

ΦΩΚΙΩΝ ΦΩΤΟΠΟΥΛΟΣ

Μοντελοποίηση και οικονομική
ανάλυση διασυνδεδεμένων
συστημάτων αιολικής ενέργειας
με μπαταρίες

Τομέας: Ενέργειας

Επιβλέπων: Γιώργος Κάραλης, ΕΔΙΠ ΕΜΠ



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Αθήνα 2022

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Φωκίων Φωτόπουλος

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία «Μοντελοποίηση και οικονομική ανάλυση διασυνδεδεμένων συστημάτων αιολικής ενέργειας με μπαταρίες» εκπονήθηκε στα πλαίσια των προπτυχιακών σπουδών μου στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη του κ. Γιώργου Κάραλη.

Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω ιδιαιτέρως για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο επίκαιρο, ενδιαφέρον και απαιτητικό θέμα και να έρθω πιο κοντά με το αντικείμενο ενασχόλησης μου που είναι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η καθοδήγηση του και το ειλικρινές ενδιαφέρον που έδειξε κατά την εκπόνηση της εργασίας, βοήθησαν σημαντικά στην ποιότητα της έρευνας και στην ευχάριστη διεξαγωγή της.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην οικογένεια μου που με στήριξε στην πενταετή αυτή πορεία και τους συμφοιτητές μου που έκαναν ευχάριστη την καθημερινότητα στις αίθουσες.

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια, η κλιματική αλλαγή έχει αφήσει έντονα το στίγμα της στον πλανήτη μέσω της πρωτοφανούς αύξησης θερμοκρασίας, των έντονων φυσικών καταστροφών, της αυξημένης στάθμης της θάλασσας και της συρρίκνωσης της βιοποικιλότητας. Σε μια ύστατη προσπάθεια αναχαίτισης των παραπάνω φαινομένων, έχει χαραχθεί ένα σχέδιο βιώσιμης ανάπτυξης στο επίκεντρο της οποίας είναι η απανθρακοποίηση με στόχο την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050. Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων, καίριο ρόλο αποτελούν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, με πρωτοπόρες την αιολική και την ηλιακή. Η χώρα μας τυγχάνει να έχει άφθονο αιολικό δυναμικό και ηλιακή ακτινοβολία, που καθιστά τα έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ως πολύ αποδοτικούς και κατ' επέκταση φθηνούς παραγωγούς ενέργειας. Παράλληλα οι πολιτικές διαμάχες που δημιουργήθηκαν εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης και ειδικότερα ο πόλεμος που ξέσπασε στην Ουκρανία, έκαναν επιτακτικότερη την επιτάχυνση επενδύσεων ΑΠΕ σε μια γενικότερη προσπάθεια ανασχεδιασμού του ενεργειακού χάρτη της ΕΕ, λόγω της ανάγκης απεξάρτησης από το ρωσικό πετρέλαιο και φυσικό αέριο. Κομβικό ρόλο, ωστόσο, στην εισαγωγή περισσότερων έργων ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα και την απεξάρτηση από τις μονάδες ορυκτών καυσίμων, έχει η αποθήκευση ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, η αυξημένη διείσδυση στοχαστικών παραγωγών ενέργειας απαιτεί περισσότερες μονάδες εφεδρείες ώστε να επιτυγχάνεται η ισορροπία του συστήματος και να ενισχύεται η αξιοπιστία του.

Η διπλωματική εργασία με τίτλο «Μοντελοποίηση και οικονομική ανάλυση διασυνδεδεμένων συστημάτων αιολικής ενέργειας με μπαταρίες» ασχολείται με υβριδικά συστήματα που αποτελούνται από έναν στοχαστικό παραγωγό ρεύματος και μία μονάδα αποθήκευσης, που στην προκειμένη περίπτωση είναι ένα αιολικό πάρκο και μια μπαταρία ιόντων λιθίου. Η έρευνα αποσκοπεί στην ανάλυση και βελτιστοποίηση δύο διακριτών λειτουργιών ενός υβριδικού συστήματος που συμμετέχει στην αγορά ενέργειας, του ενεργειακού arbitrage και της μείωσης σφαλμάτων πρόβλεψης. Εξετάζονται εναλλακτικά σενάρια λειτουργίας που καθορίζονται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά, περιορισμούς του συστήματος ή θεσμικά πλαίσια λειτουργίας και μέσα από αυτά γίνεται η μοντελοποίηση λειτουργίας και υπολογίζεται η ενεργειακή αξιοποίηση. Στην συνέχεια, ακολουθεί η οικονομική ανάλυση του συστήματος όπου βάσει των αποτελεσμάτων λειτουργίας κρίνεται η βιωσιμότητα της επένδυσης και η χρηματοοικονομική απόδοση που μπορεί να αποφέρει. Τέλος, η οικονομική ανάλυση συνοδεύεται και από μια ανάλυση διαχείρισης ρίσκου με την βοήθεια προσομοίωσης της μεθόδου Monte Carlo, σύμφωνα με την οποία προκύπτουν τα πορίσματα της έρευνας.

