



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών
Υπολογιστών
Τομέας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Βέλτιστος Προγραμματισμός Λειτουργίας Σταθμού Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας Βασισμένου Σε Συσσωρευτές Υπό Αβεβαιότητα

Διπλωματική Εργασία

Κρίθης Π. Δημήτριος

Επιβλέπων : Αντώνης Παπαβασιλείου, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2025



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών
Υπολογιστών
Τομέας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Βέλτιστος Προγραμματισμός Λειτουργίας Σταθμού Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας Βασισμένου Σε Συσσωρευτές Υπό Αβεβαιότητα

Διπλωματική Εργασία

Κρίθης Δημήτριος

Επιβλέπων : Αντώνης Παπαβασιλείου, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 7^η Ιουλίου 2025

.....
Αντώνης Παπαβασιλείου

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σταύρος Παπαθανασίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Άρης-Ευάγγελος Δημέας

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2025

Copyright © Δημήτριος Κρίθης, 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.

(Υπογραφή)

.....

Δημήτριος Κρίθης

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

Περίληψη

Δεδομένης της υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ τα τελευταία χρόνια και των φιλόδοξων κλιματικών στόχων η ένταξη μονάδων αποθήκευσης στο ΣΗΕ κρίνεται όλο και πιο αναγκαία. Από τις τεχνολογίες αυτές οι μονάδες αποθήκευσης βασιζόμενες σε τεχνολογίες συσσωρευτών είναι οι πιο πολλά υποσχόμενες. Με τα τωρινά δεδομένα οι μονάδες αυτές θα λειτουργούν στην αγορά αντιδρώντας στις διακυμάνσεις των τιμών των διάφορων αγορών ηλεκτρισμού στις οποίες και θα συμμετάσχουν. Η διπλωματική αυτή αποσκοπεί στην μοντελοποίηση μιας τέτοιας συσκευής σε περιβάλλον αγορών μέσω μαθηματικού προγραμματισμού προς κατανόηση της βέλτιστης συμπεριφοράς της και των προτεραιοτήτων της στον προγραμματισμός της λειτουργίας της.

Λέξεις Κλειδιά:

Βελτιστοποίηση, Αποθήκευση Ενέργειας, Στοχαστικός Προγραμματισμός, Μπαταρία, Αγορές Ηλεκτρικής Ενέργειας

Abstract

Due to the high penetration of renewable energy sources and the ambitious climate goals the incorporation of energy storage units in the electrical energy system is more crucial than ever. From the different storage technologies currently available, those based on batteries are the most promising. Based on the current data regarding the integration of energy storage modules, they will most likely operate based on the electricity prices on the different markets they will participate in. The goal of this diploma thesis is the modeling of one battery energy storage system (BESS) participating in multiple energy markets via mathematical programming in order to better understand their optimal scheduling and their operating priorities.

Keywords:

Optimization, Energy Storage, Stochastic Programming, Battery Energy Storage System, Electricity Markets

Ευχαριστίες

Θα ήθελα καταρχήν να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Αντώνη Παπαβασιλείου για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και επίκαιρο θέμα. Επίσης, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την διαρκή βοήθεια και καθοδήγηση του. Τέλος, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω που με εισήγαγε στον πολύ ενδιαφέρον τομέα της βελτιστοποίησης.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Δημήτρη Χατζηγιάννη για την βοήθεια του. Χωρίς αυτόν και τις εβδομαδιαίες συναντήσεις μας η διπλωματική αυτή δεν θα είχε ολοκληρωθεί τόσο ομαλά και ευχάριστα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω του φίλους μου. Του ανθρώπους που στάθηκαν δίπλα μου στα δύσκολα τόσα χρόνια και τα γέμισαν με τόσες ωραίες στιγμές. Χωρίς αυτούς η καθημερινότητα θα ήταν μουντή και φτωχότερη.

Τέλος, οφείλω και θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Παναγιώτη και Αγγέλα και τον αδερφό μου Γιώργο για την διαρκή στήριξη τους, την πίστη τους σε μένα, τα ερεθίσματα που μου έδωσαν και τις όμορφες στιγμές που μου χάρισαν. Δεν θα ήμουν αυτός που είμαι χωρίς εσάς.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στους Αλέξη Τσανό και Μελίνα Ζαχαροπούλου για την βοήθεια διόρθωσης και την επικουρική επιμέλεια της εργασίας αυτής. Ακόμη στον Φώτη Γάκη, διευθυντή μου στον ΔΕΔΔΗΕ, για την εμπιστοσύνη, τις συμβουλές του και την γνώση που μου εμφύτευσε.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	10
1.1 Σκοπός της εργασίας.....	10
1.2 Δομή και μεθοδολογία της εργασίας	10
Κεφάλαιο 2 : Αγορές Ηλεκτρικής Ενέργειας	12
2.1 Δομή Αγοράς Ηλεκτρισμού.....	12
2.2 Προθεσμιακή Αγορά.....	13
2.3 Αγορά Επόμενης Μέρας	14
2.4 Ενδοημερήσια Αγορά	17
2.5 Αγορά Ενέργειας Εξισορρόπησης και επικουρικών υπηρεσιών	19
Κεφάλαιο 3: Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	24
3.1 Τεχνολογίες Αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας	24
3.2 Οφέλη Αποθήκευσης	28
3.3 Αποθήκευση στο Ελληνικό Σύστημα	31
3.4 Μοντελοποίηση Σταθμού Αποθήκευσης Βασισμένης Σε Συσσωρευτές.....	34
Κεφάλαιο 4: Μαθηματικό Υπόβαθρο	38
4.1 Βελτιστοποίηση	38
4.2 Γραμμικός Προγραμματισμός	39
4.3 Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός.....	41
4.4 Στοχαστικός Προγραμματισμός.....	45
Κεφάλαιο 5: Κατασκευή Σεναρίων Τιμών	50
5.1 Συλλογή και Επεξεργασία Δεδομένων Αγοράς	50
5.2 Κατασκευή Σεναρίων Τιμών	53
5.3 Μείωση Σεναρίων	55
Κεφάλαιο 6: Μοντελοποίηση Συσσωρευτή σε Περιβάλλον Αγορών	59
6.1 Συμμετοχή στην Αγορά Επόμενης Μέρας.....	59
6.2 Ταυτόχρονη Συμμετοχή στις Αγορές Επόμενης Μέρας και Εξισορρόπησης	68
6.3 Ταυτόχρονη Συμμετοχή στις Αγορές Επόμενης Μέρας και Εξισορρόπησης Δεδομένης Αβεβαιότητας Τιμών	74
6.4 Μοντελοποίηση με χρονικό βήμα δεκαπενταλεπτου.....	84
Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα και Μελλοντικές Προοπτικές	88
7.1 Συμπεράσματα	88
7.2 Μελλοντικές προοπτικές.....	89
Βιβλιογραφία	91

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Στο αρχικό αυτό κεφάλαιο θα παρουσιαστεί τόσο ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας όσο και η δομή της και η μέθοδος που ακολουθήθηκε προς εκτέλεση των προσομοιώσεων.

1.1 Σκοπός της εργασίας

Η εργασία αυτή αποσκοπεί στην κατανόηση της λειτουργίας μιας συσκευής αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας βασιζόμενη σε τεχνολογία συσσωρευτών (ή μπαταρίας όπως αποκαλείται απλουστευτικά στην διάρκεια της ανάλυσης).

Η αποθήκευση ενέργειας και ιδίως η αποθήκευση ενέργειας μέσω μπαταριών ενδέχεται να παίζει καθοριστικό ρόλο τα επόμενα χρόνια στην ανάπτυξη του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό οφείλεται στην ανάγκη του συστήματος να φιλοξενήσει μεγάλες ποσότητες καθαρής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές (ΑΠΕ).

Ταυτόχρονα, λόγω της αποκεντροποίησης της ηλεκτροπαραγωγής και του ανοίγματος των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας ο τρόπος λειτουργίας του συστήματος αλλάζει. Η παλιά κεντρική διαχείριση από τον διαχειριστή του Συστήματος μεταφοράς αντικαθίσταται με την αποκεντρωμένη λειτουργία σταθμών στο ηλεκτρικό σύστημα οι οποίοι αντιδρούν στα διάφορα σήματα των αγορών ηλεκτρισμού.

Μέσα σε αυτό το ραγδαία εξελισσόμενο περιβάλλον κρίνεται απαραίτητη η δημιουργία μεθόδων ανάλυσης της συμπεριφοράς των νέων οντοτήτων που θα κληθούν να ενταχθούν στο ηλεκτρικό σύστημα. Η εργασία αυτή αποσκοπεί σε ακριβώς αυτό. Μέσω των μεθόδων του μαθηματικού προγραμματισμού θα κατασκευαστούν λεπτομερή μοντέλα προς περιγραφή της λειτουργίας μιας συσκευής αποθήκευσης σε περιβάλλον μίας ή παραπάνω αγορών. Μέσω της μοντελοποίησης θα παρουσιαστούν οι συμπεριφορές των συσκευών αποθήκευσης στο περιβάλλον αυτό προς πληρέστερη κατανόηση της δυναμικής αυτών των νέων συσκευών στο ηλεκτρικό σύστημα και στις αγορές ηλεκτρισμού.

1.2 Δομή και μεθοδολογία της εργασίας

Η εργασία αυτή αποτελείται από δύο κύρια μέλη. Το πρώτο μέρος (Κεφάλαια 2-4) αποτελεί την βιβλιογραφική ανασκόπηση του θέματος και των θεωρητική εισαγωγή στις μαθηματικές έννοιες που θα χρειαστούν προς κατανόηση της μεθοδολογίας της εργασίας. Το δεύτερο μέρος (Κεφάλαια 5 – 7) παρουσιάζουν σταδιακά την μέθοδο που ακολουθήθηκε και τα εργαλεία που αξιοποιήθηκαν προς διεξαγωγή της παρούσας εργασίας καθώς και τα συμπεράσματα αυτής.

Συγκεκριμένα στο πρώτο μέρος :

- Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται οι διάφορες αγορές ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίες λειτουργούν αυτή την στιγμή στην Ελλάδα. Με αυτόν τον τρόπο εισάγεται το περιβάλλον στο οποίο καλείται να δράσει η συσκευή αποθήκευσης
- Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι διάφορες τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίες έχουν ή θα έχουν κάποιο ρόλο στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο θα επιτευχθεί η κατανόηση και η μοντελοποίηση της συσκευής αποθήκευσης
- Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται οι διάφορες μαθηματικές τεχνικές που θα αξιοποιηθούν στην εργασία. Μέσω των τεχνικών αυτών θα δημιουργηθούν κατάλληλα μοντέλα βελτιστοποίησης προκειμένου να προγραμματιστεί η λειτουργία της μπαταρίας σε περιβάλλον αγορών.

Στο δεύτερο μέρος :

- Στο Κεφάλαιο 5 πραγματοποιείται η μοντελοποίηση της αβεβαιότητας του προβλήματος. Στην εργασία αυτή η αβεβαιότητα παίρνει την μορφή των τιμών των διαφόρων αγορών ηλεκτρικής ενέργειας. Η αβεβαιότητα μοντελοποιείται μέσω στατιστικής ανάλυσης των τιμών των αγορών. Η ανάλυση γίνεται με την γλώσσα προγραμματισμού Python.
- Στο Κεφάλαιο 6 υλοποιούνται διάφορα μοντέλα συμμετοχής μιας συσκευής αποθήκευσης σε περιβάλλοντα αγορών. Εδώ εκτελούνται προσομοιώσεις μέσω της γλώσσας προγραμματισμού Python. Τα μοντέλα μαθηματικού προγραμματισμού επιλύονται μέσω του solver Gurobi.
- Στο Κεφάλαιο 7 αποτυπώνονται τα διάφορα συμπεράσματα όπως και οι προοπτικές επέκτασης της εργασίας αυτής.

Κεφάλαιο 2 : Αγορές Ηλεκτρικής Ενέργειας

Αρχικά, χρήσιμη κρίνεται μια εισαγωγή στην μορφή και την λειτουργία των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας προκειμένου να γίνει αντιληπτό το οικοσύστημα στο οποίο θα συμμετέχουν οι σταθμοί αποθήκευσης.

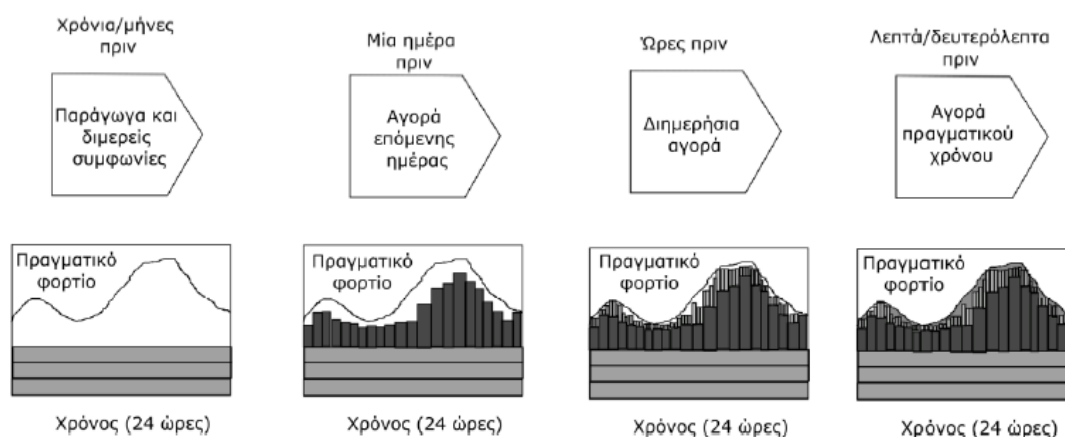
Από το 1999 ξεκίνησε η σταδιακή αποκέντρωση της Ελληνικής αγοράς ηλεκτρισμού έπειτα από την Οδηγία 96/92 της Ε.Ε. Η παραπάνω επιτεύχθηκε μέσω της διάσπασης της κρατικής ΔΕΗ το 1999 σε ΔΕΗ ΑΕ και ΔΕΣΜΗΕ ΑΕ (το 2011 ακολούθησε απόσχιση της διεύθυνσης δικτύου της ΔΕΗ ΑΕ και ίδρυση του ΔΕΔΔΗΕ και διαχωρισμός του ΔΕΣΜΗΕ ΑΕ σε ΑΔΜΗΕ ΑΕ και ΛΑΓΗΕ ΑΕ), της ίδρυσης της ανεξάρτητης ρυθμιστικής αρχής αγοράς ενέργειας – ΡΑΕ το 1999 και εν τέλει της ίδρυσης του Ελληνικού χρηματιστηρίου ενέργειας (EXE ή HenEx) το 2018 . Από το 2020 άρχισε η επίσημη λειτουργία της Ελληνικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας όπως αυτή υφίσταται σήμερα [2]. Η ελληνική αγορά ηλεκτρική ενέργειας βασίζεται στο πρότυπο της Ενιαίας Ευρωπαϊκής Αγοράς του Μοντέλου Στόχος (Target Model) και απαρτίζεται από διαφορά στάδια τα οποία λαμβάνουν χώρα από λίγους μήνες μέχρι λίγα λεπτά πριν την ώρα της κατανάλωσης. [1] Στο πρώτο αυτό κεφάλαιο θα παρουσιαστεί ο σκοπός, η λειτουργία και οι ιδιαιτερότητες των σταδίων αυτών.

2.1 Δομή Αγοράς Ηλεκτρισμού

Το μοντέλο στόχος απαρτίζεται από τέσσερα κύρια μέρη. Αυτά είναι η προθεσμιακή αγορά, η αγορά επόμενης μέρας, η ενδοημερήσια αγορά και η αγορά εξισορρόπησης. Ένας αρμόδιος φορέας διαχειρίζεται καθεμία από τις προαναφερθείσες αγορές, ενώ στην περίπτωση του Ελληνικού Συστήματος οι φορείς είναι το χρηματιστήριο (EXE) και ο διαχειριστής του συστήματος μεταφοράς (ΑΔΜΗΕ) [1]. Παράλληλα, υπάρχουν αρκετοί άλλοι φορείς που συμμετέχουν στην λειτουργία των αγορών όπως, οι προμηθευτές (που εκπροσωπούν τους καταναλωτές χονδρικής και μπορούν να συμμετέχουν στο σύστημα ως καταναλωτές), οι έμποροι λιανικής (που εκπροσωπούν φορτία τα οποία δεν συμμετέχουν στην χονδρεμπορική αγορά), οι φορείς σφωρευτικής εκπροσώπησης (οι οποίοι συντονίζουν μεγάλα πλήθη καταναλωτών ή μικρών παραγωγών) και οι εταιρείες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [3].

Τα στάδια αυτά διαφέρουν, αρχικά, ως προς τον χρόνο υλοποίησής τους σε σχέση με τον πραγματικό χρόνο κατανάλωσης της ενέργειας και ως προς το βαθμό συγκεντρωτισμού τους. Κατά κανόνα όσο πιο κοντά χρονικά στον πραγματικό χρόνο τόσο πιο κεντρικά λειτουργεί η αγορά και άρα τόσο λιγότερη ευελιξία υπάρχει για τους συμμετέχοντες. Ένας συμμετέχοντας δύναται να διαμορφώσει την θέση του στην φυσική αγορά μέσω, σε πρώτο επίπεδο, της συμμετοχής στην προθεσμιακή αγορά. Η θέση του μπορεί να αναπροσαρμοστεί σε ωριαίο επίπεδο την προηγούμενη μέρα της παράδοσης μέσω της αγοράς επόμενης μέρας και να διορθωθεί στην ενδοημερήσια αγορά. Τέλος, σε περίπτωση που σε πραγματικό χρόνο δεν υφίσταται το ισοζύγιο

παραγωγής – κατανάλωσης ισχύος ο ΑΔΜΗΕ προχωρά σε ενέργειες εξισορρόπησης χρεώνοντας ή πιστώνοντας μέσω της αγοράς εξισορρόπησης τους κατάλληλους συμμετέχοντες. [1]



Σχήμα 1: Οι αγορές ηλεκτρισμού σε λειτουργία [3]

Αξίζει να σημειωθεί πως η μετάβαση προς το target model των αγορών ηλεκτρισμού έγινε προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος της δημιουργίας μιας ενιαίας πανευρωπαϊκής αγοράς [4]. Οι αγορές και γενικά η αποκέντρωση της ηλεκτροπαραγωγής προσδίδουν επιπρόσθετα οφέλη στη λειτουργία του Συστήματος τα οποία δεν είναι επιτεύξιμα από ένα σύστημα με κεντρικό σχεδιασμό όπως ο αποδοτικός υπολογισμός της κατανομής των πόρων, η μείωση της απαιτούμενης πληροφορίας για την εκπροσώπηση των παραγωγών και των καταναλωτών και η αποδοτικότερη επέκταση του συστήματος σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα [3]

2.2 Προθεσμιακή Αγορά

Ως προθεσμιακή αγορά ηλεκτρικής ενέργειας (Forward Market) θεωρούμε την αγορά στην οποία πραγματοποιούνται συναλλαγές είτε κεντρικά βασισμένες σε τυποποιημένες συμβάσεις με φυσική εκκαθάριση (δηλαδή υποχρέωση απορρόφησης ή έγχυσης ενέργειας με βάση μια προθεσμιακή σύμβαση στο Σύστημα Μεταφοράς) ή διμερώς (δηλαδή με διμερείς συμβάσεις με υποχρέωση φυσικής παράδοσης για παραγωγή και ζήτηση) [1]. Αυτή την αγορά διαχειρίζεται το ΕΧΕ και οι συμβάσεις αφορούν παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας χρόνια ή μήνες πριν τον πραγματικό χρόνο. Οι διμερείς συμβάσεις καλούνται προθεσμιακά συμβόλαια (forwards) ενώ οι κεντρικές τυποποιημένες συμβάσεις καλούνται Συμβόλαια Μελλοντικής εκπλήρωσης (futures) [4].

Τα προϊόντα τα οποία αποτελούν αντικείμενο της συναλλαγής καλούνται παράγωγα και είναι χρηματοοικονομικά προϊόντα των οποίων η αξία ορίζεται μέσω μια μεταβλητής (στην περίπτωση μας η ηλεκτρική ενέργεια) [1]. Τα παράγωγα ηλεκτρικής ενέργειας δεν συνδέονται απαραίτητα με φυσική παράδοση ενέργειας για αυτό και στη

προθεσμιακή αγορά του EXE συμμετέχουν και οντότητες οι οποίες δεν είναι μέλη της φυσικής αγοράς.

Προφίλ Φορτίου	Διάρκεια Παράδοσης	Ημέρες/Ωρες Παράδοσης
Βάσης	Έτος/Τρίμηνο/Μήνας/Εβδομάδα/ Σαββατοκύριακο/Ημέρα	Όλες οι ημέρες και ώρες
Αιχμής	Έτος/Τρίμηνο/Μήνας/Εβδομάδα Σαββατοκύριακο Ημέρα	Δευτέρα-Παρασκευή 8:00-20:00 CET Σάββατο- Κυριακή 8:00-20:00 CET 8:00-20:00 CET
Εκτός Αιχμής	Έτος/Τρίμηνο/Μήνας/Εβδομάδα/ Σαββατοκύριακο/Ημέρα	Το συμπληρωματικό της αιχμής ως προς βάση

Πίνακας 1 : Τυποποιημένα Συμβόλαια Στην Προθεσμιακή Αγορά [1]

Οι προθεσμιακές αγορές υπάρχουν προκειμένου να μετριάσουν το ρίσκο στο οποίο υπόκεινται οι συμμετέχοντες της αγοράς ηλεκτρισμού. Λόγω της έλλειψης (ή πολύ περιορισμένης) ικανότητας αποθήκευσης, η ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να καταναλώνεται την ώρα που παράγεται. Αυτό σε συνδυασμό με τις διακυμάνσεις σε παραγωγή (στοχαστικότητα ΑΠΕ, αστοχία μονάδας) και ζήτηση (ώρες αιχμής) οδηγεί σε αρκετά ασταθείς τιμές ηλεκτρισμού. Μέσω των προθεσμιακών αγορών επιτυγχάνεται η μείωση αυτής της αβεβαιότητας και βελτιώνεται ο οικονομικός προγραμματισμός του συστήματος αφού μέσω των παραγώγων οι τιμές κλειδώνουν. Επίσης, η ύπαρξη μακροχρόνιων συμβολαίων και η εγγύηση τιμών απαλύνει το επενδυτικό ρίσκο δίνοντας σταθερά εισοδήματα. Ακόμα, διευκολύνουν τις διασυνοριακές συναλλαγές ηλεκτρικής ενέργειας, επιταχύνοντας την σύγκλιση μεταξύ διαφορετικών περιοχών της Ε.Ε. Τέλος, παρέχουν απαραίτητη ρευστότητα στους συμμετέχοντες της αγοράς.

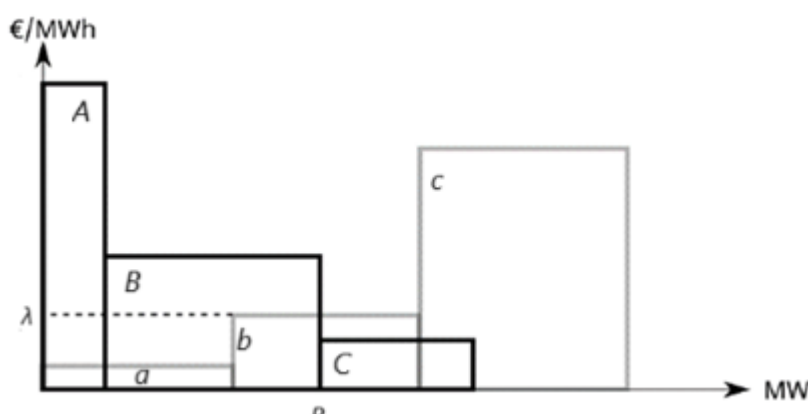
Στο EXE η προθεσμιακή αγορά λειτουργεί βάσει του κανονισμού Ενεργειακής Χρηματοπιστωτικής Αγοράς, ενώ η εκκαθάριση και ο διακανονισμός των συναλλαγών γίνονται από την Εταιρεία Εκκαθάρισης Συναλλαγών Χρηματιστηρίου Αθηνών (ΕΤ.ΕΚ) [1].

2.3 Αγορά Επόμενης Μέρας

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής θα ασχοληθούμε ιδιαίτερα με την αγορά επόμενης μέρας (Day – Ahead Market). Με τον όρο αγορά επόμενης μέρας αναφερόμαστε σε μια αγορά άμεσης πώλησης Ενέργειας η οποία οργανώνεται μέσω μια δημοπρασίας κατά την οποία συνδυάζονται οι καμπύλες προσφοράς και ζήτησης προς καθορισμό της τιμής με τρόπο ανώνυμο και διαφανή [1]. Τις αγορές αυτές τις διαχειρίζεται το EXE και έχουν χρονικό ορίζοντα μιας μέρας πριν τον πραγματικό χρόνο. Συγκεκριμένα, οι υποβαλλόμενες προσφορές για παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας γίνονται δεκτές μέχρι τις 12:00 CET την προηγούμενη της μέρας φυσικής παράδοσης.

Κατά την αγορά αυτή οι προσφορές παραγωγής και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας συλλέγονται από τον δημοπράτη (το EXE στην περίπτωση μας) και κατασκευάζονται οι καμπύλες προσφοράς και ζήτησης όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (με γκρι σχεδιάζεται η καμπύλη προσφοράς ενώ με μαύρο η καμπύλη ζήτησης).

Η τιμή εκκαθάρισης της αγοράς καθώς και οι ποσότητες παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας του κάθε συμμετέχοντα υπολογίζονται από την επίλυση της αγοράς. Η τιμή εκκαθάρισης είναι τέτοια ώστε η παραγωγή να ισούται με την ζήτηση.



Σχήμα 2: Καμπύλες Προσφοράς και Ζήτησης στην Αγορά Επόμενης Μέρας [3]

Η αγορά αυτή βασίζεται στην δημοπρασία ενιαίας τιμής η οποία αποτελεί μια γενίκευση της δημοπρασίας δεύτερης τιμής. Στην δημοπρασία ενιαίας τιμής αυτός με την φθηνότερη προσφορά αναλαμβάνει την παροχή ενός τεμαχίου του αγαθού (1 MW στην περίπτωση μας) και για την υπηρεσία του πληρώνεται όσο η προσφορά του δεύτερου φθηνότερου συμμετέχοντα στην δημοπρασία. Κατά αυτόν τον τρόπο η δημοπρασία εξωθεί τους συμμετέχοντες στο να δηλώσουν το αληθινό τους κόστος για την παροχή του αγαθού. Στην δημοπρασία ενιαίας τιμής συνεπώς η τιμή εκκαθάρισης είναι η τιμή την οποία πληρώνουν / πληρώνονται οι καταναλωτές /παραγωγοί του αγαθού αντίστοιχα και ισούται με την τιμή της φθηνότερης προσφοράς που δεν έγινε πλήρως δεκτή (στην περίπτωση αυτή η προσφορά παραγωγής b) [3] .

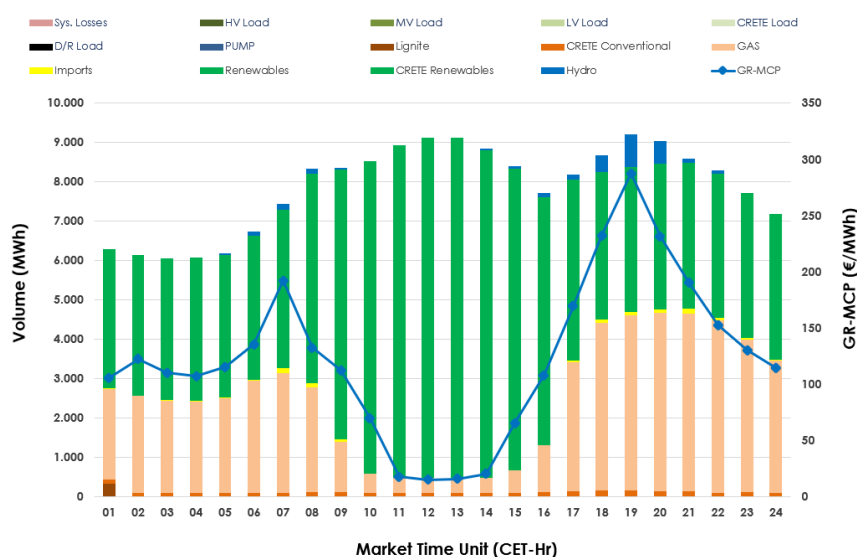
Στο παράδειγμά μας όλοι οι παραγωγοί θα πουλήσουν τα MW που όρισε η επίλυση της αγοράς από το EXE και θα ανταμειφθούν με λ ευρώ/MW αντίστοιχα. Οι καταναλωτές θα χρεωθούν λ ευρώ/MW. Η τιμή λ δρα ως σήμα της αγοράς ώστε να ωθήσει τους συμμετέχοντες σε κατάλληλες συμπεριφορές. Συγκεκριμένα, οι παραγωγοί με κόστος $< \lambda$ θα επιθυμήσουν να παρέχουν όλη την διαθέσιμη ισχύ τους, αυτοί με κόστος $> \lambda$ δεν θα συμμετέχουν στην παραγωγική διαδικασία και αυτοί με κόστος λ δεν έχουν κάποιο κέρδος ή ζημία από την συναλλαγή και συνεπώς παράγουν όσο τους ζητηθεί. Αντίστοιχα δρουν οι καταναλωτές. Η ύπαρξη τιμής εκκαθάρισης εξαρτάται από την μορφή των προσφορών στην αγορά, για προσφορές που εισάγουν μη κυρτότητες στο μοντέλο (πχ αλληλεξάρτηση μεταξύ χρονικών περιόδων) ενδέχεται να μην υπάρχει τιμή εκκαθάρισης που εξωθεί τους συμμετέχοντες στην επιθυμητή συμπεριφορά [3].

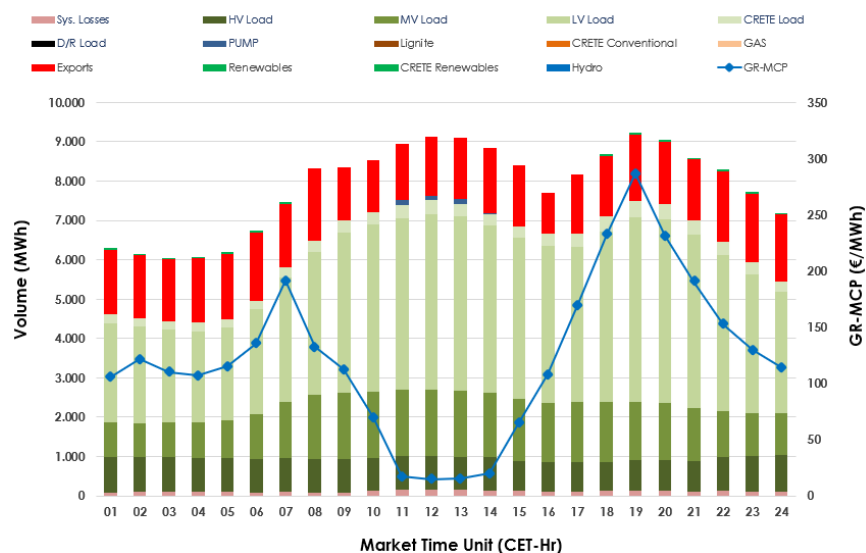
Οι προσφορές που υποβάλλονται καθώς και τα αποτελέσματα της αγοράς αυτής είναι σε ωριαίο επίπεδο. Αξίζει να σημειωθεί πως δεν επιβάλλονται κατά την επίλυση της αγοράς οι τεχνικοί περιορισμοί του Δικτύου ή των παραγωγών και συνεπώς τα αποτελέσματα της αγοράς δύναται να παραβιάζουν τους περιορισμούς του Συστήματος

Μεταφοράς. Αυτές οι αποκλίσεις χρειάζεται να διορθωθούν από την αγορά επικουρικών υπηρεσιών ή την αγορά εξισορρόπησης.

Στην Ελλάδα η αγορά επόμενης μέρας με την τωρινή της μορφή εκκίνησε 1.11.2020 ως μια αγορά που εμπορεύεται μόνο ενέργεια με υποχρέωση φυσικής παράδοσης την επόμενη μέρα (εν αντιθέσει με την προθεσμιακή αγορά). Οι προσφορές δηλώνονται ηλεκτρονικά και ανώνυμα και η συμμετοχή στην αγορά επόμενης μέρας είναι υποχρεωτική για τους παραγωγούς (οφείλουν να εξαντλούν το υπόλοιπο της διαθέσιμης ισχύος για τις μονάδες που εκπροσωπούν) και προαιρετική για τους υπόλοιπους συμμετέχοντες. Στην αγορά επόμενης μέρας μπορούν επίσης να δηλωθούν προϊόντα που αποκτήθηκαν από την προθεσμιακή αγορά. Τα ελάχιστα και τα μέγιστα όρια τιμών στην αγορά επόμενης μέρας ορίζονται στα -500 €/MWh και 3000 €/MWh αντίστοιχα

Η επίλυση της αγοράς γίνεται από τον αλγόριθμο EUPHEMIA όπου και ανακοινώνονται οι ποσότητες αγοράς και πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας και οι τιμές ανά ώρα. Οι τύποι εντολών που αξιοποιούνται στην αγορά επόμενης μέρας είναι αυτοί που υποστηρίζονται από τον αλγόριθμο EUPHEMIA και αποτελούν υποσύνολο των επιτρεπόμενων στην απόφαση του ACER [1]. Αυτές είναι οι ωριαίες υβριδικές εντολές, οι εντολές πακέτου, οι συνδεδεμένες εντολές πακέτου και η αποκλειστική ομάδα εντολών πακέτου. Μέσω αυτών είναι δυνατή η περιγραφή των μη γραμμικών κοστών μια μονάδας (όπως το κόστος εκκίνησης) τα οποία δεν γίνεται να εισαχθούν από απλές ωριαίες προσφορές.





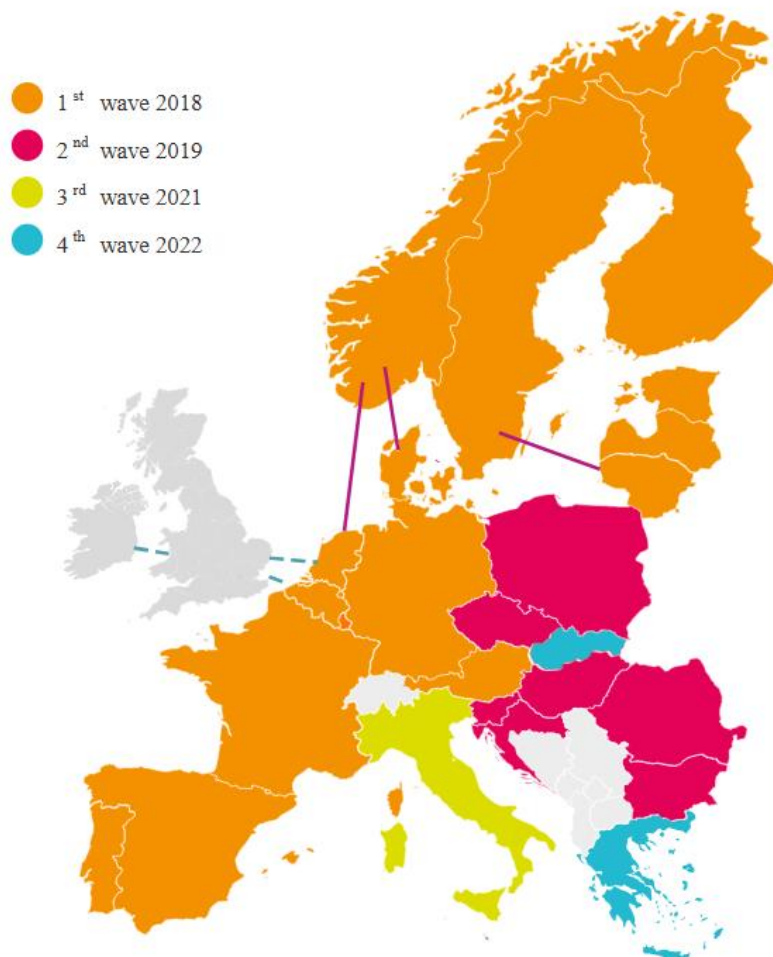
Σχήμα 3: Τα αποτελέσματα της αγοράς επόμενης μέρας για πώληση (πάνω) και αγορά (κάτω) ενέργειας για τις 4/3/25 όπως αυτά ανακοινώθηκαν από τον ENEX (<https://www.enxgroup.gr/el/markets-publications-el-day-ahead-market>)

2.4 Ενδοημερήσια Αγορά

Η αγορά προηγούμενης μέρας βασίζεται σε βραχυπρόθεσμες προβλέψεις για τα φορτία και την παραγωγή ΑΠΕ οι οποίες είναι αρκετά ακριβέστερες από ‘τι οι μακροπρόθεσμες προβλέψεις στις οποίες βασίζονται οι προθεσμιακές αγορές. Εντούτοις, δύναται να υπάρχουν αποκλίσεις την ημέρα φυσικής παράδοσης της ενέργειας είτε λόγω *αστοχίας* προβλέψεων, για παράδειγμα μια ξαφνική νηνεμία που μειώνει αισθητά την αιολική παραγωγή από την προβλεπόμενη, είτε λόγω απροσδόκητων *αστοχιών*, όπως η απροσδόκητη *αστοχία* μιας μονάδας. Η ενδοημερήσια αγορά αποσκοπεί στην μείωση αυτής της απόκλισης [4]. Η αγορά αυτή επιτυγχάνει την γεφύρωση της πρόβλεψης με την πραγματική ζήτηση μέσω της συνεχούς διαπραγμάτευσης της θέσης των συμμετεχόντων (όπως συμβαίνει σε Γαλλία, Γερμανία ή τις Σκανδιναβικές χώρες) ή αρκετών συνεδριών ενδοημερήσιας αγοράς (όπως συμβαίνει στην Ιταλία και την Ισπανία) έως και μερικά λεπτά πριν την φυσική παράδοση)

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύζευξη των ενδοημερήσιων αγορών η οποία πραγματοποιείται στη κοινή πλατφόρμα XBID επιτρέποντας στους παραγωγούς και τους καταναλωτές να διενεργούν συνεχείς συναλλαγές σε Πανευρωπαϊκό επίπεδο. Αυτό συνεισφέρει στην αύξηση του ανταγωνισμού και της ρευστότητας λόγω του αυξημένου αριθμού συμμετεχόντων στην αγορά, ενώ παράλληλα βοηθά τους συμμετέχοντες να μειώσουν τα κόστη εξισορρόπησης τους και να διορθώσουν την θέση τους μετά το κλείσιμο της αγοράς επόμενης μέρας (προβλήματα τα οποία είναι όλο και πιο έντονα λόγω της διεύδυσης των έντονα στοχαστικών ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας)[1]. Η εν λόγω σύζευξη υπήρξε μια πρωτοβουλία των διαχειριστών αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και των διαχειριστών συστήματος μεταφοράς των Ευρωπαϊκών χωρών (οι οποίοι αναλαμβάνουν την κοινοποίηση της

διαθέσιμης μεταφορικής ικανότητας των διασυνδέσεων).Η συμμετοχή στη σύζευξη έγινε σε κύματα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4. Αυτή την στιγμή τα μεγαλύτερα χρηματιστήρια ενέργειας στην Ευρώπη είναι το EPEX Spot (14 χώρες) και το NordPool (16 χώρες)[1] .



