%$), υποδηλώνοντας ότι το όριο κύκλων *δεν ενεργοποιείται* στο τυπικό προφίλ τιμών της DAM. Η μοναδική ουσιαστική υποβάθμιση εμφανίζεται στο 0.6 κύκλοι/ημέρα, όπου περιορίζεται εμφανώς η δυνατότητα arbitrage. Το αποτέλεσμα αυτό υποδηλώνει ότι το σύστημα αποθήκευσης *δεν απαιτεί πλήρεις ημερήσιους κύκλους* για τη βέλτιστη αξιοποίηση των arbitrage ευκαιριών, καθώς οι μερικοί κύκλοι επαρκούν για την αποτελεσματική σύλληψη των ενδοημερήσιων spreads στη βέλτιστη συμμετοχή.

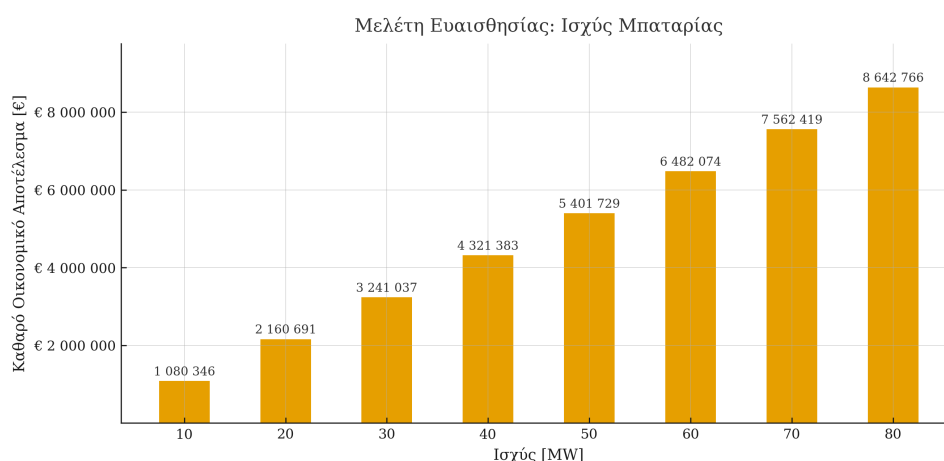
5.3.1.2 Επίδραση Διάρκειας Αποθηκευτικής Διάταξης



Σχήμα 5.47: Ευαισθησία μηνιαίου καθαρού κέρδους ως προς τη διάρκεια της αποθηκευτικής διάταξης

Το Σχήμα 5.47 καταδεικνύει ότι η διάρκεια του BESS εμφανίζει *σημαντική επίδραση* στην κερδοφορία. Για σταθερή ισχύ 40 MW, το ετήσιο κέρδος αυξάνεται από 1.30 Μ€ (1h) σε 6.08 Μ€ (8h), καταγράφοντας συνολική αύξηση 367%. Η μετάβαση από 1h σε 2h επιφέρει βελτίωση 93.7% (από 1.30 σε 2.52 Μ€), ενώ η αύξηση από 2h σε 4h συνοδεύεται από αύξηση 71.3% (από 2.52 σε 4.32 Μ€). Η περαιτέρω μετάβαση από 4h σε 6h προσφέρει επιπλέον βελτίωση 26.7% (από 4.32 σε 5.47 Μ€), ενώ η αύξηση από 6h σε 8h επιφέρει αύξηση 11.2% (από 5.47 σε 6.08 Μ€). Η κερδοφορία παρουσιάζει έντονη διαφοροποίηση για διάρκειες 1h έως 4h, με την υψηλότερη οριακή απόδοση να εμφανίζεται στο εύρος 2–4h. Το εύρημα αυτό υποδηλώνει ότι διάρκειες >6h προσφέρουν περιορισμένη πρόσθετη αξία υπό το παρόν προφίλ τιμών της DAM.

5.3.1.3 Επίδραση Ονομαστικής Ισχύος



Σχήμα 5.48: Ευαισθησία μηνιαίου καθαρού κέρδους ως προς την ονομαστική ισχύ της αποθηκευτικής διάταξης

Στο Σχήμα 5.48 η κερδοφορία κλιμακώνεται σχεδόν γραμμικά με την ισχύ στο εύρος 10–80 MW, χωρίς ένδειξη κορεσμού. Για σταθερή διάρκεια 4h, το ετήσιο κέρδος αυξάνεται από 1.08 Μ€ (10 MW) σε

8.64 Μ€ (80 MW), με εξαιρετικά σταθερή γραμμικότητα ($R^2 \approx 1.00$) και μέσο ρυθμό 108 k€/MW.

5.3.1.3.1 Σύνοψη ευρημάτων (DAM).

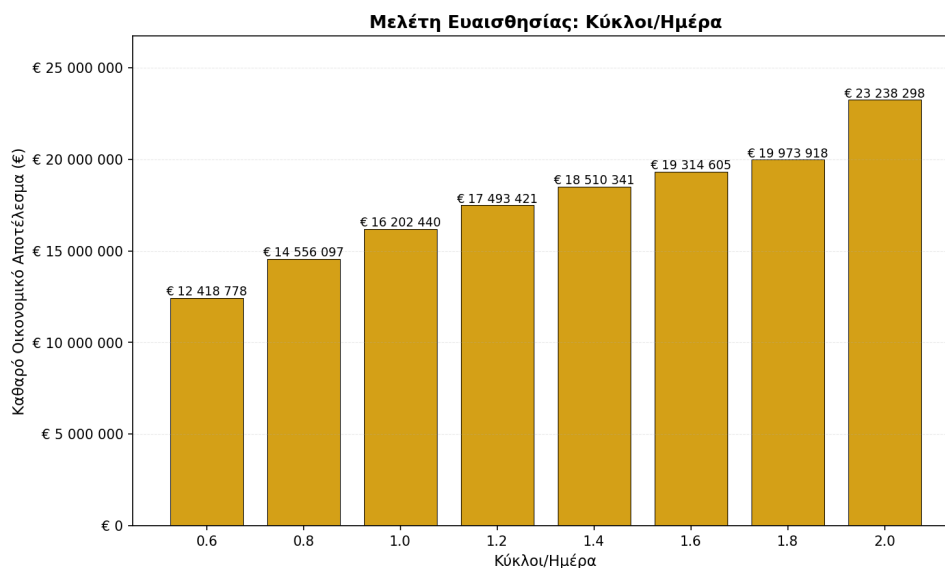
- **Όριο κύκλων:** Ουσιώδης επίπτωση μόνο στο **0.6** κύκλου/ημέρα· για ≥ 1.2 οι διαφορές είναι *οριακές* $\Rightarrow$ ο περιορισμός είναι *μη δεσμευτικός* στα περισσότερα σενάρια. Το σύστημα δεν απαιτεί πλήρεις κύκλους για βέλτιστη απόδοση.
- **Διάρκεια:** Μεγάλη διαφοροποίηση έως **6 h**, κατόπιν *φθίνουσες οριακές αποδόσεις*. Η κερδοφορία ανά ώρα διάρκειας μεγιστοποιείται στο εύρος 2–4h.
- **Ισχύς:** *Σχεδόν γραμμική* βελτίωση στο **10–80 MW**, χωρίς σαφή ένδειξη κορεσμού.

Για DAM, η προτεραιοποίηση *ισχύος* και *μέτριας διάρκειας* (3–4 h) είναι αποτελεσματικότερη. Η στόχευση > 1.2 κύκλων/ημέρα δεν αυξάνει ουσιαστικά το κέρδος υπό το παρόν προφίλ τιμών και μπορεί να επιτείνει τα κόστη γήρανσης.

5.3.2 Μελέτη Ευαισθησίας — Μοντέλο M2 — Συμμετοχή σε DAM και mFRR Energy

Η ανάλυση ευαισθησίας για το Μοντέλο M2 (συμμετοχή σε DAM και mFRR energy) αποσκοπεί στη διερεύνηση της επίδρασης κρίσιμων τεχνικών παραμέτρων στην οικονομική απόδοση της αποθηκευτικής διάταξης. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η κερδοφορία επηρεάζεται σημαντικά και από τις τρεις εξεταζόμενες παραμέτρους, με την *ονομαστική ισχύ* (MW) να ασκεί τη μεγαλύτερη επίδραση. Το μοντέλο εμφανίζει σημαντική ευαισθησία στη *διάρκεια/χωρητικότητα* (h) και το *ημερήσιο όριο κύκλων*, καθώς η συνδυασμένη συμμετοχή σε δύο αγορές ενέργειας (DAM και mFRR energy) επιτρέπει ευρύτερη αξιοποίηση τιμικών ευκαιριών σε σύγκριση με το μονο-αγοραίο Μοντέλο M1.

5.3.2.1 Επίδραση Ημερήσιου Ορίου Κύκλων



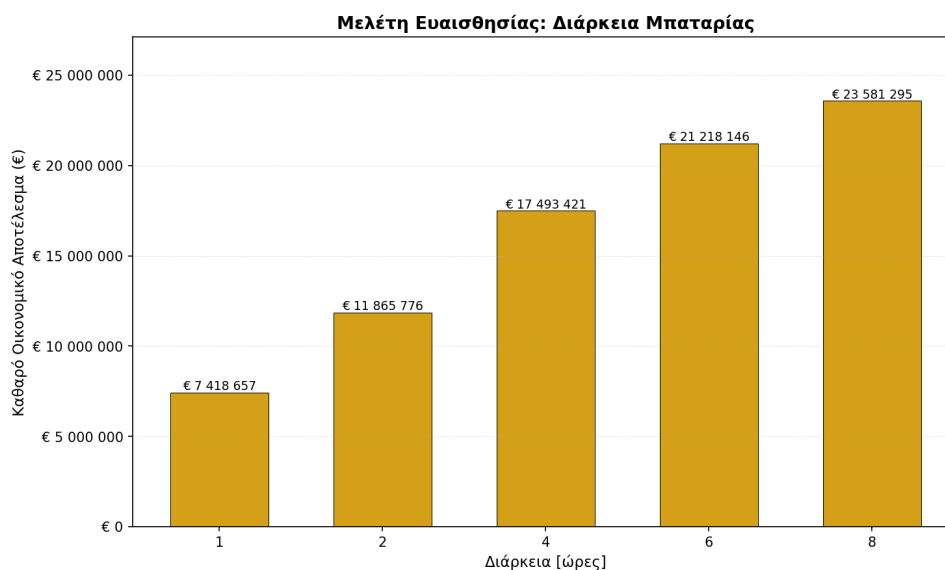
Σχήμα 5.49: Ευαισθησία καθαρού κέρδους ως προς το ημερήσιο όριο κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης

Το Σχήμα 5.49 παρουσιάζει την επίδραση του ημερήσιου ορίου κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης στην ετήσια κερδοφορία του Μοντέλου M2. Για το εξεταζόμενο εύρος 0.6–2.0 κύκλοι/ημέρα, το ετήσιο καθαρό κέρδος αυξάνεται από 12.42 Μ€ (0.6 κύκλοι/ημέρα) έως 23.24 Μ€ (2.0 κύκλοι/ημέρα), καταγράφοντας συνολική διακύμανση 87.1%. Η αύξηση της κερδοφορίας είναι σταδιακή και συνεχής σε όλο το φάσμα τιμών, με έντονη μείωση της οριακής συνεισφοράς σε υψηλότερα επίπεδα.