Abstract

The past few years, climate change has left its mark on our planet as we are witnessing a steep rise in global temperature, unprecedented natural disasters, rising sea levels and reduced biodiversity. In an ultimate effort to combat such phenomena, there has been a plan of sustainable growth in the center of which is decarbonization and climate neutrality by 2050. In order to achieve the aforementioned goals, renewable energy sources and especially wind and solar power technologies, play a crucial role. Our country has vast wind potential and is high in solar irradiation, making both wind and solar technologies very efficient and therefore cheap energy producers. Furthermore, the latest political affairs and especially the war in Ukraine, have made the need for energy reform an urgent matter within the EU which aims to completely shut down imports of petrol and natural gas from Russia. Renewables increased penetration and elimination of fossil fuel units, however, require that there is enough energy storage units to act as energy regulators. More specifically, as the participation of variable renewable energy sources in the energy mix increases, the energy system requires more energy storage to balance electricity supply and maintain system's reliability.

This dissertation report titled "Modeling and financial analysis of interconnected hybrid wind-plus-battery systems" refers to systems that consist of a stochastic generator and a storage unit such as a wind park and a lithium battery that are examined in this paper. Our research aims to analyze and optimize the performance of a hybrid system participating in the energy market having two distinct functions, energy arbitrage and forecasting error reduction. A plethora of scenarios are analyzed regarding system's technical characteristics, constraints or framework and a range of performance results is calculated. Afterwards, performance results lead to the system's financial analysis where the projects economic viability is assessed, and its potential internal rate of return is calculated. The paper's financial analysis is paired with an uncertainty analysis using the Monte Carlo simulation through which the research's conclusions are drawn.

Περιεχόμενα

1.	Κατάλογος Συμβολισμών	7
2.	Κατάλογος Πινάκων.....	8
3.	Κατάλογος Σχημάτων	9
4.	Κατάλογος Εικόνων	11
5.	Εισαγωγή	12
5.1	Πλαίσιο	12
5.2	Σκοπός, ερωτήματα και στόχοι	16
5.3	Οριοθέτηση.....	17
5.4	Μεθοδολογία.....	19
6.	Βάση Συγκριτικής Ανάλυσης	21
6.1	Λειτουργία Ενεργειακού Arbitrage	23
6.2	Λειτουργία Μείωσης Σφαλμάτων Πρόβλεψης	24
7.	Δομή Μοντέλου Βελτιστοποίησης	25
7.1	Λειτουργία Ενεργειακού Arbitrage	26
7.2	Λειτουργία Μείωσης Σφαλμάτων Πρόβλεψης	28
8.	Δεδομένα Εισαγωγής	30
8.1	Δεδομένα Αγοράς.....	30
8.2	Δεδομένα Πάρκου	33
9.	Αποτελέσματα Λειτουργίας	35
9.1	Λειτουργία Ενεργειακού Arbitrage	36
9.1.1	Διερεύνηση Ενεργειακής Χωρητικότητας Μπαταρίας	36
9.1.2	Διαχείριση Αβεβαιοτήτων Πρόβλεψης	39
9.1.3	Διερεύνηση Περιορισμού Ισχύος Σημείου Διασύνδεσης	42
9.2	Λειτουργία Μείωσης Σφαλμάτων Πρόβλεψης	43
9.2.1	Αποτελέσματα Θεώρησης Σταθερών C_d-C_p	46
10.	Οικονομική Ανάλυση και Διαχείριση Ρίσκου	49
10.1	Μεταβλητές Εισόδου.....	50
10.2	Οικονομικά Αποτελέσματα Λειτουργίας Ενεργειακού Arbitrage.....	55
10.3	Οικονομικά Αποτελέσματα Λειτουργίας Μείωσης Σφαλμάτων Πρόβλεψης.....	57
11.	Πορίσματα Έρευνας.....	60
11.1	Σύγκριση Αποτελεσμάτων	60
11.2	Μελλοντική Πορεία Αγορών Ενέργειας	62
11.3	Πορεία Κεφαλαιακού Κόστους Αποθηκευτικών Συστημάτων.....	63
11.4	Προτάσεις Μελλοντικής Έρευνας.....	65
12.	Κατάλογος Αναφορών	67