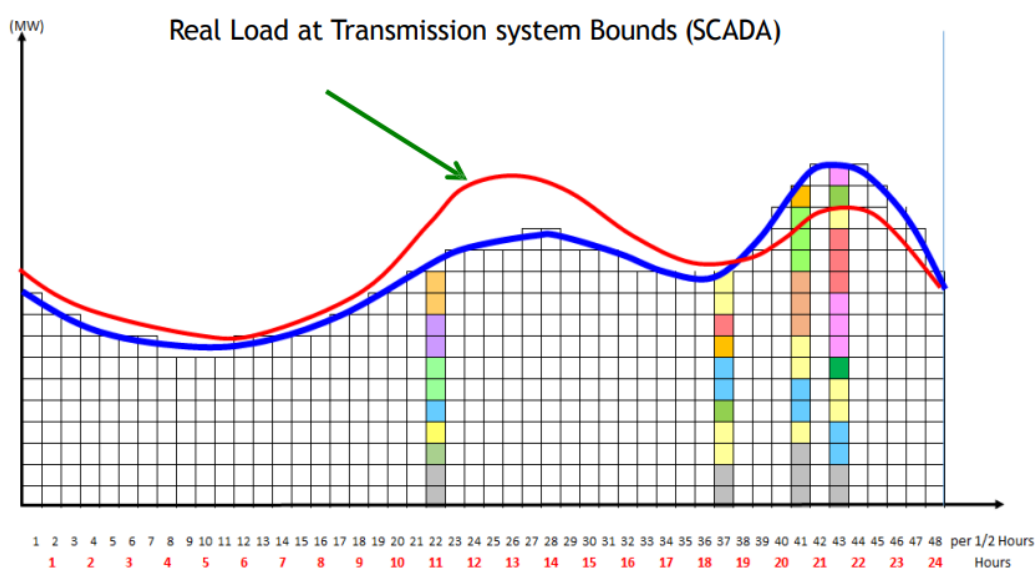
Σχήμα 4: Ενιαία Σύζευξη Ενδοημερήσιων Αγορών όπως αυτή εμφανίζεται του ENTSOE

Στην Ελλάδα η ενδοημερήσια αγορά ήταν προγραμματισμένη να ενταχθεί στο 3^ο κύμα σύζευξης μαζί με την Ιταλία το 2021 όμως λόγω καθυστέρησης αναδιαμόρφωσης της Ελληνικής Αγοράς Ενέργειας [1] η ένταξη έγινε το 2022 (πριν την ένταξη υπήρχαν μόνο τοπικές ενδοημερήσιες δημοπρασίες). Οι συμμετέχοντες υποβάλουν τις εντολές παραγωγής / κατανάλωσης στο τοπικό βιβλίο εντολών του Χρηματιστηρίου και αυτό με την σειρά του τις ανεβάζει στο Κοινόχρηστο Βιβλίο Εντολών της πλατφόρμας XBID. Αξίζει να σημειωθεί πως τα προϊόντα διαφέρουν σε χρονική διάρκεια ανάλογα με την περιοχή διεξαγωγής της ενδοημερήσιας δημοπρασίας, για παράδειγμα σε χώρες όπως η Ελλάδα και η Ιταλία η διάρκεια είναι συνήθως 1 ώρα ενώ σε χώρες της Βόρειας και της Κεντρικής Ευρώπης τα προϊόντα διαρκούν μέχρι και 15 λεπτά [1] .

2.5 Αγορά Ενέργειας Εξισορρόπησης και επικουρικών υπηρεσιών

Πλην της αγοράς προηγούμενης μέρας ιδιαίτερα κομβική για την παρούσα εργασία είναι η αγορά εξισορρόπησης. Ως εξισορρόπηση σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ορίζουμε την διαδικασία κατά την οποία η παραγωγή ισχύος ισούται ακριβώς με την κατανάλωση. Η εξισορρόπηση είναι απαραίτητη για την ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος καθώς αποκλίσεις μεταξύ παραγόμενης και καταναλισκόμενης ισχύος μεταβάλλουν την συχνότητα του συστήματος το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε μαζική αποσύνδεση φορτίων και παραγωγών (κατάρρευση συστήματος). Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας μαζικής κατάρρευσης συστήματος ήταν αυτό της Κεντρικής Ευρώπης 4/11/06 [1].

Προς επίτευξη της εξισορρόπησης αξιοποιείται είτε ενέργεια εξισορρόπησης είτε εφεδρείες. Η πρώτη αναφέρεται στη διαδικασία προσαρμογής (σε σχέση με το πρόγραμμα αγοράς τους) της παραγωγής ή της κατανάλωσης των ευέλικτων πόρων του συστήματος σε πραγματικό χρόνο ενώ η δεύτερη αναφέρεται στη δέσμευση πόρων από τους παρόχους υπηρεσιών εξισορρόπησης προκειμένου να αποκτήσει ο διαχειριστής του Συστήματος Μεταφοράς επιλογή κατανομής των πόρων κατά την περίοδο κράτησης. Η εφεδρεία προσφέρεται από τους παρόχους μέσω της επιλογής Προσφορών Εφεδρείας [1]. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4 υπάρχουν δύο είδη εξισορρόπησης: άνω και κάτω. Η πρώτη απαιτείται σε καταστάσεις όπου το πραγματικό φορτίο βρίσκεται πάνω από το προβλεπόμενο ή η παραγωγή κάτω από την προγραμματιζόμενη (όπως στην ώρα 13 στο σχήμα 4). Η δεύτερη απαιτείται σε καταστάσεις όπου το πραγματικό φορτίο βρίσκεται κάτω από το προβλεπόμενο ή η παραγωγή πάνω από την προγραμματιζόμενη (όπως στην ώρα 22 στο σχήμα 4).



Σχήμα 5: Σύγκριση πραγματικού φορτίου (κόκκινη γραμμή) όπως αυτό μετρήθηκε από τα συστήματα τηλεμετρικής του ΑΔΜΗΕ, με πρόβλεψη φορτίου στην αγορά επόμενης μέρας (μπλε γραμμή) [5]

Η αγορά εξισορρόπησης λοιπόν είναι το σύνολο των πόρων (θεσμικών, εμπορικών και λειτουργικών) οι οποίοι εξασφαλίζουν την απαραίτητη ενέργεια εξισορρόπησης σε πραγματικό χρόνο (η περίοδος κατανομής είναι ανά 15 λεπτά). Στην αγορά εξισορρόπησης συμμετέχουν οι παραγωγοί (ως εκπρόσωποι μονάδων παραγωγής, μονάδων παραγωγής σε δοκιμαστική λειτουργία και συμβεβλημένες μονάδες), οι εκπρόσωποι φορτίου (ως εκπρόσωποι χαρτοφυλακίων μη κατανεμό-μενου φορτίου), οι φορείς σωρευτικής εκπροσώπησης απόκρισης ζήτησης (ως εκπρόσωποι χαρτοφυλακίων κατανεμόμενου φορτίου), οι παραγωγοί ΑΠΕ (ως εκπρόσωποι μονάδων) και φορείς σωρευτικής εκπροσώπησης ΑΠΕ (ως εκπρόσωποι χαρτοφυλακίων ΑΠΕ κατανεμόμενων και μη) [1]. Ως κατανεμόμενοι καλούνται οι πόροι οι οποίοι δύναται να δεχθούν εντολές από τον διαχειριστή Συστήματος μεταφοράς. Σε αντίθεση με τις άλλες αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, η αγορά αυτή ρυθμίζεται από τον διαχειριστή συστήματος μεταφοράς (ΑΔΜΗΕ στην περίπτωση της Ελλάδας) και όχι από το χρηματιστήριο.

Ο διαχειριστής του Συστήματος Μεταφοράς οφείλει να προβλέπει τις επικείμενες ανισορροπίες του συστήματος και να προμηθεύεται επαρκή ενέργεια προκειμένου να τις εξουδετερώσει. Η ενέργεια αυτή, η οποία παρέχεται μέσω προσφορών των παρόχων υπηρεσιών εξισορρόπησης, παρέχεται στον διαχειριστή μέσω της αγοράς εξισορρόπησης. Αυτή εκκαθαρίζεται για κάθε περίοδο κατανομής πραγματικού χρόνου όπου και ανακοινώνονται οι τιμές για ανοδική και καθοδική ενέργεια εξισορρόπησης (η τιμή προκύπτει μέσω ενιαίας τιμολόγησης όπως στην αγορά επόμενης μέρας) [1]. Στην περίπτωση ανοδικής εξισορρόπησης, ο διαχειριστής πληρώνει την ενέργεια που λαμβάνει. Στην περίπτωση καθοδικής εξισορρόπησης, ο διαχειριστής πληρώνεται για την ενέργεια που δίνει.

Εντούτοις, η ενέργεια εξισορρόπησης είναι πεπερασμένη. Συνεπώς, για να μετριαστεί ο κίνδυνος να μην έχει ο διαχειριστής του Συστήματος Μεταφοράς επαρκείς πόρους για την εξισορρόπηση εξασφαλίζει εκ των προτέρων επαρκή ποσότητα εφεδρειών. Αυτή την εφεδρεία εξασφαλίζει ο διαχειριστής μέσω των αγορών επικουρικών υπηρεσιών. Οι πάροχοι υπηρεσιών εξισορρόπησης υποβάλουν τις προσφορές τους (διαθέσιμα MW και €/MW) ανά είδος εφεδρείας και ο διαχειριστής εκκαθαρίζει την αγορά (ως ζήτηση θεωρείται η απαιτούμενη ποσότητα εφεδρείας σε MW από τον διαχειριστή) [1]. Η τιμή εφεδρείας ορίζεται μέσω τιμολόγησης ενιαίας τιμής (όπως στην αγορά προηγούμενης μέρας).

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο ορίζονται τα ακόλουθα είδη εφεδρείας τα οποία αποτυπώνονται και στο σχήμα 5:

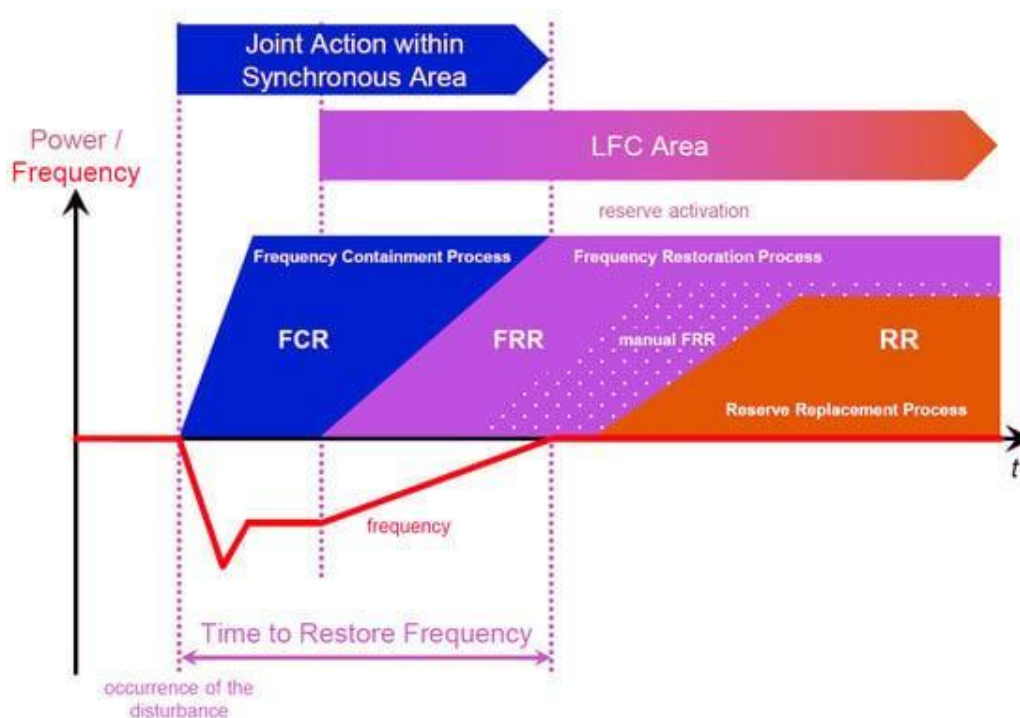
1) Εφεδρεία διατήρησης συχνότητας (Frequency Containment Reserve FCR): Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι αποκλίσεις στην ποσότητα παραγόμενης και καταναλισκόμενης ισχύος επιφέρουν αλλαγή στην συχνότητα του συστήματος. Συγκεκριμένα, το πλεόνασμα παραγωγής αυξάνει την συχνότητα ενώ το πλεόνασμα ζήτησης μειώνει την συχνότητα [3]. Η εφεδρεία συγκράτησης συχνότητας (ή πρωταρχική εφεδρεία όπως αλλιώς εντοπίζεται στην βιβλιογραφία) αποτελεί την πρώτη και ταχύτερη άμυνα έναντι του φαινομένου αυτού (τόσο για άνω όσο και για

κάτω την εξισορρόπηση). Η λειτουργία της χρειάζεται λίγα δευτερόλεπτα για να επιτευχθεί και ως σκοπό έχει τον περιορισμό στην απόκλιση της συχνότητας από την ονομαστική συχνότητα.

2) Εφεδρεία αποκατάστασης συχνότητας (Frequency Restoration Reserve FRR): Αυτή ενεργοποιείται μετά από την εφεδρεία διατήρησης συχνότητας και πρέπει να είναι διαθέσιμη σε μερικά δευτερόλεπτα (επίτευξη πλήρους απόκρισης σε 5-10 λεπτά) [3]. Χωρίζεται σε χειροκίνητη και αυτόματη εφεδρεία (ενώ σε άλλα συστήματα υπάρχει ο διαχωρισμός μεταξύ στρεφόμενης και μη στρεφόμενης εφεδρείας). Στην βιβλιογραφία αυτή η κατηγορία εμφανίζεται και ως δευτερογενής εφεδρεία. Στόχος της είναι να επιστρέψει την συχνότητα στην ονομαστική τιμή της.

3) Εφεδρεία αντικατάστασης (Replacement Reserve RR): Αλλιώς γνωστή και ως τριτογενής έλεγχος είναι η κατηγορία εφεδρείας που ενεργοποιείται τελευταία (πρέπει να είναι διαθέσιμη σε διάστημα λίγων λεπτών). Αντικαθιστά τις εφεδρείες αποκατάστασης συχνότητας (αποδεσμεύοντας τες και επιτρέποντάς τους να είναι εκ νέου διαθέσιμες για μελλοντική εξισορρόπηση) και διορθώνει, μέσω της λειτουργίας της, την απόκλιση παραγωγής – ζήτησης [1].

Αξίζει να σημειωθεί πως οι εφεδρείες οι οποίες συμμετέχουν στις προηγούμενες κατηγορίες μπορούν να συμμετέχουν και στις επόμενες κατηγορίες (υποκατάσταση μίας κατεύθυνσης) και άρα είναι πιο πολύτιμες [3].



Σχήμα 6: Οι κατηγορίες εφεδρειών όπως εξήχθησαν από το κείμενο του ENTSO-E : *Supporting Document for the Network Code on Load Frequency Control and Reserves*

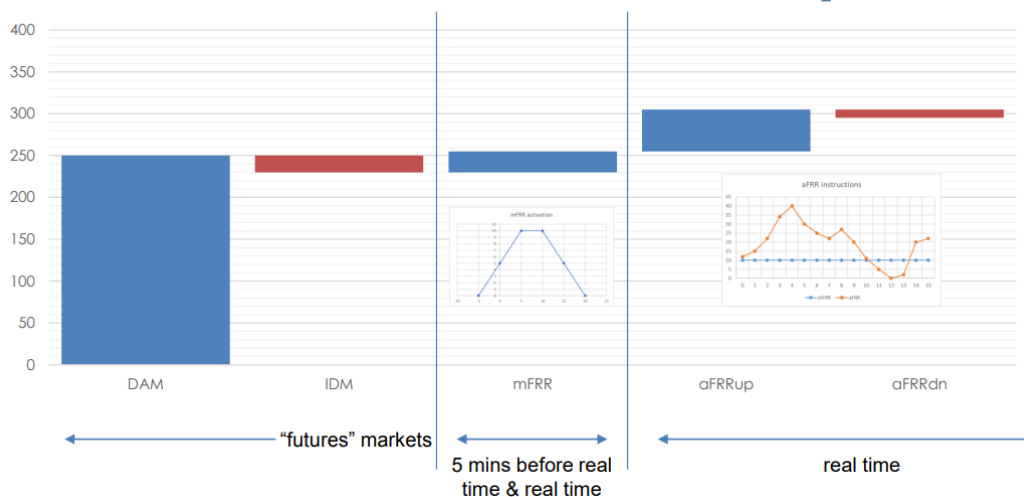
Οι εφεδρείες δεν είναι οι μόνες επικουρικές υπηρεσίες που μπορούν δημοπρατηθούν σε μια αγορά. Άλλες τέτοιες υπηρεσίες που εντοπίζονται σε αγορές ανά τον κόσμο είναι

η ρύθμιση τάσης (voltage regulation) και η εκκίνηση του δικτύου μετά από διακοπή (blank start capabilities).

Στο ελληνικό Σύστημα η αγορά εξισορρόπησης βασίζεται στο σύστημα Κεντρικού Προγραμματισμού και Κατανομής. Η κεντρική διαδικασία αυτή αποτελείται από δύο φάσεις. Αρχικά, μια μέρα πριν τον πραγματικό χρόνο (μέρα D-1) εκτελείται από τον διαχειριστή του Συστήματος η διαδικασία ενοποιημένου προγραμματισμού κατά την οποία επιλύεται ένα μοντέλο ένταξης μονάδων για την ημέρα D (ακολουθούνται και άλλες εκτελέσεις παρόμοιου μοντέλου κατά το ενδοημερήσιο στάδιο) [1]. Το μοντέλο κατά την επίλυσή του αποφασίζει την βέλτιστη προμήθεια προϊόντων ενέργειας εξισορρόπησης και εφεδρείας για τον διαχειριστή σε επίπεδο ημιώρου δεδομένων των προσφορών και των τεχνοοικονομικών στοιχείων των παρόχων υπηρεσιών εφεδρειών καθώς και των προγραμμάτων αγοράς των συμμετεχόντων της αγοράς. Ο στόχος του ΔΕΠ είναι να βρει τον οικονομικότερο τρόπο για να προμηθευτεί ο διαχειριστής τα προϊόντα δεδομένων των περιορισμών των μονάδων και του συστήματος. Πριν τον πραγματικό χρόνο γίνονται διορθώσεις στη θέση των πόρων.

Μετά την διαδικασία ενοποιημένου προγραμματισμού και όντας πιο κοντά στον πραγματικό χρόνο λαμβάνει χώρα η αγορά ενέργειας εξισορρόπησης πραγματικού χρόνου η οποία και αποτελεί τη δεύτερη φάση της διαδικασίας. Στην αγορά αυτή ο διαχειριστής του Συστήματος στέλνει εντολές στους παρόχους προς ενεργοποίηση της ενέργειας εξισορρόπησης τους σε επίπεδο τετάρτου (15') στον πραγματικό χρόνο. Στο σχήμα 7 φαίνονται οι αλλαγές της θέσης μιας μονάδας από την αρχική της θέση όπως αυτή διαμορφώθηκε στην αγορά επόμενης μέρας μέχρι την τελική της θέση στον πραγματικό χρόνο

Market Position Example



Σχήμα 7: Παράδειγμα θέσης αγοράς μιας μονάδας με μπλε συμβολίζεται η αύξηση ισχύος και με κόκκινο η μείωση [5]

Οι εντολές προς ενεργοποίηση ενέργειας εξισορρόπησης είναι δεσμευτικές. Σε περίπτωση μη συμμόρφωσης η μονάδα οφείλει να επισημάνει την μη συμμόρφωση στον διαχειριστή και ενδεχομένως να δεχθεί χρέωση μη συμμόρφωσης. Επίσης, το

πρόγραμμα αγοράς της μονάδας θεωρείται επίσης δεσμευτικό. Στην περίπτωση μη συμμόρφωσης οι μονάδες δέχονται κυρώσεις για τις αποκλίσεις τους οι οποίες υπολογίζονται από την διαφορά μεταξύ του προγράμματός τους και της μετρούμενης ποσότητας ισχύος τους [1].

Κεφάλαιο 3: Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας

Σύμφωνα με τους εθνικούς και τους Ευρωπαϊκούς στόχους τα κράτη-μέλη της Ένωσης οφείλουν να συνεισφέρουν στον περιορισμό της μείωσης της υπερθέρμανσης του πλανήτη σε $1.5 - 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ σε σχέση με τα επίπεδα πριν την εκβιομηχάνιση. Αυτός ο περιορισμός θα υλοποιηθεί μέσω της δραστηκής μείωσης της εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου από ανθρώπινη δραστηριότητα κατά 55% μέχρι το 2030 (σε σχέση με τα επίπεδα τους το 1990) και κατά 100% μέχρι το 2050 (επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας) [6]. Προς επίτευξη του στόχου αυτού ένα απαραίτητο πρώτο βήμα είναι η απανθρακοποίηση της ηλεκτροπαραγωγής μέσω μαζικής ένταξης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στο ενεργειακό μίγμα. Συγκεκριμένα, το 45% της παραγόμενης ενέργειας πρέπει να προέρχεται από ΑΠΕ μέχρι το 2030 (το ποσοστό ανέρχεται στο 90% το 2050) [2]. Η επίτευξη του στόχου αυτού δεν είναι εφικτή χωρίς την μαζική ένταξη της αποθήκευσης στο ενεργειακό μίγμα, ενώ υπολογίζεται πως για την επίτευξη των στόχων διείσδυσης ΑΠΕ του 2030 θα χρειαστούν 5000MW αποθήκευσης εκ των οποίων περίπου τα 2000 MW θα προσφέρονται από σταθμούς αντλησιοταμίευσης και τα 3000MW από σταθμούς μπαταριών [6]. Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει μία εισαγωγή στις κυριότερες μεθόδους και στα οφέλη της αποθήκευσης ενέργειας, και θα παρουσιαστεί η μέθοδος μοντελοποίησης ενός σταθμού αποθήκευσης προς ένταξη του σε προβλήματα βελτιστοποίησης.

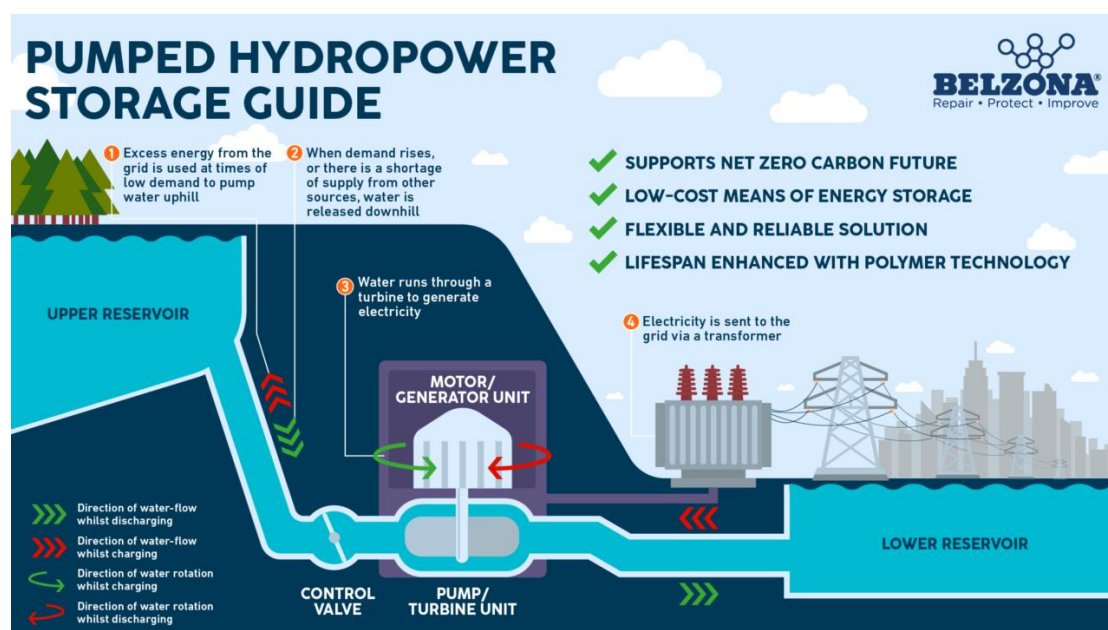
3.1 Τεχνολογίες Αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

Η ηλεκτρική ενέργεια δεν αποθηκεύεται εύκολα και οικονομικά. Προκειμένου να γίνει η αποθήκευση μετατρέπεται σε μίαν άλλη μορφή ενέργειας και μετά πάλι σε ηλεκτρική για να καταναλωθεί. Με γνώμονα το είδος της μορφής ενέργειας στην οποία η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται για να αποθηκευτεί οι τεχνολογίες αποθήκευσης κατηγοριοποιούνται σε [2,7]:

1. Μηχανικές, όπως η αντλησιοταμίευση (PHS), η αποθήκευση με πεπιεσμένο αέρα (CAES) και η αποθήκευση σε σφονδύλους (Flywheels). Οι πρώτες αποθηκεύουν την ενέργεια με την μορφή δυναμικής ενώ η τελευταία με την μορφή κινητικής ενέργειας.
2. Ηλεκτροχημικές, όπως οι μπαταρίες (ιόντων-λιθίου, μολύβδου-οξέος, θείου-νατρίου κτλ)
3. Θερμικές, όπως η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας μέσω αλάτων (MSES), η άντληση θερμότητας (PHES) και η υγροποίηση αέρα (LAES). Η πρώτη χαρακτηρίζεται ως αποθήκευση υψηλής θερμοκρασίας ενώ οι άλλες ως χαμηλής
4. Χημικές, όπως το υδρογόνο και το συνθετικό φυσικό αέριο
5. Ηλεκτρομαγνητικές, όπως οι ηλεκτροστατικές μέθοδοι (μέσω υπερπυκνωτών) και οι μαγνητικές μέθοδοι (SMES)

Αξίζει να σημειωθεί πως μία άλλη κατηγοριοποίηση των μεθόδων αποθήκευσης είναι βάσει της λειτουργίας τους. Ορισμένες τεχνολογίες χαρακτηρίζονται από υψηλή παρεχόμενη ισχύ και χαμηλή ενέργεια οι οποίες συνεισφέρουν κυρίως στην ποιότητα ισχύος και την αδιάλειπτη παροχή ισχύος (όπως οι μπαταρίες) και άλλες που αποσκοπούν κυρίως στην διαχείριση ενέργειας (όπως η αντλησιοταμίευση) [7].

Αυτή την στιγμή η κυρίαρχη τεχνολογία αποθήκευσης είναι η αντλησιοταμίευση. Με τα δεδομένα του 2023, το 95% της παγκόσμιας αγοράς συστημάτων αποθήκευσης ανήκει στην αντλησιοταμίευση (συνολικά εγκατεστημένη ισχύ πάνω από 120GW) [2]. Αυτοί οι σταθμοί αποθήκευσης, όπως φαίνεται και από το σχήμα 8, αποτελούνται από δύο ταμιευτήρες με υψομετρική διαφορά, μία αντλία για να στέλνει το νερό από τον κάτω στον άνω ταμιευτήρα (φόρτιση) και από μια γεννήτρια η οποία δημιουργεί ηλεκτρικό ρεύμα κατά την κίνηση του νερού από τον άνω στον κάτω ταμιευτήρα (εκφόρτιση). Ορισμένες υδροηλεκτρικές μονάδες με ψηλά φράγματα και ικανότητα αποθήκευσης μπορούν να μετατραπούν σε μονάδες αντλησιοταμίευσης. Η ίδια μονάδα μπορεί να δράσει και ως αντλία και ως γεννήτρια ενώ ως κάτω ταμιευτήρας δύναται να λειτουργήσει τόσο η ανοικτή θάλασσα όσο και υπόγεια νερά [7]. Ακόμη, η αποθηκευμένη ενέργεια εξαρτάται από την υψομετρική διαφορά μεταξύ ταμιευτήρων και από τον όγκο αποθηκευμένου νερού.



Σχήμα 8 Διάγραμμα συστήματος αποθήκευσης με αντλησιοταμίευση όπως αυτό εξήχθη από <https://blog.belzona.com/how-to-improve-pumped-hydro-storage-efficiency/>

Η αντλησιοταμίευση είναι μια αρκετά ώριμη τεχνολογία σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες αποθήκευσης, αφού οι πρώτες χρήσεις σταθμών αντλησιοταμίευσης εντοπίζονται στην Ιταλία και την Ελβετία την δεκαετία του 1890 [7]. Πρόκειται για ιδιαίτερα μεγάλα έργα (μεγέθους από μερικές εκατοντάδες έως αρκετές χιλιάδες MW) τα οποία λόγω της μικρής απώλειας όγκου λόγω εξάτμισης του νερού, του ικανοποιητικού βαθμού απόδοσης (60-80%) και της ικανότητας εκφόρτισης

για πολλές ώρες [2] μπορούν να αποθηκεύουν μεγάλα ποσά ενέργειας για μεγάλα χρονικά διαστήματα (ώρες έως και μέρες). Επίσης, ανατροφοδοτούνται με φυσικές μεθόδους (π.χ. βροχόπτωση) αποκτώντας έτσι επιπλέον ενέργεια χωρίς την ανάγκη φόρτισης. Λόγω της τεχνολογικής αυτής ωριμότητας είναι μια από τις φθηνότερες μορφές αποθήκευσης. Επίσης, αποτελούν έργα πολλαπλών σκοπών καθώς το αποθηκευμένο νερό στους ταμιευτήρες δύναται να αξιοποιηθεί για διαφόρων ειδών εργασίες (π.χ. καλλιέργειες). Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως τα έργα αυτά έχουν πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής (>30 χρόνια όπως φαίνεται στο σχήμα 10)

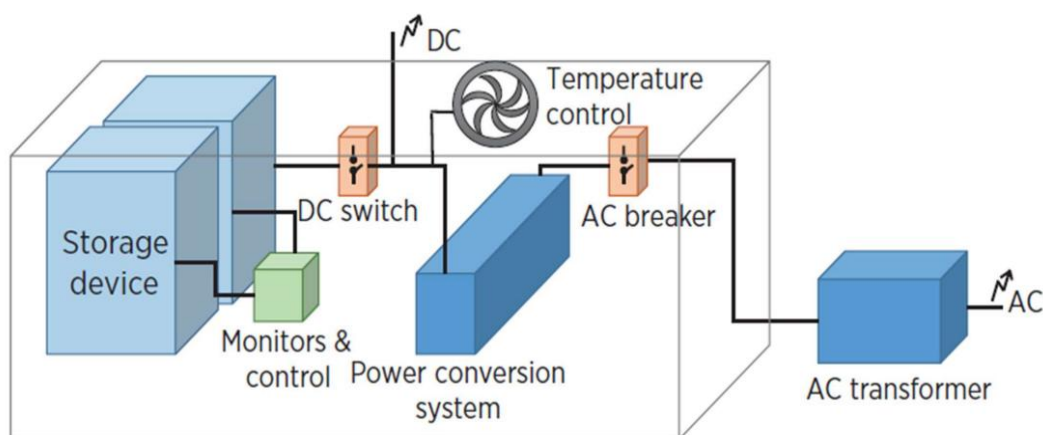
Παρόλα τα σπουδαία τεχνικά πλεονεκτήματα παρατηρείται πως η κατασκευή νέων μονάδων αντλησιοταμίευσης έχει μειωθεί δραστικά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι θέσεις εγκατάστασης τέτοιων έργων είναι περιορισμένες και έχουν σε έναν βαθμό εξαντληθεί. Επίσης, λόγω του μεγάλου μεγέθους παρουσιάζουν πολύ υψηλό αρχικό επενδυτικό κόστος το οποίο απωθεί πολλούς πιθανούς επενδυτές (αν και το ανά MW κόστος είναι από τα χαμηλότερα για την αποθήκευση). Τέλος, η κατασκευή του σταθμού διαρκεί πολλά χρόνια και εμφανίζει καθυστερήσεις λόγω περιβαλλοντικών ζητημάτων.

Η πλέον ανερχόμενη τεχνολογία αποθήκευσης και αυτή που αναλύεται εκτενέστερα στην παρούσα εργασία είναι αποθήκευση μέσω συστημάτων συσσωρευτών/μπαταριών (Battery Energy Storage System BESS). Οι μπαταρίες ως τεχνολογία αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι από τις παλαιότερες (αν και όχι για εφαρμογές επιπέδου Δικτύου). Μια μπαταρία αποτελείται από ένα θετικό άνοδος, ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο κάθοδος και ενδιάμεσα τους έναν ηλεκτρολύτη ο οποίος και επιτρέπει την κίνηση ιόντων μεταξύ ανόδου και καθόδου. Κατά την εκφόρτιση οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις των ηλεκτροδίων δημιουργούν ροή ηλεκτρονίων στο εξωτερικό κύκλωμα και άρα ηλεκτρικό ρεύμα. Οι αντιδράσεις είναι αντιστρέψιμες αν επιβληθεί εξωτερική τάση στην μπαταρία (μηχανισμός φόρτισης).

Όπως γίνεται εμφανές τέτοιοι σταθμοί αποτελούνται πρωτίστως από την συσκευή αποθήκευσης, η οποία συνήθως είναι μπαταρία ιόντος-λιθίου (Li-ion) ή πιο σπάνια μια μπαταρία μολύβδου-οξέος (Lead-acid). Αποτελείται επίσης από τον μετατροπέα ισχύος και τον μετασχηματιστή προκειμένου η DC τάση της μπαταρίας να μετατραπεί σε AC και να ανυψωθεί στο επίπεδο του υφιστάμενου Δικτύου. Τέλος, υπάρχουν και διάφορα επικουρικά συστήματα όπως το σύστημα διαχείρισης της μπαταρίας (το οποίο αναλαμβάνει τον έλεγχο του συστήματος), το σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας (που αναλαμβάνει τον εξαερισμό και την διαχείριση της θερμοκρασίας του συστήματος σε αποδεκτά επίπεδα) και προφανώς τα απαραίτητα συστήματα προστασίας και απομόνωσης.

Αν και οι παλαιότερες και από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες επαναφορτιζόμενες μπαταρίες είναι οι μολύβδου-οξέος (εφευρέθηκαν το 1859) [7], η πιο διαδεδομένη τεχνολογία ηλεκτροχημικής αποθήκευσης σε νέες εγκαταστάσεις είναι η μπαταρίες Li-ion. Η πρώτη τέτοια συσκευή κατασκευάστηκε από την Sony 1990 και, αν και αρχικά είχε απαγορευτικά υψηλό κόστος για εφαρμογές μεγάλου μεγέθους (>600\$/kWh) [7], τα τελευταία χρόνια παρατηρείται έντονη πτώση του κόστους η οποία οδήγησε και

στην καθολική κυριαρχία της εμπορικά. Μέσα σε διάστημα λιγότερο των 10 χρόνων η τιμή των μπαταριών Li-Ion έπεσε από 730\$/kWh σε 150\$/kWh [2].



Σχήμα 9: Τυπική διάταξη συστήματος μπαταριών [2]

Οι μπαταρίες αποτελούν σχετικά μικρά έργα, από μερικές εκατοντάδες kW έως και μερικά MW εν αντιθέσει με την αντλησιοταμίευση, τα οποία λειτουργούν με πολύ υψηλό συντελεστή απόδοσης (60-80%). Επίσης, όπως φαίνεται από το Σχήμα 10, η απόκριση τους είναι ταχύτατη (μερικά ms) και παρέχει ισχύ υψηλής ποιότητας γεγονός που τις κάνει ιδιαίτερα ευέλικτες και ιδανικές για παροχή επικουρικών υπηρεσιών (όπως εφεδρεία συγκράτησης συχνότητας) στο Δίκτυο. Τέλος, λόγω του μικρού μεγέθους τους και τις σχετικά εύκολης ανάπτυξης τους αποτελούν τεχνολογίες αποθήκευσης ικανές για εφαρμογές τόσο Δικτύου όσο και Συστήματος [2].

Αν και το ενδιαφέρον για τις μπαταρίες είναι αυξημένο σε σχέση με τα παλαιότερα χρόνια [2,6] τα τεχνικά μειονεκτήματα των τεχνολογιών αυτών δεν πρέπει να αγνοηθούν. Η τιμή των σταθμών αυτών παραμένει αρκετά υψηλή παρόλες τις μειώσεις στην τιμή τα τελευταία χρόνια. Επίσης, καθώς οι συσσωρευτές δεν ενδείκνυνται για πολύωρη αποθήκευση (συνήθως 1-4 ώρες) γεγονός που περιορίζει τις εφαρμογές τους στο Δίκτυο. Ακόμα, ο μικρός χρόνος ζωής τους (2-10 χρόνια) σε συνδυασμό με την εξάρτησή τους από σπάνιες γαίες και την δύσκολη ανακύκλωση οδηγεί σε ανησυχία σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που θα έχει η μαζική υιοθέτηση των σταθμών αποθήκευσης μέσω μπαταριών. Αυτές οι επιπτώσεις αφορούν τόσο την κατασκευή των σταθμών (εξόρυξη και μεταφορά πρώτων υλών, περιορισμένα αποθέματα πρώτων υλών) όσο και στην τελική απομάκρυνση τους λόγω χρήσης τοξικών υλικών προς κατασκευή μπαταριών τα οποία απαιτούν ιδιαίτερη μεταχείριση για την ασφαλή απομάκρυνση τους. Τέλος, υπάρχουν και ανησυχίες σχετικά με την οικονομική βιωσιμότητα και την συμμετοχή στην αγορά των σταθμών αυτών ιδίως μετά την μεγάλη διείσδυση τους στα ηλεκτρικά συστήματα.

Τέλος, αξίζει να αναφερθούμε και στην μορφή αποθήκευσης η οποία πιθανώς θα παίξει κομβικό ρόλο στην μεταμόρφωση του ενεργειακού μας συστήματος τα επόμενα χρόνια, την αποθήκευση με υδρογόνο. Μέσω χρήσης της περίσσειας ηλεκτρικής

ενέργειας (για παράδειγμα από υπερπαραγωγή ΑΠΕ) μπορεί να παραχθεί το πράσινο υδρογόνο μέσω της χημικής διαδικασίας της υδρόλυσης (διάσπασης νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο). Το υδρογόνο αυτό δύναται να αποθηκευτεί και να αξιοποιηθεί μελλοντικά για την κάλυψη διαφόρων ενεργειακών αναγκών (μεταφορές ή θέρμανση για παράδειγμα) ή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [2]. Μέσω αυτής της τεχνολογίας μπορεί να επιτευχθεί τόσο η μακροχρόνια αποθήκευση ενέργειας (καθώς έχει πολύ υψηλή διάρκεια ζωής) όσο η εξηλεκτρίση και η απανθρακοποίηση τομέων όπως οι μεταφορές μεγάλων αποστάσεων οι οποίοι δεν μπορούν να μετατραπούν εύκολα σε κλιματικά ουδέτεροι με τις τωρινές τεχνολογίες. Αποτελούν λοιπόν μία καίρια τεχνολογία για την επίτευξη των κλιματικών εθνικών στόχων [6]. Εντούτοις, η τεχνολογία αυτή πάσχει από υψηλά κόστη και απογοητευτικά χαμηλή απόδοση, όπως φαίνεται από το σχήμα 10) καθώς και από ελλιπή θεσμικό (απουσία αγοράς και σχετικής νομοθεσίας) και τεχνικό πλαίσιο (απουσία υποδομών τόσο για την μεταφορά όσο και την μαζική παραγωγή του).

Energy storage device	Flywheel energy storage	Pumped-hydro storage	CAES	BES	H ₂ fuel storage
Capacity (MW)	0.1-10	100-1000	0.1-1000	0.1-10	0.1-1
Duration of storage	Short term (< 15 sec)	Long term (6 months)	long term (> 1 year)	Short term	long term
Type of storage	kinetic energy	Potential energy	Potential energy	electro-chemical energy	Electro-chemical energy
Lifetime	40 years	30+ yrs [81]	30 yrs	2-10 yrs	40000 hrs
Response time	Very short in ms (5ms)	10-30 ms	3-15 min	30 ms	0.5 s
Duration of discharge at maximum power level	minutes to 1 hour	12 hrs	4-24 hrs	1-8 hrs	Hours as needed [82]
Round up efficiency (%)	90	80	60-75	60-80	50
Energy density	10-100 Wh/kg	~2000 Wh/m ³	~3 Wh/mol	20-40 Wh/kg (lead-acid)	20-45 kWh/kg
Cost	150-250 €/kW	2500-3000 \$/kW	\$517/kW [82]	50-250 €/kW (lead acid)	\$4.03/kg
Operating temperature	normal atmospheric	Normal atmospheric	Normal atmospheric	high 0-100°F for lead acid	50-120°C

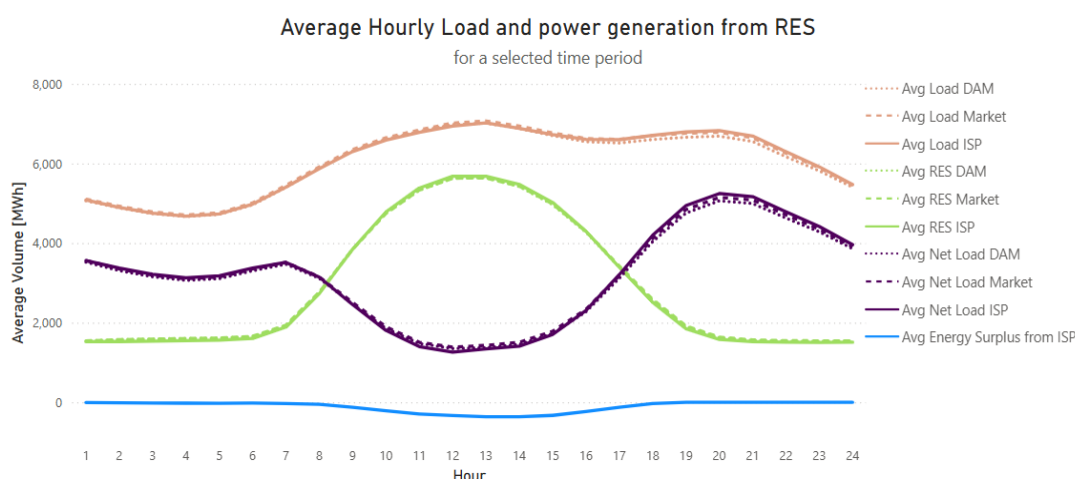
Σχήμα 9 : Σύγκριση μεγεθών μεταξύ σταθμών αποθήκευσης [8]

3.2 Οφέλη Αποθήκευσης

Η αποθήκευση, όπως εύκολα μπορεί να γίνει αντιληπτό, παρουσιάζει πολλαπλά οφέλη τόσο για το Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας όσο και για τους χρήστες του. Οι αρετές αυτές της αποθήκευσης χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες: στις τεχνικές και τις οικονομικές. Οι πρώτες αναφέρονται στα οφέλη από την ένταξη της αποθήκευσης για την λειτουργία και την διαχείριση του Συστήματος ενώ οι δεύτερες αναφέρονται στα οικονομικά οφέλη για τους χρήστες του συστήματος (καταναλωτές, παραγωγούς και συμμετέχοντες στην αγορά).