Συγκεκριμένα, η μετάβαση από 0.6 σε 0.8 κύκλοι/ημέρα επιφέρει αύξηση της τάξης του 17.2% (από 12.42 σε 14.56 Μ€), ενώ η περαιτέρω αύξηση από 0.8 σε 1.0 κύκλοι/ημέρα προσφέρει επιπλέον βελτίωση 11.3% (από 14.56 σε 16.20 Μ€). Η μετάβαση από 1.0 σε 1.2 κύκλοι/ημέρα συνοδεύεται από αύξηση της τάξης του 8.0% (από 16.20 σε 17.49 Μ€), ενώ από 1.2 σε 1.4 κύκλοι/ημέρα η αύξηση είναι 5.8% (από 17.49 σε 18.51 Μ€). Η περαιτέρω μετάβαση από 1.4 σε 1.6 κύκλοι/ημέρα επιφέρει αύξηση 4.3% (από 18.51 σε 19.31 Μ€), ενώ από 1.6 σε 1.8 κύκλοι/ημέρα παρατηρείται αύξηση 3.4% (από 19.31 σε 19.97 Μ€). Τέλος, από 1.8 σε 2.0 κύκλοι/ημέρα σημειώνεται σημαντικό άλμα 16.3% (από 19.97 σε 23.24 Μ€).

Η παρατηρούμενη συμπεριφορά αντανακλά τη φύση του Μοντέλου M2, στο οποίο η ταυτόχρονη συμμετοχή σε δύο αγορές ενέργειας (DAM και mFRR energy) απαιτεί αυξημένη λειτουργική ευελιξία σε σύγκριση με το μονο-αγοραίο Μοντέλο M1. Η βελτιστοποίηση επωφελείται από την αυξημένη δυνατότητα εκτέλεσης κύκλων arbitrage για την αξιοποίηση τιμικών ευκαιριών σε αμφότερες τις αγορές. Παρατηρείται φθίνουσα οριακή απόδοση στο εύρος 1.0–1.8 κύκλοι/ημέρα, με σημαντική ανάκαμψη στα 2.0 κύκλοι/ημέρα.

5.3.2.2 Επίδραση Διάρκειας Αποθηκευτικής Διάταξης

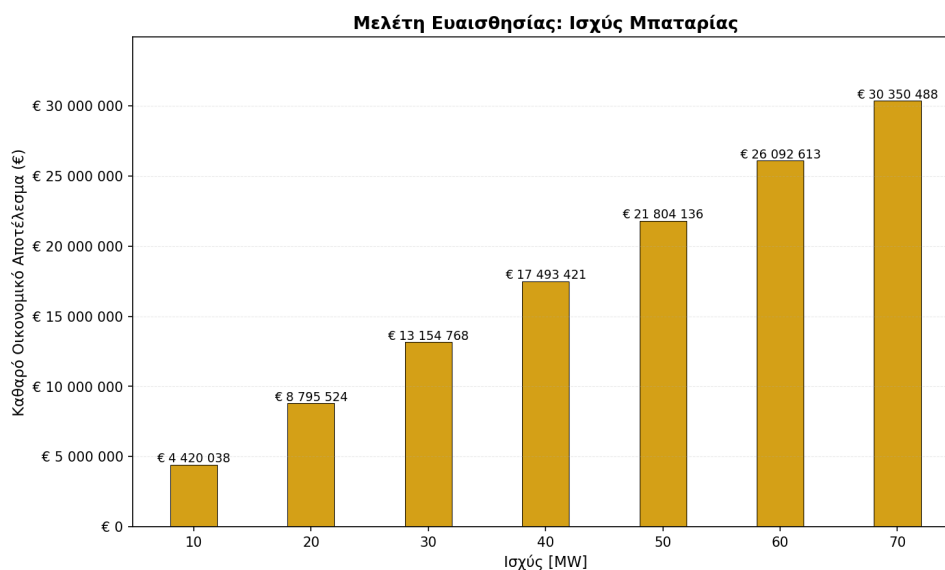


Σχήμα 5.50: Ευαισθησία μηνιαίου καθαρού κέρδους ως προς τη διάρκεια της αποθηκευτικής διάταξης

Το Σχήμα 5.50 αποτυπώνει τη σχέση μεταξύ της διάρκειας της αποθηκευτικής διάταξης και της μηνιαίας κερδοφορίας. Η διάρκεια επιδεικνύει *σημαντική επίδραση* στην οικονομική απόδοση του Μοντέλου M2. Για σταθερή ισχύ 40 MW, το ετήσιο καθαρό κέρδος αυξάνεται από 7.42 Μ€ (1h) σε 23.58 Μ€ (8h), καταγράφοντας συνολική αύξηση 217.9%. Η μετάβαση από 1h σε 2h επιφέρει βελτίωση 60.0% (από 7.42 σε 11.87 Μ€), ενώ η αύξηση από 2h σε 4h συνοδεύεται από αύξηση 47.4% (από 11.87 σε 17.49 Μ€). Η περαιτέρω μετάβαση από 4h σε 6h προσφέρει επιπλέον βελτίωση 21.3% (από 17.49 σε 21.22 Μ€), ενώ η αύξηση από 6h σε 8h επιφέρει αύξηση 11.1% (από 21.22 σε 23.58 Μ€).

Η καταγεγραμμένη ευαισθησία στη διάρκεια είναι *σημαντικά υψηλότερη* σε σύγκριση με το Μοντέλο M4 (το οποίο παρουσίασε μόνο 11.1% συνολική αύξηση) αλλά μικρότερη από το Μοντέλο M1 (367%). Το εύρημα αυτό υποδεικνύει ότι το Μοντέλο M2 βασίζεται ουσιαστικά στη χωρητικότητα αποθηκευμένης ενέργειας για την αξιοποίηση τιμικών διαφορών (spreads) τόσο στη DAM όσο και στην αγορά εξισορροπητικής ενέργειας mFRR. Οι οριακές αποδόσεις εμφανίζουν *φθίνουσα τάση* αλλά παραμένουν σημαντικές σε όλο το εξεταζόμενο εύρος, με τη διάρκεια 4–6h να παρουσιάζει βέλτιστη ισορροπία μεταξύ κεφαλαιουχικού κόστους και λειτουργικών ωφελειών.

5.3.2.3 Επίδραση Ονομαστικής Ισχύος



Σχήμα 5.51: Ευαισθησία καθαρού κέρδους ως προς την ονομαστική ισχύ της αποθηκευτικής διάταξης

Το Σχήμα 5.51 απεικονίζει τη σχέση μεταξύ ονομαστικής ισχύος και ετήσιας κερδοφορίας. Παρατηρείται *σχεδόν γραμμική* σχέση κέρδους-ισχύος στο εξεταζόμενο εύρος 10–70 MW. Για σταθερή διάρκεια 4h, το ετήσιο καθαρό κέρδος του Μοντέλου M2 αυξάνεται από 4.42 M€ (10 MW) σε 30.35 M€ (70 MW), επιδεικνύοντας υψηλό βαθμό γραμμικότητας με μέσο ρυθμό αύξησης ~432 k€/MW. Το Μοντέλο M2 επιτυγχάνει σημαντικά ανώτερη κερδοφορία έναντι του Μοντέλου M1 σε όλο το φάσμα ισχύος, καταγράφοντας βελτίωση της τάξης των 4.0 φορών ανά MW.

Η παρατηρούμενη σχεδόν γραμμική αύξηση της κερδοφορίας υποδηλώνει ότι η ελληνική ενεργειακή αγορά διατηρεί υψηλή απορροφητική ικανότητα για αποθηκευτικά συστήματα έως 70 MW, χωρίς σημαντικά φαινόμενα κορεσμού. Η δυνατότητα του Μοντέλου M2 να συμμετέχει σε δύο διακριτές αγορές ενέργειας (DAM και mFRR energy) διευρύνει το φάσμα των διαθέσιμων ευκαιριών arbitrage και ενισχύει την αποτελεσματική αξιοποίηση της εγκατεστημένης ισχύος.

5.3.2.3.1 Σύνοψη ευρημάτων (Μοντέλο M2).

- **Όριο κύκλων:** Το μοντέλο εμφανίζει σημαντική ευαισθησία με συνολική διακύμανση **87.1%** στο εύρος 0.6–2.0 κύκλοι/ημέρα. Σημαντικές βελτιώσεις παρατηρούνται σε όλο το εξεταζόμενο εύρος, με ισχυρές αυξήσεις στις χαμηλές τιμές (17.2% και 11.3%), φθίνουσα οριακή απόδοση στο εύρος 1.0–1.8 (από 8.0% έως 3.4%), και σημαντική ανάκαμψη στα 2.0 κύκλοι/ημέρα (16.3%). Η

επίδραση είναι σημαντικά μεγαλύτερη σε σύγκριση με το Μοντέλο M4 και το Μοντέλο M1, αντανακλώντας την ανάγκη για υψηλή λειτουργική ευελιξία στη συμμετοχή σε δύο αγορές ενέργειας.