1. Κατάλογος Συμβολισμών

- ΑΕ: Αγορά Εξισορρόπησης (Balancing Market – BM)
- ΑΕΗ: Αγορά Επόμενης Ημέρας (Day Ahead Market – DAM)
- ΑΠΕ: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
- ΑΣ: Αποθηκευτικό Σύστημα
- ΔΑΠ: Διάγραμμα Αθροιστικών Πιθανοτήτων (Cumulative Distribution Function - CDF)
- ΕΑΕ: Ενδοημερήσια Αγορά Ενέργειας (Intraday Market - IM)
- ΕΑΣΑ: Ελάχιστος Αποδεκτός Συντελεστής Απόδοσης (MARR)
- ΕΣΑ: Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης (IRR)
- ΚΚ: Κεφαλαιακό Κόστος
- ΟΤΣ: Οριακή Τιμή Συστήματος (System Marginal Price – SMP)
- ΚΦ: Κίνητρο Φοροαπαλλαγής (Investment Tax Credit – ITC)
- ΜΣΠ: Μείωση Σφαλμάτων Πρόβλεψης
- ΣΕ: Συντελεστής Εκμεταλλευσιμότητας (Capacity Factor – CF)
- ΣΠ: Σφάλμα Πρόβλεψης
- FIT: Feed-in Tariff

2. Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Διάγραμμα ροής για την λειτουργία ενεργειακού arbitrage	23
Πίνακας 2: Διάγραμμα ροής για την λειτουργία μείωσης σφαλμάτων πρόβλεψης.....	24
Πίνακας 3: Τεχνικά στοιχεία υβριδικού συστήματος	35
Πίνακας 4: Σενάρια κερδοφορίας για κάθε εύρος πρόβλεψης ΟΤΣ για μπαταρία διάρκειας 1 και 2 ωρών.....	41
Πίνακας 5: Συντελεστές πληρωμών σε περίπτωση περίσσειας και έλλειψης ενέργειας	46
Πίνακας 6: Περιπτώσεις αύξησης μέσης τιμής πώλησης ενέργειας για λειτουργία εξάλειψης σφαλμάτων.....	46
Πίνακας 7: Διάγραμμα ροής οικονομικής ανάλυσης και διαχείρισης ρίσκου	49
Πίνακας 8: Τιμές και στατιστικές κατανομές κοστολογικών στοιχείων	52
Πίνακας 9: Τιμές και στατιστικές κατανομές οικονομικών στοιχείων για την λειτουργία του ενεργειακού arbitrage.....	53
Πίνακας 10: Ποσοστά χρηματοδότησης επένδυσης	54
Πίνακας 11: Οικονομικά μεγέθη λειτουργίας εξάλειψης σφαλμάτων πρόβλεψης.....	57
Πίνακας 12: Τιμές τριγωνικής κατανομής ετήσιου τζίρου για κάθε συντελεστή σφάλματος	57
Πίνακας 13: Ωράριο λειτουργίας και όριζοντα αποφάσεων των περιφερειακών ενδοημερήσιων αγορών [18].....	66

3. Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Ιστόγραμμα καθαρών προσθηκών ΑΠΕ των τελευταίων ετών παγκοσμίως	13
Σχήμα 2: Δομή ευρωπαϊκών αγορών ενέργειας [3]	14
Σχήμα 3: Μηνιαία μέση τιμή ΟΤΣ για την Αγορά Επόμενης Ημέρας του έτους 2021	30
Σχήμα 4: Ένδειξη μέσης ημερήσιας μεταβλητότητας για την Αγορά Επόμενης Ημέρας για το έτος 2021	31
Σχήμα 5: Διαγράμματα αθροιστικών πιθανοτήτων για το 1 ^ο και 2 ^ο εξάμηνο του έτους καθώς και του έτους συνολικά	32
Σχήμα 6: Διάγραμμα μηνιαίου συντελεστή εκμεταλλευσιμότητας αιολικού πάρκου για το έτος 2021.....	33
Σχήμα 7: Σύγκριση κερδοφορίας μοντέλου Feed-in Tariff και συμμετοχής στην ΑΕΗ	34
Σχήμα 8: Περιπτώσεις κερδοφορίας ενεργειακού arbitrage σύμφωνα με την ενεργειακή χωρητικότητα της μπαταρίας.....	36
Σχήμα 9: Περιπτώσεις αύξησης μέσης τιμής πώλησης ενέργειας σύμφωνα με την ενεργειακή χωρητικότητα της μπαταρίας	37
Σχήμα 10: Σύγκριση ετήσιας κερδοφορίας βάσει ενεργειακής χωρητικότητας μπαταρίας για την λειτουργία του ενεργειακού arbitrage.....	38
Σχήμα 11: Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης ΟΤΣ.....	39
Σχήμα 12: Σενάρια κερδοφορίας για κάθε εύρος πρόβλεψης ΟΤΣ για μπαταρία διάρκειας 1 ώρας	40
Σχήμα 13: Σενάρια κερδοφορίας για κάθε εύρος πρόβλεψης ΟΤΣ για μπαταρία διάρκειας 2 ωρών.....	41
Σχήμα 14: Σύγκριση κερδοφορίας για αυξημένο περιορισμό ισχύος διασύνδεσης.....	42
Σχήμα 15: Μέσο σφάλμα οργάνων πρόβλεψης συναρτήσει του χρονικού ορίζοντα [9]....	44
Σχήμα 16: Ετήσια κερδοφορία για την λειτουργία εξάλειψης σφαλμάτων βάσει υποθέσεων	47
Σχήμα 17: Σενάρια κερδοφορίας για την λειτουργία εξάλειψης σφαλμάτων πρόβλεψης .	48
Σχήμα 18: Μεταβολή κόστους ορυκτών υλών (Λίθιο) [11]	50
Σχήμα 19: Διάγραμμα εσωτερικού συντελεστή απόδοσης (IRR) για την λειτουργία ενεργειακού arbitrage χωρίς κίνητρο φοροαπαλλαγής (ITC).....	55
Σχήμα 20: Διάγραμμα αθροιστικής πιθανότητας εσωτερικού συντελεστή απόδοσης (IRR) για την λειτουργία ενεργειακού arbitrage με κίνητρο φοροαπαλλαγής (ITC).....	56
Σχήμα 21: Διάγραμμα αθροιστικών πιθανοτήτων εσωτερικού συντελεστή απόδοσης (IRR) για την λειτουργία μείωσης σφαλμάτων πρόβλεψης χωρίς κίνητρο φοροαπαλλαγής (ITC)	58
Σχήμα 22: ΔΑΠ εσωτερικού συντελεστή απόδοσης (IRR) για την λειτουργία μείωσης σφαλμάτων πρόβλεψης με κίνητρο φοροαπαλλαγής (ITC)	59
Σχήμα 23: Προστιθέμενη καθαρή αξία ενέργειας υβριδικού συστήματος στις ενεργειακές αγορές των ΗΠΑ [14].....	61

Σχήμα 24: Δεσμευμένη παραγωγή ορυχείων και πρωτογενής ζήτηση στο σενάριο βιώσιμης ανάπτυξης (SDS) για επιλεγμένα ορυκτά [16]	63
Σχήμα 25: Προβλέψεις κόστους μπαταρίας ιόντων λιθίου διάρκειας 4 ωρών έως το 2050 [17]	64

4. Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Αντικείμενο μελέτης εργασίας.....	17
Εικόνα 2: Εργαλεία μοντέλων πρόβλεψης αιολικής παραγωγής [7]	43