Πρώτον, όσον αφορά τα τεχνικά οφέλη της διείσδυσης της αποθήκευσης στο ηλεκτρικό Σύστημα, είναι η αύξηση της ευελιξίας και της αξιοπιστίας του. Μέσω των σταθμών αποθήκευσης διευκολύνεται η απόκτηση εφεδρειών και γενικά επικουρικών υπηρεσιών (όπως ρύθμιση συχνότητας και τάσης ή δυνατότητα εκκίνησης Δικτύου/blank start) ενώ ταυτόχρονα καθίσταται πιο εύκολη η εξισορρόπηση προσφοράς ζήτησης. Αυτό οφείλεται στην ικανότητα των αποθηκευτικών σταθμών για απορρόφηση και παραγωγή ισχύος ανάλογα με τις ανάγκες του Συστήματος, ιδίως των σταθμών βασισμένων σε συσσωρευτές οι οποίοι έχουν ταχύτατη απόκριση [2].

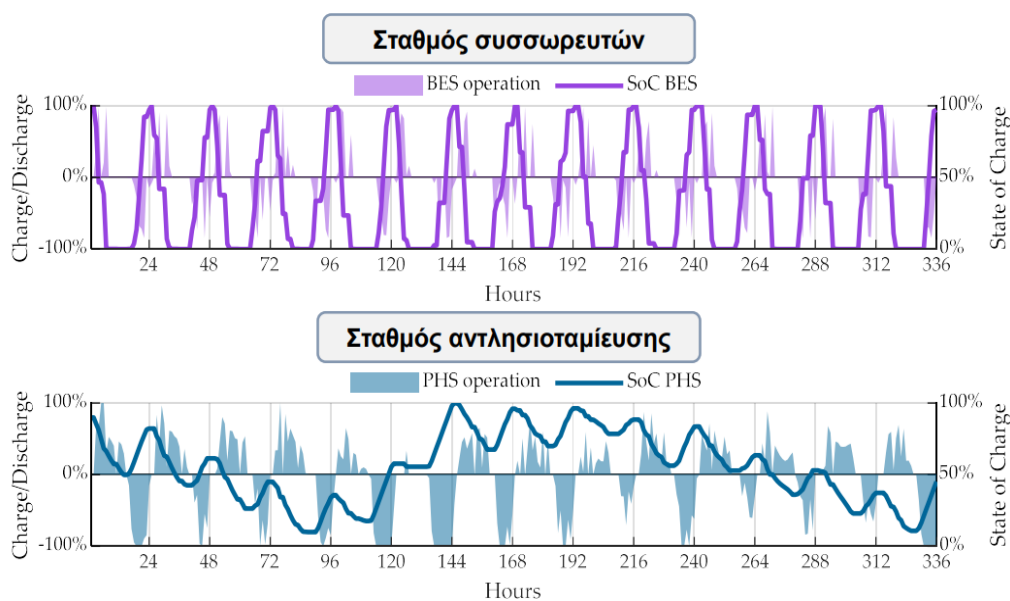
Επίσης, η διττή φύση των σταθμών αποθήκευσης ως ευέλικτοι παραγωγοί και καταναλωτές συνεισφέρει στην διαχείριση της συμφόρησης στο Σύστημα. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό καθώς λόγω των υψηλών ποσοτήτων ενέργειας ΑΠΕ (ιδίως τα μεσημέρια όπου τα φωτοβολταϊκά παράγουν ταυτόχρονα όπως φαίνεται και από το σχήμα 10) τα φαινόμενα πλήρους συμφόρησης του Δικτύου και του Συστήματος γίνονται όλο και συχνότερα. Ταυτόχρονα, οι σταθμοί αποθήκευσης με συσσωρευτές λόγω της ευκολίας κατασκευής τους και του μικρού μεγέθους τους δύνανται να αποτελέσουν σημαντικό εργαλείο για την ρύθμιση και την υποστήριξη του Δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, ιδίως σε απομακρυσμένες ή μη διασυνδεδεμένες περιοχές (όπως τα νησιά του Ανατολικού Αιγαίου) οι οποίες μέχρι πρότινος είχαν πολύ περιορισμένες επιλογές. Τέλος, η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί βασική προϋπόθεση για την εξηλεκτρίωση και την απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα του ενεργειακού συστήματος [6]. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι επιτρέπουν την χρήση της στοχαστικής ισχύος από ΑΠΕ καθ' όλη την διάρκεια της μέρας (ή και του χρόνου αν επιτευχθεί η εποχιακή αποθήκευση μέσω μεγάλων σταθμών αντλησιοταμίευσης ή μέσω υδρογόνου).



Σχήμα 10: Ενδεικτική παραγωγή ΑΠΕ σε σύγκριση με το φορτίο όπως αυτά εξήχθησαν από την ΠΑΑΕΥ

Η αύξηση της διείσδυσης των τεχνολογιών αποθήκευσης στο Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας θα έχει καθοριστικό ρόλο στην οικονομικότερη λειτουργία του. Ένα από τα σημαντικότερα οικονομικά πλεονεκτήματα είναι η μείωση του κόστους ενέργειας η οποία επιτυγχάνεται μέσω αρμπιτράζ. Αυτό επιτυγχάνεται διαφορετικά ανά σταθμό αποθήκευσης όπως μπορεί να φανεί στο σχήμα 11. Οι σταθμοί συσσωρευτών λόγω της γρήγορης απόκρισης και της ικανότητας αποθήκευσης μικρής διάρκειας φορτίζουν, συνήθως, τις μεσημεριανές ώρες όπου υπάρχει περίσσεια ενέργειας από ΑΠΕ και συνεπώς η τιμή είναι εξαιρετικά χαμηλή (οριακά μηδενική) και παράγουν το βράδυ που επειδή υπάρχει αιχμή ζήτησης και λίγη παραγωγή ΑΠΕ ενεργοποιείται η ακριβή τεχνολογία αιχμής (φυσικό αέριο) ή έχουμε αποκοπή φορτίου, σενάρια τα οποία δημιουργούν αυξημένες τιμές. Η συμπεριφορά των σταθμών συσσωρευτών κατά την διάρκεια της μέρας θα μας απασχολήσει ιδιαίτερα στην μετέπειτα ανάλυσή μας. Από την άλλη, οι σταθμοί αποθήκευσης βασισμένοι στην αντλησιοταμίευση λόγω της μεγάλης χρονικής διάρκειας της αποθήκευσης τους φορτίζουν και εκφορτίζουν για

αρκετές μέρες ανά κύκλο (πάλι οι αιχμές παραγωγής είναι τα βράδια ενώ ελάχιστη παραγωγή τα μεσημέρια που οι τιμές είναι χαμηλές). Επίσης, μέσω της αποθήκευσης δημιουργείται απόζευξη μεταξύ παραγωγής και ζήτησης καθώς η ενέργεια δεν χρειάζεται να παράγεται την ώρα που απαιτείται από το φορτίο αλλά φτάνει και ετεροχρονισμένα, για παράδειγμα παράγεται μεσημέρι για να καταναλωθεί βράδυ. Μέσω αυτής της απόζευξης και γενικότερα της ευελιξίας που παρέχουν οι σταθμοί αποθήκευσης μειώνεται η αβεβαιότητα η οποία εντοπίζεται στις διάφορες διαδικασίες του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, για παράδειγμα σφάλματα πρόβλεψης φορτίου ή παραγωγής ΑΠΕ διορθώνονται και τα αποτελέσματά τους αμβλύνονται. Αυτό οδηγεί σε χαμηλότερα κόστη συστήματος λόγω μείωσης του κόστους ενέργειας εξισορρόπησης. Παράλληλα, η χρήση αποθηκευμένης ενέργειας η οποία παρήχθη ετεροχρονισμένα και χρήση της τις ώρες αιχμής οδηγεί στην μείωση της ανάγκης ενέργειας από τεχνολογίες αιχμής και άρα μείωση ανάγκης επέκτασης του Συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (κόστη τα οποία πληρώνει ο καταναλωτής[3]). Τέλος, η απορρόφηση ενέργειας ΑΠΕ το μεσημέρι προσφέρει ασφάλεια και μείωση ρίσκου για τους παραγωγούς ΑΠΕ. Αυτό συμβαίνει διότι μέσω της αποθήκευσης δύναται να αξιοποιηθεί η ενέργεια ΑΠΕ η οποία θα αποκοβόταν λόγω υπερπαραγωγής.



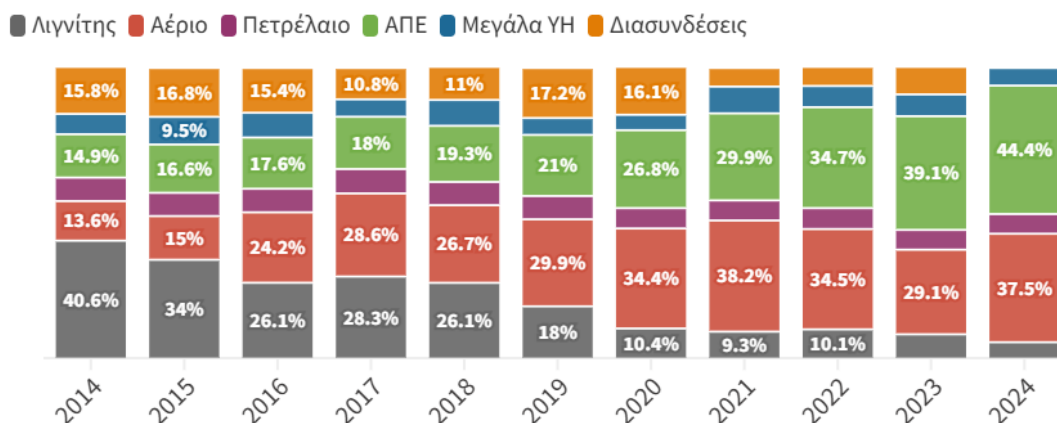
Σχήμα 11: Κύκλοι φόρτισης και εκφόρτισης για σταθμό συσσωρευτών και αντλησιοταμίευσης [2]

3.3 Αποθήκευση στο Ελληνικό Σύστημα

Στο Ελληνικό Σύστημα προς επίτευξη των κλιματικών στόχων απαιτείται συμμετοχή των ΑΠΕ στην τελική ακαθάριστη κατανάλωση ενέργειας της τάξης του 45 % μέχρι το 2030 (77% αν αναφερόμαστε στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας [6]). Το 2024 το ποσοστό ανέρχεται στο 50% της ηλεκτροπαραγωγής βάσει δεδομένων ΑΔΜΗΕ και ΔΕΔΔΗΕ, στο σχήμα 12 μπορεί να φανεί η ραγδαία αύξηση των ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα. Τον Μάιο του 2024 περίπου 12,5 GW φωτοβολταϊκών και αιολικών πάρκων έχουν συνδεθεί στο Ελληνικό Σύστημα και Δίκτυο και αναμένεται να συνδεθούν άλλα

10 GW έως το 2030 ενώ ταυτόχρονα οι επενδύσεις ΑΠΕ έχουν γίνει πιο ανταγωνιστικές οικονομικά από ‘τι παλιότερα.

Μερίδια των πηγών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα



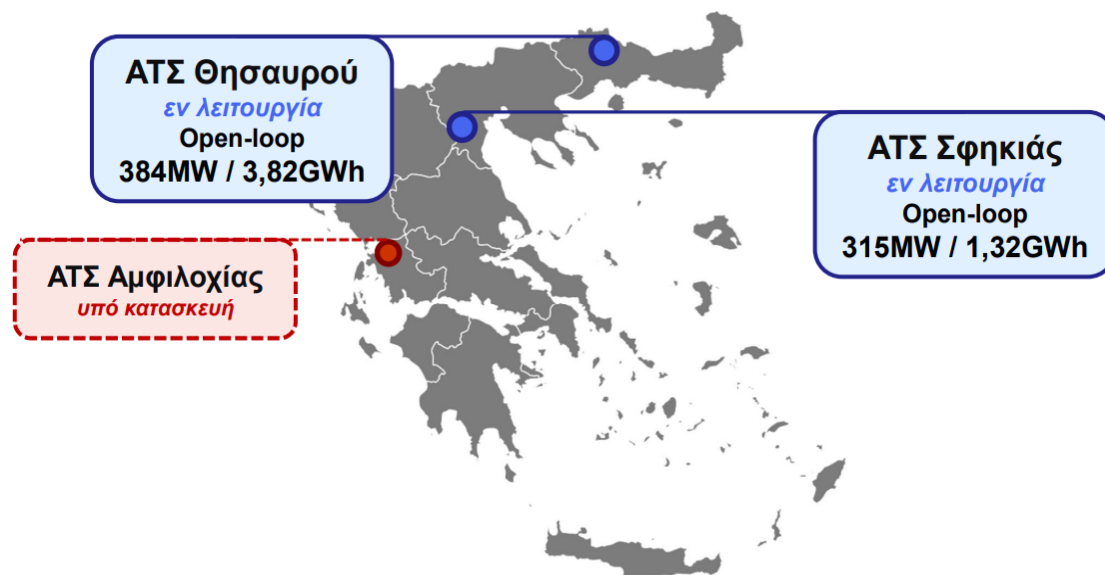
Σχήμα 12: Το ενεργειακό μείγμα ηλεκτροπαραγωγής για την δεκαετία 2014-2024. Πηγή ΑΔΜΗΕ, ΔΕΔΔΗΕ, ΔΑΠΕΕΠ, ίδια επεξεργασία.

Εντούτοις, η διείσδυση ΑΠΕ σε τέτοια επίπεδα προκαλεί προβλήματα τόσο στους παραγωγούς όσο και στο Σύστημα. Το Σύστημα κινδυνεύει από την μαζική και ταυτόχρονη παραγωγή ΑΠΕ η οποία χωρίς επαρκή ζήτηση δύναται να οδηγήσει το σύστημα σε κατάρρευση. Ο κίνδυνος είναι ιδιαίτερα εμφανής σε περιόδους κρίσιμα χαμηλού φορτίου όπως το Πάσχα. Προς αποφυγή αυτού του φαινομένου οι αποκοπές ενέργειας ΑΠΕ καθίστανται όλο και πιο συχνές. Σύμφωνα με τις προβλέψεις της διαδικασίας του ενοποιημένου προγραμματισμού που δημοσιεύει καθημερινά ο ΑΔΜΗΕ, το 2024 απορρίφθηκαν περίπου 860 GWh ΑΠΕ, που αντιστοιχούν στο 3.3% της συνολικής παραγόμενης ενέργειας από ΑΠΕ στο ίδιο χρονικό διάστημα.

Εύκολα γίνεται αντιληπτό πως για περαιτέρω ομαλή διείσδυση ΑΠΕ είναι απαραίτητη η ενίσχυση της αποθήκευσης στο Ελληνικό Σύστημα, διασυνδεδεμένο και μη. Έως το 2024 οι μόνοι σταθμοί αποθήκευσης απευθείας συνδεδεμένοι με το Σύστημα ήταν οι σταθμοί αντλησιοταμίευσης στον Θησαυρό και στην Σφηκιά μεγέθους 384MW/3,82 GWh και 315MW/1,32GWh αντίστοιχα. Στα μη διασυνδεδεμένα νησιά παραδείγματα σταθμών αποθήκευσης αποτελούν ο υβριδικός σταθμός Ικαρίας – Ναέρας (αποθήκευση μέσω αντλησιοταμίευσης) και ο υβριδικός σταθμός Τήλου (αποθήκευση μέσω μπαταριών). Μέχρι το 2030 υπολογίζεται πως θα χρειαστούν συνολικά περίπου 5GW εγκατεστημένης ισχύος αποθήκευσης (εκ των οποίων τα 2GW θα προέρχονται από αντλησιοταμίευση και τα 3GW από συσσωρευτές). Επίσης, μέχρι το 2050 αναμένεται να έχει προχωρήσει η χρήση πράσινου υδρογόνου προς κάλυψη ενεργειακών αναγκών [6].

Αναφερόμενοι στην αντλησιοταμίευση ,πέραν των ήδη λειτουργικών σταθμών, απαραίτητη προϋπόθεση προς επίτευξη του στόχου για το 2030 είναι η ολοκλήρωση του σταθμού αντλησιοταμίευσης στην Αμφιλοχία ισχύος 680MW (οι τοποθεσίες των

σταθμών φαίνονται στο Σχήμα 13) [6]. Τα έργα που θα οδηγήσουν σε εκπλήρωση των κλιματικών στόχων του 2050 χωρίζονται σε 3 κατηγορίες και αφορούν κυρίως την τροποποίηση ήδη υφιστάμενων ΥΗΣ μέσω της προσθήκης ταμιευτήρα. Οι κατηγορίες αναφέρονται σε έργα που βρίσκονται κατά το ρούν του ποταμού (θα αξιοποιούν ως ήδη υπάρχοντες ταμιευτήρες) , έργα που αξιοποιούν ως ταμιευτήρα έναν ήδη υπάρχοντα και όπου προβλέπεται η κατασκευή δύο νέων ταμιευτήρων (τα μεγαλύτερα τέτοια έργα θα κτιστούν σε παλιά λιγνιτωρυχεία).



Σχήμα 13: Γεωγραφική κατανομή τοποθέτησης σταθμών αντλησιοταμίευσης [2]

Όσον αφορά τις μπαταρίες, οι πρώτοι σταθμοί βασισμένοι σε συσσωρευτές θα ξεκινήσουν την λειτουργία τους εντός του 2025 ή του 2026. Μέσω διαφόρων νομοσχεδίων, υπουργικών αποφάσεων και αποφάσεων τόσο σε εθνικό όσο και σε διεθνές επίπεδο (Ε.Ε.) έχει δημιουργηθεί το κατάλληλο θεσμικό πλαίσιο προς αδειοδότηση, συμμετοχή στην αγορά, και εξασφάλισης της ομαλής πρόσβασης στο Δίκτυο για αποθηκευτικούς σταθμούς στο διασυνδεδεμένο σύστημα. Οι αποφάσεις εστιάζονται κυρίως στους σταθμούς βασισμένους σε συσσωρευτές (περιλαμβάνει και σταθμούς ΑΠΕ με αποθήκευση πίσω από τον μετρητή) [2].



Σχήμα 14: Γεωγραφική κατανομή υποσταθμών YT/MT οι οποίοι λαμβάνουν προτεραιότητα για σύνδεση σταθμών αποθήκευσης από τον ΔΕΔΔΗΕ [10]

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για το μέλλον των σταθμών συσσωρευτών παρουσιάζουν οι υπουργικές αποφάσεις [9] και [10]. Η πρώτη εξ αυτών αναφέρεται στους λειτουργικούς περιορισμούς των σταθμών μπαταριών προς αποφυγή δέσμευσης ηλεκτρικού χώρου. Συγκεκριμένα περιορίζει (ή και μηδενίζει) την ικανότητα έγχυσης ισχύος στο Σύστημα σταθμών αποθήκευσης κατά τις πρωινές και τις μεσημεριανές ώρες προκειμένου να μην συνεισφέρουν στην υπερφόρτιση που προκαλεί η φωτοβολταϊκή παραγωγή τις ώρες αυτές καθώς κάτι τέτοιο θα είχε τα αντίθετα αποτελέσματα από τα αναμενόμενα για την αποθήκευση. Η δεύτερη αναφέρεται στη διαδικασία υποβολής αιτημάτων και τη χορήγηση οριστικής προσφοράς σύνδεσης για μεμονωμένους σταθμούς αποθήκευσης. Πρόκειται για τη ρύθμιση των όρων και των προϋποθέσεων για την ενσωμάτωση αυτών των σταθμών στο ηλεκτρικό δίκτυο, είτε στο Σύστημα Μεταφοράς είτε στο Δίκτυο Διανομής. Βάσει της απόφασης αυτής, το πολύ 2,65 GW διατίθενται στον ΑΔΜΗΕ και 0,9 GW στον ΔΕΔΔΗΕ προς σύνδεση σταθμών συσσωρευτών. Στο σχήμα 14 φαίνεται η γεωγραφική κατανομή των υποσταθμών YT/MT που επιδέχονται προτεραιότητα από τον ΔΕΔΔΗΕ προς ένταξη σταθμών αποθήκευσης μεγέθους από 0.5 MW έως 15 MW και διάρκειας μεγαλύτερης των 2 ωρών.

3.4 Μοντελοποίηση Σταθμού Αποθήκευσης Βασισμένης Σε

Συσσωρευτές

Η εργασία αυτή αποσκοπεί στην εξέταση και βελτιστοποίηση της λειτουργίας ενός σταθμού αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε περιβάλλον αγορών. Προς επίτευξη του στόχου αυτού χρήσιμη κρίνεται η μαθηματική μοντελοποίηση ενός τέτοιου σταθμού. Λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του καθώς και της έναρξης της διαδικασίας σύνδεσης τέτοιων σταθμών στο Ελληνικό Σύστημα στο εγγύς μέλλον επιλέχθηκε η μοντελοποίηση ενός σταθμού βασισμένου στη τεχνολογία συσσωρευτών. Η παρακάτω μοντελοποίηση βασίστηκε στο paper του Pozo [11].

Το μοντέλο της συσκευής αποθήκευσης αποτελείται από τρία δομικά στοιχεία: τις παραμέτρους, τις μεταβλητές απόφασης και τους περιορισμούς. Το πρώτο εξ αυτών πρόκειται για σταθερές οι οποίες χρησιμοποιούνται προς περιγραφή ορισμένων εγγενών χαρακτηριστικών της μπαταρίας τα οποία δεν δύνανται να μεταβληθούν κατά την διάρκεια της λειτουργίας της. Αυτά είναι η μέγιστη και η ελάχιστη δυνατή αποθηκευμένη ενέργεια από την μπαταρία, η μέγιστη ισχύς που μπορεί να τραβήξει ή να εγχύσει ανά χρονική περίοδο και η απόδοση της τόσο κατά την απορρόφηση όσο και κατά την έγχυση. Αξίζει να σημειωθεί πως στην πραγματικότητα αυτά τα χαρακτηριστικά αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου (για παράδειγμα λόγω βλάβης ή γήρανσης του εξοπλισμού) αλλά καθώς η ανάλυση αυτή έχει χρονικό ορίζοντα μιας μέρας δεν έχει νόημα η θεώρηση αυτή (η συσκευή αποθήκευσης θεωρείται ιδανική) [11, 12].

Το δεύτερο αναφέρεται στις μεταβλητές ποσότητες του μαθηματικού μοντέλου. Στην μεταβολή αυτών των ποσοτήτων για τον χρονικό ορίζοντα του προβλήματος θα βασιστεί το μοντέλο προκειμένου να επιτευχθεί ο βέλτιστος προγραμματισμός της λειτουργίας της συσκευής αποθήκευσης. Αυτές είναι η ενέργεια που απορροφάται και η ενέργεια που εγχέεται ανά χρονική περίοδο καθώς και η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στην συσκευή ανά περίοδο, αλλιώς γνωστή και ως επίπεδο φόρτισης / State of Charge (SOC). Η τρίτη κατηγορία μεταβλητής απόφασης δεν είναι απαραίτητη αλλά διευκολύνει την κατασκευή του μοντέλου.

Το τρίτο αναφέρεται στους νόμους που διέπουν την συμπεριφορά του μοντέλου. Προκειμένου η περιγραφή να είναι ρεαλιστική οφείλουν να πληρούνται οι ακόλουθες προϋποθέσεις. Η πρώτη προϋπόθεση είναι η επιβολή των ορίων μέγιστης φόρτισης και εκφόρτισης (3.2, 3.3) καθώς και μέγιστης αποθηκευμένης ενέργειας (3.4) αφού η συσκευή αποθήκευσης είναι αδύνατο (ή ασύνητο) να τα υπερβεί στην κανονική λειτουργία της. Επίσης, απαραίτητη είναι η επιβολή ενός περιορισμού προς περιγραφή του ισοζυγίου ισχύος της μπαταρίας (3.1). Ο περιορισμός αυτός θα πρέπει να συνδέει την αποθηκευμένη ενέργεια της περιόδου με αυτή που προϋπήρχε στην μπαταρία της αφού η ενέργεια αυτή επηρεάζει τις μελλοντικές αποφάσεις της μπαταρίας. Τέλος, η εισαγωγή ενός περιορισμού προς αποφυγή ταυτόχρονης φόρτισης και εκφόρτισης καθίσταται σημαντική (αν και όχι απαραίτητη) (3.5). Η επιβολή ενός τέτοιου περιορισμού συμπληρωματικότητας στην παραγωγή και την κατανάλωση είναι λογική

καθώς δεν μπορεί μια μοναδική συσκευή να παράγει και να καταναλώνει ταυτόχρονα ισχύ, εντούτοις η παράλειψη του περιορισμού αυτού προσδίδει ορισμένα οφέλη στην ανάλυση τα οποία θα γίνουν εμφανή στην συνέχεια. Κατά την ανάλυση των περιορισμών δύο απλοποιήσεις έλαβαν μέρος οι οποίες όμως δεν επηρεάζουν την ακρίβεια του μοντέλου. Η πρώτη είναι η παράλειψη της μετατροπής των μεταβλητών ισχύος σε μεταβλητές ενέργειας, αυτή συμβαίνει γιατί θεωρούμε το χρονικό βήμα μία ώρα (και να μην ήταν αυτή η μετατροπή γίνεται εύκολα μέσω προσθήκης μιας σταθεράς η οποία θα πολλαπλασιάζεται με τις μονάδες ισχύος). Το γεγονός ότι το μοντέλο αρχικά παρουσιάζεται με διάρκεια μιας περιόδου δεν προκαλεί προβλήματα. Το ίδιο μοντέλο εύκολα μπορεί να επεκταθεί σε πολλαπλές περιόδους αρκεί η ενέργεια της μίας περιόδου (t) να συνδέεται με αυτή της προηγούμενης ($t-1$).

Ο συμβολισμός που θα χρησιμοποιηθεί προς περιγραφή του μοντέλου είναι ο ακόλουθος:

p_c : Η ισχύς που απορροφάται από την συσκευή αποθήκευσης

p_d : Η ισχύς που εγχέεται από την συσκευή αποθήκευσης

e : Η ενέργεια που έχει αποθηκευμένη η συσκευή αποθήκευσης (State of Charge SOC)

P_c : Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να απορροφήσει η συσκευή αποθήκευσης (άνω όριο ράμπας)

P_d : Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να εγχύσει η συσκευή αποθήκευσης (κάτω όριο ράμπας)

$\underline{E}$: Η μέγιστη δυνατή ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί στην συσκευή αποθήκευσης

$\underline{E}$: Η ελάχιστη δυνατή ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί στην συσκευή αποθήκευσης

E_0 : Η αρχική ενέργεια που έχει αποθηκευτεί στην συσκευή αποθήκευσης

η_c : Η απόδοση της συσκευής αποθήκευσης κατά την απορρόφηση ενέργειας

η_d : Η απόδοση της συσκευής αποθήκευσης κατά την απορρόφηση ενέργειας

u_c : Ακέραια μεταβλητή που αφορά την απορρόφηση ισχύος από την συσκευή αποθήκευσης

u_d : Ακέραια μεταβλητή που αφορά την έγχυση ισχύος από την συσκευή αποθήκευσης

Αξίζει να σημειωθεί πως οι δύο ακέραιες μεταβλητές u_c , u_d χρησιμοποιούνται προς επίτευξη του τελευταίου περιορισμού (συμπληρωματικότητα φόρτισης εκφόρτισης). Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί και με την εισαγωγή ενός περιορισμού της μορφής $p_c p_d = 0$, όμως ένας τέτοιος περιορισμός θα εισήγαγε στο μοντέλο μη γραμμικότητες

οι οποίες θα καθυστερούσαν την όποια διαδικασία βελτιστοποίησης. Εν τέλει το πλήρες μοντέλο έχει ως εξής:

Ακριβές Μοντέλο Συσκευής Αποθήκευσης με Συσσωρευτές:

$$e = E_0 + \eta_c p_c - \frac{1}{\eta_d} p_d \quad (3.1)$$

$$0 \leq p_c \leq P_c u_c \quad (3.2)$$

$$0 \leq p_d \leq P_d u_d \quad (3.3)$$

$$\underline{E} \leq e \leq \underline{E} \quad (3.4)$$

$$u_d + u_c \leq 1 \quad (3.5)$$

$$e, p_c, p_d \in R$$

$$u_c, u_d \in \{0, 1\}$$

Ο περιορισμός 3.5 εξασφαλίζει την συμπληρωματικότητα απορρόφησης και έγχυσης ισχύος καθώς επιτρέπει σε μόνο μια εκ των ακέραιων μεταβλητών να πάρει την τιμή 1 ανά φορά (άρα η άλλη πρέπει να μηδενιστεί). Αυτό οδηγεί το άνω όριο ενός εκ των περιορισμών 3.2, 3.3 στο να μηδενιστεί και έτσι να οδηγηθεί η αντίστοιχη μεταβλητή απόφασης στον μηδενισμό. Ο περιορισμός 3.5 μπορεί να παραληφθεί και έτσι να λάβουμε το ακόλουθο γραμμικό μοντέλο :

Γραμμικό Μοντέλο Συσκευής Αποθήκευσης με Συσσωρευτές:

$$e = E_0 + \eta_c p_c - \frac{1}{\eta_d} p_d$$

$$0 \leq p_c \leq P_c \quad (3.6)$$

$$0 \leq p_d \leq P_d \quad (3.7)$$

$$\underline{E} \leq e \leq \underline{E}$$

$$e, p_c, p_d \in R$$

Το γραμμικό μοντέλο έχει προφανώς μειωμένη ακρίβεια σε σχέση με το ακριβές. Εντούτοις, λόγω της έλλειψης ακέραιων μεταβλητών η επίλυσή του είναι ταχύτερη και απλούστερη. (όπως θα δούμε και με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στο κεφάλαιο 4), συνεπώς μπορεί να ενταχθεί σε ένα μεγαλύτερο μοντέλο χωρίς να αυξήσει σημαντικά την πολυπλοκότητά του. Αυτό που γίνεται εμφανές στο [11] είναι πως τα διάφορα μοντέλα για συσκευές αποθήκευσης πρέπει να επιλέγονται ανάλογα με το πρόβλημα (δεν υπάρχει τέλει μοντέλο για όλες τις εφαρμογές). Εδώ επειδή θέλουμε ακρίβεια στον προγραμματισμό της λειτουργίας της μπαταρίας θα αξιοποιήσουμε κυρίως το πρώτο μοντέλο.

Αξίζει να σημειωθεί πως η διαδικασία μοντελοποίησης θα ήταν αρκετά παρόμοια και για άλλα ήδη σταθμών αποθήκευσης όπως η αντλησιοταμίευση. Αυτό που θα άλλαζε

είναι οι αριθμητικές τιμές ορισμένων χαρακτηριστικών του σταθμού όπως η ράμπα ή το τεχνικό μέγιστο και ελάχιστο.

Κεφάλαιο 4: Μαθηματικό Υπόβαθρο

Αφού παρατέθηκε το τεχνοοικονομικό σύστημα στο οποίο οι σταθμοί αποθήκευσης θα λειτουργήσουν και δομήθηκε ένα μοντέλο προς περιγραφή του σταθμού βασισμένου σε τεχνολογία συσσωρευτών απαραίτητη θεωρείται η περιγραφή των μαθηματικών μεθόδων που επιτρέπουν την βέλτιστη λειτουργία του παραπάνω μοντέλου σε περιβάλλον αγορών. Στο κεφάλαιο αυτό λοιπόν θα παρουσιαστούν οι έννοιες της βελτιστοποίησης και, κυρίως, του μαθηματικού προγραμματισμού. Η ανάλυση του παρακάτω κεφαλαίου βασίστηκε στα [3,13,14, 15]

4.1 Βελτιστοποίηση

Με τον όρο βελτιστοποίηση αναφερόμαστε στην διαδικασία εύρεσης της ελάχιστης (ελαχιστοποίηση) ή της μέγιστης (μεγιστοποίησης) τιμής μιας συνάρτησης $f(x): R^n \rightarrow R$ η οποία υπόκειται (ή όχι) σε ένα σύνολο m περιορισμών $g_i(x): R^n \rightarrow R$, $i \in \{1, 2, \dots, m\}$. Η συνάρτηση f καλείται αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος ενώ x η μεταβλητή που βελτιστοποιείται και είναι ένα διάνυσμα $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. Η γενική μορφή του προβλήματος είναι :

$$\text{Min}_x f(x) \quad (4.1)$$

$$\text{Subject to } g_i(x) \leq b_i, i = 1, 2, \dots, m$$

Προφανώς αν θέλαμε να μεγιστοποιήσουμε την συνάρτηση f θα είχαμε Max_x ή θα ελαχιστοποιούσαμε την $-f$.

Μια λύση καλείται x_j καλείται εφικτή αν και μόνο αν ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς, δηλαδή αν $g_i(x_j) \leq b_i \forall i \in \{1, 2, \dots, m\}$. Μια λύση καλείται βέλτιστη και συμβολίζεται x^* αν είναι η καλύτερη ανάμεσα σε όλες τις εφικτές, δηλαδή αν ισχύει πως $f(x_j) \leq f(x_i) \forall x_i \neq x_j$. Αξίζει να σημειωθεί πως αυτό ισχύει για την περίπτωση της ελαχιστοποίησης μόνο, στην περίπτωση της μεγιστοποίησης θα ισχύει $f(x_j) \geq f(x_i)$. Αν δεν υπάρχουν εφικτές λύσεις το πρόβλημα θεωρείται ανέφικτο ενώ αν μια λύση οδηγεί σε απειρισμό της τιμής της αντικειμενικής το πρόβλημα καλείται απεριόριστο.

Στα προβλήματα μαθηματικής βελτιστοποίησης τα προβλήματα κατατάσσονται σε κατηγορίες ανάλογα με την μορφή των περιορισμών και της αντικειμενικής τους. Η πιο απλή κατηγορία είναι τα γραμμικά προγράμματα στα οποία τόσο η αντικειμενική f όσο και οι περιορισμοί g_i είναι γραμμικοί, δηλαδή ισχύει πως :

$$f(ax + by) = af(x) + bf(y) \quad (4.2)$$

Άλλες κατηγορίες αποτελούν τα μη γραμμικά προβλήματα όπου για κάποιο περιορισμό ή για την αντικειμενική δεν ισχύει η γραμμικότητα, και τα κυρτά

προβλήματα, όπου τόσο η αντικειμενική όσο και οι περιορισμοί είναι κυρτές συναρτήσεις (ισχύει δηλαδή η εξίσωση (4.3)). Από την εξίσωση (4.3) φαίνεται πως τα κυρτά προβλήματα είναι γενίκευση των γραμμικών.

$$f(ax + by) \leq af(x) + bf(y) \quad (4.3)$$

Τα προβλήματα βελτιστοποίησης λύνονται χρησιμοποιώντας συγκεκριμένες μεθόδους (αλγόριθμους) επίλυσης. Οι αλγόριθμοι αυτοί αλλάζουν ανά κλάση προβλήματος. Γενικά τα προβλήματα βελτιστοποίησης είναι αρκετά δύσκολο να επιλυθούν, εντούτοις υπάρχουν ορισμένες κατηγορίες προβλημάτων για τις οποίες υπάρχουν αποδοτικοί αλγόριθμοι και συνεπώς τα προβλήματα των κλάσεων αυτών μπορούν να λυθούν γρήγορα ακόμα και για μεγάλο αριθμό μεταβλητών (εκατοντάδες έως και μερικές χιλιάδες). Μια τέτοια κατηγορία προβλημάτων είναι τα γραμμικά προβλήματα ή τα κυρτά προβλήματα.

4.2 Γραμμικός Προγραμματισμός

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής θα αναπτυχθούν ως επί το πλείστον γραμμικά προγράμματα προς περιγραφή της λειτουργίας του σταθμού αποθήκευσης στην αγορά (στην λογική αυτού που αναπτύχθηκε στην παράγραφο 3.4). Όπως έγινε αναφορά παραπάνω στα γραμμικά προγράμματα τόσο η αντικειμενική συνάρτηση όσο και οι περιορισμοί είναι γραμμικές συναρτήσεις. Η σχέση (4.1) για γραμμικά προγράμματα μπορεί να γραφεί :

$$\text{Min}_x c^T x \quad (4.4)$$

$$\text{Subject to } a_i^T x \leq b_i, i = 1, 2, \dots, m$$

Όπου, τα διανύσματα $c, a_1, a_2, \dots, a_m \in R^n$ και οι σταθερές $b_1, b_2, \dots, b_m \in R$ είναι οι παράμετροι που περιγράφουν το μοντέλο (περιορισμούς και αντικειμενική).

Προς επίλυση ενός γραμμικού προγράμματος αξιοποιούμε διάφορες μεθόδους, όπως ο αλγόριθμος Simplex ή η γραφική επίλυση (για προβλήματα λίγων μεταβλητών). Δεν υπάρχει κλειστός τύπος για την λύση ενός γραμμικού προγράμματος. Κάθε λύση του γραμμικού προγράμματος θα βρίσκεται εντός του εφικτού συνόλου X , ενός υποσυνόλου του R^n τέτοιου ώστε $x \in X \in R^n$.

Για παράδειγμα στο ακόλουθο απλό γραμμικό πρόγραμμα:

$$\text{Min}_{x,y} x + y$$

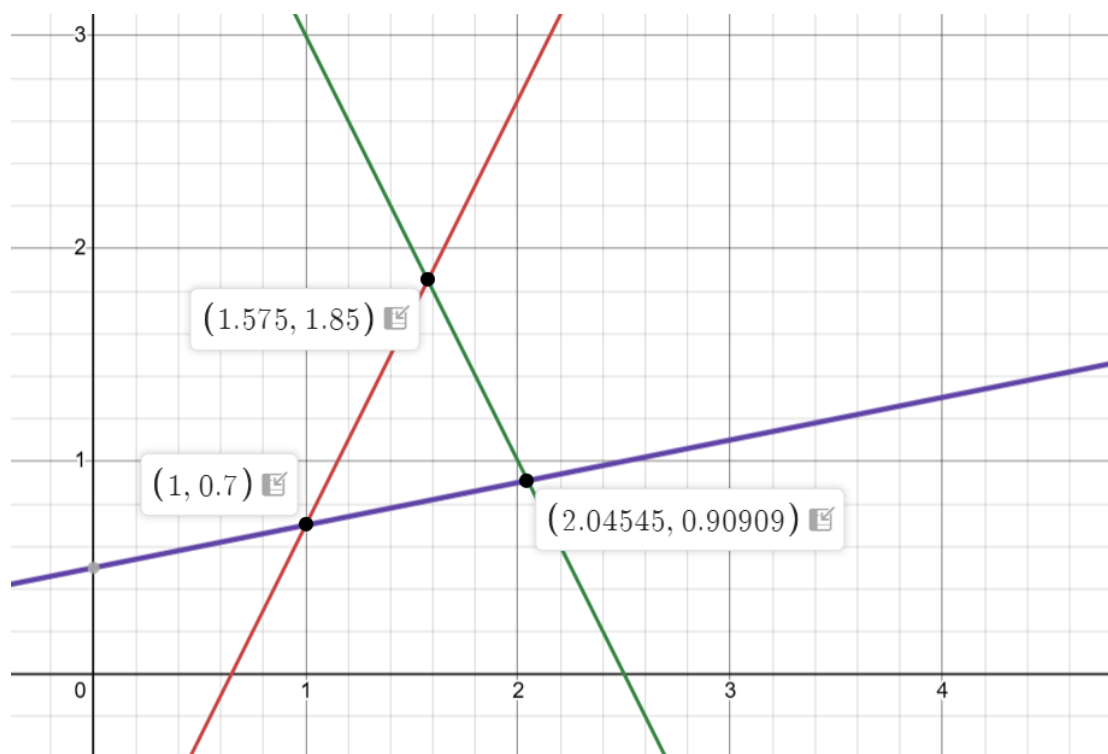
$$-2x + y < -1.3$$

$$2x + y < 5$$

$$0.2x - y < -0.5$$

$$x, y > 0$$

Το εφικτό σύνολο στο παραπάνω γραμμικό πρόγραμμα είναι το τρίγωνο της παρακάτω εικόνας, το οποίο σχηματίζεται από τους περιορισμούς του προγράμματος. Εύκολα μπορεί να παρατηρήσει κανείς πως η βέλτιστη λύση στο πρόγραμμα αυτό είναι $x^* = 1, y^* = 0.7$.