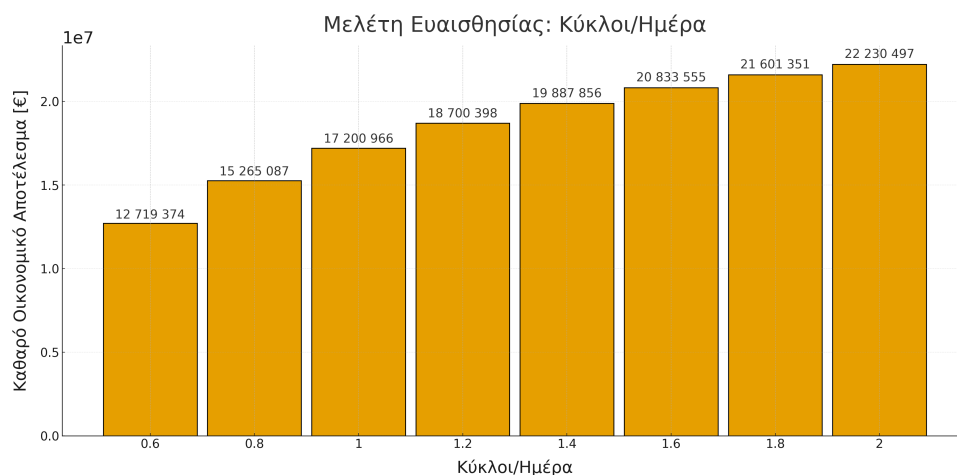
- **Διάρκεια:** Η διάρκεια επιδεικνύει σημαντική επίδραση με συνολική αύξηση κερδοφορίας **217.9%** κατά τη μετάβαση από 1h σε 8h. Οι οριακές αποδόσεις ακολουθούν φθίνουσα πορεία με ισχυρές αυξήσεις στις χαμηλές διάρκειες (60.0% και 47.4%) και μετριασμένες αυξήσεις στις υψηλές διάρκειες (21.3% και 11.1%). Το εύρος 4–6h προσφέρει βέλτιστη ισορροπία μεταξύ κεφαλαιουχικών δαπανών και λειτουργικών ωφελειών για το Μοντέλο M2.
- **Ισχύς:** Παρατηρείται *σχεδόν γραμμική* αύξηση της κερδοφορίας στο εύρος **10–70 MW** με μέσο ρυθμό ~ 432 k€/MW. Το Μοντέλο M2 υπερέχει του Μοντέλου M1 κατά συντελεστή $4.0\times$ ανά MW, ενώ παραμένει υποδεέστερο του Μοντέλου M4. Η αγορά επιδεικνύει υψηλή απορροφητική ικανότητα χωρίς σαφή ένδειξη κορεσμού στο εξεταζόμενο εύρος.

Αξιολόγηση: Το Μοντέλο M2 προσφέρει ενδιάμεση οικονομική απόδοση μεταξύ των Μοντέλων M1 και M4, με ισχυρή εξάρτηση από τις τρεις εξεταζόμενες παραμέτρους. Για τη βελτιστοποίηση της οικονομικής απόδοσης συνιστώνται ημερήσια όρια κύκλων ≥ 1.4 κύκλοι/ημέρα για μεγιστοποίηση των ευκαιριών arbitrage (με σημαντική αύξηση στα 2.0 κύκλοι/ημέρα), διάρκειες 4–6h για βέλτιστη σχέση κόστους-οφέλους, και μεγιστοποίηση της ονομαστικής ισχύος εντός των διαθέσιμων οικονομικών περιορισμών.

5.3.3 Μελέτη Ευαισθησίας — Μοντέλο M3 — Συμμετοχή σε DAM και mFRR Capacity

Η ανάλυση ευαισθησίας για το Μοντέλο M3 (συμμετοχή σε DAM, mFRR energy και mFRR capacity με περιορισμό κατευθυντικής συμβατότητας) αποσκοπεί στη διερεύνηση της επίδρασης κρίσιμων τεχνικών παραμέτρων στην οικονομική απόδοση της αποθηκευτικής διάταξης. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η *διάρκεια* αποτελεί την κυρίαρχη παράμετρο, ενώ η *ονομαστική ισχύς* διατηρεί σημαντική συνεισφορά. Το *ημερήσιο όριο κύκλων* ασκεί σημαντική επίδραση λόγω της φύσης της αγοράς εφεδρειών που παρέχει σταθερά έσοδα διαθεσιμότητας ανεξάρτητα από την ενεργοποίηση.

5.3.3.1 Επίδραση Ημερήσιου Ορίου Κύκλων

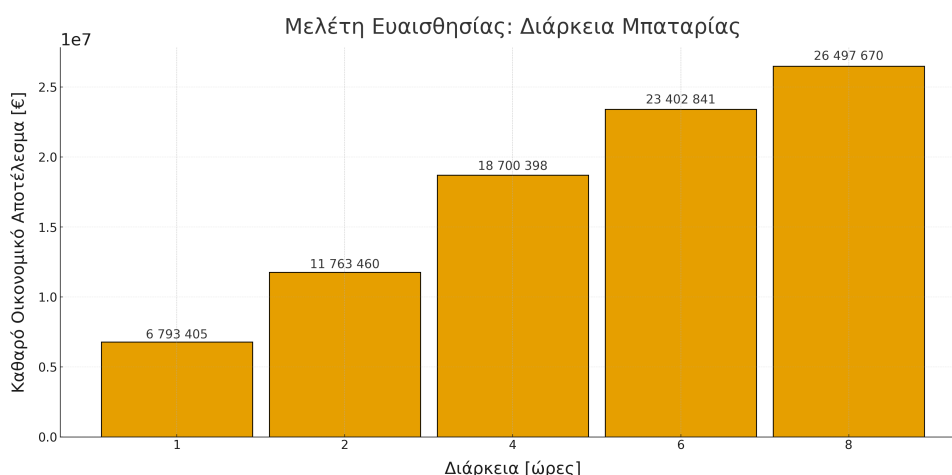


Σχήμα 5.52: Ευαισθησία καθαρού κέρδους ως προς το ημερήσιο όριο κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης

Το Σχήμα 5.52 παρουσιάζει *σημαντική ευαισθησία* στο ημερήσιο όριο κύκλων. Για το εξεταζόμενο εύρος 0.6–2.0 κύκλοι/ημέρα, το ετήσιο καθαρό κέρδος αυξάνεται από 12.72 Μ€ (0.6 κύκλοι/ημέρα) έως 22.23 Μ€ (2.0 κύκλοι/ημέρα), καταγράφοντας συνολική διακύμανση 74.8%. Οι μεγαλύτερες βελτιώσεις παρατηρούνται στα χαμηλότερα επίπεδα: η μετάβαση από 0.6 σε 0.8 κύκλοι/ημέρα επιφέρει αύξηση 20.0% (από 12.72 σε 15.27 Μ€), ενώ η μετάβαση από 0.8 σε 1.0 κύκλοι/ημέρα προσφέρει επιπλέον 12.7% (από 15.27 σε 17.20 Μ€). Η μετάβαση από 1.0 σε 1.2 κύκλοι/ημέρα συνοδεύεται από αύξηση 8.7% (από 17.20 σε 18.70 Μ€). Για τιμές άνω των 1.4 κύκλων/ημέρα η οριακή συνεισφορά μειώνεται: από 1.2 σε 1.4 η αύξηση είναι 6.3% (από 18.70 σε 19.89 Μ€), από 1.4 σε 1.6 η αύξηση είναι 4.8% (από 19.89 σε 20.83 Μ€), από 1.6 σε 1.8 η αύξηση είναι 3.7% (από 20.83 σε 21.60 Μ€), ενώ από 1.8 σε 2.0 μόλις 2.9% (από 21.60 σε 22.23 Μ€).

Η σημαντική επίδραση των κύκλων οφείλεται στον χαρακτήρα του Μοντέλου M3. Ενώ η παράλληλη συμμετοχή στην αγορά εφεδρειών (mFRR capacity) παρέχει σταθερά έσοδα διαθεσιμότητας που δεν εξαρτώνται από κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης, η συμμετοχή στη DAM και την αγορά ενέργειας εξισορρόπησης (mFRR energy) απαιτεί φυσικούς κύκλους για arbitrage, καθιστώντας το όριο κύκλων σημαντικό παράγοντα για τη συνολική απόδοση.

5.3.3.2 Επίδραση Διάρκειας Αποθηκευτικής Διάταξης

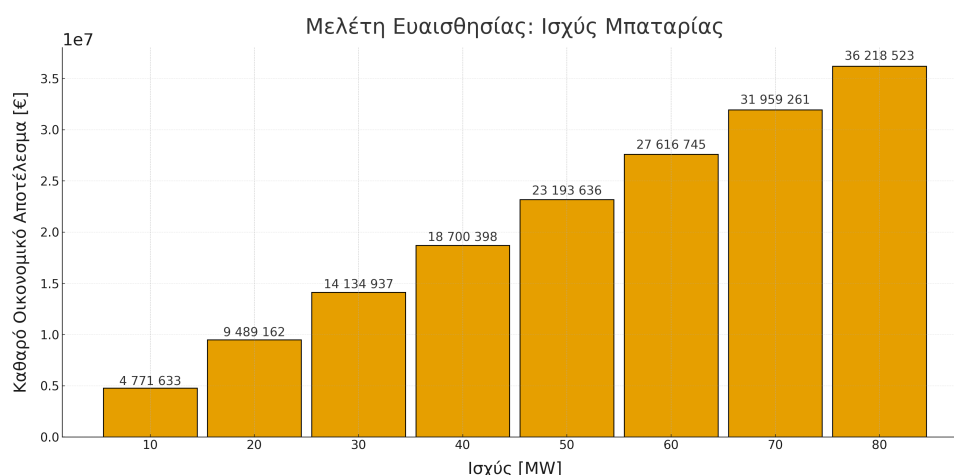


Σχήμα 5.53: Ευαισθησία μηνιαίου καθαρού κέρδους ως προς τη διάρκεια της αποθηκευτικής διάταξης

Το Σχήμα 5.53 καταδεικνύει ότι η διάρκεια έχει *εξαιρετικά μεγάλη επίδραση* και αποτελεί την κυρίαρχη παράμετρο για το Μοντέλο M3. Για σταθερή ισχύ 40 MW, το ετήσιο καθαρό κέρδος αυξάνεται από 6.79 Μ€ (1h) σε 26.50 Μ€ (8h), καταγράφοντας συνολική αύξηση 290.0%. Η μετάβαση από 1h σε 2h επιφέρει βελτίωση 73.2% (από 6.79 σε 11.76 Μ€), ενώ η αύξηση από 2h σε 4h συνοδεύεται από αύξηση 59.0% (από 11.76 σε 18.70 Μ€). Η περαιτέρω μετάβαση από 4h σε 6h προσφέρει επιπλέον βελτίωση 25.1% (από 18.70 σε 23.40 Μ€), ενώ η αύξηση από 6h σε 8h επιφέρει αύξηση 13.2% (από 23.40 σε 26.50 Μ€). Οι μεγαλύτερες οριακές αποδόσεις παρατηρούνται στο εύρος 1–4h, ενώ η φθίνουσα πορεία γίνεται έντονη μετά τις 6h.