5. Εισαγωγή

5.1 Πλαίσιο

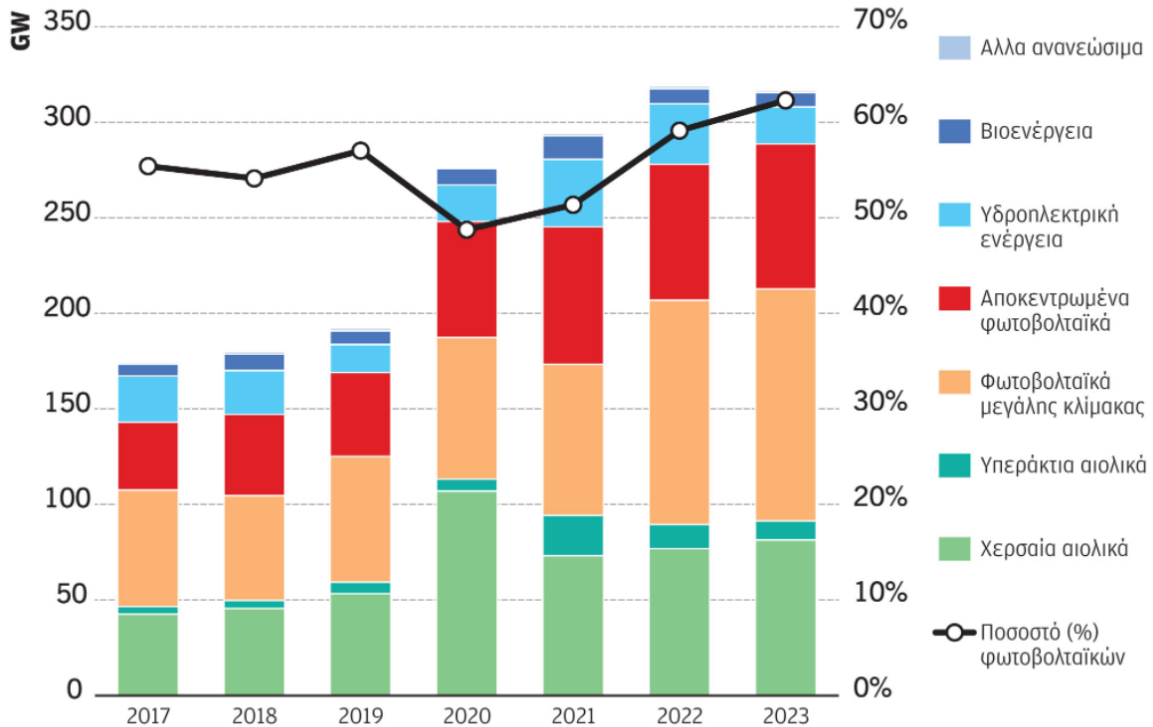
Τόσο σε εθνικό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο αντιμετωπίζονται τεράστιες προκλήσεις με κεντρικό άξονα το περιβάλλον και την βιωσιμότητα. Το συμβούλιο Ηνωμένων Εθνών σχετικά με την κλιματική αλλαγή (COP 26) που διεξήχθη στο τέλος του 2021, χάραξε μια ξεκάθαρη πορεία προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, θέτοντας ως στόχο την πλήρη απανθρακοποίηση ως το 2050. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με την σειρά τους αποτελούν ένα σημαντικό όπλο στην καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής και η συνεισφορά τους στο ενεργειακό μείγμα επιτρέπει την σταδιακή απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα. Στην Ελλάδα όπως και σε πλήθος άλλων χωρών οι σημαντικότεροι συντελεστές των ΑΠΕ, είναι ο άνεμος και ο ήλιος. Η χώρα μας χαρακτηρίζεται από υψηλή διαθεσιμότητα ηλιακής ακτινοβολίας και αιολικού δυναμικού που καθιστούν τα φωτοβολταϊκά και τις ανεμογεννήτριες πολύ αποδοτικούς και κατ' επέκταση φθηνούς παραγωγούς ενέργειας. Η πιο σημαντική πρόκληση, ωστόσο, στην λειτουργία ενός αιολικού ή φωτοβολταϊκού πάρκου είναι η απελευθέρωση ενέργειας. Το σημαντικό μειονέκτημα των παραπάνω τεχνολογιών είναι ότι υπόκεινται σε στοχαστικά μεγέθη όπως ο άνεμος κι ο ήλιος, με αποτέλεσμα να υστερούν σε αξιοπιστία συγκριτικά με άλλες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, που έχουν την δυνατότητα προγραμματισμού και ρύθμισης παραγωγής ενέργειας, όπως αυτές των ορυκτών καυσίμων. Η τεχνολογία αιολικής ενέργειας χαρακτηρίζεται ως μεταβλητή πηγή ενέργειας (variable output power source), καθώς έχει την ιδιότητα να μεταβάλλεται εντός μικρών χρονικών διαστημάτων διάρκειας λεπτών. Τα φωτοβολταϊκά, αντίστοιχα, ταξινομούνται ως πηγές παραγωγής διακοπτόμενης ενέργειας (intermittent output power sources), καθώς εμφανίζουν ραγδαίες μεταβολές παραγωγής. Ακόμα και σε ημέρες χωρίς συννεφιά που προκαλεί το φαινόμενο σκίασης, η παραγωγή ενέργειας μπορεί να μεταβληθεί έως 80% εντός 1 ώρας για όλο το σύστημα. [1]