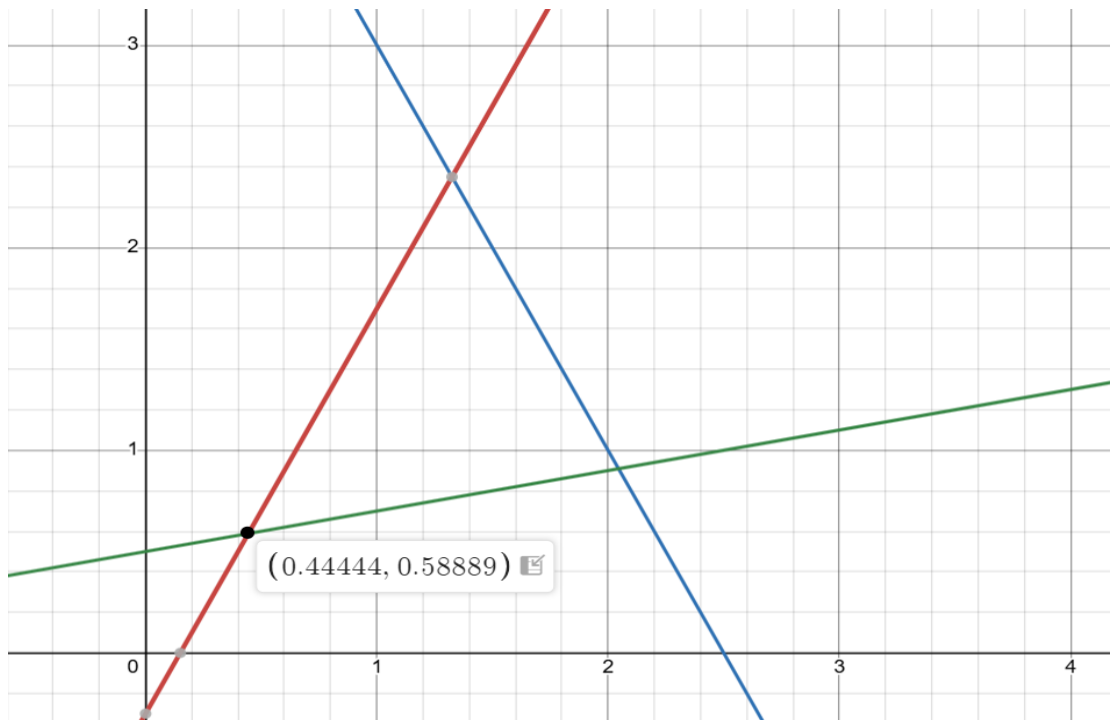
Σχήμα 15: Το εφικτό σύνολο του παραδείγματος γραμμικού προγράμματος

Παρατηρούμε πως η βέλτιστη λύση είναι ένα από τα ακραία σημεία του εφικτού συνόλου (δηλαδή ένα από τα σημεία που αποτελούν γωνίες του εφικτού συνόλου). Μπορεί να αποδειχθεί πως πάντα στα γραμμικά προγράμματα η λύση θα είναι σε ένα από τα ακραία σημεία του εφικτού συνόλου. Άρα μέσω απαρίθμησης των λύσεων που προκύπτουν από τα ακραία σημεία θα ήταν δυνατή η εύρεση της βέλτιστης λύσης του προβλήματος (φυσικά κάτι τέτοιο θα ήταν μη αποδοτικό λόγω του εξαιρετικά μεγάλου πλήθους ακραίων σημείων για μεγάλα προβλήματα).

Πάνω στην ιδέα ότι αν υπάρχει βέλτιστη λύση αυτή θα βρίσκεται σε ένα εκ των ακραίων σημείων του εφικτού συνόλου βασίζεται και ο αλγόριθμος Simplex. Ο αλγόριθμος πλοηγείται στα ακραία σημεία μεταπηδώντας σε γειτονικά ακραία σημεία και επιλέγοντας σε κάθε επανάληψη ένα νέο σημείο για πλοήγηση το οποίο θα παράξει λύση τουλάχιστον το ίδιο καλή με το αρχικό σημείο. Υπάρχουν έλεγχοι οι οποίοι συμβαίνουν σε κάθε επανάληψη για να ελέγχουμε αν η λύση που βρέθηκε είναι όντως βέλτιστη. Με αυτόν τον τρόπο ο αλγόριθμος οδηγεί σε βέβαιη σύγκλιση και (σχετική) υπολογιστική οικονομία. Η ύπαρξη τέτοιων αλγορίθμων καθιστά εύκολη την επίλυση γραμμικών προγραμμάτων με αρκετές χιλιάδες μεταβλητές.

Δύο σημαντικές έννοιες για τον γραμμικό προγραμματισμό είναι αυτές της χαλάρωσης και της ευαισθησίας. Με τον όρο χαλάρωση εννοούμε την διεύρυνση του εφικτού συνόλου του προβλήματος (επιτυγχάνεται μέσω μεταβολής ενός ή παραπάνω

εκ των περιορισμών) ενώ με τον όρο ευαισθησία αναφερόμαστε στην μεταβολή που θα δεχθεί η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης ως αποτέλεσμα της μεταβολής ενός περιορισμού. Η ευαισθησία είναι ουσιαστικά μια μέθοδος ποσοτικοποίησης της επιρροής ενός περιορισμού στην αντικειμενική συνάρτηση. Στο παραπάνω παράδειγμα χαλαρώνοντας τον πρώτο περιορισμό κατά 1 μονάδα $-2x + y < -1.3 \rightarrow -2x + y < -0.3$ οδηγούμαστε στο πιο εκτεταμένο εφικτό σύνολο του σχήματος 16. Η βέλτιστη λύση του προβλήματος πλέον είναι $x^* = 0.444, y^* = 0.589$, με τιμή αντικειμενικής συνάρτησης 1.033. Συνεπώς, για το παράδειγμά μας μοναδιαίες αλλαγές στον πρώτο περιορισμό οδηγούν σε μεταβολή της αντικειμενικής κατά 0.667.



Σχήμα 16: Το εφικτό σύνολο του χαλαρωμένου παραδείγματος

4.3 Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός

Αν και ο γραμμικός προγραμματισμός βοηθά στην επίλυση πολλών πρακτικών προβλημάτων δεν επαρκεί για την περιγραφή του μοντέλου της συσκευής αποθήκευσης μας. Αυτό οφείλεται στην ανικανότητα του γραμμικού προγραμματισμού να εκφράσει σχέσεις συμπληρωματικότητας, όπως τις σχέσεις (3.2), (3.3) και (3.5) μοντέλου της μπαταρίας. Προς υλοποίηση των περιορισμών αυτών χρειάζεται ή η εισαγωγή μη γραμμικών σχέσεων οι οποίες θα κάνουν το πρόβλημα υπερβολικά υπολογιστικά βαρύ ή η εισαγωγή ακέραιων μεταβλητών.

Ως μικτά ακέραια προγράμματα ορίζουμε την κατηγορία εκείνη των μαθηματικών προγραμμάτων στα οποία εντοπίζονται μεταβλητές τόσο πραγματικές όσο και αποκλειστικά ακέραιες. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τον μοντέλο μας έχει ο μικτός ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός (mixed integer linear programming MILP) το

είδος ακέραιου προγραμματισμού όπου οι περιορισμοί και η αντικειμενική συνάρτηση είναι γραμμικές συναρτήσεις. Η γενική μορφή ενός τέτοιου προβλήματος είναι:

$$\text{Min}_{x,y} c^T x + d^T y \quad (4.5)$$

$$\text{Subject to } a_i^T x \leq b_i, i = 1, 2, \dots, m_1$$

$$e_i^T y \leq f_i, i = 1, 2, \dots, m_2$$

Όπου $x \in Z^{n_1}, y \in R^{n_2}$ τα διανύσματα των μεταβλητών απόφασης του προβλήματος και τα διανύσματα $c, a_1, a_2, \dots, a_m \in R^{n_1}, d, e_1, e_2, \dots, e_{m_2} \in R^{n_2}$ και οι σταθερές $b_1, b_2, \dots, b_{m_1}, f_1, f_2, \dots, f_{m_2} \in R$ είναι οι παράμετροι που περιγράφουν το μοντέλο.

Οι ακέραιες μεταβλητές προσδίδουν επιπλέον εκφραστική ικανότητα στην κατασκευή μοντέλων μαθηματικού προγραμματισμού. Μερικά παραδείγματα περιορισμών που επιτρέπουν είναι οι περιορισμοί αμοιβαίας απόκλισης, οι περιορισμοί μη παρεμβολής και οι λογικές συνθήκες. Τέτοιοι περιορισμοί γράφονται σε γενική μορφή:

1. Περιορισμός αμοιβαίας απόκλισης

$$x_i \leq X_i * u_i \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, m\}$$

$$\sum_{i=1}^m u_i \leq 1$$

$$u_i \in \{0, 1\}, x_i \geq 0$$

Εδώ έχουμε m μεταβλητές x_i οι οποίες παίρνουν μέγιστη τιμή X_i . Θέλουμε μόνο μια εξ αυτών να μπορεί να ενεργοποιηθεί. Μέσω των περιορισμών επιτυγχάνεται ακριβώς αυτό καθώς μόνο μία εκ των δυαδικών μεταβλητών u_i θα μπορεί να λάβει την τιμή 1 οι υπόλοιπες θα γίνουν μηδέν αναγκάζοντας και τα αντίστοιχα x_i να γίνουν 0. Τέτοιοι περιορισμοί εντοπίζονται σε προβλήματα που απαιτείται συμπληρωματικότητα.

2. Περιορισμός μη παρεμβολής

$$Mu_{ij} + x_i - x_j \geq X_j$$

$$M(1 - u_{ij}) + x_j - x_i \geq X_i$$

$$u_i \in \{0, 1\}, x_i \geq 0$$

Εδώ επιλέγουμε M έναν μεγάλο (για τα δεδομένα του προβλήματος αριθμό) ώστε με την ενεργοποίηση ή την απενεργοποίηση της δυαδικής μεταβλητής να ενεργοποιείται μόνο ένας εκ των δύο περιορισμών. Με αυτόν τον τρόπο η μία διαδικασία θα γίνεται πάντα μετά την άλλη.

3. Λογικές Συνθήκες

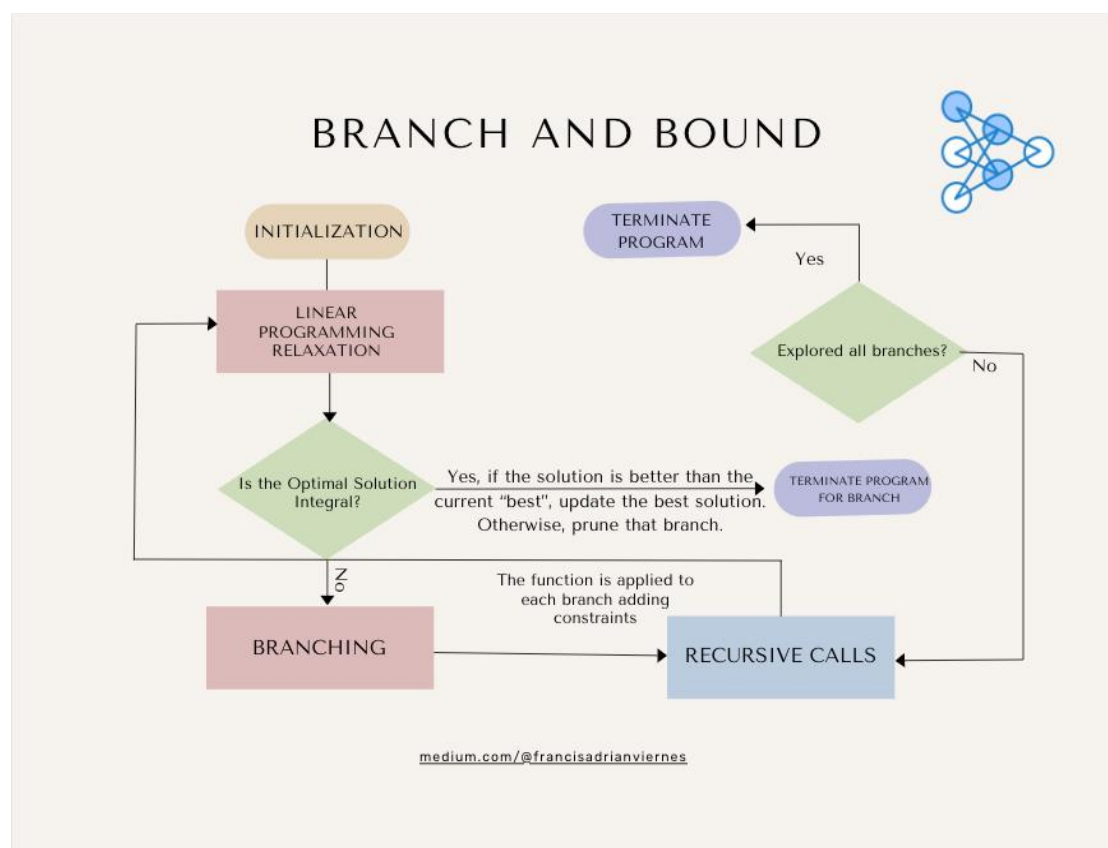
$$a > b + m - M(1 - u)$$

$$a \leq b + Mu$$

$$u \in \{0,1\}$$

Εδώ, αναπαρίσταται μια λογική συνθήκη συνεπαγωγής. Αν $a > b$ τότε η δυαδική μεταβλητή θα πάρει την τιμή 1. Σε αυτό βοηθούν οι βοηθητικές σταθερές M και m οι οποίες είναι ένας πολύ μεγάλος και ένας πολύ μικρός αριθμός αντίστοιχα. Με παρόμοιο τρόπο είναι δυνατό στον μικτό ακέραιο προγραμματισμό να περιγράφουν όλων των ειδών λογικές συνθήκες όπως οι συνθήκες AND και OR.

Τα μικτά ακέραια προγράμματα επιτρέπουν την περιγραφή πιο πολύπλοκων προβλημάτων, εντούτοις είναι πιο υπολογιστικά ακριβά από τα γραμμικά προγράμματα, ειδικά αν το πλήθος των ακεραίων μεταβλητών είναι μεγάλο. Προς επίλυση τέτοιων προβλημάτων αξιοποιούνται αλγόριθμοι όπως ο αλγόριθμος διακλάδωσης και φραγής (branch and bound) ή ο αλγόριθμος τεμώντων πεδίων (cutting plane). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο αλγόριθμος διακλάδωσης και φραγής στα πλαίσια της εργασίας αυτής.



Σχήμα 17: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου διακλάδωσης και φραγής όπως αυτό εξήχθη από το <https://pub.towardsai.net/branch-and-bound-coding-the-algorithm-from-scratch-3dc33fd4b1ea>

Ο αλγόριθμος διακλάδωσης βασίζεται στους πολύ αποδοτικούς αλγορίθμους επίλυσης γραμμικών προγραμμάτων, συγκεκριμένα επιλύει προβλήματα μικτά

ακέραια προγράμματα ανάγοντάς τα σε γραμμικά. Αρχικά, χαλαρώνει τον χώρο λύσεων διαγράφοντας ακέραιους περιορισμούς και αντικαθιστώντας κάθε ακέραια μεταβλητή u_i με την αντίστοιχη συνεχή της κατασκευάζοντας έτσι ένα γραμμικό πρόγραμμα. Επιλύει στην συνέχεια το γραμμικό πρόγραμμα και βρίσκει την συνεχή βέλτιστη λύση του. Έπειτα, εξετάζει αν η λύση του γραμμικού είναι ικανή να δώσει καλύτερη βέλτιστη ακέραια λύση σε σχέση με την τρέχουσα βέλτιστη. Αν δεν βρει ή βρει και δεν είναι καλύτερη από την τρέχουσα ο αλγόριθμος ‘φράζει’ την επιλογή αυτή (παύει να ψάχνει παρόμοιες λύσεις) και επιστρέφει στην αρχή της διαδικασίας. Αν βρεθεί τίθεται ως βέλτιστη. Όταν τελειώσει να εξετάζει μια περιοχή λύσεων ο αλγόριθμος περνάει στο βήμα της διακλάδωσης δηλαδή επιλέγει να εξετάσει άλλη χαλάρωση. Αν όλα τα μονοπάτια έχουν εξερευνηθεί πλήρως ή φραγεί τότε ο αλγόριθμος τερματίζει.

Ο αλγόριθμος αυτός είναι η βάση για πολλούς πραγματικούς επίλυτες ακέραιων προγραμμάτων και οδηγεί στην ικανοποιητικά γρήγορη επίλυση μικτών ακέραιων προγραμμάτων με δεκάδες έως και εκατοντάδες ακέραιες μεταβλητές.

4.4 Στοχαστικός Προγραμματισμός

Ο μικτός ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός παρέχει μεγάλη ευελιξία και επιτρέπει την επίλυση πολλών και ιδιαίτερα πολύπλοκων προβλημάτων, εντούτοις έχει μία σημαντική αδυναμία. Στα μικτά ακέραια προβλήματα θεωρούμε πως έχουμε πλήρη και ακριβή γνώση για όλες τις μεταβλητές του προβλήματος. Αυτή η πλήρης ντετερμινιστικότητα σε πραγματικές εφαρμογές σπάνια συμβαίνει, η διαχείριση της αβεβαιότητας είναι αναπόσπαστο κομμάτι της μοντελοποίησης. Προς αντιμετώπιση της αβεβαιότητας θα αξιοποιήσουμε τις τεχνικές του στοχαστικού γραμμικού προγραμματισμού.

Στον στοχαστικό προγραμματισμό ορισμένα δεδομένα δεν περιγράφονται από μια σταθερή τιμή αλλά από μια κατανομή πιθανότητας (με τον τρόπο αυτό περιγράφεται η αβεβαιότητα). Ο στόχος του στοχαστικού προγράμματος είναι η εύρεση αποφάσεων τέτοιων ώστε η λύση να είναι όσο το δυνατόν καλύτερη και οι περιορισμοί του προβλήματος να πληρούνται για όλες τις εκφάνσεις της αβεβαιότητας.

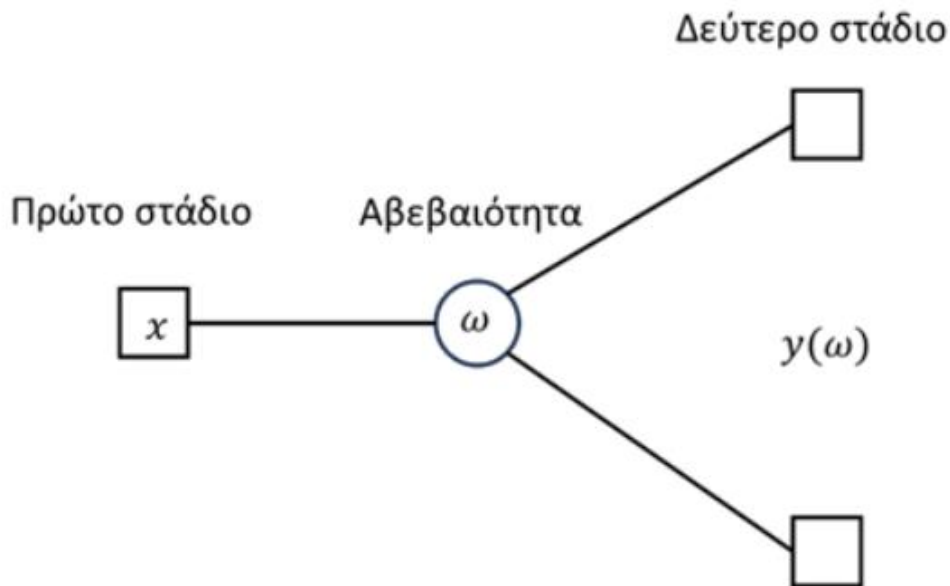
Η πιο απλή μορφή ενός στοχαστικού προγράμματος είναι το γραμμικό στοχαστικό πρόγραμμα δύο σταδίων. Σε τέτοια προβλήματα οι αποφάσεις λαμβάνονται σε δύο στάδια το πρώτο στάδιο λαμβάνει μέρος πριν την αποκάλυψη της αβεβαιότητας ω ενώ στο δεύτερο στάδιο η λήψη αποφάσεων συμβαίνει αφότου η αβεβαιότητα του προβλήματος έχει αποκαλυφθεί (όπως φαίνεται και στο σχήμα 18). Η γενική μορφή ενός τέτοιου προγράμματος είναι :

$$\text{Min}_{x,y} c^T x + E[q(\omega)^T y] \quad (4.6)$$

$$\text{Subject to } a_i^T x \leq b_i, i = 1, 2, \dots, m_1$$

$$\tau_i(\omega)^T x + w_i(\omega)^T y(\omega) \leq h_i(\omega), i = 1, 2, \dots, m_2$$

Εδώ οι αποφάσεις πρώτου σταδίου συμβολίζονται με το διάνυσμα $x \in R^{n_1}$ και οι αποφάσεις δευτέρου σταδίου από το διάνυσμα $y \in R^{n_2}$. Τα διανύσματα $c, \tau_1(\omega), \tau_2(\omega), \dots, \tau_{m_2}(\omega), a_1, a_2, \dots, a_m \in R^{n_1}, q(\omega), w_1(\omega), w_2(\omega), \dots, w_{m_2}(\omega) \in R^{n_2}$ και οι σταθερές $b_1, b_2, \dots, b_{m_1}, h_1(\omega), h_2(\omega), \dots, h_{m_2}(\omega) \in R$ είναι οι παράμετροι που περιγράφουν το μοντέλο. Στην αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος λαμβάνουμε την μέση τιμή των αποτελεσμάτων των διάφορων σεναρίων. Αξίζει να σημειωθεί πως πολλές από τις παραμέτρους του προβλήματος μεταβάλλονται προϊόντος της αβεβαιότητας ω . Κάθε πιθανή έκβαση της αβεβαιότητας ω αποτελεί και ένα σενάριο του στοχαστικού προβλήματος.



Σχήμα 18: Σχηματική αναπαράσταση ενός μοντέλου στοχαστικού προγραμματισμού δύο σταδίων [3]

Τα σενάρια ουσιαστικά επιτρέπουν την αποτύπωση των μελλοντικών εκβάσεων της διαδικασίας μοντελοποίησης του προβλήματος. Για παράδειγμα μέσω σεναρίων καθίσταται δυνατή η αποτύπωση διαφορετικών εκβάσεων των τιμών της αγοράς ηλεκτρισμού ή τις ενδεχόμενες βλάβες σε ένα ΣΗΕ κατά την δέσμευση μονάδων και εφεδρειών. Συνεπώς, τα σενάρια πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικά του προβλήματος και των πιθανών εκβάσεων της αβεβαιότητας του ενώ ταυτόχρονα το πλήθος του να μην είναι τόσο μεγάλο ώστε να κάνουν την διαδικασία βελτιστοποίησης υπολογιστικά ανέφικτη.

Προς κατασκευή των σεναρίων διάφορες τεχνικές ακολουθούνται:

1. Μέσω προσομοιώσεων στοχαστικών διαδικασιών, όπως η μέθοδος Monte Carlo, που επιτρέπει τη δημιουργία μεγάλου αριθμού πιθανών εκβάσεων με βάση μοντελοποιημένη αβεβαιότητα.
2. Μέσω δειγματοληψίας από μια θεωρητική ή εμπειρική κατανομή πιθανότητας, η οποία περιγράφει τη στοχαστική φύση της αβεβαιότητας (π.χ. κανονική ή log-normal κατανομή)

3. Μέσω ανάλυσης ιστορικών δεδομένων, τα οποία χρησιμοποιούνται είτε απευθείας είτε για τη δημιουργία στατιστικών μοντέλων από τα οποία αντλούνται νέα σενάρια.

4. Μέσω προβλέψεων με χρήση μοντέλων μηχανικής μάθησης, τα οποία μπορούν να ενσωματώσουν τις πολύπλοκες σχέσεις που διέπουν την μοντελοποιούμενη αβεβαιότητα και να προσφέρουν πιο εύστοχες εκτιμήσεις για μελλοντικές καταστάσεις.

Για την εύρεση του κατάλληλου πλήθους των σεναρίων πρέπει να βρεθεί ένα πλήθος σεναρίων ικανό να δώσει μια καλή προσέγγιση για την λύση του προβλήματος αλλά και να είναι υπολογιστικά διαχειρίσιμα. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας προς εύρεση ενός ικανού πλήθους αντιπροσωπευτικών σεναρίων θα ακολουθήσουμε όπως περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο την μέθοδο της μείωσης σεναρίων (scenario reduction).

Κατά την διαδικασία κατασκευής και επιλογής σεναρίων δύναται να προκύψουν ορισμένα προβλήματα. Ένα εξ αυτών είναι πως μπορεί για ορισμένα σενάρια να προκύψουν ορισμένες εφικτές λύσεις του στοχαστικού προγράμματος οι οποίες οδηγούν σε μη φραγμένη βέλτιστη λύση δεύτερου σταδίου. Στο στάδιο της μοντελοποίησης πρέπει να γίνεται σίγουρο πως τέτοια ενδεχόμενα δεν θα προκύψουν καθώς εμποδίζουν την διαδικασία της μοντελοποίησης και καθώς προφανώς μια τέτοια κατάσταση τις περισσότερες περιπτώσεις είναι μη ρεαλιστική.

Επίσης, ένα άλλο πρόβλημα που προκύπτει είναι πως ορισμένα σενάρια καθιστούν ορισμένες λύσεις στον χώρο λύσεων του προβλήματος ως μη εφικτές, δηλαδή δεν πληρούν τους περιορισμούς του δεύτερου σταδίου. Σε αυτές τις περιπτώσεις προσδίδουμε στην αντικειμενική συνάρτηση μια ποινή γ η οποία επιβεβαιώνει πως η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης θα είναι μη βέλτιστη. Για παράδειγμα σε προβλήματα ελαχιστοποίησης η ποινή θα επιβεβαιώνει πως η αντικειμενική συνάρτηση θα παίρνει μία υπερβολικά υψηλή τιμή. Έτσι οι λύσεις που οδηγούν σε μη εφικτούς περιορισμούς για κάποιο σενάριο δεν θα είναι σίγουρα βέλτιστες. Τέτοιες εφικτές λύσεις πρέπει να αποφεύγονται καθώς μπορεί να οδηγήσουν σε καταστροφικές συνέπειες, για παράδειγμα στο πρόβλημα της βέλτιστης επιλογής εφεδρειών σε ένα ΣΗΕ μια λύση η οποία οδηγεί στην επιλογή ανεπαρκούς ποσότητας εφεδρείας για κάποιο σενάριο αστοχίας θα πρέπει να αποφευχθεί.

Φυσικά σε περιπτώσεις που δεν είναι απαραίτητο η βέλτιστη λύση να είναι εφικτή για κάθε σενάριο είναι δυνατό μεταβάλλοντας τους περιορισμούς και την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος να μπορεί η λύση αυτή να γίνεται αποδεκτή. Μία μορφή αυτών των μετατροπών μπορεί να φανεί στο παρακάτω πρόγραμμα :

$$\text{Min}_{x,y,t} c^T x + E[q(\omega)^T y + \gamma t] \quad (4.7)$$

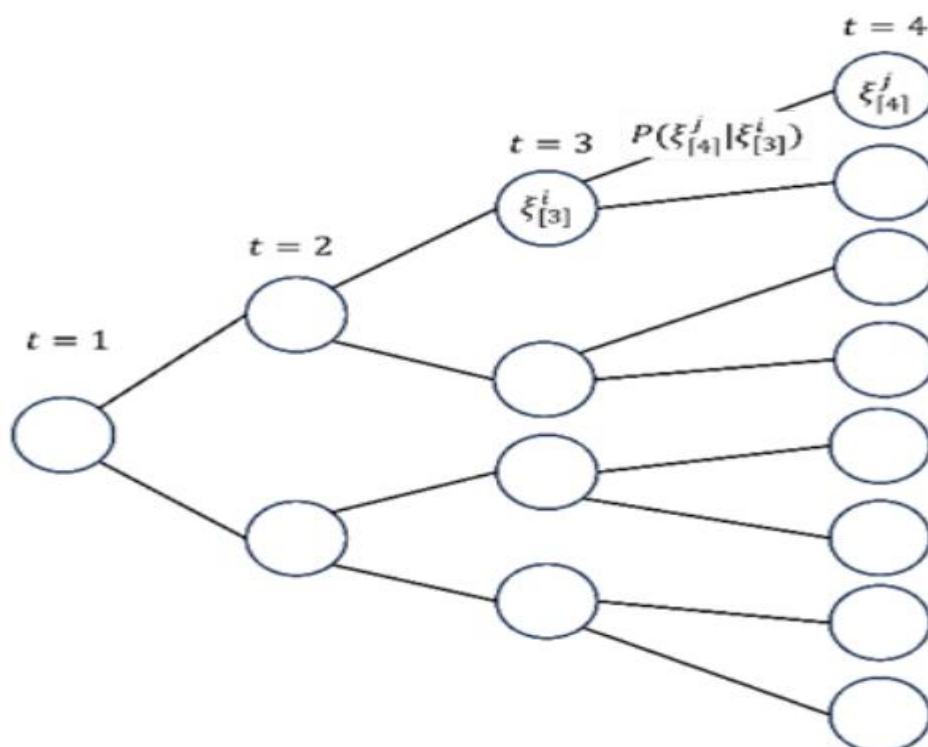
$$\text{Subject to } a_i^T x \leq b_i, i = 1, 2, \dots, m_1$$

$$\tau_i(\omega)^T x + w_i(\omega)^T y(\omega) - t e(\Omega) \leq h_i(\omega), i = 1, 2, \dots, m_2$$

$$t \geq 0$$

Εδώ το διάνυσμα $t \in R^{n_2}$ δρα ως χαλάρωση των περιορισμών των σεναρίων έτσι ενεργοποιώντας το ($t > 0$) επιτρέπεται η παραβίαση του περιορισμού με αντάλλαγμα μια ποινή γ . Στην βιβλιογραφία [3] φαίνονται και άλλες μορφές τέτοιων χαλαρώσεων των περιορισμών όπως για παράδειγμα η εισαγωγή περιορισμών τέτοιων ώστε να επιτρέπουν την παραβίαση των περιορισμών μέχρι ενός ορισμένου πλήθους σεναρίων (στην περίπτωση αυτή δεν αξιοποιείται η ποινή γ).

Για πιο σύνθετα προβλήματα και πιο λεπτομερείς μοντελοποιήσεις της αβεβαιότητας συχνά ο στοχαστικός προγραμματισμός απαρτίζεται από πολλαπλά στάδια. Σε αυτά τα προγράμματα υπάρχουν πολλαπλά στάδια τα οποία διαδέχονται το ένα το άλλο και σε καθένα εξ αυτών η αβεβαιότητα ω λαμβάνει μία άλλη έκβαση.



Σχήμα 19: Δένδρο σεναρίων ενός στοχαστικού προβλήματος με 4 στάδια [3].

Τέτοια προβλήματα μπορούν να μοντελοποιηθούν ως δένδρα σεναρίων όπως φαίνεται στο σχήμα 19. Στα δένδρα αυτά ο πρώτος κόμβος (ρίζα) αντιστοιχεί στην πρώτο στάδιο του στοχαστικού προβλήματος, ενώ κάθε άλλος κόμβος έχει έναν πρόγονο A (δηλαδή ένα κόμβο προηγούμενου χρονικού σταδίου t με τον οποίο είναι συνδεδεμένος) και πολλαπλούς κόμβους απογόνους C (δηλαδή κόμβους επόμενων χρονικών σταδίων με τους οποίους έχει σύνδεση. Σε κάθε ακμή του δένδρου αντιστοιχεί η πιθανότητα μετάβασης από έναν κόμβο ξ στον επόμενο $P(\xi_{t+1} | \xi_t)$. Η πιθανότητα να βρεθούμε σε έναν εκ των κόμβων το γινόμενο των βαρών των ακμών του. Τέλος αξίζει να αναφερθούμε στα σύνολα Ω_t και Ω_H τα οποία περιγράφουν τα σύνολα των σεναρίων σε ένα στάδιο t και στο σύνολο του στοχαστικού προβλήματος αντίστοιχα.

Το γραμμικό στοχαστικό πρόγραμμα πολλαπλών σταδίων μπορεί να περιγραφεί από το παρακάτω πρόγραμμα:

$$\begin{aligned} & \text{Min}_x \sum_{t=1}^H \sum_{n \in \Omega_t} P_n * c^T x_t (4.8) \\ & \text{Subject to } a_i^T x_l \leq b_i, i = 1, 2, \dots, m_1 \\ & \tau_{it-l}(n)^T x_{t-l}(A(n)) + w_{it}(n)^T x_t(n) \leq h_{it}(n), i = 1, 2, \dots, m_2 \\ & t \in 1, 2, \dots, H \quad n \in \Omega_t \end{aligned}$$

Στο πρόγραμμα (4.8) με $N = \bigcup_{t=1}^H \Omega_t$ ορίζουμε το σύνολο των κόμβων του δένδρου σεναρίων, με P_n την πιθανότητα πραγματοποίησης του κόμβου n ενώ με x_t τις μεταβλητές απόφασης του προβλήματος και με c, t, w, h, a, b τα σύνολα των τυχαίων μεταβλητών που ορίζουν το πρόβλημα. Αξίζει να σημειωθεί πως κάθε στάδιο στο πρόβλημα επηρεάζεται μόνο με τον πρόγονο του αυτό σημαίνει πως οι μεταβλητές απόφασης πρέπει να είναι ικανές να κωδικοποιούν την πλήρη κατάσταση του συστήματος. Η αντικειμενική συνάρτηση ουσιαστικά αποτελεί το συνολικό βάρος όλων μεταβλητών απόφασης σταθμισμένων επί την πιθανότητα του σεναρίου στο οποίο οι μεταβλητές αυτές αξιοποιούνται, επιχειρείται μια ελαχιστοποίηση του μέσου κόστους. Οι περιορισμοί διαφοροποιούνται ανάλογα με το σενάριο και το στάδιο.

Το μονολιθικό στοχαστικό πρόγραμμα ουσιαστικά είναι ένα τεράστιο γραμμικό πρόγραμμα γεγονός που καθιστά ανέφικτη την λύση του για πρακτικά προβλήματα (τα οποία απαρτίζονται από δεκάδες έως και εκατοντάδες στάδια). Η δομή του προβλήματος και ιδίως το γεγονός ότι κάθε στάδιο επηρεάζεται μόνο από το αμέσως προηγούμενο του καθιστά δυνατή την επίλυση του προβλήματος μέσω αλγορίθμων δυναμικού προγραμματισμού.

Προς ανάλυση και υπολογισμό τέτοιων υπολογιστικά απαιτητικών προγραμμάτων αξιοποιούνται συχνά ορισμένες λιγότερο πολύπλοκες προσεγγιστικές τεχνικές. Οι τεχνικές αυτές παρουσιάζουν την επίδοση του προβλήματος όταν έχουμε τέλεια πρόγνωση της αβεβαιότητας και όταν οι στοχαστικές παράμετροι αντικαθίστανται από την αναμενόμενη τιμή τους.

Η πρώτη εξ' αυτών μας δίνει την τιμή αναμονής και παρατήρησης WS (wait and see value) η οποία είναι η αναμενόμενη τιμή του στοχαστικού προγράμματος αν αντιδράσουμε με τέλεια πρόγνωση στην έκβαση της αβεβαιότητας ξ. Η διαφορά της WS με την τιμή εδώ και τώρα, δηλαδή την αναμενόμενη τιμή του στοχαστικού προγράμματος (η οποία συμβολίζεται ως SP) μας δίνει την αναμενόμενη τιμή τέλειας πληροφορίας EVPI η οποία εκφράζει την αξία που δίνεται στην τέλεια πρόγνωση. Ο υπολογισμός της WS είναι πολύ ευκολότερος από την SP καθώς επιτυγχάνεται μέσω επίλυσης πολλαπλών ανεξάρτητων γραμμικών προβλημάτων μικρού μεγέθους έναντι ενός μονολιθικού γραμμικού προβλήματος.

Αντικαθιστώντας τις αβέβαιες παραμέτρους με τις αναμενόμενες τιμές τους επιλύουμε το πρόβλημα της αναμενόμενης τιμής. Η λύση αναμενόμενης τιμής EEV βοηθά στην εύρεση της αξίας της στοχαστικής λύσης $VSS = EEV - SP$. Ο υπολογισμός

της EEV είναι και αυτό αρκετά πιο εύκολος από της SP καθώς βασίζεται στην λύση ενός μικρού γραμμικού προγράμματος.

Κεφάλαιο 5 : Κατασκευή Σεναρίων Τιμών

Μετά την ανάλυση του θεωρητικού υποβάθρου σειρά έχει η παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων. Προτού ξεκινήσει η κατάστρωση και η επίλυση του προβλήματος απαραίτητη καθίσταται η συλλογή και η επεξεργασία των δεδομένων του προβλήματος. Σκοπός της εν λόγω επεξεργασίας είναι η κατασκευή μιας συστηματικής μεθόδου παραγωγής ρεαλιστικών σεναρίων τιμών των διάφορων αγορών ηλεκτρικής ενέργειας.

5.1 Συλλογή και Επεξεργασία Δεδομένων Αγοράς

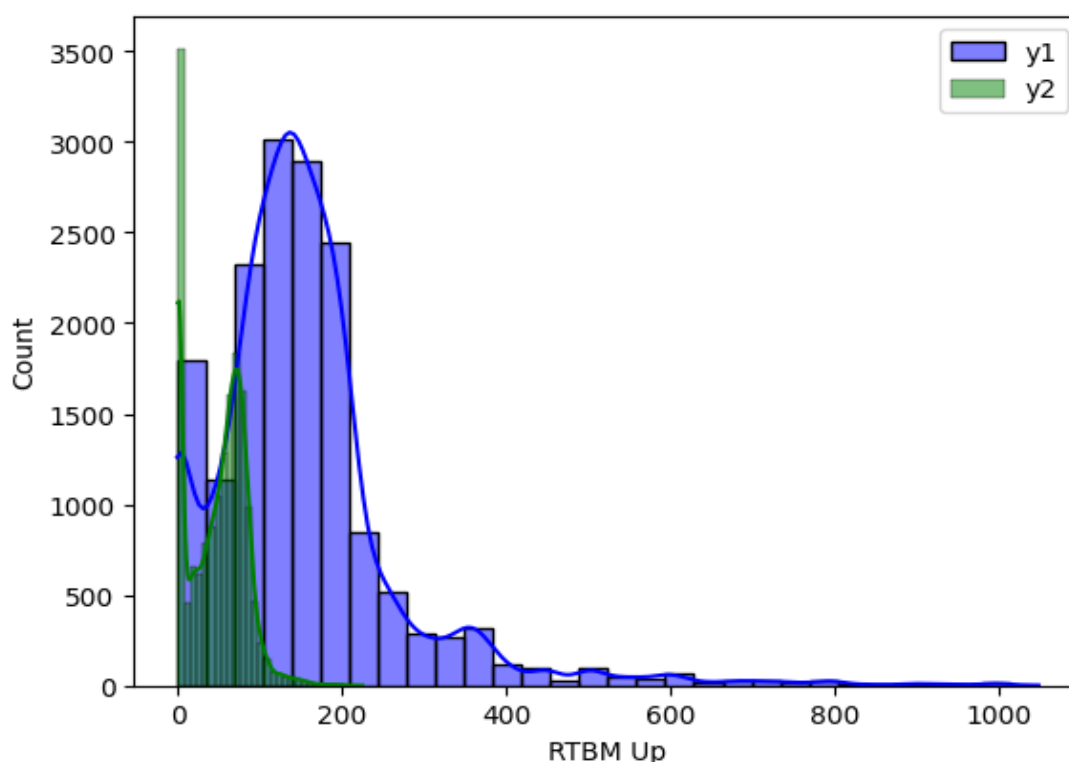
Η ανάλυση της παρούσας εργασίας βασίστηκε σε ιστορικά δεδομένα διάφορων αγορών μαζί με την αντίστοιχη trading period για τα εκάστοτε δεδομένα. Τα δεδομένα αυτά αφορούν τις τιμές της Day Ahead, της άνω και της κάτω αγοράς εξισορρόπησης (RTBM Up & RTBM Down) καθώς και της τιμής του φυσικού αερίου (TTF) και των ευρωπαϊκών δικαιωμάτων εκπομπής άνθρακα (EUA) για τις χρονιές 2023 και 2024. Τα δεδομένα προέρχονται από τους αρμόδιους φορείς.