Η εξαιρετικά υψηλή ευαισθησία στη διάρκεια οφείλεται στο ότι το Μοντέλο M3 εξακολουθεί να βασίζεται σημαντικά στη χωρητικότητα ενέργειας για την αξιοποίηση των ευκαιριών arbitrage στη DAM και την αγορά ενέργειας εξισορρόπησης. Τα έσοδα από την αγορά εφεδρειών ισχύος είναι ανεξάρτητα της διάρκειας και προσδιορίζονται κυρίως από την ονομαστική ισχύ, αλλά τα έσοδα από τις αγορές ενέργειας επωφελούνται άμεσα από την αυξημένη χωρητικότητα. Η διάρκεια παραμένει κρίσιμη παράμετρος σχεδιασμού, με το εύρος 4–6h να προσφέρει βέλτιστη ισορροπία κόστους-οφέλους.

5.3.3.3 Επίδραση Ονομαστικής Ισχύος



Σχήμα 5.54: Ευαισθησία καθαρού κέρδους ως προς την ονομαστική ισχύ της αποθηκευτικής διάταξης

Το Σχήμα 5.54 δείχνει ότι η ισχύς έχει *σημαντική επίδραση* με γραμμική σχέση κέρδους-ισχύος. Για σταθερή διάρκεια 4h, το ετήσιο κέρδος αυξάνεται από 4.77 Μ€ (10 MW) σε 36.22 Μ€ (80 MW), με μέσο ρυθμό ~449 k€/MW. Η σχέση είναι σταθερά γραμμική σε όλο το εύρος, χωρίς ενδείξεις κορεσμού.

Η ισχυρή επίδραση της ονομαστικής ισχύος οφείλεται στη διπλή συνεισφορά της: αφενός αυξάνει την ικανότητα arbitrage στη DAM και την αγορά ενέργειας εξισορρόπησης, αφετέρου καθορίζει απευθείας τα έσοδα διαθεσιμότητας από την αγορά εφεδρειών ισχύος (mFRR capacity), καθώς οι πληρωμές εφεδρειών υπολογίζονται με βάση την ονομαστική ισχύ της διάταξης. Το Μοντέλο M3 επιτυγχάνει υψηλότερη κερδοφορία ανά MW από το M1 και M2.

5.3.3.3.1 Σύνοψη ευρημάτων (Μοντέλο M3).

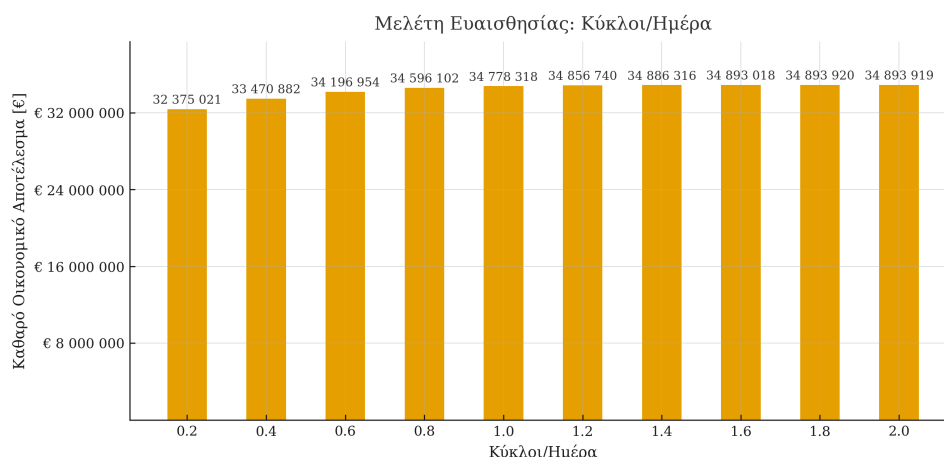
- **Όριο κύκλων:** Σημαντική ευαισθησία με συνολική διακύμανση **74.8%** στο εύρος 0.6–2.0 κύκλοι/ημέρα. Ο περιορισμός παραμένει σημαντικός παράγοντας, ιδιαίτερα στα χαμηλότερα επίπεδα. Συνιστώνται ≥ 1.2 κύκλοι/ημέρα για βέλτιστη απόδοση.
- **Διάρκεια:** Εξαιρετικά μεγάλη επίδραση με συνολική αύξηση **290.0%** (1h→8h). Είναι η κυρίαρχη παράμετρος γιατί καθορίζει την ικανότητα arbitrage στις αγορές ενέργειας, ενώ τα έσοδα εφεδρειών ισχύος είναι ανεξάρτητα της διάρκειας. Βέλτιστο εύρος: 4–6h.
- **Ισχύς:** Σημαντική επίδραση με μέσο ρυθμό ~449 k€/MW (10–80 MW). Παίζει μεγάλο ρόλο γιατί επηρεάζει τόσο το arbitrage όσο και τα έσοδα εφεδρειών—τα οποία υπολογίζονται επί της ονομαστικής ισχύος. Ανώτερη απόδοση από M1 ($4.2\times$) και M2 ($1.04\times$).

Αξιολόγηση: Το Μοντέλο M3 προσφέρει ανώτερη απόδοση από το M2, με κύρια διαφορά την εξαιρετικά υψηλή εξάρτηση από τη διάρκεια και τη συνεχιζόμενη σημαντικότητα των κύκλων. Συνιστώνται όρια κύκλων ≥ 1.2 /ημέρα, διάρκειες 4–6h (με προτεραιότητα στις υψηλότερες τιμές), και μεγιστοποίηση ισχύος. Η συμμετοχή στην αγορά εφεδρειών παρέχει σταθερότητα εσόδων και μειώνει την εξάρτηση από την αστάθεια τιμών των αγορών ενέργειας.

5.3.4 Μελέτη Ευαισθησίας — Μοντέλο M4 — Συμμετοχή σε DAM, mFRR Energy και mFRR Capacity με Ανεξάρτητες Προσφορές

Η ανάλυση ευαισθησίας για το Μοντέλο M4 (ανεξάρτητες προσφορές σε DAM, mFRR energy και mFRR capacity) δείχνει ότι η κερδοφορία επηρεάζεται κυρίως από την *ονομαστική ισχύ* (MW), ενώ η *διάρκεια/χωρητικότητα* (h) και το *ημερήσιο όριο κύκλων* εμφανίζουν ασθενή επίδραση. Η ανεξαρτησία προσφορών επιτρέπει cross-market αξιοποίηση τιμών (virtual/«λογιστικό» netting) και μειώνει την ανάγκη για υψηλό πλήθος φυσικών κύκλων.

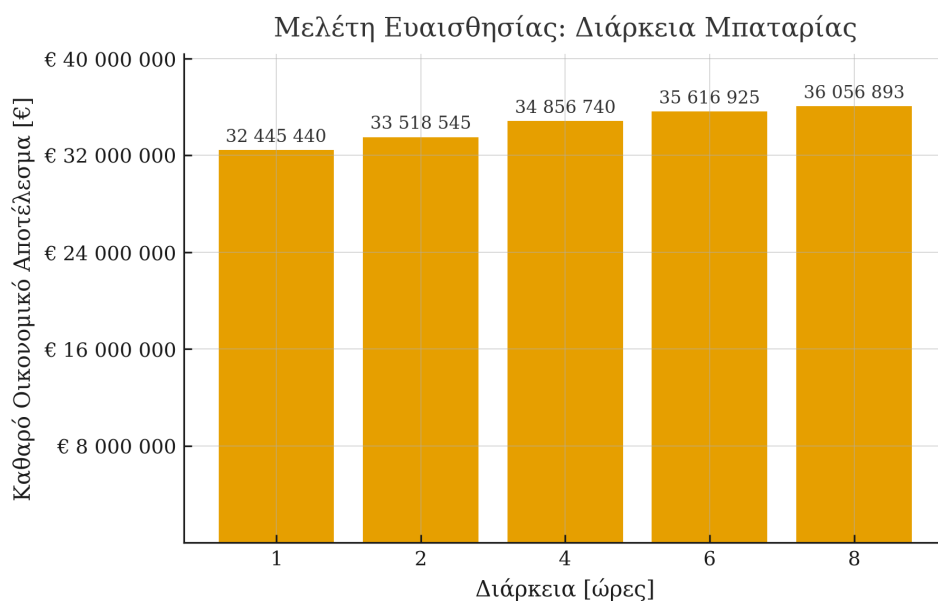
5.3.4.1 Επίδραση Ημερήσιου Ορίου Κύκλων



Σχήμα 5.55: Ευαισθησία καθαρού κέρδους ως προς το ημερήσιο όριο κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης

Στο Σχήμα 5.55 το Μοντέλο M4 παρουσιάζει *εξαιρετικά μικρή ευαισθησία* στο ημερήσιο όριο κύκλων. Για το εύρος 0.2–2.0 κύκλοι/ημέρα, το ετήσιο κέρδος κυμαίνεται από 32.38 M€ (0.2 κύκλοι/ημέρα) έως 34.89 M€ (≥ 1.4 κύκλοι/ημέρα), με συνολική διακύμανση 7.8%. Για επίπεδα ≥ 0.8 κύκλοι/ημέρα, οι καμπύλες είναι πρακτικά συνεπίπεδες. Η μετάβαση από 0.2 σε 0.4 κύκλοι/ημέρα προσφέρει αύξηση 3.4% (από 32.38 σε 33.47 M€), από 0.4 σε 0.6 αύξηση 2.2% (από 33.47 σε 34.20 M€), ενώ από 0.6 σε 0.8 μόλις 1.2% (από 34.20 σε 34.60 M€). Για τιμές από 0.8 σε 1.0 κύκλοι/ημέρα η βελτίωση είναι μόλις 0.5% (από 34.60 σε 34.78 M€), ενώ από 1.0 σε 1.2 κύκλοι/ημέρα η αύξηση είναι 0.2% (από 34.78 σε 34.86 M€). Από 1.2 σε 1.4 κύκλοι/ημέρα η αύξηση είναι επίσης 0.1% (από 34.86 σε 34.89 M€). Για τιμές ≥ 1.4 κύκλοι/ημέρα, οι διαφορές είναι αμελητέες ($< 0.01\%$). Το αποτέλεσμα συμφωνεί με τη λογική του M4, όπου οι ανεξάρτητες προσφορές διευκολύνουν το cross-market arbitrage και περιορίζουν την ανάγκη για πολλούς «βαθείς» φυσικούς κύκλους. Η στρατηγική συμμετοχής του M4 *δεν απαιτεί πλήρεις φυσικούς κύκλους*, καθώς η δυνατότητα ανεξάρτητης υποβολής προσφορών σε πολλαπλές αγορές επιτρέπει την αποτελεσματική αξιοποίηση τιμικών διαφορών χωρίς την ανάγκη πλήρους φόρτισης και εκφόρτισης της αποθηκευτικής διάταξης.

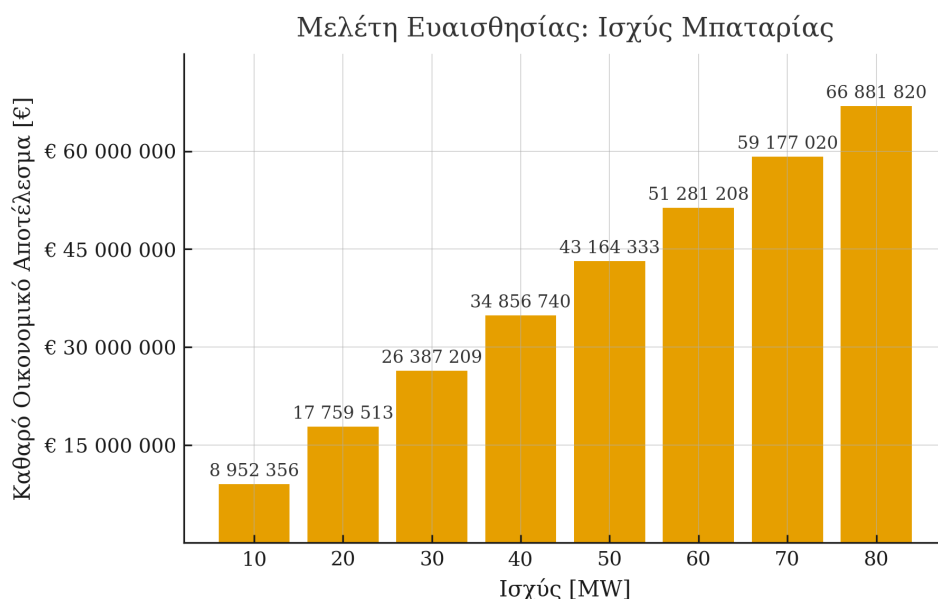
5.3.4.2 Επίδραση Διάρκειας Αποθηκευτικής Διάταξης



Σχήμα 5.56: Ευαισθησία μηνιαίου καθαρού κέρδους ως προς τη διάρκεια της αποθηκευτικής διάταξης

Το Σχήμα 5.56 καταδεικνύει ότι η διάρκεια εμφανίζει *μέτρια επίδραση* στην κερδοφορία του M4. Για σταθερή ισχύ 40 MW, το ετήσιο κέρδος αυξάνεται από 32.45 M€ (1h) σε 36.06 M€ (8h), με συνολική αύξηση 11.1%. Η μετάβαση από 1h σε 2h προσφέρει βελτίωση 3.3% (από 32.45 σε 33.52 M€), από 2h σε 4h αύξηση 4.0% (από 33.52 σε 34.86 M€), από 4h σε 6h αύξηση 2.2% (από 34.86 σε 35.62 M€), ενώ από 6h σε 8h μόλις 1.2% (από 35.62 σε 36.06 M€). Η οριακή συνεισφορά της διάρκειας είναι *φθίνουσα* και σημαντικά μικρότερη σε σύγκριση με τα Μοντέλα M1, M2 και M3, υποδεικνύοντας ότι η στρατηγική ανεξάρτητων προσφορών μειώνει την εξάρτηση από τη χωρητικότητα ενέργειας. Το M4 διατηρεί υψηλά επίπεδα κερδοφορίας σε όλο το εύρος διαρκειών, προσφέροντας μεγαλύτερη ευελιξία στην επιλογή τεχνικών χαρακτηριστικών.

5.3.4.3 Επίδραση Ονομαστικής Ισχύος



Σχήμα 5.57: Ευαισθησία καθαρού κέρδους ως προς την ονομαστική ισχύ της αποθηκευτικής διάταξης

Στο Σχήμα 5.57 παρατηρείται σχεδόν γραμμική σχέση κέρδους-ισχύος στο εύρος 10–80 MW, χωρίς ένδειξη κορεσμού. Για σταθερή διάρκεια 4h, το ετήσιο κέρδος του M4 αυξάνεται από 8.95 M€ (10 MW) σε 66.88 M€ (80 MW), με εξαιρετικά σταθερή γραμμικότητα ($R^2 \approx 0.9998$) και μέσο ρυθμό 828 k€/MW. Το M4 αποκομίζει το υψηλότερο επίπεδο κερδοφορίας σε κάθε επίπεδο ισχύος, επιτυγχάνοντας 7.7 φορές υψηλότερη κερδοφορία ανά MW σε σύγκριση με το M1 (108 k€/MW), 1.9 φορές υψηλότερη από το M2 (432 k€/MW), και 1.8 φορές υψηλότερη από το M3 (449 k€/MW). Οι ανεξάρτητες προσφορές αυξάνουν την «απορροφητικότητα» της αγοράς και μειώνουν τους χαμένους κύκλους όταν τα καθαρά spreads της DAM είναι ρηχά, επιτρέποντας την αποτελεσματική αξιοποίηση των ευκαιριών σε πολλαπλές αγορές ταυτόχρονα.

5.3.4.3.1 Σύνοψη ευρημάτων (Μοντέλο M4).

- **Όριο κύκλων:** Ουσιαστική επίπτωση μόνο κάτω από **0.8** κύκλοι/ημέρα· για ≥ 0.8 η καμπύλη είναι σχεδόν επίπεδη $\Rightarrow$ ο περιορισμός είναι *μη δεσμευτικός*. Το M4 είναι το *λιγότερο* ευαίσθητο στα όρια κύκλων και δεν απαιτεί πλήρεις φυσικούς κύκλους για βέλτιστη απόδοση.
- **Διάρκεια:** Μικρή ευαισθησία με συνολική αύξηση **11.1%** (1h $\rightarrow$ 8h) και φθίνουσες οριακές αποδόσεις. Διατηρεί υψηλό κέρδος για όλες τις διάρκειες, προσφέροντας μεγαλύτερη ευελιξία σχεδιασμού σε σύγκριση με τα M1, M2 και M3.
- **Ισχύς:** Σχεδόν γραμμική βελτίωση στο **10–80 MW** με μέσο ρυθμό ~ 828 k€/MW, χωρίς ένδειξη κορεσμού. Το M4 υπερέχει σε όλο το εύρος με $7.7\times$ υψηλότερη κερδοφορία ανά MW έναντι του M1, $1.9\times$ έναντι του M2, και $1.8\times$ έναντι του M3.

Αξιολόγηση: Το M4 προσφέρει ανώτερη κερδοφορία και ελαχιστοποιεί την εξάρτηση από τεχνικούς περιορισμούς. Η ανεξαρτησία προσφορών επιτρέπει ευελιξία στην επιλογή χαρακτηριστικών, με προτεραιότητα στην ισχύ. Όρια ≥ 0.8 κύκλοι/ημέρα επαρκούν, ενώ διάρκειες 2–4h προσφέρουν καλή ισορροπία κόστους-οφέλους.

5.3.5 Συγκριτική Αποτίμηση Ευαισθησίας Μοντέλων M1–M4

Η συγκριτική αξιολόγηση της ευαισθησίας των τεσσάρων μοντέλων λειτουργίας αποκαλύπτει θεμελιώδεις διαφορές στην εξάρτησή τους από τις εξεταζόμενες τεχνικές παραμέτρους, οι οποίες αντανακλούν τη στρατηγική φύση κάθε μοντέλου και το εύρος των αγορών στις οποίες συμμετέχει το αυτόνομο BESS. Η ανάλυση των τριών κρίσιμων παραμέτρων—ημερήσιο όριο κύκλων, διάρκεια αποθήκευσης, και ονομαστική ισχύς—διαμορφώνει μια ολοκληρωμένη εικόνα των τεχνικών και οικονομικών χαρακτηριστικών κάθε στρατηγικής συμμετοχής στις ελληνικές ενεργειακές αγορές.

5.3.5.1 Ευαισθησία ως προς το Ημερήσιο Όριο Κύκλων

Η ευαισθησία στο ημερήσιο όριο κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης αποτελεί ίσως τον πιο αποκαλυπτικό δείκτη της στρατηγικής διαφοροποίησης μεταξύ των τεσσάρων μοντέλων, καθώς αντανακλά τον βαθμό στον οποίο κάθε προσέγγιση βασίζεται σε φυσικούς κύκλους arbitrage έναντι εναλλακτικών μηχανισμών δημιουργίας εσόδων.