Η αύξηση συνεισφοράς των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με την δημιουργία νέων έργων παρότι αποτελεί μονόδρομο για την παραγωγή πράσινης ενέργειας προκαλεί νέες προκλήσεις στην ομαλή λειτουργία του ηλεκτρικού συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, η μεγάλη συμμετοχή των στοχαστικών μονάδων ΑΠΕ δοκιμάζει την ισορροπία και την ευελιξία του ηλεκτρικού δικτύου, αφού η παραγωγή τους υπόκεινται σε απρόβλεπτα μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες και είναι αδύνατη η επίτευξη σταθερής παραγωγής. Ως αποτέλεσμα, η αδυναμία ρύθμισης καθώς και ακριβούς πρόβλεψης των μονάδων παραγωγής για μικρά χρονικά διαστήματα προκαλεί αστάθεια στο ηλεκτρικό σύστημα και μειώνει την αξιοπιστία του. Επομένως, υπάρχει ανάγκη μεγάλων μονάδων εφεδρείας που θα είναι σε θέση να αντισταθμίσουν τυχόν απώλειες και να ισορροπήσουν γρήγορα το σύστημα. Το παραπάνω φαινόμενο μεγεθύνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό διείσδυσης

των ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα, γεγονός που αποτελεί εμπόδιο στην πορεία πλήρους μετάβασης στην πράσινη ενέργεια.

Καθαρές προσθήκες ΑΠΕ ανά τεχνολογία

2017-2023



ΠΗΓΗ: ΙΕΑ

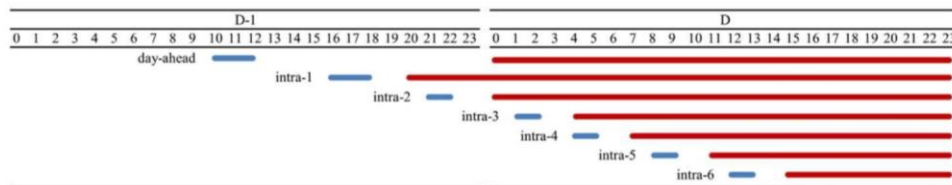
Η ΚΑΘΗΜΕΡΙΝΗ

Σχήμα 1: Ιστόγραμμα καθαρών προσθηκών ΑΠΕ των τελευταίων ετών παγκοσμίως

Η παγκόσμια τάση (βλ. σχήμα 1) καταδεικνύει την αναγκαιότητα προσθήκης περισσότερων έργων ΑΠΕ, ωστόσο τα ποσοστά διείσδυσης παραμένουν περιορισμένα όσο δεν υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας. Η ανεξέλεγκτη προσθήκη έργων ΑΠΕ χωρίς την αντιστοίχιση της με την απαιτούμενη εφεδρεία θα επιφέρει τον κορεσμό του συστήματος με αποτέλεσμα να περικόπτεται παραγόμενη ενέργεια από ΑΠΕ και να υπάρχει αστάθεια στο δίκτυο. Η αποθήκευση ενέργειας αποτελεί μονόδρομο για την διαχείριση της στοχαστικότητας παραγωγής των ΑΠΕ καθώς ελεγχόμενη απελευθέρωση ενέργειας θα ισοσκελίζει την ζήτηση και θα βοηθά στον έλεγχο του συστήματος. Το παραπάνω φαινόμενο εμποδίζει την πλήρη απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, αφού το σύστημα θα χρειάζεται μονάδες ορυκτών καυσίμων ως εφεδρεία και δεν θα είναι σε θέση να εκμεταλλευτεί την πλήρη δυναμικότητα των ΑΠΕ, μειώνοντας σημαντικά την κερδοφορία τους.