Η ανάλυση δεδομένων έγινε μέσω βιβλιοθηκών της Python (pandas, seaborn κτλ). Αρχικά, τα δεδομένα μετατράπηκαν σε αριθμητικά και εξετάστηκαν οι κενές τιμές του συνόλου δεδομένων. Επειδή το πλήθος των κενών τιμών δεν ήταν σημαντικό (2.5% για TTF & EUA και 0.5% για RTBM Up & Down) οι καταχωρήσεις με κενές τιμές αφαιρέθηκαν τελείως από το dataset (θα μπορούσε να γίνει και κάποια αντικατάσταση των κενών μέσω κάποιας μεθόδου παλινδρόμησης). Έπειτα, βρέθηκε η συσχέτιση μεταξύ των διάφορων δεδομένων. Τα δεδομένα των οποίων η συσχέτιση με τις τιμές RTBM Up & Down (οι οποίες θα είναι και οι τιμές στις οποίες θα εστιαστεί η ανάλυση) ήταν κοντά στο 0 αφαιρέθηκαν από το dataset ώστε να μην επηρεάσουν αρνητικά την ανάλυση. Τα τελικά δεδομένα και γενικά στατιστικά στοιχεία τους φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

	DAM Price	RTBM Up	RTBM Down	EUA	TTF
Mean	109.88	154.00	48.42	74.72	35.33
Std	59.67	118.32	34.09	11.04	13.93
Min	-1	-1	0	52.21	24.68
25%	80.42	89.75	16.51	65.97	25.70
50%	102.08	138.73	54.38	72.40	26.79
75%	130.50	190.25	73.62	85.16	40.36
Max	942.00	1049.00	224.90	96.85	83.83

Το dataset χωρίστηκε κατάλληλα σε σύνολα εισόδου X και σύνολα εξόδου y_1, y_2 όπου ως y_1 ορίζεται το σύνολο που περιέχει τις τιμές της αγοράς άνω εξισορρόπησης, ως y_2 ορίζεται το σύνολο που περιέχει τις τιμές της αγοράς κάτω εξισορρόπησης και ως X το σύνολο που περιέχει τις τιμές αγοράς προηγούμενης μέρας, TTF, EUA καθώς και την ώρα και τον μήνα που οι δημοπρασίες έλαβαν μέρος.

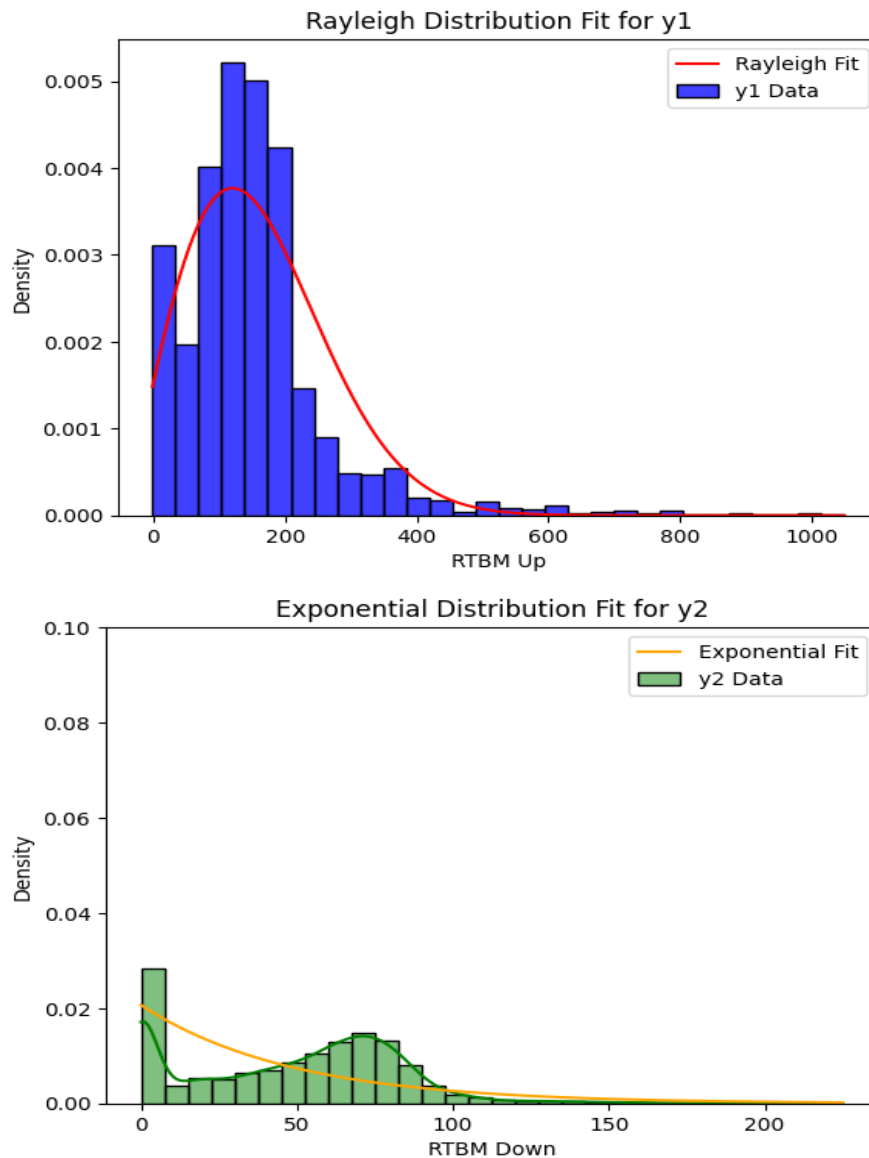
Προς κατασκευή των απαραίτητων για το μοντέλο βελτιστοποίησης σεναρίων τιμών θα αξιοποιήσουμε τις κατανομές πιθανότητας που περιγράφουν τις τιμές αγοράς. Προς εύρεση των καλύτερων κατανομών για να γίνει η περιγραφή των τιμών αγοράς κατασκευάζεται το ιστόγραμμα των τιμών (σχήμα 20). Παρατηρούμε πως οι τιμές RTBM Up είναι αρκετά υψηλότερες από τις RTBM Down, αυτό είναι λογικό αν αναλογιστεί κανείς το νόημα των τιμών αυτών. Οι τιμές άνω εξισορρόπησης δηλώνουν την ανάγκη του συστήματος για παραπάνω ισχύ σε πραγματικό χρόνο άρα οι τιμές θα τείνουν να είναι υψηλότερες κατά μέσο όρο από τις τιμές της αγοράς επόμενης μέρας καθώς στην άνω εξισορρόπηση συμμετάσχουν γρήγορες μονάδες (φυσικό αέριο) οι οποίες είναι ελεγχόμενες και γρήγορες στην ενεργοποίηση και όχι οι φτηνές ΑΠΕ οι οποίες για πολλές ώρες κυριαρχούν σε Day Ahead επίπεδο. Οι RTBM Down τιμές είναι αρκετά μικρές καθώς τις ώρες που το σύστημα έχει ανάγκη κάτω εξισορρόπηση ζητείται από τις μονάδες να κόψουν παραγωγή και άρα να πληρώσουν. Η τιμή της αγοράς οφείλει να δρα ως σήμα το οποίο ωθεί τις μονάδες στην επιθυμητή συμπεριφορά για παράδειγμα αρνητικές τιμές στην αγορά επόμενης μέρας (όπως στη 1/5/25) υποδηλώνουν την υπερπαραγωγή ισχύος στο σύστημα και την ανάγκη αύξησης της κατανάλωσης.



Σχήμα 20: Τα ιστογράμματα των τιμών αγοράς εξισορρόπησης

Προς εύρεση της κατανομής που ακολουθούν τα δεδομένα αξιοποιήσαμε την μέθοδο Kolmogorov–Smirnov βάσει της οποίας μετράτε η απόσταση των δεδομένων μας από

διάφορες γνωστές κατανομές. Για την RTBM UP η κατανομή Rayleigh ($f(x; \sigma) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, x \geq 0$) ήταν η βέλτιστη ακολουθούμενη από την κανονική κατανομή και την κατανομή Γ. Για την RTBM Down η καλύτερη κατανομή ήταν η εκθετική ($f(x; \lambda) = \lambda e^{-\lambda x}, x \geq 0$) ακολουθούμενη από την Cauchy και την X^2 (αυτό οφείλεται στον υψηλό αριθμό τιμών των δεδομένων κοντά στο 0). Μια ιδιαιτερότητα των δεδομένων μας είναι η έλλειψη αρνητικών τιμών η οποία περιορίζει την επιλογή κατανομών (γεγονός ιδιαίτερα επιζήμιο για την μοντελοποίηση της RTBM Down). Στο σχήμα 21 φαίνονται οι κατανομές όπως αυτές προσαρμόστηκαν στα δεδομένα.



Σχήμα 21 : οι κατανομές όπως αυτές προσαρμόστηκαν στα δεδομένα τιμών αγοράς.

5.2 Κατασκευή Σεναρίων Τιμών

Με τις κατανομές που περιγράφουν τα δεδομένα πλέον γνωστές επόμενο βήμα είναι η κατασκευή ρεαλιστικών σεναρίων τιμών για διάστημα 24 ωρών. Αξίζει να σημειωθεί

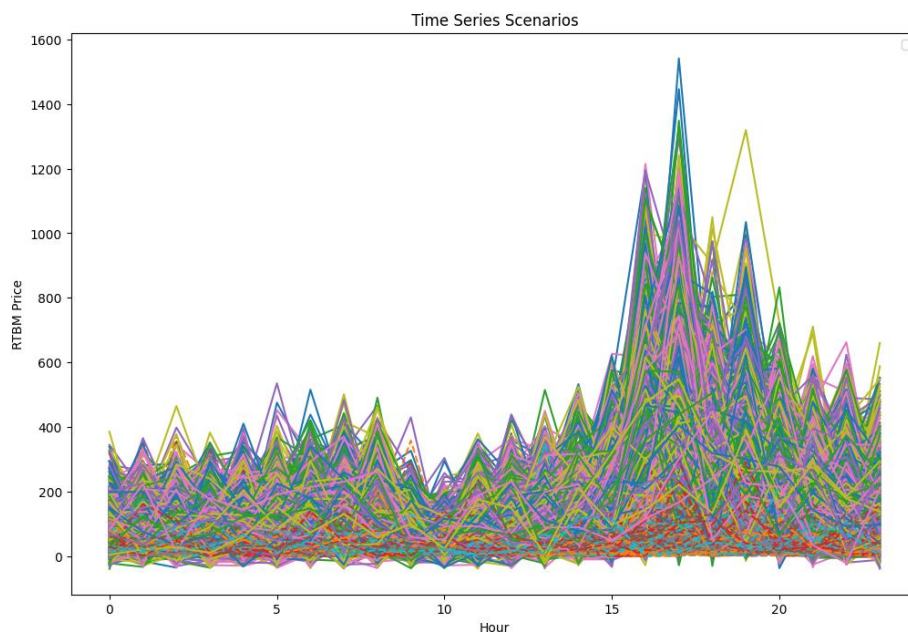
πως στα αρχικά πειράματα οι τιμές RTBM Up & Down οριζόντουσαν σε ωριαία βάση αντί για δεκαπεντάλεπτη που ισχύει στην πραγματικότητα ενώ, στα τελικά πειράματα οι τιμές άλλαζαν σε βάσει δεκαπεντάλεπτου όπως συμβαίνει πραγματικά.

Το πρώτο βήμα προς την κατασκευή σεναρίων είναι δημιουργία ενός απλού μοντέλου το οποίο υπολογίζει μέσω γραμμικής παλινδρόμησης τις παραμέτρους των κατανομών των RTBM Up & Down. Αξίζει να σημειωθεί πως προς παραμετροποίηση των κατανομών θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν και πιο πολύπλοκα μοντέλα όπως για παράδειγμα μοντέλα πρόβλεψης βασισμένα σε νευρωνικά δίκτυα. Εντούτοις για λόγους απλότητας επιλέχθηκε το γραμμικό μοντέλο με την ικανοποιητική ακρίβεια.

Συγκεκριμένα, για την RTBM Up το μοντέλο αξιοποιεί τα ιστορικά δεδομένα (σύνολο X) ώστε να υπολογίσει την τιμή της παραμέτρου σ της κατανομής Rayleigh συναρτήσει των δεδομένων εισόδου. Η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης προσπαθεί να βρει την βέλτιστη ευθεία που περιγράφει την τιμή της παραμέτρου ως συνδυασμό των δεδομένων εισόδου (5.1). Η εύρεση της παραμέτρου λ της εκθετικής κατανομής που περιγράφει την RTBM Down βρίσκεται με απολύτως αντίστοιχο τρόπο (5.2)

$$\sigma = w^T * X + w_0 \quad (5.1)$$

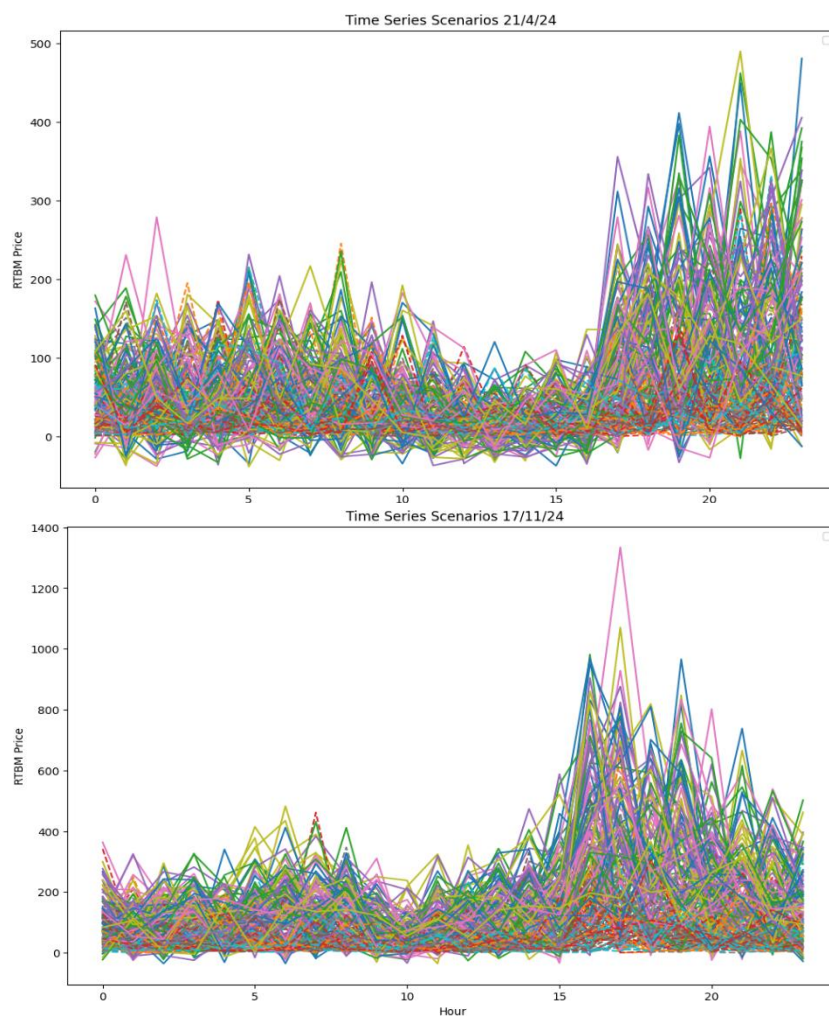
$$\lambda = w'^T * X + w'_0 \quad (5.2)$$



Σχήμα 22: Παράδειγμα παραγόμενων σεναρίων

Μετά την δημιουργία αυτής της μεθόδου παραμετροποίησης της κατανομής με βάση τα δεδομένα εισόδου ακολουθεί η διαδικασία της παραγωγής σεναρίων. Δίνοντας αρχικά δεδομένα για την μέρα που θέλουμε υπολογίζουμε τις παραμέτρους των κατανομών και τραβάμε n τυχαία δείγματα από την κατανομή. Στο σχήμα 22 φαίνεται το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας για $n=1000$. Με διακεκομμένη γραμμή είναι οι RTBM Down και με συνεχής οι RTBM Up.

Η αλλαγή της κατανομής βάσει τις συνθήκες του περιβάλλοντος, ημερομηνία και τιμές λοιπών αγορών, έχει αξία καθώς οι τιμές μεταξύ διαφορετικών ημερών έχουν έντονες διαφορές και επηρεάζουν αρκετά την έκφανση της αγοράς εξισορρόπησης. Για παράδειγμα μια μέρα της άνοιξης με αποκοπές ΑΠΕ δεν θα έχει τις ίδιες ανάγκες άνω εξισορρόπησης με μια μέρα του χειμώνα ή του φθινοπώρου όπου η παραγωγή ΑΠΕ είναι περιορισμένη. Για να φανεί καλύτερα η διαφορά παρουσιάζεται στο σχήμα 23 φαίνονται τα παραγόμενα σενάρια για τις 17/11/24 και τις 21/4/24 (n=100). Αξίζει να σημειωθεί πως σύμφωνα με τα δεδομένα του ΔΕΔΔΗΕ οι 21/4 ήταν μια από τις μέρες με την μεγαλύτερη παραγωγή ΑΠΕ στο 2024.



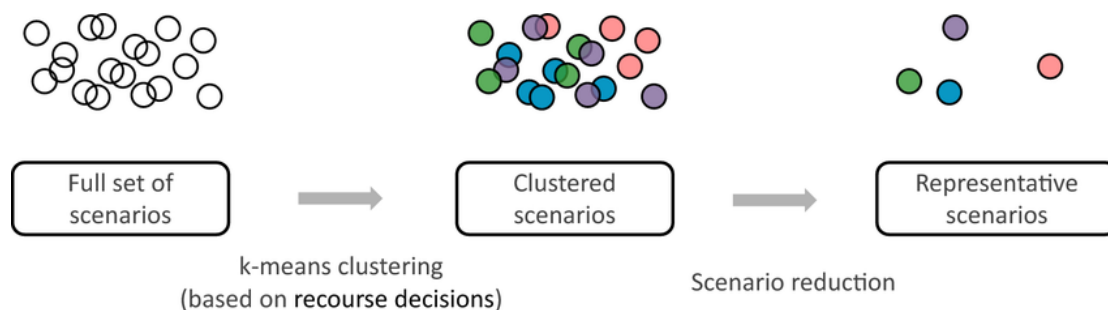
Σχήμα 23 : Σενάρια τιμών για μέρες με και χωρίς ΑΠΕ

Παρατηρούμε πως, τις μέρες του φθινοπώρου η τιμή για άνω εφεδρεία φτάνει πολύ πιο υψηλές τιμές από ότι την άνοιξη (ιδίως το μεσημέρι) το οποίο είναι λογικό καθώς υπάρχει λιγότερη παρουσία φτηνής ηλιακής ενέργειας. Εντούτοις, γενική μορφή των καμπυλών δεν αλλάζει. Η τιμή RTBM Up έχει ένα πρωινό peak και ένα βραδινό peak ενώ πιάνει ελάχιστη τιμή τα μεσημέρια. Αντίθετα η RTBM Down τιμή έχει πιο σταθερές τιμές μέσα στο διάστημα της μέρας (με ελαφρά μείωση της ώρες που η RTBM Up πιάνει peak).

5.3 Μείωση Σεναρίων

Η υφιστάμενη μέθοδος κατασκευής σεναρίων αντιμετωπίζει ένα πρόβλημα. Για να έχουμε μια αντιπροσωπευτική εικόνα για την έκφανση των αγορών εξισορρόπησης χρειάζεται έναν μεγάλο αριθμό σεναρίων το οποίο προκαλεί δυσκολία στην επίλυση του μοντέλου (όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο) λόγω της σημαντικής αύξησης των μεταβλητών απόφασης του μοντέλου συναρτήσει του αριθμού σεναρίων. Αντίθετα μέσω της επιλογής μικρού αριθμού σεναρίων ελλοχεύει ο κίνδυνος τα σενάρια που θα επιλεγούν να μην είναι αντιπροσωπευτικά της πραγματικότητας. Προς αντιμετώπιση αυτού του trade of μεταξύ ακρίβειας και υπολογιστικής δυσκολίας θα αξιοποιήσουμε την μέθοδο του scenario reduction.

Με την μέθοδο του scenario reduction ουσιαστικά θέλουμε να ομαδοποιήσουμε τα σενάρια που κατασκευάζουμε και από αυτά να κρατήσουμε τα k πιο αντιπροσωπευτικά όπου $k \ll N$ ένα αντιπροσωπευτικό υποσύνολο των σεναρίων. Μία συνήθης μέθοδος η χρήση κάποιου αλγορίθμου συσταδοποίησης. Οι αλγόριθμοι αυτοί ομαδοποιούν το σύνολο των N παραγόμενων σεναρίων σε k ομάδες (συστάδες) έτσι ώστε τα «κοντινά» σενάρια να βρίσκονται σε ίδια ομάδα. Προς ομαδοποίηση των σεναρίων αξιοποιείται μια μετρική εγγύτητας η οποία συνήθως αποφασίζεται από τον χρήστη του αλγορίθμου. Κάθε ομάδα σεναρίων αντιπροσωπεύεται από ένα κεντρικό σενάριο το οποίο αποτελεί τον μέσο όρο της ομάδας. Τέλος σε κάθε ομάδα j αντιστοιχίζεται μια πιθανότητα $p_j = |j|/N$ όπου $|j|$ ο αριθμός των σεναρίων που ανήκουν στην ομάδα. Με αυτή την μέθοδο επιτυγχάνεται η μείωση των σεναρίων σε k αντιπροσωπευτικά δείγματα. Στην περίπτωση μας ο αλγόριθμος συσταδοποίησης που θα χρησιμοποιηθεί είναι ο k means. [16]



Σχήμα 24: Σχηματική αναπαράσταση του scenario reduction με την μέθοδο kmeans [17]

Ο αλγόριθμος k means (του οποίου η χρήση φαίνεται σχηματικά στο σχήμα 24) δεν υποθέτει κάποια συγκεκριμένη κατανομή πιθανότητας για τα δεδομένα. Εντούτοις, θεωρεί γνωστό το πλήθος των ομάδων K . Ο αλγόριθμος είναι αναδρομικός και (μετά την αρχικοποίηση των κέντρων βάρων των ομάδων) σε κάθε επανάληψη έχει 2 βήματα [18] :

1. Για κάθε σενάριο βρίσκουμε το πιο κοντινό κέντρο βάρους σε αυτό και το τοποθετούμε στην συστάδα του κέντρου αυτού. Η έννοια της εγγύτητας συνήθως είναι η ευκλείδεια απόσταση του σεναρίου με το κέντρο βάρους. Ωστόσο μπορεί να χρησιμοποιηθούν και άλλες μετρικές απόστασης όπως η απόσταση Manhattan ή η απόσταση Mahalanobis. Δίνουμε άρα στο σενάριο j μια ταμπέλα $1 - k$ τέτοια ώστε να έχουμε

$$\text{Label}[j] = \operatorname{argmin} \|x_j - c_k\|.$$

2. Ενημερώνουμε την τιμή κάθε κέντρου θέτοντας το ίδιο με την μέση τιμή των σεναρίων που ανήκουν στην συστάδα του :

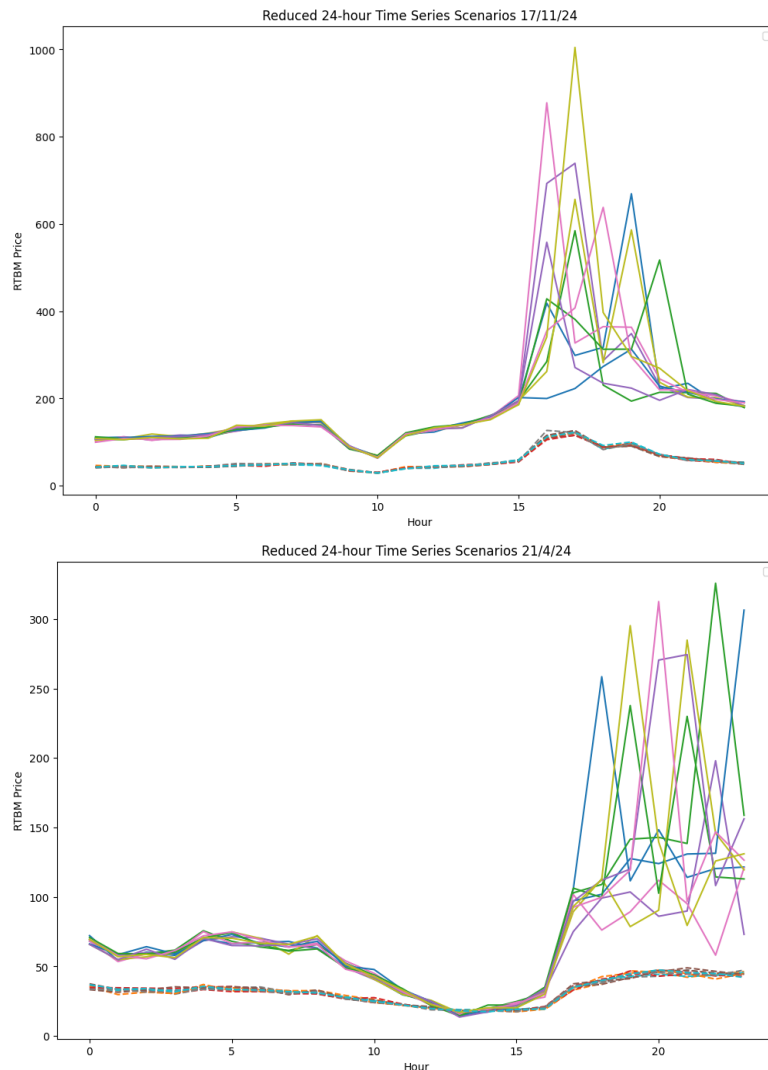
$$c_k = \frac{1}{N_k} \sum_{x_j \in \text{συστάδα } k} x_j$$

Ο αλγόριθμος τερματίζει αν για δύο επαναλήψεις δεν υπάρξει ανανέωση των βαρών των συστάδων και άρα καμία αλλαγή στην ταμπέλα ενός σεναρίου. Προς αρχικοποίηση των κέντρων βαρών των συστάδων ακολουθούμε δύο τρόπους. Είτε μέσω τυχαίας συσταδοποίησης (κάθε σενάριο λαμβάνει τυχαία ετικέτα και υπολογίζονται τα κέντρα ως μέση τιμή των σεναρίων που ανήκουν στην συστάδα τους είτε μέσω τυχαίας επιλογής k σεναρίων τα οποία θα δράσουν ως κέντρα των συστάδων [18].

Ο αλγόριθμος kmeans επιλέγεται για την μέθοδο του scenario reduction λόγω των ιδιαίτερων πλεονεκτημάτων του. Ο αλγόριθμος αυτός είναι απλός στην υλοποίηση και έχει σχετικά χαμηλή πολυπλοκότητα (ανάλογη του πλήθους των ομάδων και των αρχικών δεδομένων). Ταυτόχρονα, συγκλίνει σε λίγα βήματα (συνήθως) και δεν χρειάζεται πρότερη γνώση της κατανομής των δεδομένων. Επίσης, συνεισφέρει στην δημιουργία συμπαγών ομάδων (εν αντιθέσει με αλγορίθμους όπως ο DBSCAN).

Ωστόσο, ο αλγόριθμος απαιτεί πρότερη γνώση του πραγματικού αριθμού συστάδων (χρήση αριθμού ομάδων διαφορετικού από αυτόν καθυστερεί την διαδικασία). Επίσης, τα τελικά αποτελέσματα δύναται να διαφέρουν ανάλογα με την αρχικοποίηση των συστάδων. Ακόμη, κατά την εκτέλεση μπορεί να εμφανιστεί κενή συστάδα (αυτό είναι σημάδι πως με την παρούσα αρχικοποίηση χρειαζόμαστε $K-1$ συστάδες). Τέλος, ο αλγόριθμος αυτός είναι επιρρεπής σε ακραία σημεία και θόρυβο. Εντούτοις, τα περισσότερα από τα προβλήματα αυτά δεν σημαντικά την εφαρμογή αυτή.

Εκτελώντας την παραπάνω μέθοδο scenario reduction στα δεδομένα μας (και συγκεκριμένα στις προβλέψεις που λαμβάνουμε για τις 17/11/24 και τις 21/4/24) λαμβάνουμε τα αποτελέσματα που φαίνονται στο σχήμα 25. Όπως και πριν με διακεκομμένη γραμμή είναι οι τιμές RTBM Down και με συνεχή γραμμή οι RTBM Up.



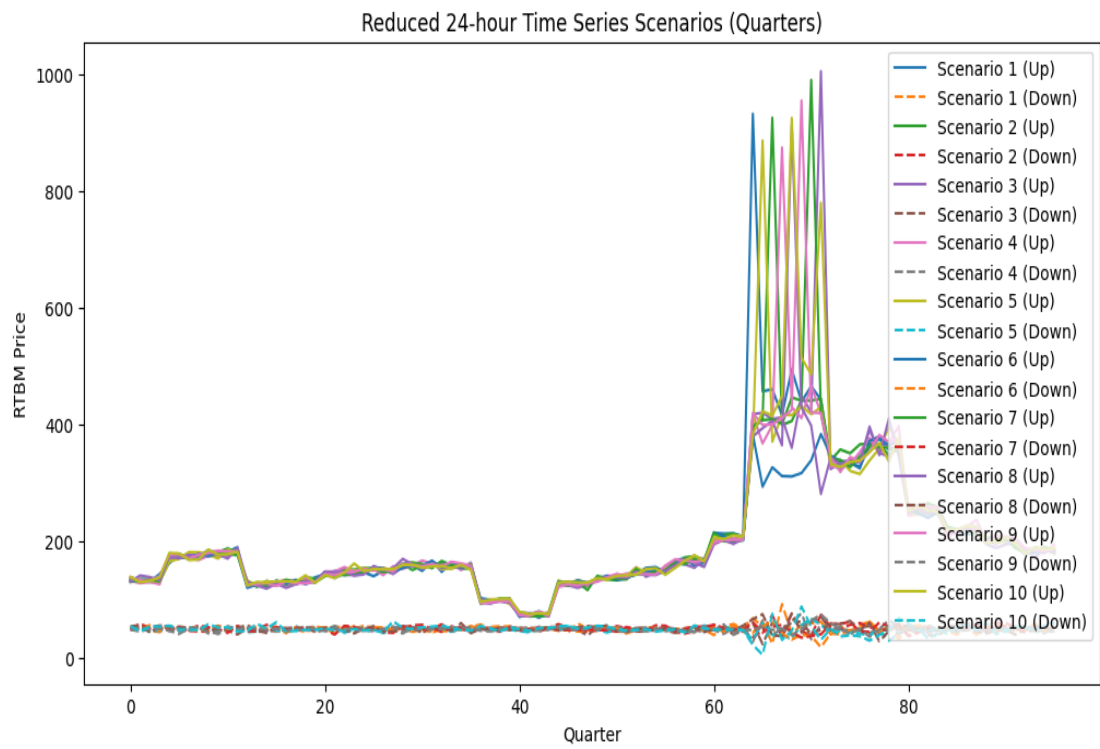
Σχήμα 25: Σενάρια τιμών μετά από Scenario Reduction

Παρατηρούμε πως η μορφή των χρονοσειρών είναι παρόμοια με πριν το οποίο είναι προφανώς επιθυμητό. Επίσης, βλέπουμε τις διαφοροποιήσεις ως προς τον χρόνο του μεγίστου και της μέγιστης τιμής της χρονοσειράς (οι διαφοροποιήσεις είναι πιο έντονες για την RTBM Up από ότι την RTBM Down λόγω και της φύσης της κατανομής τους).

Εδώ επίσης παρατηρούνται πιο εύκολα οι διαφορές μεταξύ των χειμερινών και των εαρινών μηνών. Εντυπωσιακό είναι το γεγονός πως η τιμή της άνω εφεδρείας τις μεσημεριανές ώρες για τις 21/4/24 είναι τόσο χαμηλή που καταλήγει χαμηλότερη της τιμής της κάτω εξισορρόπησης. Αυτό υποδεικνύει την υπερπαραγωγή ΑΠΕ εκείνες τις ώρες οι οποίες εκμηδενίζουν την ανάγκη για άνω εξισορρόπηση (εξού και οι χαμηλές τιμές).

Μετά την κατασκευή σεναρίων τιμών θεωρώντας βήμα μία ώρας απαραίτητη στα πλαίσια της εργασίας κρίνεται η κατασκευή σεναρίων τιμών με δεκαπεντάλεπτο βήμα (ώστε να έχουμε αποτελέσματα και προσομοιώσεις πιο ρεαλιστικές).

Ακολουθώντας παρόμοια μεθοδολογία με αυτή που περιεγράφηκε πάνω κατασκευάσαμε ένα τέτοιο μοντέλο. Τα αποτελέσματα του μοντέλου για μια τυχαία μέρα του Νοέμβρη φαίνονται στο σχήμα 26.



Σχήμα 26: Σενάρια τιμών ανά δεκαπεντάλεπτο

Κεφάλαιο 6

Μοντελοποίηση Συσσωρευτή σε Περιβάλλον Αγορών

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται στην πληρότητα της η λειτουργία μιας μονάδας αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας βασισμένης σε τεχνολογία συσσωρευτών η οποία δρα σε περιβάλλον αγορών. Οι προσομοιώσεις αποσκοπούν στο να δείξουν την δυναμική του μοντέλου που έχει αναπτυχθεί για διάφορους τύπους αγορών με διαφορά επίπεδα λεπτομέρειας και απλοποιητικών παραδοχών (ξεκινώντας από ένα ιδιαίτερα απλοϊκό μοντέλο στη παράγραφο 6.1 και χτίζοντας σταδιακά ένα πιο ακριβές μοντέλο στην παράγραφο 6.4).

6.1 Συμμετοχή στην Αγορά Επόμενης Μέρας

Ως πρώτο βήμα στο εγχείρημα αυτό κατασκευάστηκε το μοντέλο (6.1). Το μοντέλο αυτό περιγράφει την συμμετοχή της συσκευής αποθήκευσης στην αγορά επόμενης μέρας (Day Ahead Market).

Μοντέλο 6.1:

$$\max_{p_c, p_d, u, v} \sum_{t=1}^{24} \lambda_t^{DA} (p_t^{sell} - p_t^{buy}) \quad (6.1.1)$$

$$e_1 = E_0 + h^c p_1^{buy} - \frac{1}{h^d} p_1^{sell} \quad (6.1.2)$$

$$e_t = e_{t-1} + h^c p_t^{buy} - \frac{1}{h^d} p_t^{sell}, \forall t \in \{2, 24\} \quad (6.1.3)$$

$$0 \leq p_t^{buy} \leq P^c * u_t, \forall t \quad (6.1.4)$$

$$0 \leq p_t^{sell} \leq P^d * v_t, \forall t \quad (6.1.5)$$

$$u_t + v_t \leq 1, \forall t \quad (6.1.6)$$

$$E^{min} \leq e_t \leq E^{max}, \forall t \quad (6.1.7)$$

$$e_{24} \geq E^{fin} \quad (6.1.8)$$

$$\sum_{t=1}^{24} h^c p_t^{buy} \leq C * E^{max} \quad (6.1.9)$$

$$\sum_{t=1}^{24} \frac{1}{h^d} p_t^{sell} \leq C * E^{max} \quad (6.1.10)$$

$$u, v \in \{0,1\}$$

$$t \in \{1,24\}$$

Σημασία μεταβλητών μοντέλου :

p_t^{buy} : Η ισχύς που αγοράζει η μπαταρία (φόρτιση) την ώρα t

p_t^{sell} : Η ισχύς που πουλάει η μπαταρία (εκφόρτιση) την ώρα t

e_t : Η αποθηκευμένη ισχύς της μπαταρίας την ώρα t (State of Charge SOC)

u_t : Δυαδική μεταβλητή που ενεργοποιείται κατά την φόρτιση της μπαταρίας

v_t : Δυαδική μεταβλητή που ενεργοποιείται κατά την εκφόρτιση της μπαταρίας

Σημασία σταθερών μοντέλου:

$\lambda_{DA,t}$: Η τιμή ηλεκτρικής ενέργειας στην αγορά επόμενης μέρας για την ώρα t

E_0 : Η αρχική αποθηκευμένη ενέργεια της μπαταρίας

E^{min} : Η ελάχιστη δυνατή αποθηκευμένη ενέργεια της μπαταρίας

E^{max} : Η μέγιστη δυνατή αποθηκευμένη ενέργεια της μπαταρίας

E^{fin} : Η αποθηκευμένη ενέργεια της μπαταρίας στο τέλος της μέρας

h^c : Η απόδοση της μπαταρίας κατά την φόρτιση

h^d : Η απόδοση της μπαταρίας κατά την εκφόρτιση

P^c : Η μέγιστη ισχύς φόρτισης ανά ώρα

P^d : Η μέγιστη ισχύς εκφόρτισης ανά ώρα

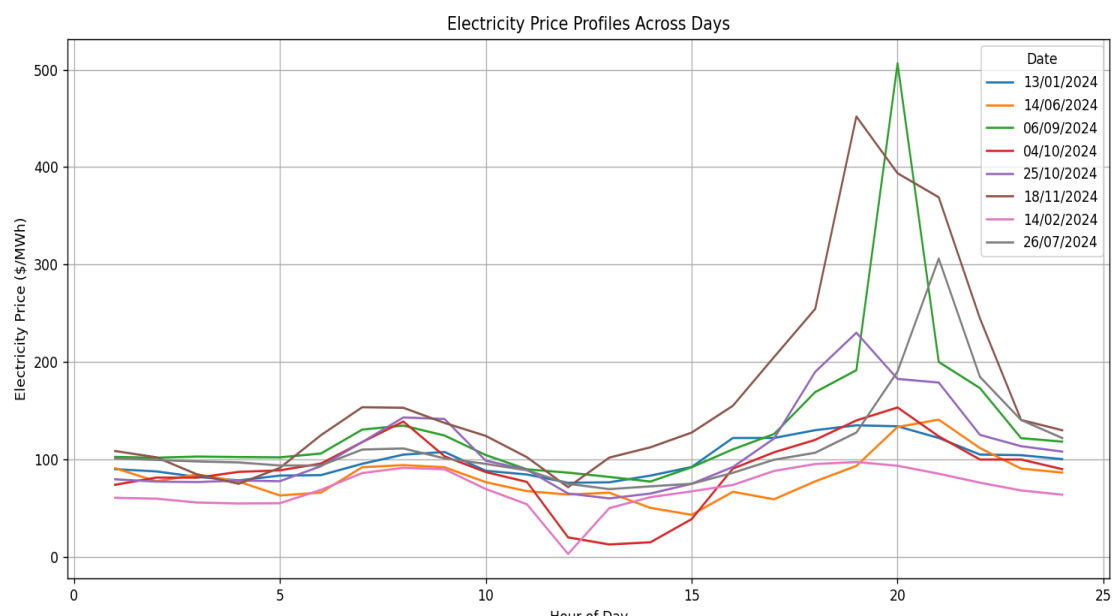
C : Ο μέγιστος αριθμός κύκλων φόρτισης – εκφόρτισης ανά μέρα

Παρατηρεί κανείς πως στο μοντέλο 6.1 ως περιορισμοί έχουν εισαχθεί όλες οι εξισώσεις βάσει των οποίων μοντελοποιήθηκε η μπαταρία στο Κεφάλαιο 3 (εξισώσεις 6.1.2 – 6.1.7). Μέσω της εισαγωγής αυτών των περιορισμών επιτυγχάνεται η πλήρης και ακριβής περιγραφή της λειτουργίας του σταθμού αποθήκευσης. Οι περιορισμοί υφίστανται για $\forall t \in \{1,24\}$, δηλαδή για κάθε ώρα της μέρας. Επίσης, πέραν των περιορισμών αυτών υπάρχουν οι περιορισμοί 6.1.8 – 6.1.10. Ο 6.1.8 περιγράφει την ανάγκη για παρουσία στην μπαταρία, στο τέλος της μέρας, ενέργειας τουλάχιστον ίσης με E_{fin} . Συνήθως η μεταβλητή E_{fin} επιλέγεται ίση με E_0 ώστε η μπαταρία να ξεκινά και να τελειώνει την μέρα με ίσα ποσά αποθηκευμένης ενέργειας. Αυτός ο περιορισμός τοποθετείται ώστε μετά τον χρονικό ορίζοντα της βελτιστοποίησης η μπαταρία να έχει τις ίδιες αρχικές συνθήκες με αυτές που άρχισε (σημαντικό για βελτιστοποίηση διαδοχικών ημερών). Οι εξισώσεις 6.1.9 και 6.1.10 δρουν ώστε να περιορίσουν τους κύκλους φόρτισης- εκφόρτισης της μπαταρίας αντίστοιχα στο πολύ C . Αυτός ο

περιορισμός τοποθετείται ώστε να εγγυηθεί την μακροζωία της συσκευής αποθήκευσης καθώς οι πολλαπλοί κύκλοι μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα αυξάνουν το degradation της μπαταρίας ιδίως αν η φόρτιση και η εκφόρτιση είναι πλήρεις [19]. Το C σε ορισμένα μοντέλα δύναται να δράσει και ως μεταβλητή απόφασης του προβλήματος [20].

Ως αντικειμενική συνάρτηση (6.1.1) ουσιαστικά χρησιμοποιούνται τα κέρδη της μπαταρίας από την αγορά κάθε ώρα. Τα κέρδη ορίζονται προφανώς ως πωλούμενη ενέργεια μείον αγοραζόμενη ενέργεια. Η συνάρτηση θα μπορούσε να εμπλουτιστεί με την προσθήκη λειτουργικού κόστους της μπαταρίας το οποίο οφείλεται στο degradation [19,20,21]. Η εισαγωγή ενός τέτοιου περιορισμού θα σιγούρευε πως η μπαταρία μακροχρόνια θα έβγαζε κέρδος τουλάχιστον ικανό να μηδενίσει τα αρχικά της επενδυτικά κόστη. Εντούτοις, επειδή η μελέτη στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής βασίζεται στην βραχυπρόθεσμη συμπεριφορά της μπαταρίας ένας τέτοιος όρος στην αντικειμενική συνάρτηση δεν υιοθετήθηκε.