Το Μοντέλο M1, με την ασθενή του ευαισθησία, αποδεικνύει ότι η αποκλειστική συμμετοχή στη DAM δεν απαιτεί εντατική φυσική λειτουργία για την επίτευξη της βέλτιστης οικονομικής απόδοσης. Το μονοαγοραίο μοντέλο αξιοποιεί αποτελεσματικά τα ενδοημερήσια spreads με μερικούς κύκλους, καθώς οι ωριαίες τιμικές διαφορές στη DAM επιτρέπουν κερδοφόρες συναλλαγές χωρίς την ανάγκη πολλαπλών πλήρων φορτίσεων-εκφορτίσεων. Αυτό υποδηλώνει ότι η στρατηγική arbitrage στην ελληνική DAM χαρακτηρίζεται από επαρκώς μεγάλα spreads που επιτρέπουν την κερδοφορία ακόμα και με περιορισμένη λειτουργική ένταση.

Σε αντίθεση, το Μοντέλο M2 εμφανίζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία μεταξύ όλων των μοντέλων, καταδεικνύοντας την κρίσιμότητα της λειτουργικής ευελιξίας όταν το σύστημα συμμετέχει σε πολλαπλές αγορές ενέργειας. Η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση σε DAM (ωριαία κλιμάκωση) και mFRR energy (τέταρτο της ώρας) δημιουργεί πολλαπλάσιες ευκαιρίες arbitrage εντός της ίδιας ημέρας, απαιτώντας αυξημένη ικανότητα εκτέλεσης κύκλων για τη μεγιστοποίηση των εσόδων.

Το Μοντέλο M3 καταλαμβάνει ενδιάμεση θέση. Η προσθήκη της αγοράς εφεδρειών ισχύος (mFRR capacity) εισάγει μια σταθερή ροή εσόδων που δεν εξαρτάται από φυσικούς κύκλους, μειώνοντας την εξάρτηση από την εντατική λειτουργία σε σύγκριση με το M2. Ωστόσο, η συνεχιζόμενη συμμετοχή στις αγορές ενέργειας (DAM και mFRR energy) διατηρεί την ανάγκη για σημαντική ικανότητα κύκλων. Αυτή η ισορροπία μεταξύ σταθερών εσόδων διαθεσιμότητας και εσόδων arbitrage προσφέρει έναν ενδιάμεσο δρόμο μεταξύ της οικονομικής απόδοσης και της λειτουργικής καταπόνησης.

Το Μοντέλο M4 ανατρέπει τον συμβατικό συσχετισμό μεταξύ οικονομικής απόδοσης και φυσικής λειτουργίας. Με την ελάχιστη ευαισθησία στους κύκλους, το M4 αποδεικνύει ότι η στρατηγική ανεξάρτητων προσφορών μπορεί να επιτύχει τη μέγιστη κερδοφορία χωρίς ανάλογη εντατικοποίηση της φυσικής καταπόνησης. Ο μηχανισμός του virtual netting—όπου αντίρροπες θέσεις σε διαφορετικές αγορές αλληλοαντισταθμίζονται λογιστικά—επιτρέπει στο σύστημα να αποκομίζει οικονομικά οφέλη από τιμικές διαφορές χωρίς την ανάγκη πλήρους φυσικής εκτέλεσης. Αυτό το κρίσιμο εύρημα έχει σημαντικές επιπτώσεις για τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, τα κόστη συντήρησης, και τη συνολική αειφορία του συστήματος.

5.3.5.2 Ευαισθησία ως προς τη Διάρκεια Αποθηκευτικής Διάταξης

Η διάρκεια της αποθηκευτικής διάταξης—η χωρητικότητα ενέργειας εκφρασμένη σε ώρες αποθήκευσης σε πλήρη ισχύ—αποτελεί παράμετρο με δραματικά διαφοροποιημένη επίδραση μεταξύ των μοντέλων, αντανakλώντας τον βαθμό στον οποίο κάθε στρατηγική βασίζεται σε χωρητικότητα έναντι ισχύος για τη δημιουργία εσόδων.

Το Μοντέλο M1 παρουσιάζει την υψηλότερη εξάρτηση από τη διάρκεια, υπογραμμίζοντας τη θεμελιώδη φύση της χωρητικότητας αποθήκευσης για την arbitrage στρατηγική. Στο μονο-αγοραίο πλαίσιο, η μεγιστοποίηση των εσόδων εξαρτάται άμεσα από την ικανότητα αποθήκευσης μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας κατά τις περιόδους χαμηλών τιμών για εκφόρτιση κατά τις περιόδους αιχμής. Η τιμική δομή της ελληνικής DAM, με έντονη διαφοροποίηση μεταξύ χαμηλών και υψηλών τιμών, ανταμείβει συστήματα με μεγάλη χωρητικότητα που μπορούν να εκμεταλλευτούν πλήρως αυτά τα spreads. Το εύρημα αυτό υποδηλώνει ότι για τους επενδυτές που επιλέγουν το M1, η προτεραιότητα στη διάρκεια έναντι άλλων παραμέτρων αποτελεί κρίσιμη απόφαση σχεδιασμού.

Το Μοντέλο M2 μειώνει την εξάρτηση από τη διάρκεια σε σύγκριση με το M1, αλλά εξακολουθεί να την αναδεικνύει ως σημαντική παράμετρο. Η διεύρυνση του στρατηγικού χώρου μέσω της πρόσβασης σε δύο αγορές ενέργειας προσφέρει περισσότερες ευκαιρίες κερδοφορίας ανά μονάδα αποθηκευμένης ενέργειας, μειώνοντας τις απαιτήσεις για εξαιρετικά μεγάλη χωρητικότητα. Ωστόσο, η φύση του arbitrage—τόσο στη DAM όσο και στην mFRR energy—εξακολουθεί να απαιτεί ουσιώδη χωρητικότητα για την αποτελεσματική αξιοποίηση των τιμικών ευκαιριών. Η βελτιστοποίηση σε δύο χρονικές κλίμακες (ωριαία και τέταρτο της ώρας) αυξάνει την αποδοτικότητα χρήσης της αποθηκευμένης ενέργειας, αλλά δεν εξαλείφει την ανάγκη για επαρκή διάρκεια.

Στο Μοντέλο M3 ακολουθεί τη λογική του M2, όσον αφορά τη διάρκεια της μπαταρίας ως προς την ευαισθησία.

Το Μοντέλο M4 επιτυγχάνει την πιο ριζική αποδέσμευση από τη χωρητικότητα, επιδεικνύοντας πώς η στρατηγική καινοτομία μπορεί να υπερβαίνει τους τεχνικούς περιορισμούς. Η ανεξαρτησία προσφορών επιτρέπει στο σύστημα να βελτιστοποιεί ταυτόχρονα σε τρεις αγορές χωρίς τους περιορισμούς της κατευθυντικής συμβατότητας. Τα έσοδα από την αγορά εφεδρειών ισχύος γίνονται πλήρως ανεξάρτητα από τη φυσική λειτουργία, ενώ οι ευκαιρίες arbitrage στις αγορές ενέργειας μπορούν να εκμεταλλεύονται χωρίς την ανάγκη μεγάλης χωρητικότητας λόγω του virtual netting. Αυτή η αποδέσμευση έχει σημαντικές επιπτώσεις για την επιλογή τεχνολογίας: το M4 μπορεί να επιτύχει υψηλή κερδοφορία με χαμηλές διάρκειες (2–4h).

5.3.5.3 Ευαισθησία ως προς την Ονομαστική Ισχύ

Η ονομαστική ισχύς αναδεικνύεται ως η μόνη παράμετρος με σταθερά γραμμική επίδραση σε όλα τα μοντέλα, αλλά η κλίση αυτής της σχέσης—η κερδοφορία ανά MW—διαφοροποιείται δραματικά, αποκλύπτοντας τη σχετική αποτελεσματικότητα κάθε στρατηγικής.

Το Μοντέλο M1 αποτελεί τη βάση σύγκρισης, με την απόδοσή του ανά MW να αντανakλά τη θεμελιώδη οικονομική αξία της συμμετοχής στη DAM. Η σχετικά χαμηλή απόδοση δεν υποδηλώνει αναποτελεσματικότητα, αλλά μάλλον τους εγγενείς περιορισμούς της μονο-αγοραίας στρατηγικής. Κάθε MW εγκατεστημένης ισχύος μπορεί να εκμεταλλευτεί μόνο τα spreads μιας αγοράς, σε μία χρονική κλίμακα, περιορίζοντας τη συνολική δημιουργία εσόδων.

Το Μοντέλο M2 τετραπλασιάζει την απόδοση ανά MW, αποδεικνύοντας την ουσιαστική αξία της διεύ-

ρυνσης σε πολλαπλές αγορές ενέργειας. Αυτή η τετραπλάσια βελτίωση δεν προέρχεται απλά από την πρόσβαση σε δύο αγορές αντί για μία, αλλά από τη συνεργιστική αξιοποίηση διαφορετικών χρονικών κλιμάκων και τιμικών δυναμικών. Η DAM προσφέρει ωριαία spreads, ενώ η mFRR energy προσφέρει ευκαιρίες σε επίπεδο τετάρτου, επιτρέποντας στο ίδιο MW ισχύος να δημιουργεί πολλαπλάσια αξία. Η ελληνική ενεργειακή αγορά επιδεικνύει υψηλή απορροφητική ικανότητα για αυτή τη στρατηγική, υποδηλώνοντας ότι οι δύο αγορές διατηρούν επαρκή τιμική ασυσχέτιση για να δικαιολογήσουν τη διπλή συμμετοχή.

Το Μοντέλο M3 προσθέτει μια τρίτη διάσταση—την αγορά εφεδρειών ισχύος—που θεωρητικά θα έπρεπε να προσφέρει σημαντική πρόσθετη αξία. Το M3 πρέπει να ισορροπεί μεταξύ της μεγιστοποίησης των εσόδων capacity και της διατήρησης της αποτελεσματικότητας arbitrage.