Παράλληλα, τα περισσότερα έργα ΑΠΕ που δημιουργήθηκαν στην χώρα αναπτύχθηκαν στην λογική των συμβάσεων πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας (PPAs), οι οποίες προστάτευαν τον επενδυτή από το ρίσκο και τις υποχρεώσεις που συνεπάγεται η συμμετοχή στο χρηματιστήριο ενέργειας. Σύμφωνα με τις συμβάσεις, ο παραγωγός πουλάει την παραγόμενη ενέργεια σε μια προκαθορισμένη τιμή η οποία είναι ανεξάρτητη της εκάστοτε ωριαίας τιμής που προκύπτει από το χρηματιστήριο ενέργειας και με αυτό τον τρόπο καθίσταται πιο εύκολη η οικονομική ανάλυση της επένδυσης και πιο απλή η διαδικασία λειτουργίας του. Πλέον, καθώς έχουν ωριμάσει οι τεχνολογίες ΑΠΕ και έχει μειωθεί σημαντικά το κόστος παραγωγής ενέργειας τους, ξεκινάει η σταδιακή μετάβαση τους στην ελεύθερη αγορά.

Η αγορά ενέργειας αποτελείται από την Αγορά Επόμενης Ημέρας (AEH-Day Ahead Market), τις Ενδοημερήσιες Αγορές (EA-Intra Day Market) και την Αγορά Εξισορρόπησης (AE-Balancing Market), με την αγορά επόμενης ημέρας να καλύπτει το μεγαλύτερο όγκο συναλλαγών και τις υπόλοιπες αγορές να καλύπτουν αποκλίσεις ή ανισορροπίες που προκύπτουν. Στην AEH, το ισοζύγιο προσφοράς-ζήτησης για κάθε ώρα καθορίζει την Οριακή Τιμή Συστήματος (SMP) βάσει της οποίας όλοι οι παραγωγοί, εφόσον ενταχθούν στο ενεργειακό μείγμα, θα πληρωθούν και όσοι προσφέρουν ενέργεια σε τιμή υψηλότερη αυτής μένουν εκτός. Η συμμετοχή των ΑΠΕ στην AEH προϋποθέτει την δήλωση της ποσότητας καθώς και την τιμή στην οποία επιθυμεί ο παραγωγός να διαθέσει την ενέργεια προς πώληση μια ημέρα πριν την φυσική παράδοση, για κάθε μια από τις 24 περιόδους της επόμενης ημέρας. Για να μπορεί να δηλωθεί η παραγωγή ενός έργου ΑΠΕ σε ωριαία βάση απαιτείται η αντίστοιχη πρόβλεψη βάσει καιρικών φαινομένων, η οποία ενδέχεται να αποκλίνει από την πραγματική παραγωγή. Στην περίπτωση απόκλισης από την δηλωμένη ποσότητα, ο παραγωγός μπορεί να διορθώσει ελαφρώς τις προβλέψεις του εντός των ενδοημερησίων αγορών και τελικώς πληρώνει ποινή για την έλλειψη ενέργειας ή πουλάει την περίσσεια στην αγορά εξισορρόπησης. [2]



Σχήμα 2: Δομή ευρωπαϊκών αγορών ενέργειας [3]

Για κάθε αγορά το άνοιγμα και το κλείσιμο αντιστοιχίζεται με την μπλε γραμμή, ενώ ο οριζοντας προγραμματισμού στον οποίο αναφέρονται αντιστοιχεί στην κόκκινη γραμμή. Η αγορά εξισορρόπησης λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο και γι' αυτό απουσιάζει από το σχήμα 2 και καλύπτει διαφορές μεταξύ προβλέψεων και αποτελεσμάτων των δύο προηγούμενων αγορών.

Η τελευταία χωρίζεται σε 3 επιμέρους αγορές ενέργειας που διαδέχονται χρονικά η μία την άλλη και είναι κατά σειρά:

- Η Αγορά Ισχύος Εξισορρόπησης
- Η Αγορά Ενέργειας Εξισορρόπησης
- Η Εκκαθάριση Αποκλίσεων

Το σχήμα 2 αναφέρεται στο ΟΜΙΕ, που αντιστοιχεί στο χρηματιστήριο ενέργειας της Ιβηρικής χερσονήσου, ωστόσο βασίζεται στο κοινό ρυθμιστικό ευρωπαϊκό πρότυπο που ακολουθούν όλες οι ευρωπαϊκές χώρες και αποκαλείται Target Model. Απώτερος σκοπός του παραπάνω ενιαίου πλαισίου είναι η δημιουργία μιας ενιαίας, διασυνδεδεμένης ευρωπαϊκής αγοράς ενέργειας. [4]