Προς μια πρώτη παρουσίαση του μοντέλου επιλέχθηκαν αντιπροσωπευτικές μέρες του 2024 οι οποίες ακολουθούν την τυπική κατανομή τιμών Day Ahead αγοράς, όπως φαίνεται στο σχήμα 27. Παρατηρείται ένα πρωινό peak τιμών ακολουθούμενο από χαμηλές τιμές το μεσημέρι προϊόντος της υψηλής παραγωγής ΑΠΕ και μετά ένα υψηλότερο βραδινό μέγιστο τιμών (το οποίο πιθανώς οφείλεται στην ταυτόχρονη αύξηση ζήτησης στα νοικοκυριά και την μείωση ισχύος ΑΠΕ). Αξίζει να σημειωθεί πως οι μέρες επιλέχθηκαν από όλη την διάρκεια του έτους πλην του Απρίλη και του Μάρτη για λόγους που θα εξηγηθούν παρακάτω.



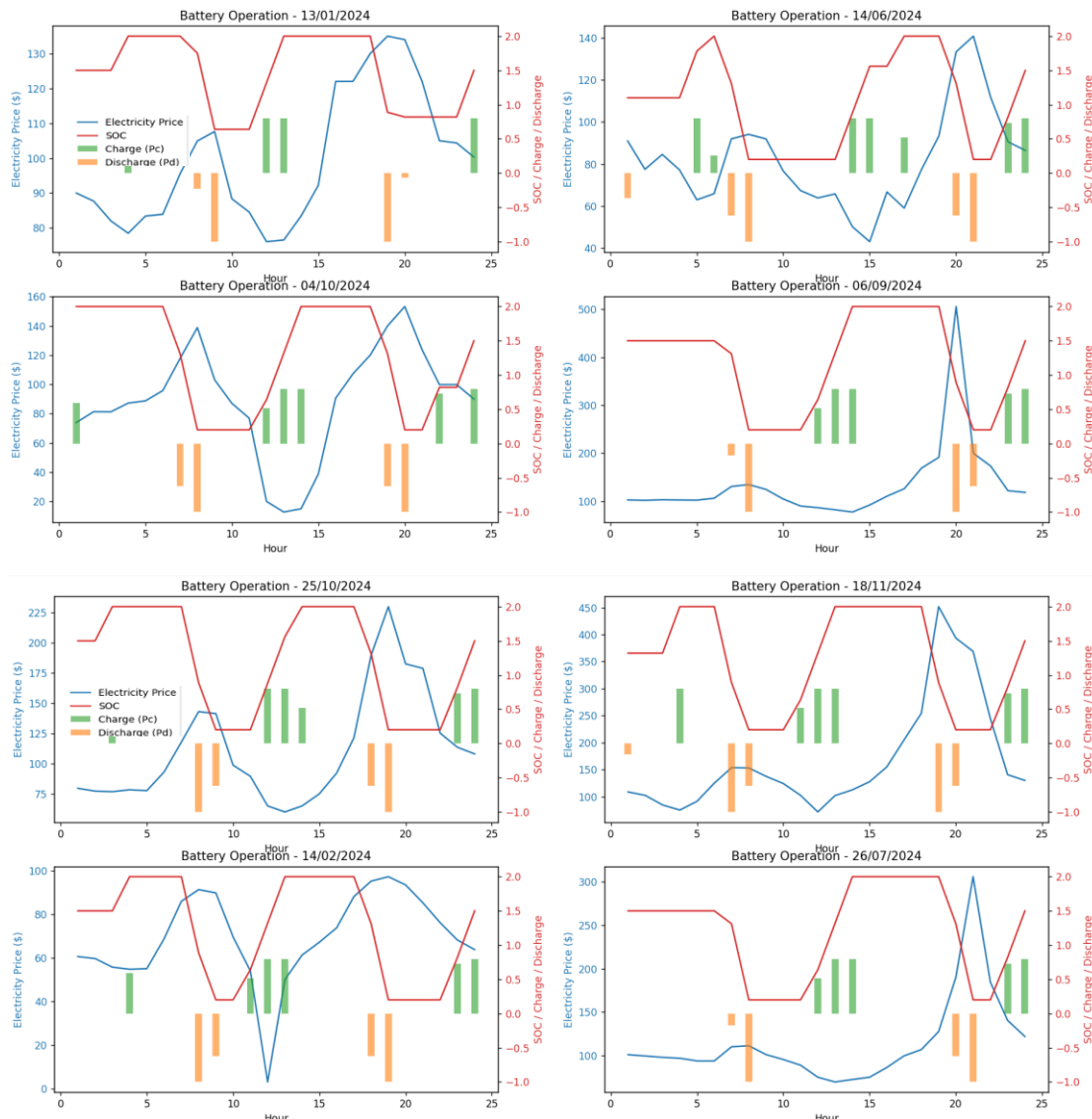
Σχήμα 27 : Κατανομή τιμών για τις επιλεγθείσες μέρες

Προτού παρουσιαστούν τα αποτελέσματα αξίζει να παρουσιαστεί η αρχικοποίηση του μοντέλου. Ο σκοπός ήταν η μοντελοποίηση μιας μέσης μπαταρίας και οι τιμές των παραμέτρων αντικατοπτρίζουν αυτό [2,11]. Η μπαταρία είναι του 1MW με διάρκεια 2h (2MWh μπαταρία). Οι συγκεκριμένες τιμές φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Παράμετρος Μοντέλου	Τιμή
E_0	1.5
E^{min}	0.2
E^{max}	2
E^{fin}	1.5
h^c	0.85
h^d	0.9
p^c	0.8
p^d	1
C	2

Πίνακας 6.1

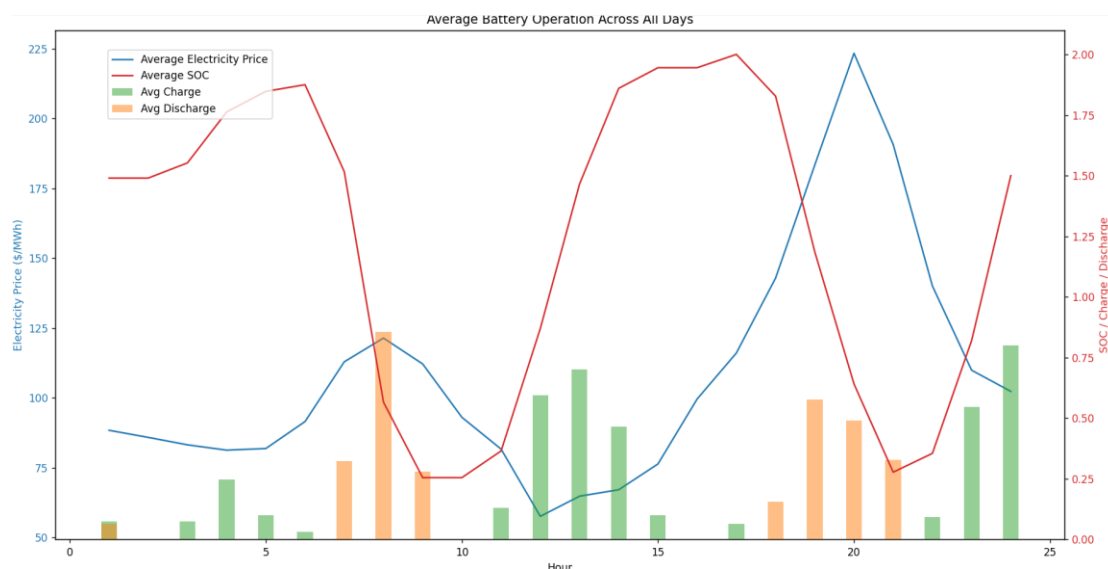
Η επίλυση του μοντέλου έγινε με την βοήθεια της βιβλιοθήκης Pyomo της Python και με τον solver Gurobi. Τα αποτελέσματα παραθέτονται στο σχήμα 28.



Σχήμα 28: Λειτουργία μπαταρίας για τις τυχαίες μέρες του έτους

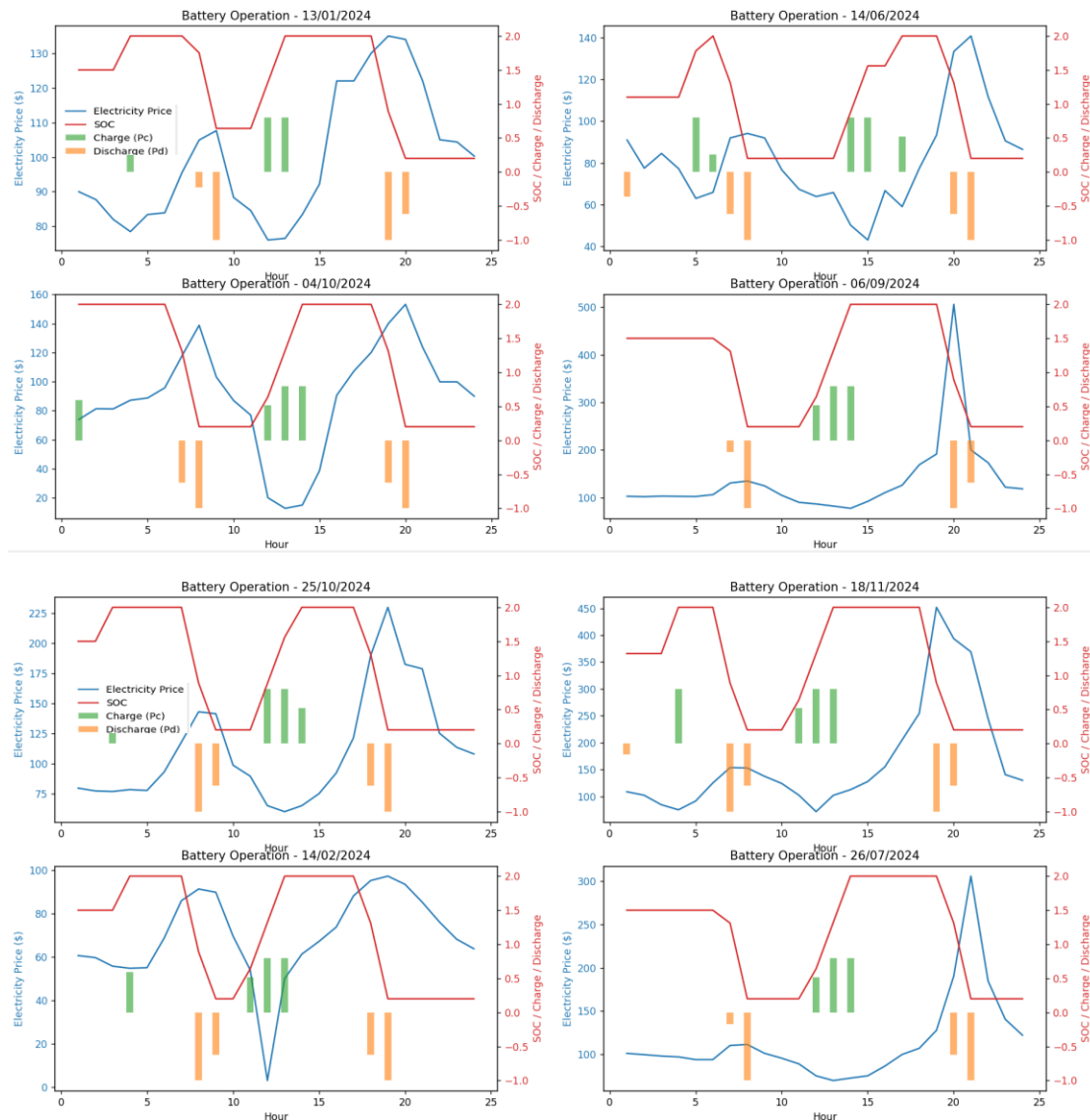
Παρατηρούμε πως η μπαταρία δρα όπως θα περίμενε κανείς. Κατά το πρωινό peak στις τιμές αγοράς επόμενης μέρας η μπαταρία πουλάει στην αγορά (αποφορτίζει)

εκμεταλλευόμενη το peak. Παρομοίως δρα και τις βραδινές ώρες (19:00-21:00) όπου εκεί επειδή οι τιμές είναι υψηλότερες το μοντέλο πουλάει όσο περισσότερο μπορεί. Ταυτόχρονα κατά τις μεσημεριανές ώρες (11:00-14:00) η μπαταρία αγοράζει ισχύ (φορτίζει) ώστε να έχει αρκετή ισχύ για να δώσει το βράδυ. Παρατηρείται ακόμα φόρτιση κατά τις βραδινές ώρες (22:00-24:00) όπου η τιμή χαμηλώνει πάλι λόγω της πτώσης ζήτησης. Αυτός ο κύκλος φόρτισης γίνεται ώστε το μοντέλο να έχει αρκετή απομείναισα ενέργεια για την επόμενη μέρα (περιορισμός 6.1.8). Επίσης, ορισμένες μέρες (13/01,14/06,25/10,18/11,14/02) παρατηρείται μια αρχική αγορά ισχύος στις πρώτες πρωινές ώρες (3:00-5:00). Αυτή η αγορά οφείλεται στην μεγάλη διαφορά τιμής μεταξύ των πρώτων πρωινών ωρών και των ωρών που γίνεται η πρώτη πώληση ισχύος στην αγορά. Η μπαταρία γεμίζει ισχύ ώστε να δώσει ακόμα παραπάνω κατά την πρώτη εκφόρτιση. Το μοντέλο ουσιαστικά κάνει αρμπιτράζ μεταξύ των διάφορων τιμών της μέρας ώστε να μεγιστοποιήσει το κέρδος του. Ταυτόχρονα παρατηρείται πως το μοντέλο δεν κάνει πάνω από 2 κύκλους φόρτισης εκφόρτισης, όπως περιμέναμε λόγω της επιβολής μέγιστου πλήθους κύκλων. Στο σχήμα 29 φαίνεται η μέση συμπεριφορά του μοντέλου για τις μέρες αυτές. Παρατηρούμε πως επιβεβαιώνει τις παρατηρήσεις μας.



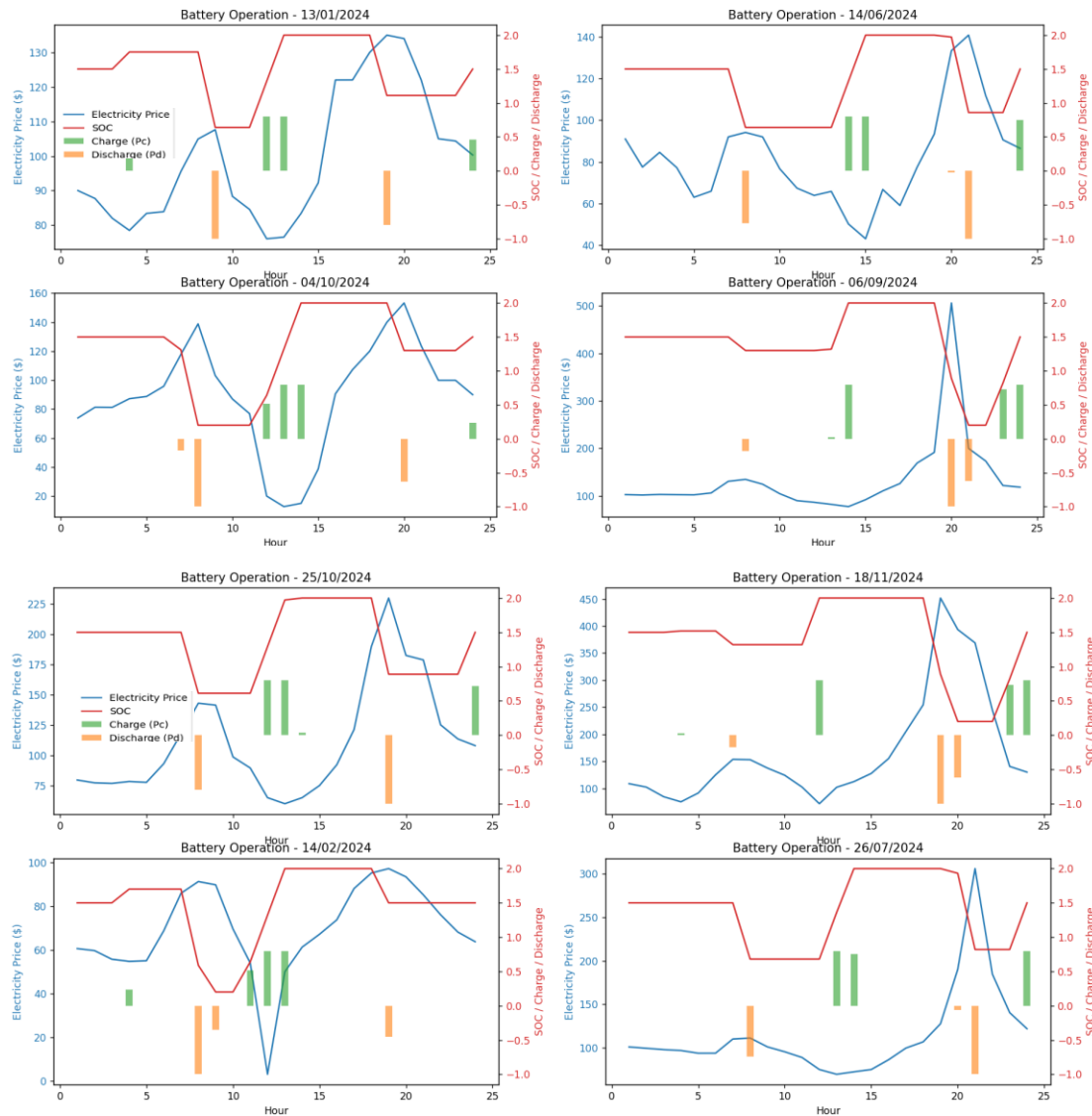
Σχήμα 29 : Κατανομή τιμών για τις επιλεγθείσες μέρες

Προς πληρέστερη κατανόηση του μοντέλου θα μεταβληθούν ορισμένοι περιορισμοί του και θα αποτυπωθεί πως αυτοί επηρεάζουν τα αποτελέσματα. Στο σχήμα 30 φαίνεται το πρώτο αποτέλεσμα μίας τέτοιας δοκιμής. Στο σχήμα φαίνονται τα αποτελέσματα του μοντέλου για τις ίδιες μέρες χωρίς τον περιορισμό 6.1.8. Παρατηρεί κανείς πως εν αντιθέσει με το πλήρες μοντέλο εδώ δεν παρατηρείται φόρτιση από την μπαταρία στις τελευταίες ώρες της ημέρας. Το μοντέλο πάντα επιλέγει να αδειάσει πλήρως την αποθηκευμένη του ενέργεια τις βραδινές ώρες που παρατηρούνται αυξημένες τιμές προς μεγιστοποίηση του κέρδους. Εντούτοις, δημιουργεί χειρότερες αρχικές συνθήκες για την επόμενη μέρα βελτιστοποίησης.



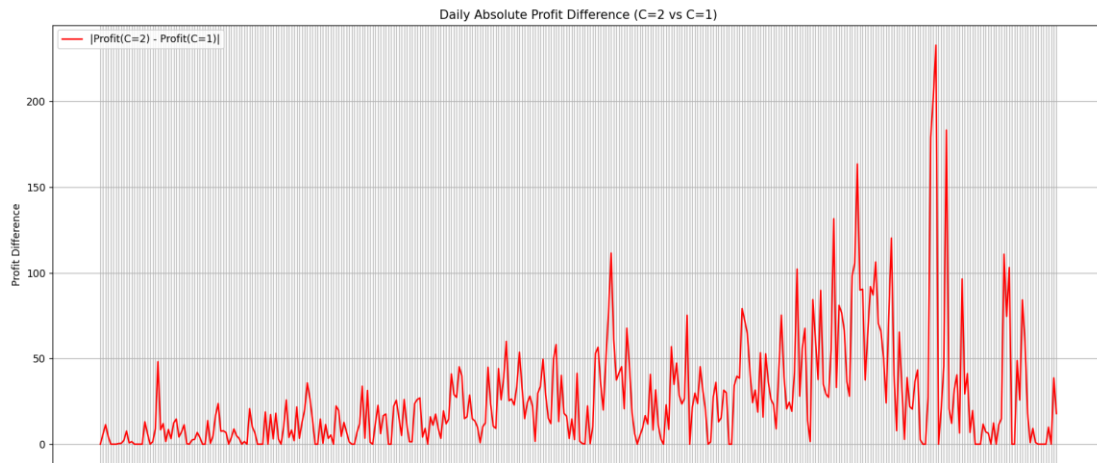
Σχήμα 30: Κατανομή τιμών για τις επιλεγθείσες μέρες 6.1.8

Στο επόμενο πείραμα θα εξεταστεί η ευαισθησία του μοντέλου στην αλλαγή της μεταβλητής C (περιορισμοί 6.1.9-6.1.10). Αυξάνοντας τη σταθερά C κατά 1 δεν παρατηρείται κάποια αλλαγή στην συμπεριφορά του μοντέλου για τις μέρες του πειράματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η δομή της χρονοσειράς των τιμών της Day Ahead αγοράς δεν επιτρέπει σχεδόν ποτέ παραπάνω από 2 κύκλους φόρτισης εκφόρτισης (καθώς έχει δύο ουσιαστικά peaks τιμών και μία με δύο σημεία με ιδιαίτερα χαμηλές τιμές). Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μείωση της σταθεράς C από 2->1. Κάτι τέτοιο πρακτικά θα εξασφάλιζε μεγαλύτερη μακροζωία για την συσκευή αποθήκευσης λόγω των λιγότερων κύκλων πλήρους φόρτισης-εκφόρτισης μέσα στην μέρα σε αντάλλαγμα με λιγότερα κέρδη μέσα στην μέρα. Στο σχήμα 31 φαίνεται η αλλαγή στην συμπεριφορά του μοντέλου. Για ορισμένες μέρες όπου η διαφορά μεσημέρι-βράδυ είναι πολύ μεγαλύτερη από την πρωινή διαφορά τιμών (π.χ. 14/6/24) παρατηρείται πλήρης έλλειψη του πρώτου κύκλου φόρτισης εκφόρτισης. Σε άλλες μέρες με πιο ισορροπημένες διαφορές τιμών μέσα στην μέρα παρατηρείται η ύπαρξη δύο πιο ρηχών κύκλων φόρτισης εκφόρτισης οι οποίοι ισοδυναμούν με έναν βαθύ κύκλο.



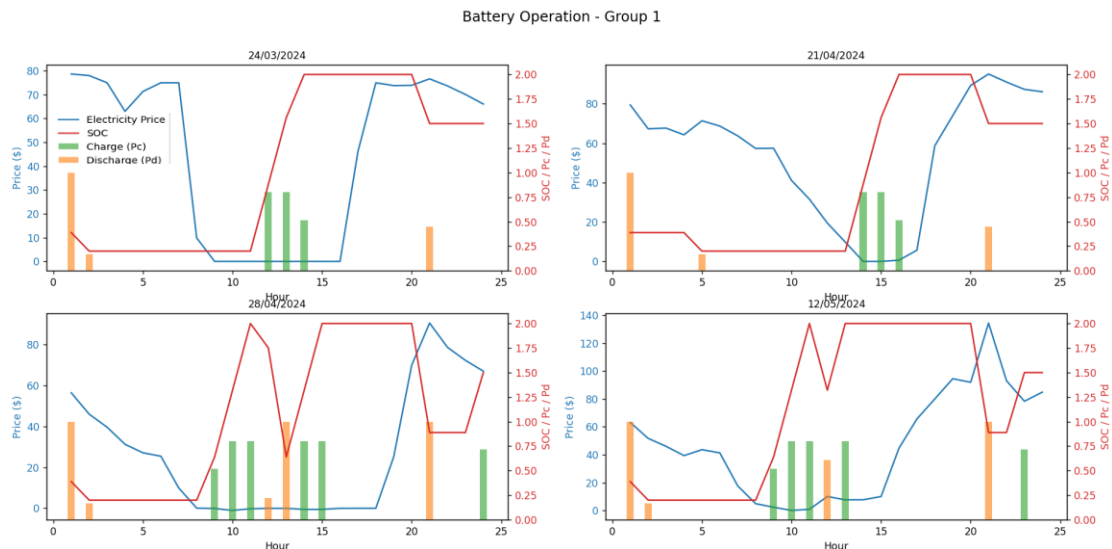
Σχήμα 31 : Κατανομή τιμών για τις επιλεχθείσες μέρες 6.1.9 6.1.10

Επίσης ενδιαφέρον έχει η απώλεια κέρδους μεταξύ του μοντέλου με 2 και 1 κύκλο μέσα στην μέρα. Τρέχοντας το μοντέλο για κάθε μέρα του έτους 2024 και αποτυπώνοντας την απώλεια κέρδους από τον περιορισμό κύκλων παράγεται το σχήμα 32. Στο σχήμα 32 φαίνεται πως οι απώλειες αυξάνονται δραματικά στο δεύτερο μισό του έτους και συγκεκριμένα στους φθινοπωρινούς μήνες. Παράλληλα, ιδιαίτερα ψιλές απώλειές παρατηρούνται και τον Ιούλιο αλλά όχι τόσο μεγάλες όσο τους φθινοπωρινούς μήνες. Στο 10% των ημερών του έτους με την χειρότερες απώλειες εντοπίζονται 6 μέρες που δεν ανήκουν στους φθινοπωρινούς μήνες (4 τον Δεκέμβρη και 2 τον Ιούλιο). Η μέση απώλεια κέρδους για τις μέρες αυτές υπολογίζεται στα 26.21 Ευρώ δηλαδή παρατηρείται μια μέση πτώση κέρδους της τάξης του 13% μέσα στην χρονιά. Για παρόμοια ανάλυση με την αύξηση του C 2->3 δεν παρατηρείται διαφορά στο κέρδος, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, παρά μόνο σε 5 μέρες του φθινοπώρου μέσα στην χρονιά όπου η αύξηση αυτή οδηγεί σε αύξηση κέρδους της τάξης του 2-4% (10-15 ευρώ σε απόλυτα νούμερα). Αξίζει να σημειωθεί πως υπήρχαν και άλλες 5 μέρες με αύξηση κέρδους της τάξης του 0.5-2% όπου σε καθαρά νούμερα η αύξηση είναι κάτω των 3 ευρώ και άρα μη ουσιαστική.



Σχήμα 32 : Απόλεια κέρδους ανά μέρα

Τέλος, ενδιαφέρον έχει η παρουσίαση της λειτουργία του μοντέλου σε μέρες με υπερπαραγωγή ΑΠΕ. Μέσω δεδομένων ΔΕΔΔΗΕ βρέθηκαν 4 τέτοιες μέρες και τα αποτελέσματα του μοντέλου φαίνονται στο σχήμα 33.



Σχήμα 33 : Συμπεριφορά μοντέλου σε μέρες με υπερπαραγωγή ΑΠΕ

Εδώ παρατηρείται μια διαφοροποίηση στην συμπεριφορά του μοντέλου σε σχέση με τις πιο τυπικές μέρες. Μέσα στην μέρα το μοντέλο εκφορτίζει από τις πρώτες πρωινές ώρες εκμεταλλευόμενο το γεγονός ότι το πρωί λόγω της απουσίας ΑΠΕ έχει υψηλότερες τιμές από ότι μέσα στην μέρα (τις υπόλοιπες ώρες η τιμή πέφτει ραγδαία). Τις πρωινές και τις μεσημεριανές ώρες το μοντέλο φορτίζει να φορτίσει με την σχεδόν δωρεάν ενέργεια και να αποφορτίσει στις μικρές βραδινές αιχμές. Ορισμένες μέρες παρατηρούνται μικρές φορτίσεις-αποφορτίσεις στην διάρκεια του μεσημεριού οι οποίες εκμεταλλεύονται μικρές μεταβολές τιμών τις ώρες εκείνες και δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερο κέρδος. Σε τέτοιες μέρες οι οποίες εμφανίζονται συχνά τους εαρινούς μήνες, και η συχνότητα τους προϊόντος χρόνου θα αυξάνεται λόγω της προβλεπόμενης αύξηση της παρουσίας των ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα, η αγορά επόμενης μέρας δεν παρουσιάζει τόσο σημαντικά κέρδη. Γενικά η μπαταρία δυσκολεύεται σε μέρες με σχετικά σταθερές τιμές. Εκτός από τις μέρες με υπερπαραγωγή ΑΠΕ τέτοια θέματα υπάρχουν και σε μέρες με μηδενική παραγωγή

ΑΠΕ και υψηλές τιμές όλη μέρα (όπως τις μέρες του Δεκέμβρη και του Γενάρη). Φαίνεται λοιπόν η ανάγκη συμμετοχής της ευέλικτης μονάδας αποθήκευσης σε παραπάνω κατηγορίες αγορών (γενικά οι μπαταρίες λόγω της μεγάλης ευελιξίας τους μπορούν να συμμετάσχουν σε πολλαπλές αγορές ταυτόχρονα και να συσσωρεύουν κέρδη από όλες τους).

6.2 Ταυτόχρονη Συμμετοχή στις Αγορές Επόμενης Μέρας και Εξισορρόπησης

Προς αντιμετώπιση προβλημάτων ανεπαρκών κερδών και προς εκμετάλλευση της πλήρους ικανότητας ευελιξίας της μπαταρίας εξετάζεται η ταυτόχρονη συμμετοχή της τόσο στην αγορά επόμενης μέρας όσο και την αγορά εξισορρόπησης. Προς επίτευξη του στόχου αυτού δημιουργείται το μοντέλο 6.2

Μοντέλο 6.2:

$$\max_{pc,pd,u,v} \sum_{t=1}^{24} [\lambda_t^{DA} (p_t^{sellDA} - p_t^{buyDA}) + \lambda_t^{up} * be_t^{up} - \lambda_t^{dw} * be_t^{dw}] \quad (6.2.1)$$

$$e_1 = E_0 + h^c p_1^{buy} - \frac{1}{h^d} p_1^{sell} \quad (6.2.2)$$

$$e_t = e_{t-1} + h^c p_t^{buy} - \frac{1}{h^d} p_t^{sell}, \forall t \in \{2, 24\} \quad (6.2.3)$$

$$0 \leq p_t^{buy} \leq P^c * u_t, \forall t \quad (6.2.4)$$

$$0 \leq p_t^{sell} \leq P^d * v_t, \forall t \quad (6.2.5)$$

$$u_t + v_t \leq 1, \forall t \quad (6.2.6)$$

$$E^{min} \leq e_t \leq E^{max}, \forall t \quad (6.2.7)$$

$$e_{24} \geq E^{fin} \quad (6.2.8)$$

$$\sum_{t=1}^{24} h^c p_t^{buy} \leq C * E^{max} \quad (6.2.9)$$

$$\sum_{t=1}^{24} \frac{1}{h^d} p_t^{sell} \leq C * E^{max} \quad (6.2.10)$$

$$p_t^{sell} - p_t^{buy} = p_t^{sellDA} - p_t^{buyDA} + be_t^{up} - be_t^{dw} \forall t \quad (6.2.11)$$

$$0 \leq be_t^{up} \leq BE^{up} * u_t^{up} \forall t \quad (6.2.12)$$

$$0 \leq be_t^{dw} \leq BE^{dw} * u_t^{dw} \forall t \quad (6.2.13)$$

$$u_t^{up} + u_t^{dw} \leq 1 \forall t \quad (6.2.14)$$

$$u, v \in \{0, 1\}$$

$$t \in \{1,24\}$$

Σημασία μεταβλητών μοντέλου :

p_t^{buy} : Η συνολική ισχύς που αγοράζει η μπαταρία την ώρα t

p_t^{sell} : Η συνολική ισχύς που πουλάει η μπαταρία την ώρα t

p_t^{buyDA} : Η συνολική ισχύς που αγοράζει η μπαταρία την ώρα t από την αγορά επόμενης μέρας

p_t^{sellDA} : Η συνολική ισχύς που πουλάει η μπαταρία την ώρα t από την αγορά επόμενης μέρας

be_t^{up} : Η ενέργεια άνω εξισορρόπησης που παρέχει η μπαταρία την ώρα t

be_t^{dw} : Η ενέργεια κάτω εξισορρόπησης που παρέχει η μπαταρία την ώρα t

e_t : Η αποθηκευμένη ισχύς της μπαταρίας την ώρα t (State of Charge SOC)

u_t : Δυαδική μεταβλητή που ενεργοποιείται κατά την φόρτιση της μπαταρίας

v_t : Δυαδική μεταβλητή που ενεργοποιείται κατά την εκφόρτιση της μπαταρίας

u_t^{up} : Δυαδική μεταβλητή που ενεργοποιείται κατά την παροχή υπηρεσιών άνω εξισορρόπησης από την μπαταρία

u_t^{dw} : Δυαδική μεταβλητή που ενεργοποιείται κατά την παροχή υπηρεσιών κάτω εξισορρόπησης από την μπαταρία

Σημασία σταθερών μοντέλου:

λ_t^{DA} : Η τιμή ηλεκτρικής ενέργειας στην αγορά επόμενης μέρας για την ώρα t

λ_t^{up} : Η τιμή ηλεκτρικής ενέργειας στην αγορά άνω εξισορρόπησης για την ώρα t

λ_t^{dw} : Η τιμή ηλεκτρικής ενέργειας στην αγορά κάτω εξισορρόπησης για την ώρα t

BE^{up} : Η μέγιστη ενέργεια άνω εξισορρόπησης που μπορεί να δοθεί σε μία ώρα

BE^{dw} : Η μέγιστη ενέργεια κάτω εξισορρόπησης που μπορεί να δοθεί σε μία ώρα

(Οι υπόλοιπες σταθερές είναι ίδιες με το μοντέλο 6.1)

Το μοντέλο 6.2 δρα ως εξέλιξη του 6.1. Οι περιορισμοί 6.2.2- 6.2.10 είναι ίδιοι με αυτούς του μοντέλου 6.1. Από τους υπόλοιπους περιορισμούς ο 6.2.11 περιγράφει την θέση της μπαταρίας ως υπέρθεση της συμπεριφοράς της στην αγορά επόμενης μέρας και την αγορά εξισορρόπησης. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η επιβολή περιορισμών σε πολλαπλές αγορές. Οι περιορισμοί 6.2.12 και 6.2.13 δρουν ως περιορισμοί ράμπας για την αγορά εξισορρόπησης. Εκφράζουν δηλαδή την μέγιστη άνω και κάτω ενέργεια εξισορρόπησης που μπορεί να δοθεί στο διάστημα μίας

χρονικής περιόδου (σε απόλυτη αντιστοιχία με τους περιορισμούς 6.1.4 και 6.1.5). Τέλος, ο περιορισμός 6.2.14 απαγορεύει στην μπαταρία να δώσει άνω και κάτω ενέργεια εξισορρόπησης ταυτόχρονα (αν και διαφορετικά προϊόντα). Αυτό απαγορεύεται γιατί σε πραγματικές συνθήκες αγοράς δεν θα επέτρεπε ο διαχειριστής σε μία μονάδα να δώσει ταυτόχρονα και τα δύο προϊόντα.

Ως αντικειμενική συνάρτηση (6.2.1) ουσιαστικά χρησιμοποιούνται και στο μοντέλο αυτό τα κέρδη της μπαταρίας από την αγορά κάθε ώρα. Τα κέρδη αυτή τη φορά ορίζονται ως η πωλούμενη ενέργεια μείον αγοραζόμενη ενέργεια στην αγορά επόμενης μέρας συν την ενέργεια που προσφέρθηκε για άνω εξισορρόπηση μείον την ενέργεια που μειώθηκε για κάτω εξισορρόπηση. Η αντικειμενική αυτή περιγράφει μια απλή εκδοχή του profit stacking των συσκευών αποθήκευσης από πολλαπλές αγορές.

Εντούτοις, το μοντέλο 6.2 είναι μια απλοποίηση της πραγματικής κατάστασης αφού ,αρχικά, προς κατασκευή του έχει θεωρηθεί τόσο ίδιο χρονικό βήμα για την αγορά εξισορρόπησης και την αγορά επόμενης μέρας. Κανονικά θα έπρεπε να έχουμε βήμα 15 λεπτών για τις τιμές εξισορρόπησης και μίας ώρας για τις τιμές πραγματικού χρόνου. Για την ώρα αυτή η παραδοχή δεν θα επηρεάσει την ανάλυση καθώς σκοπός του μοντέλου 6.2 είναι να φανεί η βασική αντίδραση του μοντέλου στην ύπαρξη πολλαπλών πηγών κέρδους. Επίσης, το μοντέλο αξιοποιεί αρκετά απλοποιημένες τιμές για την άνω και την κάτω εξισορρόπηση (δεν έχει αξιοποιηθεί κάποια μέθοδος πρόβλεψης προς κατασκευή τους). Αυτό που είχε σημασία για το μοντέλο ήταν η εύρεση τιμών οι οποίες υπακούουν στην γενική μορφή των μορφών των RTBM Up & Down τιμών, όπως αυτές φάνηκαν στο K5, ώστε το μοντέλο να δρα ρεαλιστικά στις πολλαπλές αγορές. Οι εξισώσεις εύρεσης των τιμών φαίνονται στις παρακάτω εξισώσεις :

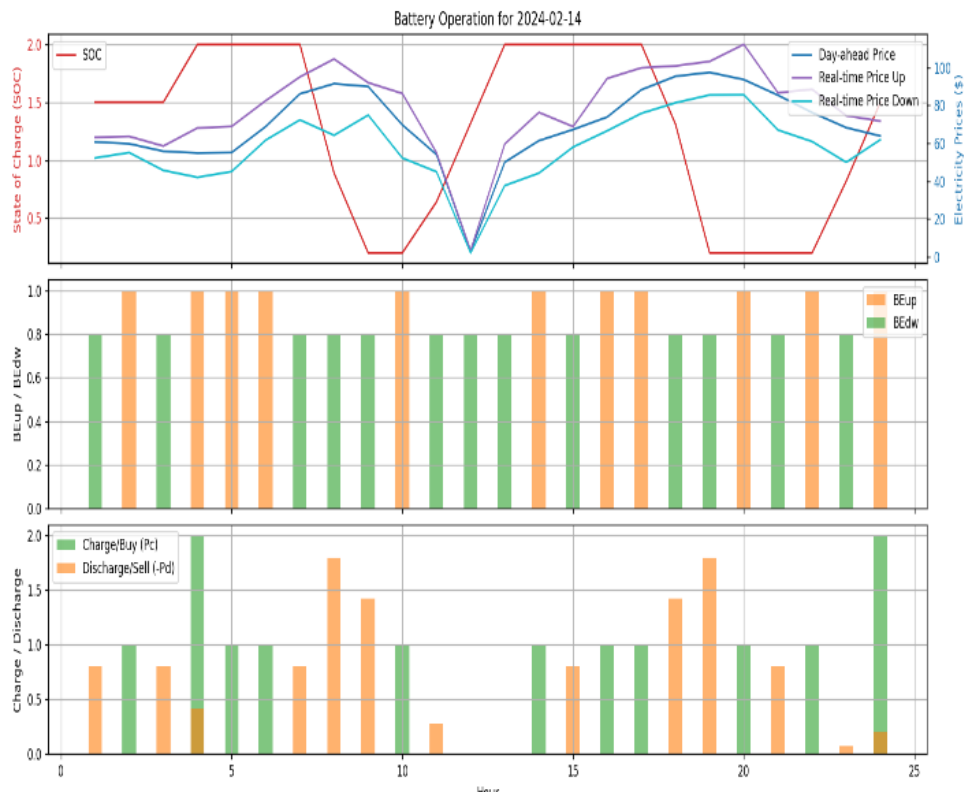
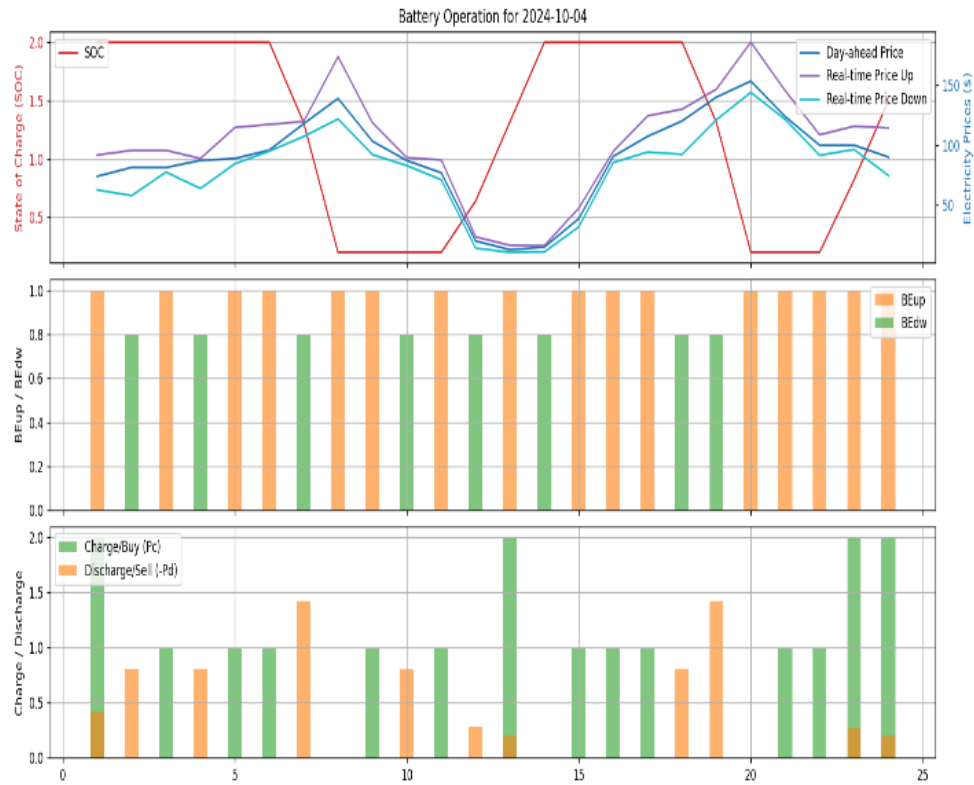
$$\lambda_t^{up} = \lambda_t^{DA} * (1 + p)$$

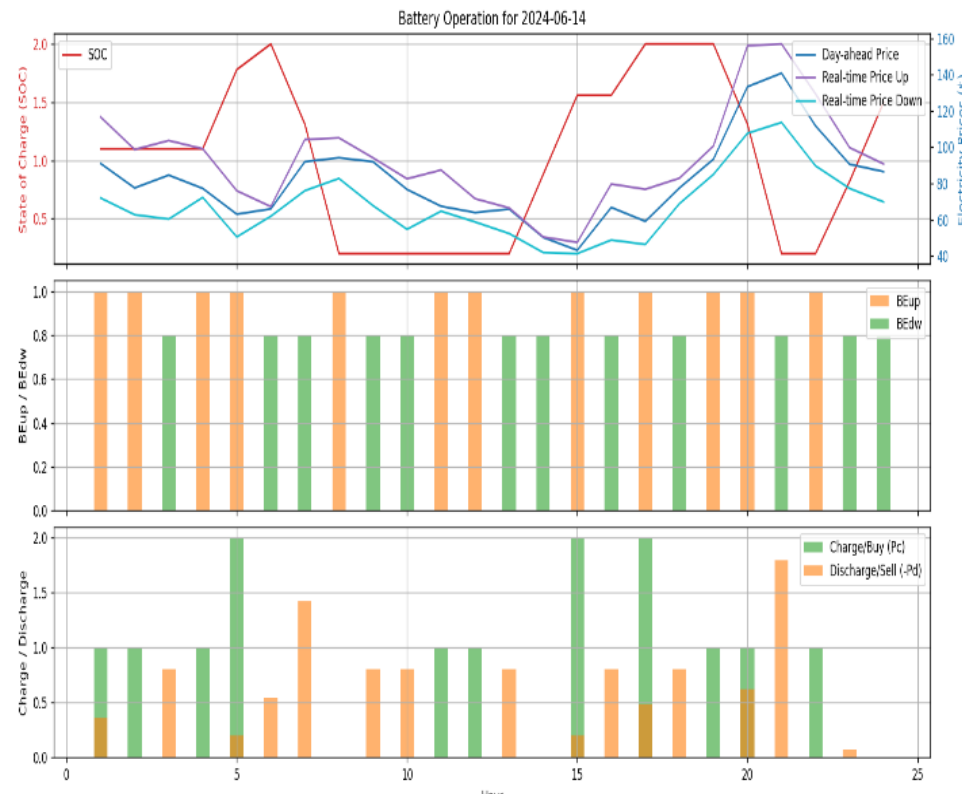
$$\lambda_t^{dw} = \lambda_t^{DA} * (1 - p)$$

Στις εξισώσεις αυτές θεωρούμε $p \sim U(-0.1, 0.3)$

Η αρχικοποίηση του μοντέλου είναι όμοια με πριν (πίνακας 6.1). Αξίζει να σημειωθεί πως για τις σταθερές BE^{up} και BE^{dw} έχουν χρησιμοποιηθεί ίδιες τιμές με αυτές των σταθερών P^d και P^c αντίστοιχα. Αυτό συμβαίνει γιατί έχουμε θεωρήσει ίδιο χρονικό βήμα για τις δύο αγορές και άρα ίδια ικανότητα φόρτισης και αποφόρτισης μέσα στην χρονική περίοδο.