Το Μοντέλο M4 επιτυγχάνει οκταπλάσια απόδοση έναντι του M1, αποτελώντας την πιο αποτελεσματική στρατηγική ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος. Αυτή η εξαιρετική απόδοση προέρχεται από την πλήρη απελευθέρωση του δυναμικού της ισχύος σε όλες τις αγορές χωρίς τους περιορισμούς συμβατότητας. Κάθε MW μπορεί να συμμετέχει ταυτόχρονα και ανεξάρτητα σε DAM, mFRR energy, και mFRR capacity, μεγιστοποιώντας τα έσοδα από όλες τις διαθέσιμες πηγές. Το virtual netting επιτρέπει στην ίδια φυσική ισχύ να «πωλείται» πολλαπλές φορές σε διαφορετικές αγορές, με τις αντίρροπες θέσεις να αλληλοαντισταθμίζονται λογιστικά. Αυτός ο μηχανισμός αποτελεί θεμελιώδη καινοτομία που ανατρέπει τον παραδοσιακό συσχετισμό μεταξύ φυσικής ισχύος και οικονομικής αξίας.

Κεφάλαιο 6

Σύνοψη και Συμπεράσματα

6.1 Σύνοψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία ανέπτυξε ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο μαθηματικής βελτιστοποίησης για την αξιολόγηση της οικονομικής απόδοσης συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας (BESS) στο ελληνικό ενεργειακό σύστημα. Η μεθοδολογική προσέγγιση βασίστηκε στη σταδιακή ενσωμάτωση πρόσθετων αγορών ηλεκτρικής ενέργειας και στη χαλάρωση περιορισμών, με σκοπό την επίδρασή της η προσθήκη κάθε νέας αγοράς.

Αναπτύχθηκαν τέσσερα διακριτά μοντέλα μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού: το Μοντέλο M1 περιορίζεται στη συμμετοχή στην Αγορά Επόμενης Ημέρας (Day-Ahead Market, DAM), το Μοντέλο M2 επεκτείνεται στην αγορά ενέργειας εξισορρόπησης (mFRR Energy), το Μοντέλο M3 ενσωματώνει επιπλέον την αγορά ισχύος εξισορρόπησης (mFRR Capacity) υπό τον περιορισμό ότι οι προσφορές στην αγορά ενέργειας εξισορρόπησης οφείλουν να έχουν ίδια κατεύθυνση με αυτή των προσφορών στην DAM, και το Μοντέλο M4 αίρει τον περιορισμό αυτόν επιτρέποντας ανεξάρτητες προσφορές σε όλες τις αγορές για το ίδιο χρονικό διάστημα. Όλα τα μοντέλα ενσωματώνουν ρητά τεχνικούς περιορισμούς ισχύος, απόδοσης, κατάστασης φόρτισης (SoC) και περιορισμούς που προκύπτουν από το ελληνικό ρυθμιστικό πλαίσιο. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με βάση πραγματικά δεδομένα τιμών από την Αγορά Επόμενης Ημέρας και την αγορά εξισορρόπησης mFRR για το ημερολογιακό έτος 2024.

6.2 Συμπεράσματα

Η σύγκριση των τεσσάρων μοντέλων βελτιστοποίησης αποκάλυψε σημαντικές διαφορές στην οικονομική απόδοση, οι οποίες σχετίζονται άμεσα με τις αγορές στις οποίες συμμετέχει το σύστημα και τους θεσμικούς περιορισμούς που επιβάλλονται.

Η πρόσβαση στην αγορά ενέργειας εξισορρόπησης (mFRR Energy) αποδείχθηκε ο σημαντικότερος παράγοντας βελτίωσης, τετραπλασιάζοντας την οικονομική απόδοση σε σχέση με τη συμμετοχή αποκλειστικά στην Αγορά Επόμενης Ημέρας (DAM). Οι διαφορές τιμών μεταξύ ανοδικής και καθοδικής εφεδρείας υπερβαίνουν κατά πολύ τις διακυμάνσεις της προημερήσιας αγοράς, δημιουργώντας σημαντικές ευκαιρίες κέρδους.

Η προσθήκη της αγοράς ισχύος εξισορρόπησης (mFRR Capacity) δημιούργησε μία πρόσθετη ροή εσόδων

μέσω των πληρωμών διαθεσιμότητας, χωρίς να απαιτεί επιπλέον ενεργειακές κινήσεις.

Η άρση του περιορισμού που απαιτούσε οι προσφορές στην mFRR Energy να έχουν ίδια κατεύθυνση με τις προσφορές στην DAM οδήγησε στη μεγαλύτερη αύξηση κέρδους μεταξύ διαδοχικών μοντέλων. Η δυνατότητα ταυτόχρονης υποβολής προσφορών σε πολλαπλές αγορές με αντίθετες κατευθύνσεις επιτρέπει την εκμετάλλευση των διαφορών τιμών μεταξύ αγορών, με τις αντίθετες κινήσεις να αλληλοαντισταθμίζονται φυσικά αλλά να παράγουν οικονομικό όφελος. Αυτή η στρατηγική αύξησε σημαντικά τον ρόλο της DAM, με τη συνεισφορά της να τριπλασιάζεται όταν επιτρέπεται η ευέλικτη συμμετοχή.

Σημαντικό εύρημα αποτελεί η διαφοροποίηση της συμπεριφοράς της μπαταρίας από μοντέλο σε μοντέλο. Ωστόσο, η αύξηση των εσόδων αποδίδεται στη στρατηγική κατανομή των συναλλαγών μεταξύ αγορών και όχι σε εντατικοποίηση της λειτουργίας ή σε πρόσθετη φθορά του συστήματος. Η οικονομική αξία παράγεται μέσω αξιοποίησης διαφορών τιμών, με διατήρηση της τεχνικής ακεραιότητας του συστήματος αποθήκευσης.

Όπως ανέδειξαν οι μελέτες ευαισθησίας, δεν είναι απαραίτητη η εκτέλεση πλήρων κύκλων φόρτισης–εκφόρτισης για την επίτευξη της βέλτιστης συμμετοχής. Αντιθέτως, το βέλτιστο συχνά προκύπτει μέσω μερικών κινήσεων εντός του επιτρεπτού παραθύρου SoC, ιδίως στο Μοντέλο M4 με τις ταυτόχρονες προσφορές, όπου ο συνδυασμός αγορών αξιοποιείται αποτελεσματικότερα.

Η κατανομή εσόδων ανά αγορά έδειξε ότι η αγορά ενέργειας εξισορρόπησης (mFRR Energy) συνεισφέρει το μεγαλύτερο μέρος των κερδών σε όλα τα μοντέλα που έχουν πρόσβαση σε αυτήν. Η αγορά ισχύος εξισορρόπησης (mFRR Capacity) προσθέτει σταθερά περίπου το ένα έκτο των εσόδων, ενώ η DAM έχει συμπληρωματικό ρόλο στα μοντέλα όπου οι προσφορές στην mFRR Energy πρέπει να έχουν ίδια κατεύθυνση με τις προσφορές στην DAM, αλλά ανακτά σημασία όταν επιτρέπονται ανεξάρτητες προσφορές.

Λαμβάνοντας υπόψη το ελληνικό περιβάλλον αγορών το 2024, διαμορφώθηκαν ευνοϊκές συνθήκες για την αποκόμιση εσόδων από συστήματα αποθήκευσης. Ο συνδυασμός υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ, έντονων ενδοημερήσιων διακυμάνσεων τιμών και εξελιγμένων μηχανισμών εξισορρόπησης δημιούργησε διακριτές ευκαιρίες αξιοποίησης σε κάθε αγορά. Η ταχύτητα απόκρισης και η δυνατότητα λειτουργίας σε 15λεπτη βάση καθιστούν τα συστήματα αποθήκευσης ιδανικά για την αντιμετώπιση βραχυχρόνιων ανισορροπιών και την παροχή υπηρεσιών εξισορρόπησης.

Τα ευρήματα αναδεικνύουν την ανάγκη για ευέλικτα ρυθμιστικά πλαίσια που επιτρέπουν την πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων των τεχνολογιών αποθήκευσης. Η πρόσβαση σε πολλαπλές αγορές (DAM, mFRR Energy, mFRR Capacity) και η απουσία περιοριστικών κανόνων για την κατεύθυνση των προσφορών αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για τη βιωσιμότητα των επενδύσεων σε συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.

Συμπερασματικά, η συμμετοχή σε πολλαπλές αγορές, συνδυασμένη με ολοκληρωμένη βελτιστοποίηση και σωστή διαχείριση τεχνικών περιορισμών, μπορεί να πολλαπλασιάσει την οικονομική απόδοση των συστημάτων αποθήκευσης χωρίς να επιβαρύνει τη λειτουργική τους διάρκεια. Η μαθηματική μοντελοποίηση που αναπτύχθηκε παρέχει ένα συνεπές πλαίσιο για τη λήψη επενδυτικών αποφάσεων και τον σχεδιασμό λειτουργικών στρατηγικών στην ενεργειακή μετάβαση.

6.3 Επεκτάσεις και Μελλοντική Έρευνα

Οι κύριες κατευθύνσεις επέκτασης της παρούσας εργασίας περιλαμβάνουν:

- **Στοχαστική βελτιστοποίηση και πρόβλεψη τιμών.** Η παρούσα εργασία υλοποίησε ex-post βελτιστοποίηση με γνωστές τιμές, παρέχοντας την ιδανική βάση σύγκρισης. Η μετάβαση σε ex-ante βελτιστοποίηση με προβλέψεις τιμών αποτελεί κρίσιμο βήμα για πρακτική εφαρμογή.
- **Επέκταση σε πρόσθετες αγορές.** Η ενσωμάτωση επιπλέον αγορών θα παράσχει ολοκληρωμένη εικόνα του portfolio ευκαιριών. Η μετάβαση της DAM από ωριαία σε 15λεπτη εκκαθάριση (Οκτώβριος 2025) δημιουργεί νέες δυνατότητες arbitrage που χρήζουν ποσοτικοποίησης. Η Ενδοημερήσια Αγορά (Intraday Market) επιτρέπει την προσαρμογή θέσεων εγγύτερα στην παράδοση, η αυτόματα ενεργοποιούμενη εφεδρεία (aFRR) προσφέρει ταχύτερη απόκριση με υψηλότερες πληρωμές ισχύος, και η εφεδρεία διατήρησης συχνότητας (FCR) παρέχει σταθερή δέσμευση ισχύος.
- **Μοντελοποίηση γήρανσης μπαταρίας.** Η ρητή ενσωμάτωση του κόστους γήρανσης στην αντικειμενική συνάρτηση ως συνάρτηση της ενέργειας κύκλων, του βάθους εκφόρτισης, του ρυθμού φόρτισης και του εύρους λειτουργίας SoC θα επιτρέψει τη βελτιστοποίηση του trade-off μεταξύ βραχυπρόθεσμων εσόδων και μακροχρόνιας διάρκειας ζωής. Αυτή η προσέγγιση θα οδηγήσει σε πιο συντηρητικές στρατηγικές κατά τις περιόδους χαμηλών διαφορικών τιμών, ενώ θα επιτρέπει εντατικότερη χρήση όταν η οικονομική αξία δικαιολογεί το κόστος γήρανσης.
- **Συστήματα συνδεδεμένα με ΑΠΕ.** Η επέκταση των μοντέλων για συστήματα κατηγορίας 11α (co-located) και 11β (συμβατικά συνδεδεμένα) με περιορισμούς κοινού σημείου σύνδεσης και υποχρεώσεις απορρόφησης παραγωγής θα διευκολύνει τη σύγκριση της απόδοσης μεταξύ stand-alone και hybrid συστημάτων. Η ενσωμάτωση πραγματικών προφίλ παραγωγής αιολικών και φωτοβολταϊκών σταθμών θα αναδείξει τις βέλτιστες στρατηγικές λειτουργίας για κάθε διαμόρφωση.

Η υλοποίηση αυτών των επεκτάσεων θα ενισχύσει τον ρεαλισμό και την πρακτική εφαρμοσιμότητα των αποτελεσμάτων, παρέχοντας πλήρη εργαλειακή βάση για τη λήψη αποφάσεων και λειτουργικών στρατηγικών συστημάτων αποθήκευσης.

Βιβλιογραφία

- [1] International Energy Agency, “Share of renewable electricity generation by technology, 2000-2030,” Paris, 2024, licence: CC BY 4.0. [Online]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/share-of-renewable-electricity-generation-by-technology-2000-2030>
- [2] European Association for Storage of Energy (EASE) and LCP Delta, “European market monitor on energy storage – 2024 trends,” 2024. [Online]. Available: <https://ease-storage.eu/publications/market-analyses/>
- [3] “European market outlook for battery storage 2025–2029,” SolarPower Europe, Tech. Rep., 2025. [Online]. Available: <https://www.solarpowereurope.org/insights/outlooks/european-market-outlook-for-battery-storage-2025-2029/detail>
- [4] Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, “Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (Αναθεωρημένη Έκδοση 2024),” 2024, ΦΕΚ 6983, Επίσημη έκδοση. [Online]. Available: <https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/2025/04/Αναθεωρημένο-ΕΣΕΚ-2024-ΦΕΚ-6983.pdf>
- [5] ΑΔΜΗΕ, “Περιγραφή Αγορών Ηλεκτρικής Ενέργειας,” Ιστότοπος Ανεξάρτητου Διαχειριστή Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, 2024, Διαγραμματική απεικόνιση της δομής των αγορών. [Online]. Available: <https://www.admie.gr/agora-energeias/leitoyrgia-agoras/perigrafi>
- [6] —, “Χρονική διαδοχή διαδικασιών Αγοράς Εξισορρόπησης (εικόνα),” Εικόνα στον ιστότοπο του ΑΔΜΗΕ, Διαθέσιμο στον ιστότοπο του ΑΔΜΗΕ. [Online]. Available: <https://www.admie.gr/agora/genika/agora-eksisorropisis>
- [7] —, “Storage high level design – public consultation document,” Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, Αθήνα, Ελλάδα, Tech. Rep., Απρίλιος 2023, Έγγραφο δημόσιας διαβούλευσης για τη συμμετοχή συστημάτων αποθήκευσης. [Online]. Available: https://www.admie.gr/sites/default/files/diaboyleyseis/attached-files2023/04/Storage%20High%20Level%20Design%20Public%20Consultation%20Document_0.pdf
- [8] Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, “ΥΑ ΥΠΕΝ/ΔΑΠΕΕΚ/53563/1556: Περιορισμοί έγχυσης ηλεκτρικής ενέργειας και ισχύος σε σταθμούς ΑΠΕ, ΣΗΘΥΑ και σταθμούς αποθήκευσης,” ΦΕΚ Β’ 3328/19.05.2023, 2023, Αριθμ. απόφασης: ΥΠΕΝ/ΔΑΠΕΕΚ/53563/1556. Ισχύει από τη δημοσίευση. [Online]. Available: https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/2023/05/FEK-2023-Tefxos-B-03328-downloaded-22_05_2023.pdf
- [9] European Commission, “The european green deal,” 2019, cOM(2019) 640 final. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2019:640:FIN>
- [10] —, “‘fit for 55’: delivering the eu’s 2030 climate target on the way to climate neutrality,” 2021, cOM(2021) 550 final. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021DC0550>

- [11] European Parliament and the Council, “Directive (eu) 2023/2413 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast),” Official Journal of the European Union, 2023. [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en
- [12] ΡΑΑΕΥ and Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, “Α’ Κύκλος Διαγωνισμών Αποθήκευσης — Προκήρυξη,” 2023, ΦΕΚ Β’ 3939/2023. [Online]. Available: https://licensing.rae.gr/data/public/2023/06/FEK_2023_Tefxos_B_03939.pdf
- [13] —, “Β’ Κύκλος Διαγωνισμών Αποθήκευσης — Προκήρυξη,” 2023, ΦΕΚ Β’ 6608/2023, MIS 5216889. [Online]. Available: https://greece20.gov.gr/wp-content/uploads/2023/11/ΦΕΚ_B_6608-2023_ΣΑΗΕ_Φαση-B_MIS_5216889.pdf
- [14] —, “Γ’ Κύκλος Διαγωνισμών Αποθήκευσης — Προκήρυξη,” 2024, ΦΕΚ, Νοέμβριος 2024. [Online]. Available: https://greece20.gov.gr/wp-content/uploads/2024/11/FEK_3_AntagonistikiDiadikadia.pdf
- [15] Hellenic Energy Exchange, “Κανονισμός Συναλλαγών Αγορών Ενέργειας — spot trading rulebook,” HEnEx Group, Αθήνα, Ελλάδα, Έκδοση 2.4, Σεπτέμβριος 2024, Διαθέσιμο στον ιστότοπο του Ελληνικού Χρηματιστηρίου Ενέργειας. [Online]. Available: https://www.enexgroup.gr/documents/20126/144557/20250925_HEnEx_Spot_Trading_Rulebook_v2.4_gr.pdf
- [16] ΑΔΜΗΕ, “Κανονισμός Αγοράς Εξισορρόπησης,” Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, Αθήνα, Ελλάδα, Έκδοση 19, 2024, Επίσημο κείμενο διαθέσιμο μέσω του διαδικτυακού τόπου του ΑΔΜΗΕ. [Online]. Available: https://www.admie.gr/sites/default/files/users/authenticated/KANONISMOS_AGOPAS%20ΕΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ_v19.pdf
- [17] —, “Τεχνική Απόφαση Διαδικασίας Ενοποιημένου Προγραμματισμού,” Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, Αθήνα, Ελλάδα, Έκδοση 2, 2020, Τεχνικό έγγραφο για τη Διαδικασία Ενοποιημένου Προγραμματισμού (ISP). [Online]. Available: https://www.admie.gr/sites/default/files/users/dda/ΔΕΠ/Τεχνική%20Απόφαση%20ΔΕΠ_v2.pdf
- [18] “Grid-scale battery storage: Frequently asked questions,” National Renewable Energy Laboratory (NREL), U.S. DOE, Tech. Rep., 2023, accessed 2025-10-06. [Online]. Available: <https://docs.nrel.gov/docs/fy19osti/74426.pdf>
- [19] “Batteries and secure energy transitions,” International Energy Agency (IEA), Paris, Tech. Rep., 2024, licence: CC BY 4.0. [Online]. Available: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/cb39c1bfd2b3-446d-8c35-aae6b1f3a4a0/BatteriesandSecureEnergyTransitions.pdf>
- [20] Hellenic Energy Exchange, “Day-ahead market – markets & publications,” Ιστότοπος Ελληνικού Χρηματιστηρίου Ενέργειας, 2025, Δεδομένα και αποτελέσματα Αγοράς Επόμενης Ημέρας. [Online]. Available: <https://www.enexgroup.gr/el/markets-publications-el-day-ahead-market>
- [21] ΑΔΜΗΕ, “Ενεργοποιημένη Ενέργεια Εξισορρόπησης και Τιμές,” Ιστότοπος Ανεξάρτητου Διαχειριστή Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, 2025, Δεδομένα ενεργοποιημένης ενέργειας εξισορρόπησης και οριακών τιμών. [Online]. Available: <https://www.admie.gr/data-type/energopoiimeni-energeia-times>
- [22] —, “Isp results – integrated scheduling process,” Ιστότοπος Ανεξάρτητου Διαχειριστή Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, 2025, Αποτελέσματα Διαδικασίας Ενοποιημένου Προγραμματισμού (ΔΕΠ). [Online]. Available: <https://www.admie.gr/en/data-type/isp-results>

- [23] SmartRue Research Group, NTUA, “Diem platform – data intelligence for energy markets,” Πλατφόρμα DIEM, 2025, Πλατφόρμα συλλογής και ανάλυσης δεδομένων αγορών ενέργειας. [Online]. Available: <https://diem-platform.com/>
- [24] Gurobi Optimization, LLC, “Gurobi optimizer delivers support for all major problem types,” 2025. [Online]. Available: <https://www.gurobi.com/features/gurobi-optimizer-delivers-support-for-all-major-problem-types/>
- [25] —, “Gurobi optimizer,” 2022. [Online]. Available: <https://www.gurobi.com/solutions/gurobi-optimizer/>