Εκτελώντας προσομοιώσεις για ορισμένες από τις βασικές μέρες του μοντέλου 6.1 παρατηρούνται τα ακόλουθα αποτελέσματα:





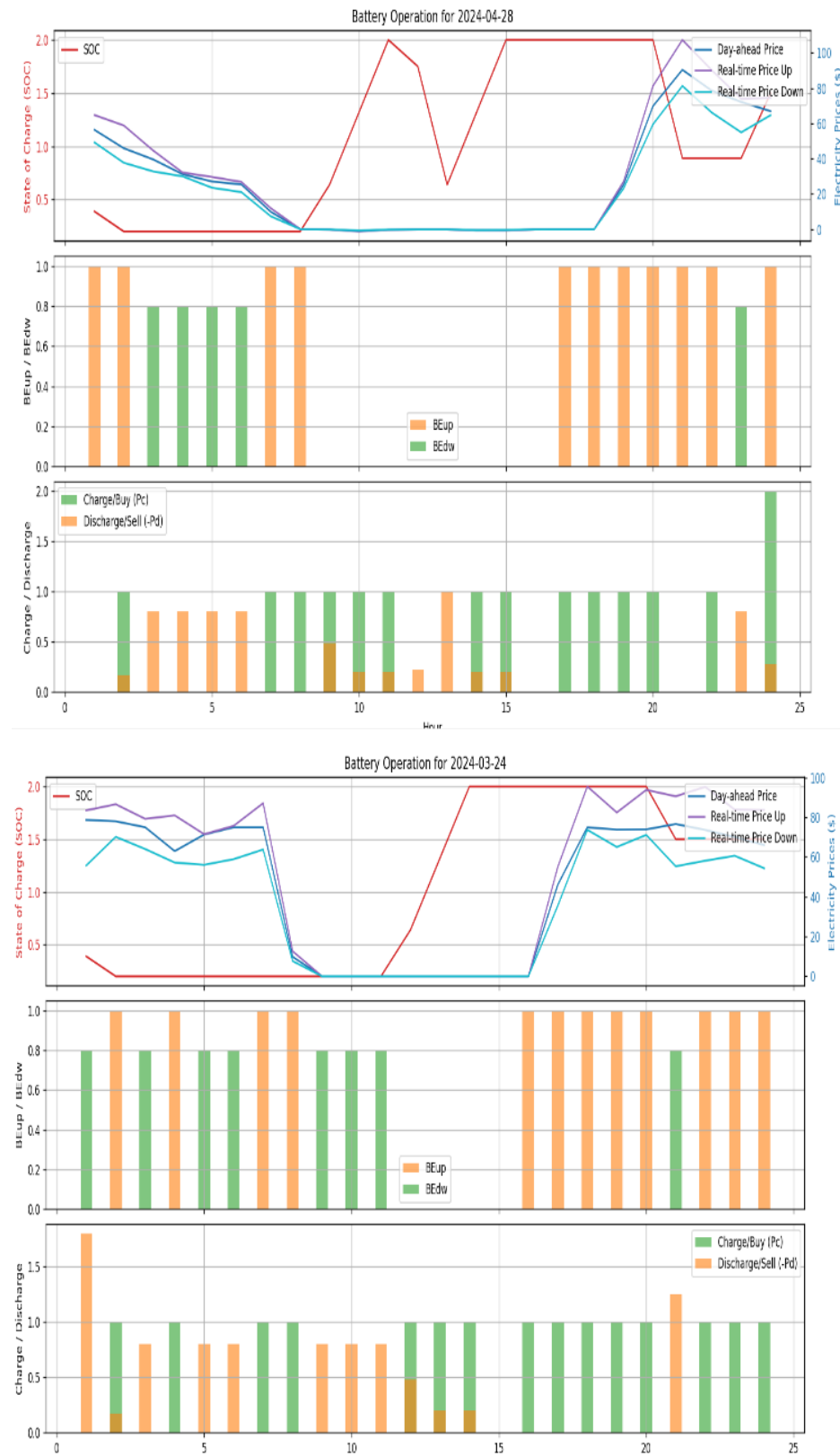
Σχήμα 34: Τα αποτελέσματα του μοντέλου 6.2 για τις ορισμένες από τις βασικές μέρες

Παρατηρούμε πως ,αρχικά, η μορφή του επιπέδου φόρτισης (State Of Charge /SOC) δεν αλλάζει στο μοντέλο αυτό. Η μπαταρία συνεχίζει να εκμεταλλεύεται τα πρωινά και τα βραδινά peaks στις τιμές καθώς και τις ελάχιστες τιμές στα ξημερώματα και τα μεσημέρια προς κερδοσκοπία μέσω αρμπιτράζ. Ταυτόχρονα οι περιορισμοί σχετικά με τον μέγιστο αριθμό κύκλων και την βραδινή φόρτιση εξακολουθούν να υφίστανται και να επηρεάζουν το μοντέλο όπως πριν.

Η ένταξη δεύτερης αγοράς δημιουργεί ένα νέο φαινόμενο στην λειτουργία της μπαταρίας. Παρατηρεί κανείς πως τις ώρες που το επίπεδο φόρτισης (SOC) δεν αλλάζει η μπαταρία συμμετάσχει εξίσου και στις δύο αγορές με τρόπο συμπληρωματικό. Αυτό σημαίνει πως την ενέργεια που είχε κανονίσει να αγοράσει ή να πουλήσει σε επίπεδο αγοράς επόμενης μέρας την πουλάει (μέσω παροχής άνω ενέργειας εξισορρόπησης) ή την αγοράζει (μέσω παροχής κάτω ενέργειας εξισορρόπησης) αντίστοιχα σε επίπεδο αγοράς εξισορρόπησης. Μέσω αυτής της στρατηγικής ουσιαστικά η μονάδα δεν παράγει ή καταναλώνει ενέργεια αλλά εκμεταλλεύεται την διαφορά τιμών στις αγορές προς επίτευξη κέρδους. Στις ώρες που το SOC πάλι το ίδιο φαινόμενο εντοπίζεται αλλά σε επίπεδο μίας από τις δύο αγορές έχουμε μεγαλύτερη συμμετοχή. Αυτό συμβαίνει γιατί το μοντέλο επιθυμεί μελλοντικά (προβλέποντας μεγάλες ή μικρές τιμές) να αυξήσει ή να μειώσει την διαθέσιμη αποθηκευμένη ενέργειά του ώστε να εκμεταλλευτεί στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό τις τιμές αυτές. Όπως θα περίμενε κανείς το αρμπιτράζ μεταξύ των αγορών χαρακτηρίζει την συμπεριφορά του μοντέλου.

Πλην των ημερών αυτών αξίζει να δοκιμαστεί το μοντέλο σε μέρες με υψηλή παραγωγή ΑΠΕ (και άρα αποκοπές). Αυτές οι μέρες έχουν ιδιαιτερότητες λόγω των

πολλαπλών ωρών με μηδενικές τιμές, προϊόν του πλεονάσματος παραγωγής ΑΠΕ. Οι μέρες για τις οποίες θα τρέξει το μοντέλο είναι ίδιες με αυτές του μοντέλου 6.1. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 35 :



Σχήμα 35: Τα αποτελέσματα του μοντέλου 6.2 για ορισμένες από τις μέρες με ΑΠΕ

Παρατηρούμε πως η συμπεριφορά του μοντέλου θυμίζει και πάλι την συμπεριφορά του μοντέλου της μίας αγοράς. Αυτό οφείλεται και στον τρόπο δημιουργίας των τιμών αγοράς εξισορρόπησης. Αυτό που έχει ενδιαφέρον είναι πως πάλι το μοντέλο εκτελεί διαρκές αρμπιτράζ μεταξύ των δύο αγορών προς μεγιστοποίηση του κέρδους του. Αξιοσημείωτο είναι πως τις ώρες των αποκοπών που οι τιμές είναι πολύ κοντά στο 0 το μοντέλο δεν συμμετάσχει καθόλου στην εξισορρόπηση. Γενικά το αρμπιτράζ συμβαίνει μεταξύ της αγοράς επόμενης μέρας και της αγοράς εξισορρόπησης με την οποία έχει την μεγαλύτερη διαφορά, γεγονός που φαίνεται από την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος.

Φυσικά αξίζει να σημειωθεί πως αυτή η συμπεριφορά του μοντέλου 6.2 δεν είναι πολύ ρεαλιστική. Αυτό συμβαίνει γιατί στην πραγματικότητα τέτοιο πρόγραμμα αγοράς δύναται να οδηγήσει σε κόστη για τον ιδιοκτήτη της συσκευής αποθήκευσης αφού δεν υπάρχει βεβαιότητα στο αν θα έχει την δυνατότητα να ενεργοποιηθεί στις αγορές εξισορρόπησης και έτσι θα δυσκολευτεί να κλείσει την θέση του. Εντούτοις, δίνει χρήσιμη πληροφορία σχετικά την συμπεριφορά της μπαταρίας αν μπορούσε να δράσει ελεύθερα στις αγορές.

6.3 Ταυτόχρονη Συμμετοχή στις Αγορές Επόμενης Μέρας και Εξισορρόπησης Δεδομένης Αβεβαιότητας Τιμών

Προς δημιουργία ενός πιο ρεαλιστικού μοντέλου για την συμμετοχή της μπαταρίας στις δύο ακολουθιακές αγορές θα αξιοποιηθεί στοχαστικός προγραμματισμός. Το πρόβλημα θα μοντελοποιηθεί ως ένα στοχαστικό πρόγραμμα δύο σταδίων. Στο πρώτο στάδιο το μοντέλο αποφασίζει την θέση που θα ακολουθήσει στην αγορά επόμενης μέρας και στο δεύτερο βήμα θα πρέπει να αντιδράσει βέλτιστα στα διάφορα σενάρια τιμών αγορών εξισορρόπησης. Το μοντέλο 6.3 που παρουσιάζεται παρακάτω υλοποιεί ακριβώς αυτό :

Μοντέλο 6.3:

$$\max_{pc,pd,u,v} \sum_{t=1}^{24} [\lambda_t^{DA} (p_t^{sellDA} - p_t^{buyDA}) + \lambda_{s,t}^{up} * be_{s,t}^{up} - \lambda_{s,t}^{dw} * be_{s,t}^{dw}] \quad (6.3.1)$$

$$e_{s,1} = E_0 + h^c p_{s,1}^{buy} - \frac{1}{h^d} p_{s,1}^{sell} \quad \forall s \quad (6.3.2)$$

$$e_{s,t} = e_{s,t-1} + h^c p_{s,t}^{buy} - \frac{1}{h^d} p_{s,t}^{sell}, \forall t \in \{2, 24\} \quad (6.3.3)$$

$$0 \leq p_{s,t}^{buy} \leq P^c * u_{s,t}, \forall t \quad \forall s \quad (6.3.4)$$

$$0 \leq p_{s,t}^{sell} \leq P^d * v_{s,t}, \forall t \quad \forall s \quad (6.3.5)$$

$$u_{s,t} + v_{s,t} \leq 1, \forall t \quad \forall s \quad (6.3.6)$$

$$E^{min} \leq e_{s,t} \leq E^{max}, \forall t \quad \forall s \quad (6.3.7)$$

$$e_{s,24} \geq E^{fin} \quad \forall s \quad (6.3.8)$$

$$\sum_{t=1}^{24} h^c p_{s,t}^{buy} \leq C * E^{max} \forall s (6.3.9)$$

$$\sum_{t=1}^{24} \frac{1}{h^d} p_{s,t}^{sell} \leq C * E^{max} \forall s (6.3.10)$$

$$p_{s,t}^{sell} - p_{s,t}^{buy} = p_t^{sellDA} - p_t^{buyDA} + be_{s,t}^{up} - be_{s,t}^{dw} \forall t \forall s (6.3.11)$$

$$0 \leq be_{s,t}^{up} \leq BE^{up} * u_{s,t}^{up} \forall t \forall s (6.3.12)$$

$$0 \leq be_{s,t}^{dw} \leq BE^{dw} * u_{s,t}^{dw} \forall t \forall s (6.3.13)$$

$$u_{s,t}^{up} + u_{s,t}^{dw} \leq 1 \forall s \forall t (6.3.14)$$

$$u, v \in \{0,1\}$$

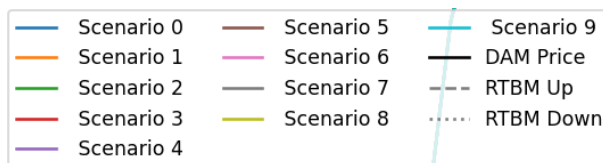
$$t \in \{1,24\}$$

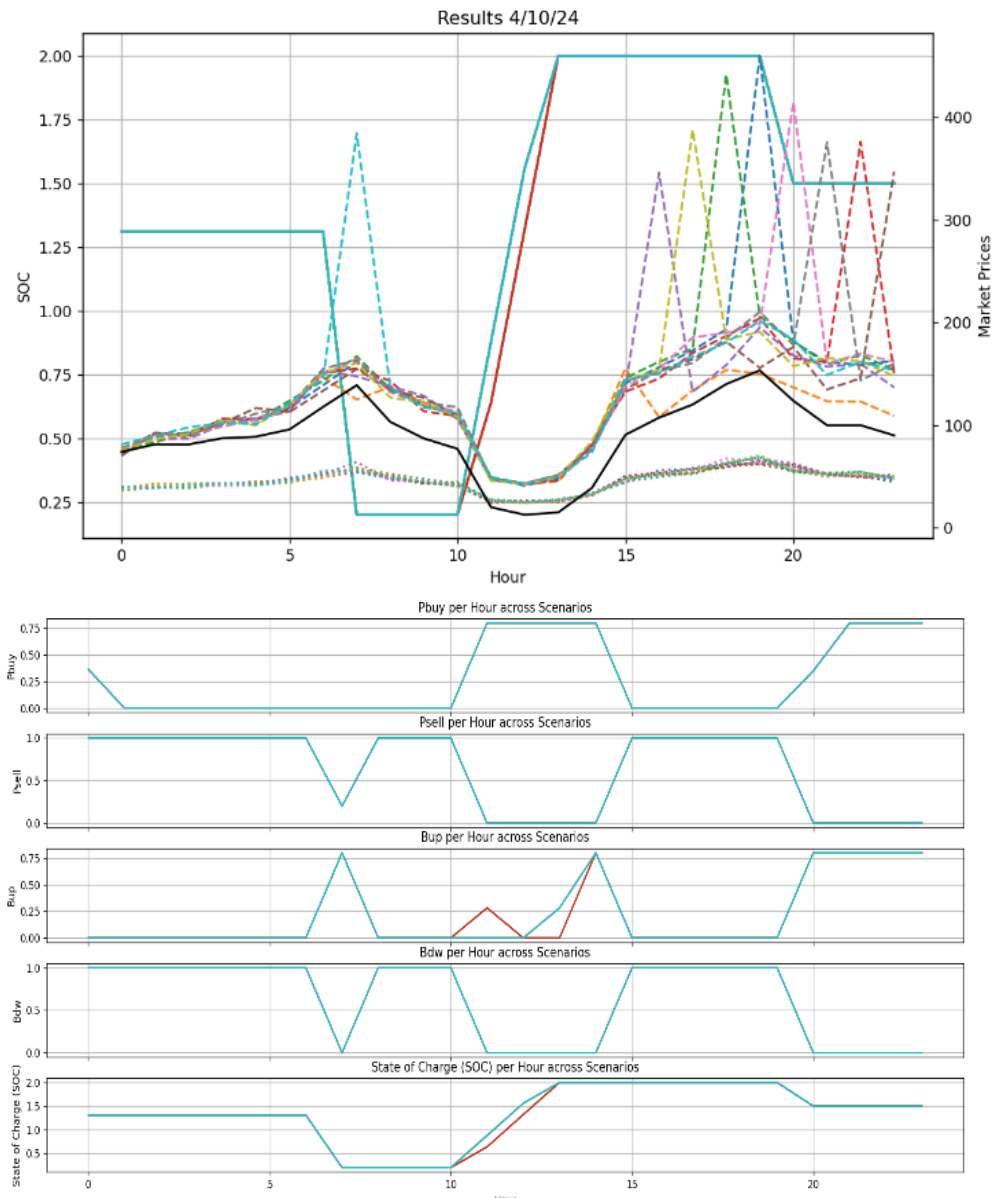
$$s \in S$$

Παρατηρεί κανείς πως το μοντέλο είναι αρκετά όμοιο. Αυτό που άλλαξε είναι η αντικειμενική και το πλήθος των μεταβλητών (λόγω της ύπαρξης σεναρίων). Η αντικειμενική συνάρτηση πλέον αντί να μεγιστοποιεί το άθροισμα του κέρδους από τις δύο αγορές, μεγιστοποιεί το μέσο κέρδος σε όλα τα σενάρια. Η πιθανότητα κάθε σεναρίου συμβολίζεται με ps . Οι μεταβλητές ανά περίοδο αυξήθηκαν από κ σε $\kappa * |S|$ όπου $|S|$ το πλήθος των σεναρίων στο μοντέλο. Εντούτοις, το πνεύμα του μοντέλου είναι αρκετά παρόμοιο με του μοντέλου 6.2

Εκτελώντας προσομοιώσεις για την βασική μέρες της μελέτης του μοντέλου 6.1 4/10/24 παρατηρούνται τα αποτελέσματα του σχήματος 36 (η αρχικοποίηση του μοντέλου είναι ίδια με αυτή του 6.2). Τα σενάρια τιμών κατασκευάζονται με την μέθοδο του κεφαλαίου 5.

Στα αποτελέσματα του σχήματος 36 φαίνεται (αριστερή στήλη) με συνεχή γραμμή το SOC ανά σενάριο, με παχιά συνεχή γραμμή η τιμή αγοράς επόμενης μέρας με διακεκομμένη γραμμή η τιμή RTBM Up ανά σενάριο και με γραμμή με τελείες η τιμή RTBM Down ανά σενάριο. Ταυτόχρονα (δεξιά) φαίνονται με σειρά από πάνω προς τα κάτω η ισχύς που το μοντέλο αγοράζει στην αγορά επόμενης μέρας, η ισχύς που πουλάει στην αγορά επόμενης μέρας, η ενέργεια άνω εξισορρόπησης (ανά σενάριο), η ενέργεια κάτω εξισορρόπησης (ανά σενάριο) και η αποθηκευμένη ενέργεια στην μπαταρία (ανά σενάριο). Αυτή η σύμβαση ακολουθείται για όλες τις γραφικές που ακολουθούν στο κεφάλαιο αυτό και στο επόμενο.





Σχήμα 36: Αποτελέσματα του μοντέλου 6.3 για την βασική μέρα 4/10/24

Παρατηρεί κανείς πως το μοντέλο 6.3 παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά από τα προηγούμενα μοντέλα. Αντί για 2 κύκλους φόρτισης – εκφόρτισης μέσα στην μέρα σε αρκετές περιπτώσεις παρατηρείται μείωση της αποθηκευμένης ενέργειας της μπαταρίας στις πρώτες ώρες και φόρτιση κατά το μεσημέρι. Τι υπόλοιπες ώρες το επίπεδο ενέργειας της μπαταρίας μένει σταθερό. Αυτή η συμπεριφορά εξηγείται αν παρατηρήσει κανείς πως σε όλη την διάρκεια της μέρας το μοντέλο ανταλλάσσει ισχύ μεταξύ αγορών. Σχεδόν σε όλη την διάρκεια της μέρας το μοντέλο πουλάει στην αγορά επόμενης μέρας και αγοράζει πίσω την ισχύ που πούλησε στην αγορά κάτω εξισορρόπησης. Με αυτό τον τρόπο εκμεταλλεύεται την διαφορά τιμών μεταξύ των ωρών προς μεγιστοποίηση της κερδοφορίας (όπως το μοντέλο 6.2). Τις μεσημεριανές ώρες που η αγορά επόμενης μέρας είναι φτηνότερη το μοντέλο δεν δίνει πίσω την ισχύ του στο σύστημα (κρατάει την φόρτιση ώστε να πληροί τον περιορισμό (6.3.8) με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνει βέλτιστη φόρτιση. Ένα ακόμα ενδιαφέρον αποτέλεσμα του μοντέλου είναι η τάση του να αποφορτίζει όταν βρίσκει πολύ υψηλές τιμές άνω

εξισορρόπησης. Εκείνες τις ώρες το αρμπιτράζ γίνεται μεταξύ της άνω εξισορρόπησης και της αγοράς ενέργειας από την αγορά επόμενης μέρας. Όταν οι τιμές άνω εξισορρόπησης δεν είναι ταυτόχρονα υψηλές στα σενάρια ή δεν είναι αρκούντως υψηλές το μοντέλο τις αγνοεί. Αυτό συμβαίνει γιατί το μοντέλο μεγιστοποιεί την μέση τιμή της απόδοσης στις αγορές άρα προτιμά πιο σίγουρες μεθόδους κερδοφορίας. Επειδή η ανταλλαγή μεταξύ κάτω εξισορρόπησης και αγοράς επόμενης μέρας είναι αρκετά σίγουρη (λόγω μικρότερου volatility στην προβλεπόμενη τιμή κάτω εξισορρόπησης) παρατηρείται πως δεν αλλάζει πολύ η συμπεριφορά του μοντέλου ανά σενάριο. Η στρατηγική του αρμπιτράζ μεταξύ αγοράς εξισορρόπησης και αγοράς επόμενης μέρας κυριαρχεί έναντι των υπολοίπων.

Εντούτοις, το μοντέλο αυτό αν και αποτελεί μια πιο ρεαλιστική μοντελοποίηση του προβλήματος πάσχει από ορισμένα προβλήματα του μοντέλου 6.2. Συγκεκριμένα, το διαρκές αρμπιτράζ που περιγράφεται στο μοντέλο αυτό δεν θα ήταν επιτρεπτό στην πραγματικότητα από τον διαχειριστή της αγοράς. Επίσης, ορισμένες ώρες τις μέρας το μοντέλο για να μεγιστοποιήσει τα κέρδη του προγραμματίζει ταυτόχρονη αγορά και πώληση ενέργειας σε επίπεδο αγοράς επόμενης μέρας. Εν τέλει, λόγω των περιορισμών 6.3.4, 6.3.5 και 6.3.11 η μπαταρία δεν φορτίζει και εκφορτίζει ταυτόχρονα, όμως και πάλι το πρόγραμμα συμμετοχής στην αγορά επόμενης μέρας που παραδίδει είναι μη αποδεκτό.

Προς αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών εισάγονται στο μοντέλο οι ακόλουθοι νέοι περιορισμοί :

$$0 \leq p_t^{buyDA} \leq P_c * u_t^{DA}, \forall t \forall s \quad (6.3.15)$$

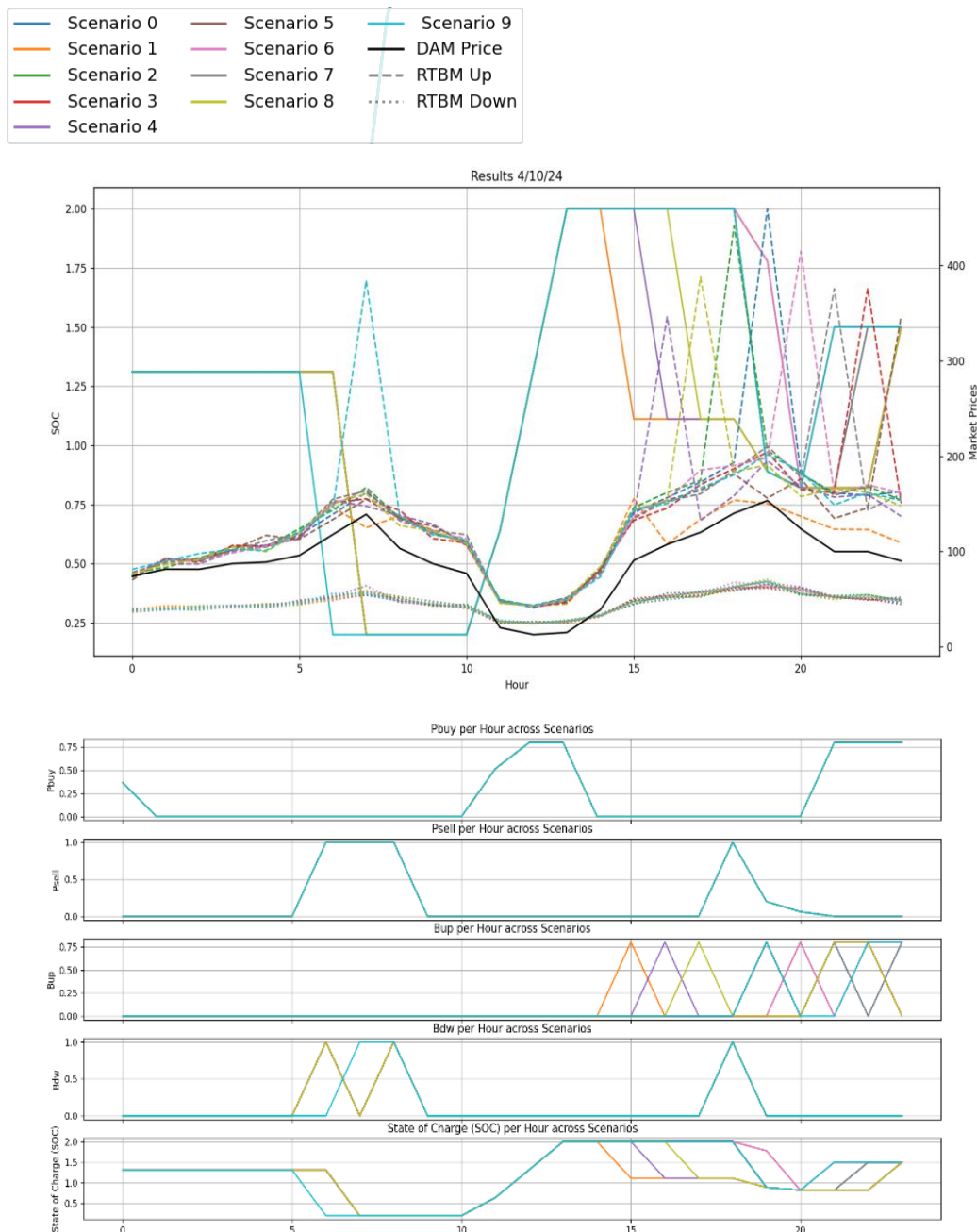
$$0 \leq p_t^{sellDA} \leq P_d * v_t^{DA}, \forall t \forall s \quad (6.3.16)$$

$$u_t^{DA} + v_t^{DA} \leq 1, \forall t \forall s \quad (6.3.17)$$

$$\sum_{t=1}^{24} u_{s,t}^{up} \leq B^{max} \forall s \quad (6.3.18)$$

$$\sum_{t=1}^{24} u_{s,t}^{dw} \leq B^{max} \forall s \quad (6.3.19)$$

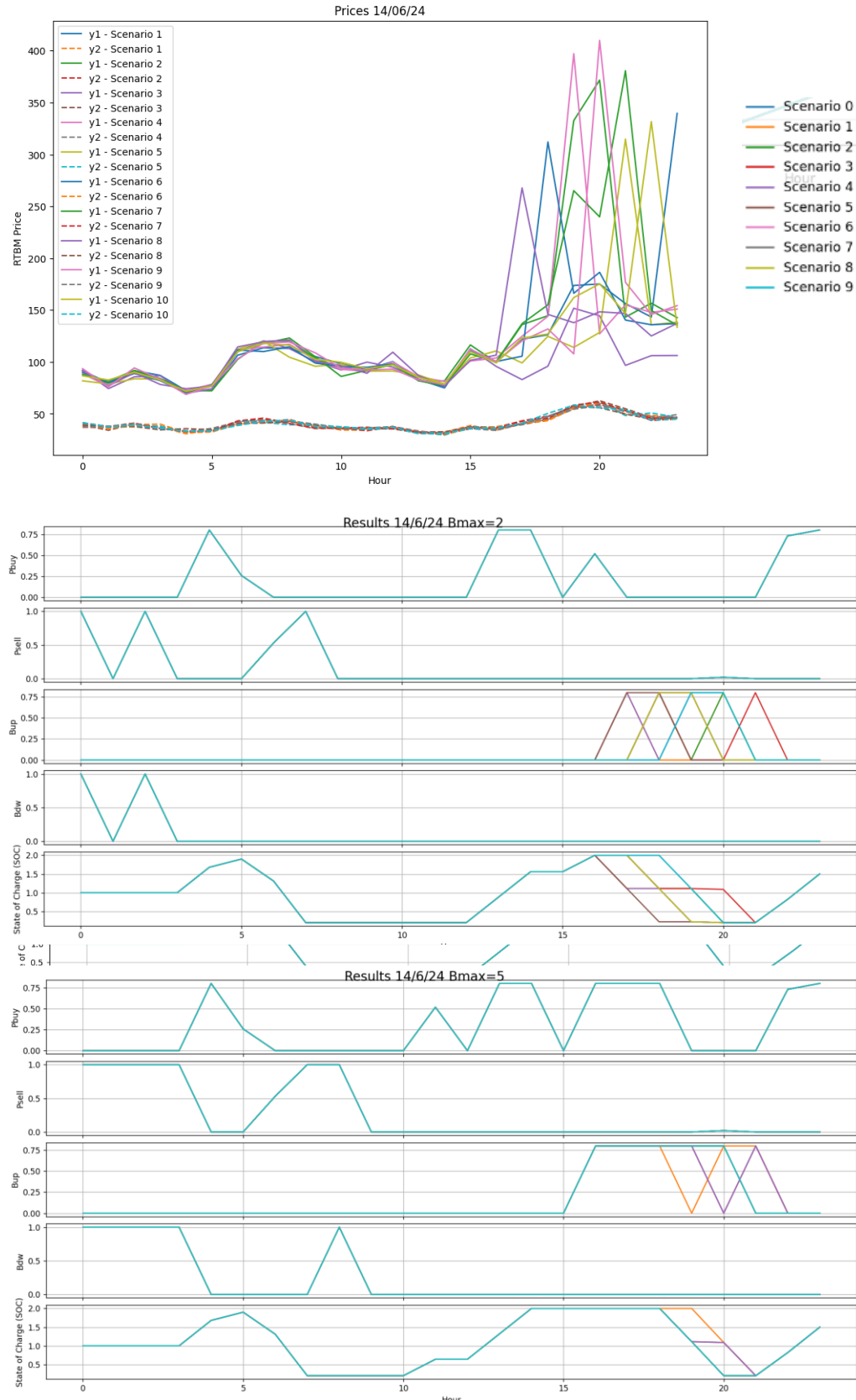
Στους περιορισμούς 6.3.15-6.3.17 εμφανίζονται οι δυαδικές μεταβλητές u_t^{DA} και v_t^{DA} . Αυτές απαγορεύουν στο μοντέλο να αγοράσει και να πουλήσει ενέργεια ταυτόχρονα στην αγορά επόμενης μέρας. Στους περιορισμούς 6.3.18 και 6.3.19 εμφανίζεται η σταθερά B^{max} . Η σταθερά αυτή περιγράφει τον μέγιστο αριθμό συμμετοχών της μπαταρίας που αναμένονται στην αγορά εξισορρόπησης. Για τις ανάγκες της αρχικοποίησης θεωρείται ίσος με 3 για τις προσομοιώσεις που ακολουθούν. Μέσω αυτών των περιορισμών επιτυγχάνεται η κατασκευή ενός πιο Εκτελώντας προσομοιώσεις με τους νέους περιορισμούς για την ίδια μέρα με πριν παρατηρούνται τα ακόλουθα αποτελέσματα:

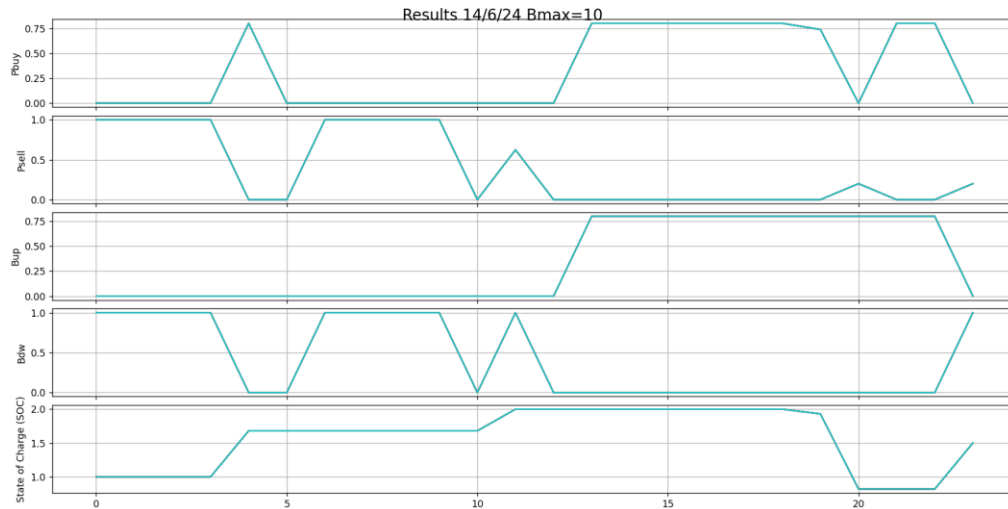


Σχήμα 37: Αποτελέσματα του μοντέλου 6.3 για ορισμένες την βασική μερα

Όπως γίνεται εμφανές στο σχήμα 37 το μοντέλο 6.3 με την προσθήκη των επιπλέον περιορισμών θυμίζει στην βέλτιστη του λύση την βέλτιστη λύση του μοντέλου 6.1. Το μοντέλο δηλαδή φαίνεται να κάνει 2 κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης μέσα στην μέρα (ώρες παρόμοιες με το μοντέλο 6.1) εκμεταλλευόμενο τις διαφορές στην τιμή αγοράς επόμενης μέρας. Παρόλες τις ομοιότητες με το μοντέλο 6.1 ορισμένες ώρες της μέρας (ιδίως στις ώρες 19:00-21:00 όπου οι τιμές RTBM Up εντοπίζουν τα μέγιστα τους) παρατηρείται πάλι το φαινόμενο του αρμπιτράζ μεταξύ αγορών. Επίσης, στις περισσότερες περιπτώσεις τις ώρες του αρμπιτράζ μεταξύ αγορών παρατηρούνται διαφοροποιήσεις στον προγραμματισμό του μοντέλου ανά σενάριο. Αυτό οφείλεται στα διαφορετικές χρονικές στιγμές που τα διαφορετικά σενάρια τιμών παρουσιάζουν μέγιστα ή ελάχιστα.

Αυτό που έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι το πως η σταθερά B^{max} επηρεάζει την συμπεριφορά του μοντέλου. Στο σχήμα 38 φαίνεται η απόκριση του μοντέλου για την μέρα 14/6 (η οποία ακολουθεί μια τυπική χρονοσειρά τιμών αγοράς επόμενης μέρας) για διαφορετικές τιμές της σταθεράς B^{max} .

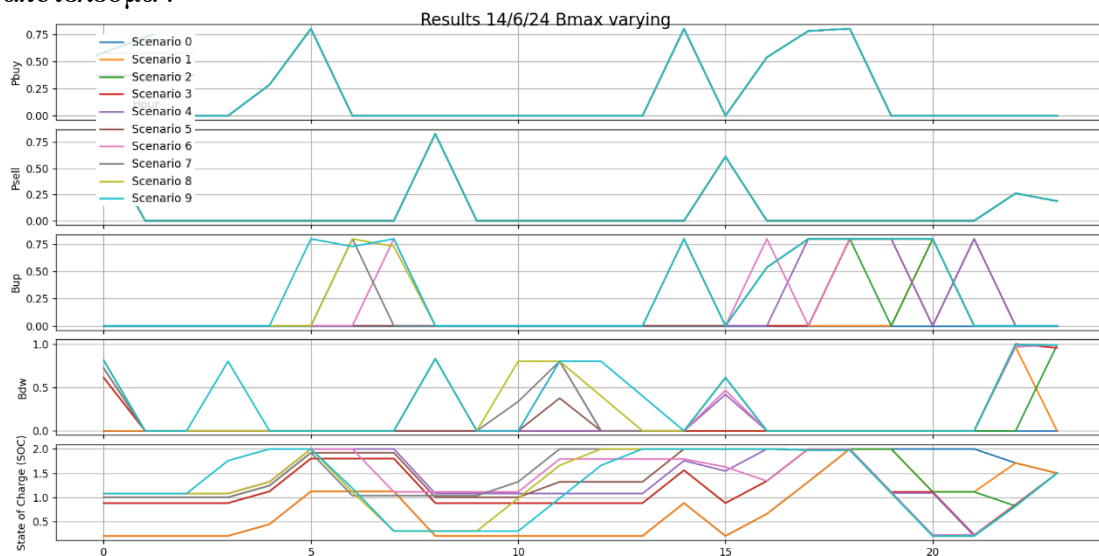




Σχήμα 38: Αποτελέσματα του μοντέλου 6.3 για τις 14/06/24 συναρτήσει της αλλαγής του περιορισμού 6.3.18 & 6.3.19

Παρατηρεί κανείς πως για $B^{max}=0$ το μοντέλο εκφυλίζεται στο μοντέλο 6.1 (λογικό καθώς το μοντέλο αρκείται να συμμετάσχει μόνο στην αγορά επόμενης μέρας) και άρα δρα αναμενόμενα (φόρτιση το μεσημέρι εκφόρτιση το απόγευμα κτλ). Τα σενάρια έχουν ίδια συμπεριφορά καθώς οι τιμές αγορών εξισορρόπησης (οι οποίες είναι οι διαφορές μεταξύ των σεναρίων) δεν επηρεάζουν το μοντέλο. Για χαμηλές τιμές του B^{max} παρατηρούνται διαφοροποιήσεις στα σενάρια ανάλογα με τα peaks των τιμών (Σχήμα 37). Αυτό είναι λογικό καθώς το μοντέλο επιθυμεί να αξιοποιήσει τις λίγες συμμετοχές του στην εξισορρόπηση όσο πιο συνετά μπορεί. Όσο αυξάνεται το B^{max} το μοντέλο τείνει στην συμπεριφορά του μοντέλου σε αυτή του μοντέλου 6.2, δηλαδή στο διαρκές αρμπιτράζ μεταξύ των δύο αγορών και άρα πάλι όλα τα σενάρια καταλήγουν να έχουν ίδια συμπεριφορά. Για $B^{max} = 24$ τα αποτελέσματα του μοντέλου φαίνονται στο σχήμα 36.

Αν γινόταν η δοκιμή κάθε σενάριο να είχε διαφορετικό B^{max} θα υπήρχε το παρακάτω αποτέλεσμα :

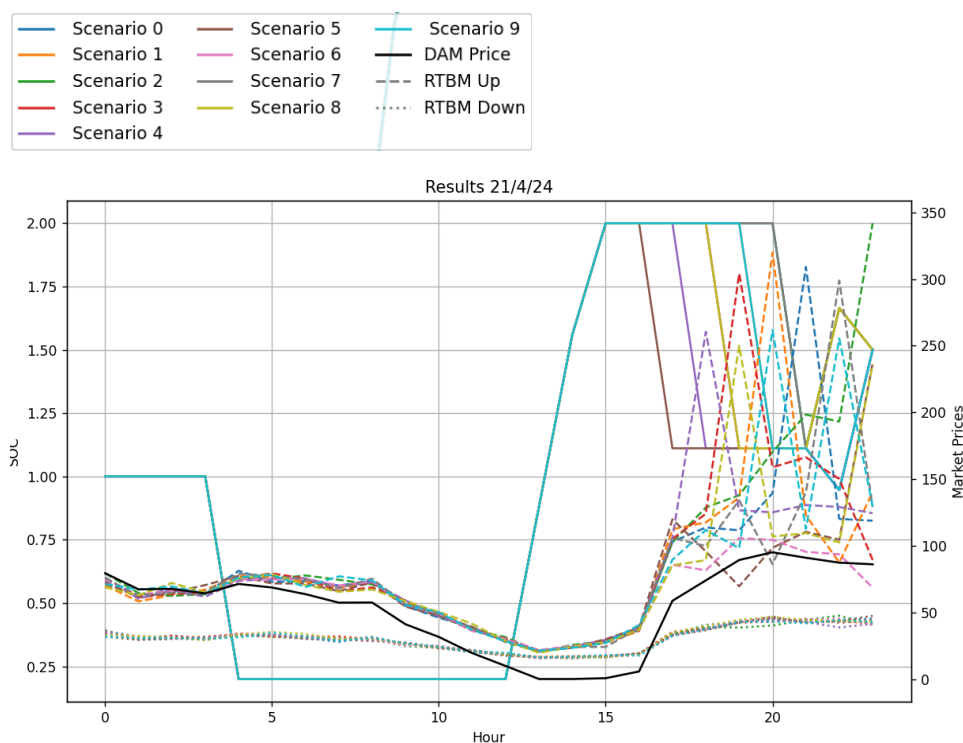


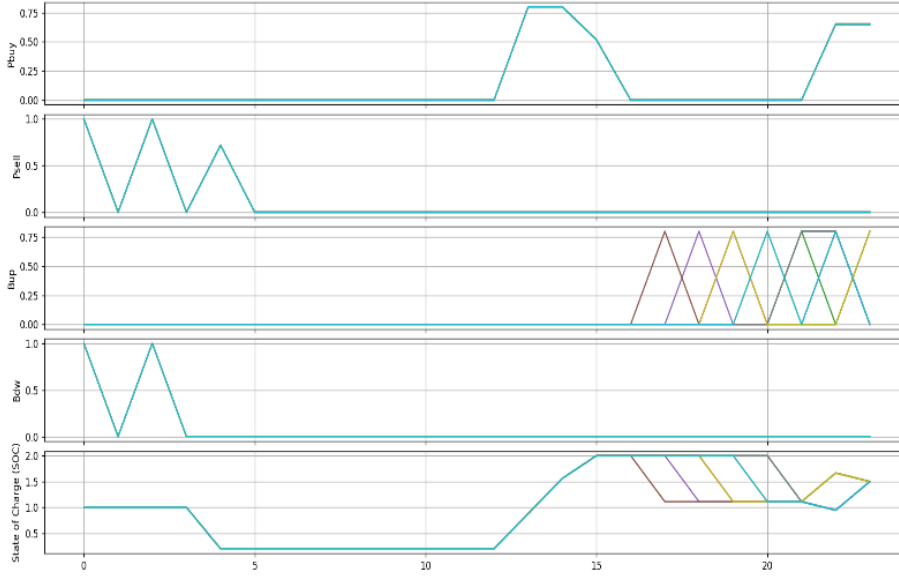
Σχήμα 39: Αποτελέσματα του μοντέλου 6.3 για τις 14/06/24 συναρτήσει της δυναμικής αλλαγής του περιορισμού 6.3.18 & 6.3.19

Για τα αποτελέσματα του σχήματος 39 ισχύει πως $B_i^{max} = i, i \in \{1,10\}$ με i να είναι ο αριθμός του σεναρίου. Παρατηρείται πως εδώ η συμπεριφορά του μοντέλου

διαφοροποιείται έντονα ανάλογα με την αλλαγή του B^{max} , όπως θα περίμενε κανείς από την ανάλυση του σχήματος 38. Κάθε σενάριο ξεχωριστά εκμεταλλεύεται τις ιδιαιτερότητες των τιμών του προκειμένου να ενεργοποιήσει την άνω και την κάτω εξισορρόπηση του. Ταυτόχρονα, σε επίπεδο αγοράς επόμενης μέρας τις πρωινές ώρες η μπαταρία ακολουθεί σχεδόν το ίδιο πρόγραμμα που θα είχε αν δεν συμμετείχε καθόλου στην αγορά εξισορρόπησης. Αυτό συμβαίνει γιατί τις ώρες εκείνες εντοπίζεται σχεδόν ταυτοχρονισμένο peak των τιμών των αγορών. Η μπαταρία άρα θέλει να συμμετάσχει και στις δύο αγορές προς την ίδια κατεύθυνση (πώληση) προς μεγιστοποίηση των σίγουρων κερδών. Τα βράδια παρόμοια συμπεριφορά εντοπίζεται. Η μόνη διαφορά είναι πως αντί η μπαταρία να αγοράζει και να πουλάει από αγορά επόμενης μέρας αυτή μόνο αγοράζει γιατί πουλάει στην εξισορρόπηση εκμεταλλευόμενη τις πολύ υψηλές τιμές. Τέλος, τα μεσημέρια λόγω των χαμηλών τιμών στην κάτω εξισορρόπηση η ενέργεια αγοράζεται αποκλειστικά από εκεί ενέργεια και όχι από την αγορά επόμενης μέρας. Το κύριο συμπέρασμα από την παραπάνω ανάλυση είναι πως η πρόβλεψη του πλήθους των πιθανών ενεργοποιήσεων της μονάδας από την αγορά εξισορρόπησης έχει καίρια αξία για την καλή επίδοση του μοντέλου καθώς αλλάζει έντονα την απόκρισή του.

Τέλος, ενδιαφέρον θα είχε η παρουσίαση των αποτελεσμάτων του μοντέλου για τις μέρες με υπερπαραγωγή ΑΠΕ. Αξιοποιώντας την ίδια αρχικοποίηση με τις αρχικές προσομοιώσεις λαμβάνουμε τα εξής αποτελέσματα :





Σχήμα 40: Αποτελέσματα του μοντέλου 6.3 για τις πρώτες μέρες με περικοπές ΑΠΕ

Εδώ παρατηρεί κανείς πως το μοντέλο επιλέγει να αγοράσει σίγουρα στην αγορά επόμενης μέρας τα μεσημέρια (λόγω των εξαιρετικά χαμηλών τιμών αγοράς επόμενης μέρας λόγω της υπερπροσφοράς ενέργειας τις ώρες εκείνες). Αυτό οδηγεί σε απόκριση αρκετά παραπλήσια με αυτή του μοντέλου 6.1. Η διαφορά είναι πως αντί να πωλείται η ενέργεια στην αγορά επόμενης μέρας το μοντέλο ρισκάρει και επιθυμεί να την δώσει στην αγορά εξισορρόπησης. Αν δεν είχε τόσο σίγουρα peaks η πρόβλεψη της αγοράς εξισορρόπησης τις ώρες του απογεύματος ίσως προτιμούσε να πουλήσει στην αγορά επόμενης μέρας.

Αξίζει να σημειωθεί πως τα μεσημέρια παρατηρείται το σπάνιο φαινόμενο η τιμή της αγοράς κάτω εξισορρόπησης είναι η υψηλότερη. Αυτό είναι προϊόν της υπερβολικά υψηλών ποσοτήτων ισχύος που υπάρχουν εκείνη την στιγμή στο Σύστημα. Η υπερπροσφορά αυτή σπρώχνει τις τιμές χαμηλά και εκμηδενίζει την ανάγκη άνω εξισορρόπησης. Αντίθετα, αυξάνει την ανάγκη για πιθανή κάτω εξισορρόπηση και άρα κρατά την τιμή κάτω εξισορρόπησης σε (σχετικά) υψηλά επίπεδα.

6.4 Μοντελοποίηση με χρονικό βήμα δεκαπεντάλεπτου.

Το μοντέλο 6.3 είναι αρκετά κοντά στην πραγματικότητα και αρκετά ρεαλιστικότερο από τα προηγούμενα. Εντούτοις, προς δημιουργία του έχει συμβεί μια απλοποίηση η οποία μειώνει την εγγύτητα του μοντέλου στην πραγματικότητα. Στο μοντέλο 6.3 θεωρείται πως η αγορά επόμενης μέρας και η αγορά εξισορρόπησης έχουν ίδιο χρονικό βήμα (1 ώρα). Όπως φάνηκε στο Κεφάλαιο 2 κάτι τέτοιο δεν υφίσταται. Στην Ελλάδα η αγορά εξισορρόπησης έχει βήμα 15 λεπτών ενώ η αγορά επόμενης μέρας έχει 1 ώρας. Προς αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος παρουσιάζεται το μοντέλο 6.4

Μοντέλο 6.4:

$$\max_{p, be} \sum_{t=1}^{24} [\lambda_t^{DA} (p_t^{buyDA} - p_t^{sellDA})] + \sum_{q=1}^{96} \left[\sum_s \pi_s * (\lambda_q^{up} * be_{s,q}^{up} - \lambda_q^{dw} * be_{s,q}^{dw}) \right] \quad (6.41)$$

$$e_{s,1} = E_0 + h^c p_{s,q}^{buy} - \frac{1}{h^d} p_{s,q}^{sell} \forall s (6.4.2)$$

$$e_{s,q} = e_{s,q-1} + h^c p_{s,q}^{buy} - \frac{1}{h^d} p_{s,q}^{sell}, \forall q \in \{2,96\} \forall s (6.4.3)$$

$$E^{min} \leq e_{s,q} \leq E^{max}, \forall q \forall s (6.4.4)$$

$$e_{s,96} \geq E^{fin} \forall s (6.4.5)$$

$$p_{s,q}^{sell} - p_{s,q}^{buy} = ms_q + be_{s,q}^{up} - be_{s,q}^{dw} \forall q \forall s (6.4.6)$$

$$ms_t = p_{DA,t}^{sell} - p_{DA,t}^{buy} \forall t (6.4.7)$$

$$ms_q = \frac{ms_t}{4} \forall q \in t (6.4.8)$$

$$0 \leq p_q^{buy} \leq P'^c * u_{s,q}, \forall q \forall s (6.4.9)$$

$$0 \leq p_q^{sell} \leq P'^d * v_{s,q}, \forall q \forall s (6.4.10)$$

$$u_{s,q} + v_{s,q} \leq 1, \forall q \forall s (6.4.11)$$

$$0 \leq p_{s,t}^{buy} \leq P^c * u_t^{DA}, \forall t \forall s (6.4.12)$$

$$0 \leq p_{s,t}^{sell} \leq P^d * v_t^{DA}, \forall t \forall s (6.4.13)$$

$$u_t^{DA} + v_t^{DA} \leq 1, \forall t \forall s (6.4.14)$$

$$0 \leq be_{s,q}^{up} \leq BE^{up} * u_{s,q}^{up} \forall q \forall s (6.4.15)$$

$$0 \leq be_{s,q}^{dw} \leq BE^{dw} * u_{s,q}^{dw} \forall q \forall s (6.4.16)$$

$$u_{s,q}^{up} + u_{s,q}^{dw} \leq 1 \forall q \forall s (6.4.17)$$

$$\sum_{t=1}^{96} h^c p_{s,q}^{buy} \leq C * E^{max} \forall s (6.4.18)$$

$$\sum_{t=1}^{96} \frac{1}{h^d} p_{s,q}^{sell} \leq C * E^{max} \forall s (6.4.19)$$

$$\sum_{q=1}^{96} u_{s,q}^{up} \leq B^{max} \forall s (6.4.20)$$

$$\sum_{q=1}^{96} u_{s,q}^{dw} \leq B^{max} \forall s (6.4.21)$$

$$u, v \in \{0,1\}$$

$$t \in \{1,24\}$$

$$q \in \{1,96\}$$

$$s \in S$$

Σημασία μεταβλητών μοντέλου :

ms_t : Το πρόγραμμα αγοράς επόμενης μέρας της μπαταρίας για την ώρα t

ms_q : Το πρόγραμμα αγοράς επόμενης μέρας της μπαταρίας για το τέταρτο q

u_t^{DA} : Δυαδική μεταβλητή που ενεργοποιείται κατά την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας την ώρα t

v_t^{DA} : Δυαδική μεταβλητή που ενεργοποιείται κατά την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας την ώρα t

Οι υπόλοιπες μεταβλητές έχουν την ίδια σημασία με τα παραπάνω μοντέλα (6.1-6.3)

Σημασία σταθερών μοντέλου:

B^{max} :Μέγιστος αριθμός συμμετοχών στην αγορά εξισορρόπησης μέσα στην μέρα

P'^c : Η μέγιστη συνολική ισχύς φόρτισης ανά τέταρτο

P'^d : Η μέγιστη συνολική ισχύς εκφόρτισης ανά τέταρτο

Οι υπόλοιπες σταθερές έχουν την ίδια σημασία με τα παραπάνω μοντέλα (6.1-6.3)

Στο παραπάνω μοντέλο υπάρχουν δύο χρονικές κλίμακες η πρώτη εξ αυτών είναι η χρονική κλίμακα της αγοράς επόμενης μέρας (χρονική βήμα ώρας) και η δεύτερη η χρονική κλίμακα των αγορών εξισορρόπησης (χρονικό βήμα δεκαπεντάλεπτου). Αυτές οι δύο χρονικές κλίμακες συνδέονται μέσω του περιορισμού 6.4.8 ο οποίος μεταφράζει το ωριαίο πρόγραμμα αγοράς επόμενης μέρας της μπαταρίας στο αντίστοιχο ισοδύναμο πρόγραμμα αγοράς με διάρκεια τετάρτου της ώρας. Μέσω αυτής της εξίσωσης και της εξίσωσης 6.4.6 (που συνδέει τις αγορές) επιτυγχάνεται η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση των ακολουθιακών αγορών διαφορετικής διάρκειας.

Αξίζει για λόγους πληρότητας να περιγράψει το μοντέλο στην τελική μορφή του. Η αντικειμενική συνάρτηση (6.4.1) επιχειρεί να μεγιστοποιήσει τα κέρδη από τις δύο αγορές. Οι περιορισμοί (6.4.2-6.4.5) περιγράφουν το ισοζύγιο ενέργειας στις συναλλαγές της μπαταρίας, τα όρια φόρτισης- εκφόρτισης και την απαίτηση η μπαταρία να έχει ορισμένη αποθηκευμένη ενέργεια στο τέλος του χρονικού ορίζοντα. Οι περιορισμοί 6.4.6- 6.4.8 συνδέουν τις δύο αγορές όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Οι περιορισμοί 6.4.9 -6.4.17 περιγράφουν για κάθε διαδικασία απορρόφησης ή έγχυσης ισχύος τους περιορισμούς συμπληρωματικότητας (αποφυγή ταυτόχρονης φόρτισης και αποφόρτισης) και μέγιστης ανταλλαγής ισχύος στην μονάδα του χρόνου. Αξίζει να σημειωθεί πως στη συγκεκριμένη μοντελοποίηση θεωρείται πως το μοντέλο μέσα στην διάρκεια ενός τετάρτου της ώρας δύναται να

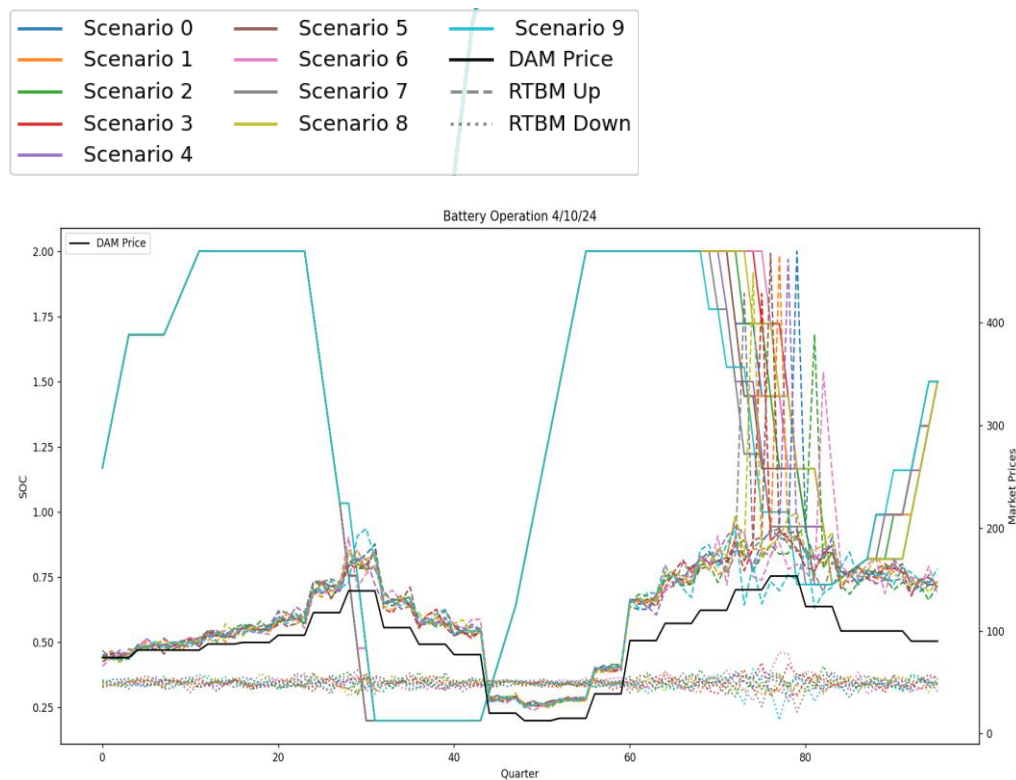
λάβει ή να δώσει ισχύ ίση με το 1/4 της ωριαίας ($P'^c = \frac{P^c}{4}$ & $P'^d = \frac{P^d}{4}$). Οι περιορισμοί 6.4.18-6.4.19 περιορίζουν του κύκλους φόρτισης για λόγους αποφυγής degradation. Τέλος, οι περιορισμοί 6.4.20 – 6.4.21 περιορίζουν την συμμετοχή στην αγορά εξισορρόπησης προς αποφυγή διαρκούς αρμπιτράζ και παρατήρησης μιας πιο ρεαλιστικής και επιτρεπτής συμπεριφοράς του μοντέλου.

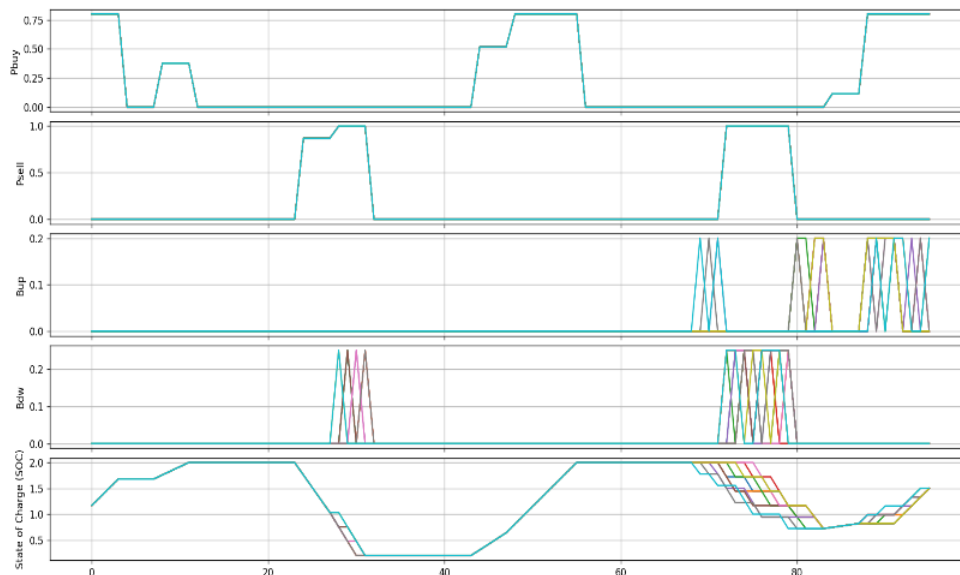
Παράμετρος Μοντέλου	Τιμή
B^{max}	6
P'^c	0.2
P'^d	0.25

Πίνακας 2

Για την συμμετοχή στην αγορά εξισορρόπησης το ανώτατο όριο B^{max} τέθηκε ίσο με 6 προκειμένου να υπάρχουν αποτελέσματα κοντινά σε αυτά του μοντέλου 6.3 και να επιτραπεί με τον τρόπο αυτό η σύγκριση μεταξύ της επίδοσης των δύο μοντέλων και οι προτεραιότητες του μοντέλου στην ενεργοποίηση της αγοράς εξισορρόπησης.

Αρχικοποιώντας το μοντέλο βάσει του πίνακα 6.1 και του 6.2 και εκτελώντας προσομοιώσεις για τις βασικές μέρες του μοντέλου 6.1 παρατηρούνται τα ακόλουθα αποτελέσματα. Τα σενάρια τιμών κατασκευάζονται με την μέθοδο του κεφαλαίου 5.

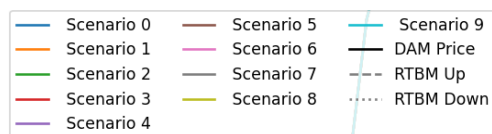


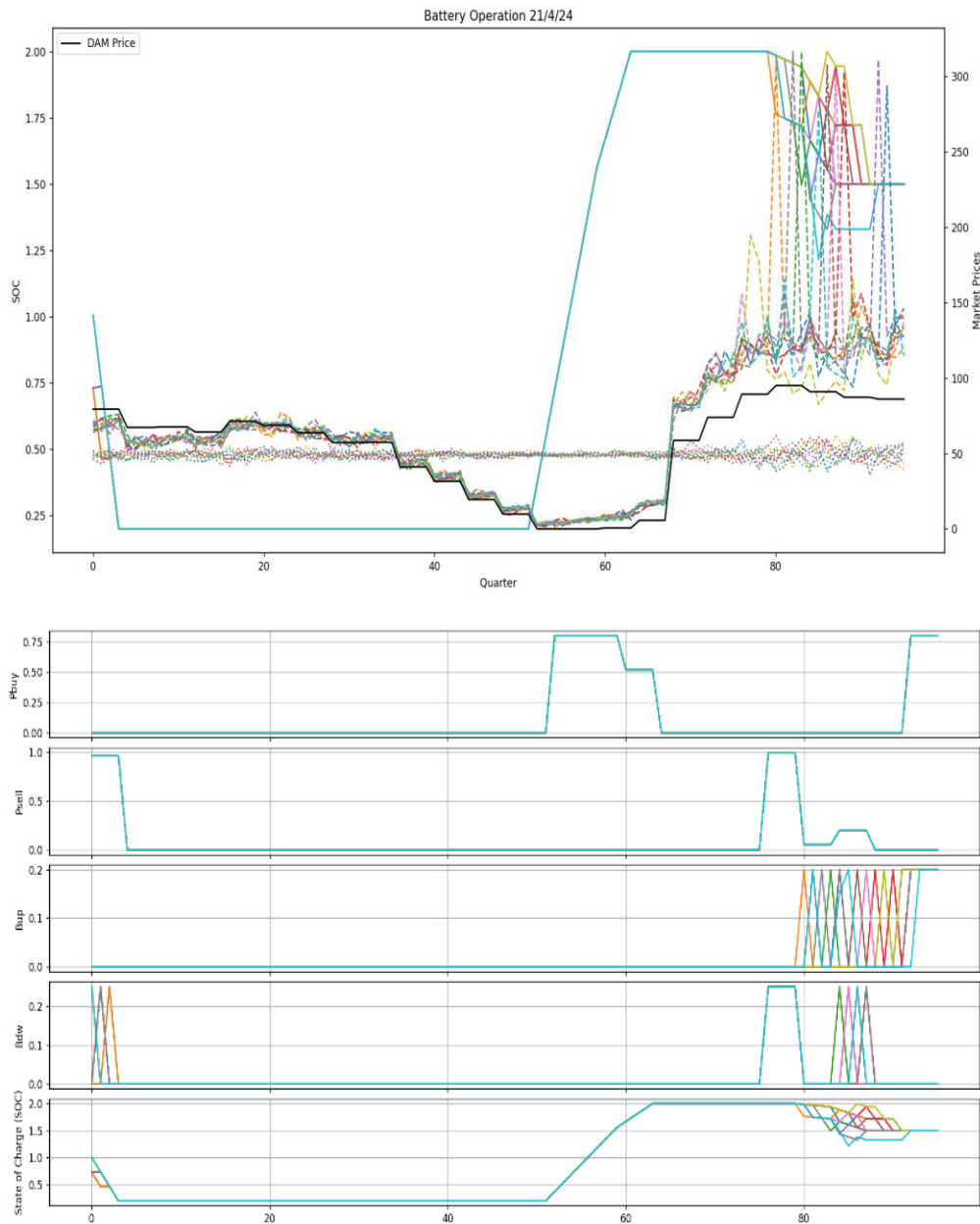


Σχήμα 41: Αποτελέσματα μοντέλου 6.4 για την βασική μέρα

Παρατηρούμε πως το μοντέλο δρα με τρόπο παρόμοιο του μοντέλου 6.3. Αυτό που έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την απόκριση του μοντέλου είναι πως κατά κύριο λόγο η μπαταρία επιλέγει να φορτίσει και να εκφορτίσει βάσει των διακυμάνσεων της αγοράς επόμενης μέρας, όπως έχει εξηγηθεί στις προηγούμενες παραγράφους. Η μπαταρία επιλέγει να συμμετάσχει στην εξισορρόπηση προφανώς τις βραδινές ώρες όπου οι τιμές άνω εξισορρόπησης προβλέπονται αρκετά υψηλές τιμές. Από την άλλη η συμμετοχή στην κάτω αγορά εξισορρόπησης συμβαίνει είτε τις πρωινές ώρες είτε τις απογευματινές - βραδινές ώρες. Όσον αφορά τις πρωινές ώρες η αγορά RTBM Down χρησιμοποιείται μαζί με την αγορά επόμενης μέρας προς επίτευξη αρμπιτράζ μεταξύ των τιμών των δύο αγορών (όπως συμβαίνει και στο μοντέλο 6.2 αλλά σε πολύ μικρότερη έκταση). Ταυτόχρονα, παρόμοιο φαινόμενο εντοπίζεται και τις απογευματινές- βραδινές ώρες. Το μοντέλο φροντίζει να φορτίσει ή να διατηρήσει την φόρτιση του σταθερή μέσω της συμμετοχής στην RTBM Down ώστε να εκμεταλλευτεί τα peaks τιμών στην αγορά επόμενης μέρας και στην RTBM Up (τα οποία συμβαίνουν σχεδόν ταυτόχρονα) προς επίτευξη του μέγιστου δυνατού κέρδους μέσω πώληση της μεγαλύτερης δυνατής ποσότητας ισχύος.

Τέλος, εκτελώντας προσομοιώσεις για την μέρα με υπερπαραγωγή ΑΠΕ λαμβάνονται τα ακόλουθα αποτελέσματα :





Σχήμα 42: Αποτελέσματα μοντέλου 6.4 για μέρα με υπερπαραγωγή ΑΠΕ

Παρατηρούμε ότι το μοντέλο μέχρι τις βραδινές ώρες το μοντέλο λειτουργεί σχεδόν μόνο στην αγορά επόμενης μέρας (με εξαίρεση κάποιες μέρες που εκμεταλλεύομενο τα πρωινά μέγιστα των τιμών κάνει αρμπιτράζ μεταξύ της αγοράς κάτω εξισορρόπησης και της αγοράς επόμενης μέρας). Αυτό συμβαίνει πιθανώς λόγω των εξαιρετικά χαμηλών τιμών τις μεσημβρινές ώρες λόγω της υπερπαραγωγής ενέργειας στο σύστημα. Τις βραδινές ώρες το μοντέλο εκμεταλλεύεται τις προβλεπόμενες υψηλές βραδινές τιμές οι οποίες αν και χαμηλότερες από τις αντίστοιχες των άλλων ημερών εξακολουθούν να είναι καλή πηγή κερδοφορίας. Αυτό οδηγεί σε συμπεριφορά παρόμοια με αυτή των βασικών ημερών που εξετάστηκαν παραπάνω. Φυσικά αντί για δύο κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης μέσα στην μέρα εδώ εντοπίζεται μόνο ένας.

Αξίζει να σημειωθεί πως τα παραπάνω μοντέλα αποσκοπούν στην ανάλυση της συμπεριφοράς μιας συσκευής αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας βασισμένης σε τεχνολογία συσσωρευτών η οποία αφήνεται ελεύθερη να δράσει στην αγορά.

Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα και Μελλοντικές Προοπτικές

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα συμπεράσματα καθώς και διάφορες μελλοντικές προοπτικές για πιθανές επεκτάσεις της παρούσας διπλωματικής εργασία προκειμένου να δοθεί μια πληρέστερη εικόνα τόσο για την εργασία όσο και για ερευνητικό οικοσύστημα του οποίου η διπλωματική αυτή είναι μέρος.

7.1 Συμπεράσματα

Από την εργασία αυτή προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα σχετικά με την συμπεριφορά μιας μπαταρίας σε περιβάλλον αγορών :

- Η μπαταρία ακολουθεί, σχετικά, σταθερά μοτίβα συμπεριφοράς μέσα στην διάρκεια της μέρας. Αυτό λογικά οφείλεται στην μορφή των τιμών της αγοράς επόμενης μέρας και των προβλεπόμενων τιμών. Η τυπική συμπεριφορά αποτελείται από ένα με δύο κύκλους φόρτισης- εκφόρτισης. Ο πρώτος κύκλος συμβαίνει τις πρωινές ώρες και οφείλεται στα υψηλά επίπεδα αρχικής αποθηκευμένης ενέργειας με τα οποία αρχικοποιούμε το μοντέλο. Ο δεύτερος κύκλος λαμβάνει χώρα το μεσημέρι, όπου λόγω της υψηλής παραγωγής ΑΠΕ και των χαμηλών τιμών που αυτή συνεπάγεται η μπαταρία φορτίζει, και το βράδυ όπου οι υψηλές τιμές ωθούν την μπαταρία σε αποφόρτιση. Η μπαταρία δρα ανάποδα από τις τιμές της αγοράς όπως θα περίμενε κανείς (αγοράζει στα φτηνά και πουλάει στα ακριβά). Το αρμπιτράζ αποτελεί την κύρια μέθοδος κερδοφορίας των συσκευών αποθήκευσης.
- Όταν υπάρχουν πολλαπλές αγορές η συμπεριφορά του μοντέλου καθορίζεται σε μεγαλύτερο βαθμό από την πιο βέβαια αγορά (τα σίγουρα κέρδη έχουν προτεραιότητα). Εκτός από τα σίγουρα κέρδη, τα οποία στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής έρχονται από την αγορά επόμενης μέρας (για την οποία θεωρήσαμε ιδανική πρόβλεψη τιμών). και του περιορισμού στην συμμετοχή στην αγορά εξισορρόπησης επηρεάζει την συμπεριφορά του μοντέλου παραπάνω από την αγορά εξισορρόπησης. Παρόλα αυτά το μοντέλο προσπαθεί να κάνει αρμπιτράζ μεταξύ των διαφορετικών αγορών (παράγοντας ενέργεια στην μία και καταναλώνοντας την στην άλλη) προς μεγιστοποίηση των κερδών. Αν αφεθεί χωρίς περιορισμούς η πρόσβαση στην αγορά εξισορρόπησης το μοντέλο θα εκτελέσει ένα διαρκές αρμπιτράζ μεταξύ των διαφορετικών αγορών (μοντέλο 6.2-6.3). Στην περίπτωση που οι προβλεπόμενες τιμές των αγορών εξισορρόπησης παρουσιάζουν ταυτόχρονα μέγιστα ή ελάχιστα ωθούν το μοντέλο σε συμμετοχή σε αυτές έναντι της αγοράς επόμενης μέρας.
- Η αβεβαιότητα που έχει νόημα να προβλεφθεί δεν είναι μόνο οι τιμές στις μελλοντικές αγορές αλλά και το πλήθος των πιθανών συμμετοχών του μοντέλου στις αγορές εξισορρόπησης. Όπως φάνηκε στο μοντέλο 6.3 το πλήθος

των συμμετοχών στην διαδικασία εξισορρόπησης αλλάζει ριζικά την συμπεριφορά του μοντέλου.

- Υψηλή άξια έχει λοιπόν η πρόβλεψη της πιθανότητας συμμετοχής της μπαταρίας στην αγορά εξισορρόπησης για μια δεδομένη μέρα προκειμένου να υπάρχει μεγαλύτερη βεβαιότητα και ακρίβεια στην συμπεριφορά του μοντέλου.
- Η μπαταρία λαμβάνει πολύ υψηλότερα κέρδη από την ταυτόχρονη συμμετοχή σε πολλαπλές αγορές από ότι σε μία (profit stacking). Αυτό συμβαίνει καθώς μέσω της υψηλής ευελιξίας της δύναται να εκμεταλλευτεί την μορφή πολλών αγορών διαφορετικής χρονικής διάρκειας. Αυτή η ταχύτητα στην απόκριση την κάνει ιδανικό μέσο για εξισορρόπηση και εξομάλυνση των αστοχιών παραγωγής ζήτησης (τα οποία συχνά αποφέρουν αρκετά υψηλά έσοδα).

7.2 Μελλοντικές προοπτικές

Ορισμένες από τις πιο ενδιαφέρουσες προεκτάσεις της εργασίας παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα :

Προέκταση	Σκοπός
Ένταξη κόστους λειτουργίας στο μοντέλο βασισμένο στη γήρανση της μπαταρίας και μακροχρόνια μελέτη συμπεριφοράς της μπαταρίας	Εξέταση βιωσιμότητας επένδυσης σε αποθήκευση και διαφόρων μοτίβων συμπεριφοράς στη διάρκεια του χρόνου
Βελτιστοποίηση συστάδας μπαταριών	Εξέταση δυναμικής μοντέλου στο οποίο δεν υφίσταται η συμπληρωματικότητα αγοράς-πώλησης
Συνβελτιστοποίηση μπαταρίας με διαφορετικά είδη ΑΠΕ	Εξέταση οφελών εγκατάστασης σταθμού αποθήκευσης σε υφιστάμενα έργα. Εξέταση λειτουργία αυτόνομου μικροδικτύου.
Βελτιστοποίηση λειτουργίας μπαταρίας σε παραπάνω είδη αγορών (όπως η αγορά εφεδρειών ή η ενδοημερήσια αγορά)	Εξέταση του profit stacking της μπαταρίας και της αλλαγής που προκαλούν οι παραπάνω αγορές στην συμπεριφορά της μπαταρίας
Λειτουργία μπαταρίας σε περιβάλλον αγορών με υψηλή διείσδυση αποθήκευσης	Εξέταση μεθόδων κερδοφορίας των μονάδων αποθήκευσης με λιγότερο ή καθόλου δυνατότητες αρμπιτράζ (κανιβαλισμός εσόδων) και μεγαλύτερο ανταγωνισμό
Επέκταση μοντέλου για παραπάνω μορφές αποθήκευσης	Εξέταση δυναμικής διαφορετικών μεθόδων αποθήκευσης προς οικονομική αξιολόγηση τους και εύρεσης της θέσης τους στο ΣΗΕ
Πρόβλεψη συμμετοχών στην αγορά εξισορρόπησης	Εξέταση της δυναμικής του μοντέλου για πολλαπλά σενάρια με διαφορετικές τιμές και

	διαφορετική ανάγκη εξισορρόπησης . Εξετάζεται έτσι μεγαλύτερη αβεβαιότητα και επιτυγχάνεται ακριβέστερη μοντελοποίηση)
--	---

Βιβλιογραφία

1. Χονδρεμπορικές Αγορές Ηλεκτρικής Ενέργειας Ρυθμιστικό Πλαίσιο και Λειτουργία, ΓΚΟΥΝΤΗΣ Β.- ΖΙΩΓΟΣ Ν.- ΙΩΑΝΝΟΥ Γ. – ΚΟΜΝΙΟΣ Κ. , ΜΠΙΣΚΑΣ Π. – ΠΑΝΑΓΟΣ Θ.- ΠΑΠΑΣΤΑΜΑΤΙΟΥ Π. – ΠΙΤΣΟΣ Ν. – ΦΙΛΙΠΠΟΠΟΥΛΟΥ ΟΛ.
2. Σημειώσεις Διαλέξεων Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Σταύρος Παπαθανασίου
3. Μοντέλα Βελτιστοποίησης σε Αγορές Ηλεκτρικής Ενέργειας, Αντώνης Παπαβασιλείου εκδόσεις Κριτική.
4. A technical comparison of wholesale electricity markets in North America and Europe, KASHIF IMRAN – IVANA KOCKAR
5. An overview of the Greek Balancing Market RAE EVENT 84th Thessaloniki International Fair Dr. Ioannis Kampouris Chief Officer for Operations, Infrastructure and Market Independent Power Transmission Operator
6. ΕΘΝΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΤΟ ΚΛΙΜΑ – ΑΝΑΘΕΩΡΗΜΕΝΗ ΕΚΔΟΣΗ ΑΘΗΝΑ, ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2024
7. Progress in electrical energy storage system: A critical review Haisheng Chen, Thang Ngoc Cong, Wei Yang, Chunqing Tan, Yongliang Li, Yulong Ding
8. An Overview on Energy Storage Options for Renewable Energy Systems, Sharma, Shiv & Yadav, Vinod & R.R.Joshi,. (2010). ΦΕΚ 3328/19.05.2023
9. ΦΕΚ 1248/Β/13-3-2025
10. Linear battery models for power systems analysis David Pozo
11. Unraveling the Degradation Mechanisms of Lithium-Ion Batteries, Rufino Júnior, C.A.; Sanseverino, E.R.; Gallo, P.; Amaral, M.M.; Koch, D.; Kotak, Y.; Diel, S.; Walter, G.; Schweiger, H.-G.; Zanin, H. Energies 2024
12. Convex Optimization Stephen Boyd, Lieven Vandenberghe
13. Operations Research: An Introduction, H. Taha
14. A Tutorial on Stochastic Programming Alexander Shapiro, Andy Philpott
15. Problem-Driven Scenario Clustering in Stochastic Optimization Julien Keutchayan, Janosch Ortmann, Walter Rei June 23, 2021
16. Enhancing explainability of stochastic programming solutions via scenario and recourse reduction, Rathi, Tushar & Gupta, Rishabh & Pinto, Jose & Zhang, Qi. (2023)
17. Μηχανική Μάθηση , Κωνσταντίνος Διαμαντάρας, Δημήτρης Μπότσης
18. Batteries in Electricity Markets: Economic Planning and Operations, Bolun Xu
19. Smart and optimization-based operation scheduling strategies for maximizing battery profitability and longevity in grid-connected application, Masoume Shabani, Mohadeseh Shabani, Fredrik Wallin, Erik Dahlquist, Jinyue Yan
20. A linear programming approach for battery degradation analysis and optimization in offgrid power systems with solar energy integration Chiara

Bordin, Harold Oghenetejiri Anuta, Andrew Crossland, Isabel Lascurain
Gutierrez, Chris J. Dent b Daniele Vigo