Το πρόβλημα της στοχαστικότητας των ΑΠΕ μπορεί να επιλυθεί σε μεγάλο βαθμό με την ύπαρξη συστημάτων αποθήκευσης, προσδίδοντας ευελιξία στο σύστημα δημιουργώντας εφεδρείες ενέργειας. Η σύζευξη έργων ΑΠΕ με συστήματα αποθήκευσης βοηθά τόσο στην ισορροπία του ηλεκτρικού συστήματος και την ένταξη περισσότερων ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα όσο και στην κερδοφορία των παραγωγών-επενδυτών, αυξάνοντας την τιμή πώλησης της παραγόμενης ενέργειας. Επιπρόσθετα, η ένταξη υβριδικών συστημάτων σε μεγάλη κλίμακα ωφελεί και τους καταναλωτές ρεύματος, εξομαλύνοντας τις υψηλές διακυμάνσεις της οριακής τιμής συστήματος. Ακόμα, η αυξημένη συνεισφορά των ΑΠΕ στην οποία συντελούν τα αποθηκευτικά συστήματα, επιτρέπει την απεξάρτηση από ακριβές εναλλακτικές ορυκτών καυσίμων που έχουν οδηγήσει στις υψηλές τιμές συστήματος τον τελευταίο καιρό.

Η παρακάτω έρευνα επικεντρώνεται στην βελτιστοποίηση λειτουργίας συζευγμένων συστημάτων αιολικού πάρκου και σταθμού αποθήκευσης, καθώς και την ανάλυση της οικονομικής βιωσιμότητας ένταξης σταθμού φόρτισης σε έργο ΑΠΕ. Πιο συγκεκριμένα, η ανάλυση βασίζεται στην λειτουργία του υβριδικού συστήματος στην ελληνική αγορά ενέργειας και συνοδεύεται από ένα οικονομικό μοντέλο που κρίνει την βιωσιμότητα προσθήκης αποθηκευτικού συστήματος βάσει των αποτελεσμάτων λειτουργίας.

5.2 Σκοπός, ερωτήματα και στόχοι

Σκοπός της παρακάτω εργασίας είναι η μοντελοποίηση λειτουργίας ενός υβριδικού συστήματος και η αξιολόγηση της κερδοφορίας που αποφέρει στον επενδυτή. Πιο συγκεκριμένα, η εργασία αναλώνεται στους τρόπους λειτουργίας που το αποθηκευτικό σύστημα μπορεί να αποφέρει κέρδος, στη μέθοδο λήψης αποφάσεων για την βέλτιστη λειτουργία του και στο πλαίσιο που η εγκατάσταση αποφέρει κέρδος για τον επενδυτή. Η μοντελοποίηση λειτουργίας και η μελέτη οικονομικής βιωσιμότητας είναι βασισμένη στα δεδομένα της ελληνικής αγοράς ενέργειας. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αφορούν την αγορά επόμενης ημέρας για το Ελληνικό Χρηματιστήριο Ενέργειας το έτος 2021, ενώ τα δεδομένα παραγωγής αφορούν ένα διασυνδεδεμένο αιολικό πάρκο στην περιοχή της Εύβοιας για το ίδιο χρονικό διάστημα. Ωστόσο, οποιοδήποτε έργο ΑΠΕ στοχαστικού χαρακτήρα συζευγμένο με οποιοδήποτε σύστημα αποθήκευσης μπορεί να ακολουθήσει την ίδια δομή μοντελοποίησης. Στόχος της εργασίας είναι να προκύψουν πορίσματα σχετικά με την επιπρόσθετη κερδοφορία που αποφέρει ένας σταθμός αποθήκευσης σε έργα ΑΠΕ και να προταθεί ένα θεσμικό πλαίσιο όπου θα επιτρέψει την σταδιακή ένταξη τους, προσφέροντας κέρδος τόσο σε καταναλωτές και δίκτυο όσο και στον επενδυτή.

Τα ερωτήματα που επιδιώκει να απαντήσει η μελέτη είναι:

- Με ποιους τρόπους μπορεί να εκμεταλλευτεί το αποθηκευτικό σύστημα ένα έργο ΑΠΕ
- Πως η υβριδική λειτουργία του συστήματος μπορεί να μοντελοποιηθεί με τη χρήση γραμμικού προγραμματισμού
- Αν και υπό ποιες συνθήκες, η προσθήκη συστήματος αποθήκευσης αποφέρει κέρδος στον επενδυτή

Πιο συγκεκριμένα, η εργασία αποσκοπεί στην κατάστρωση γραμμικού μοντέλου του συζευγμένου συστήματος με στόχο την βελτιστοποίηση του κέρδους σε δύο διακριτές λειτουργίες:

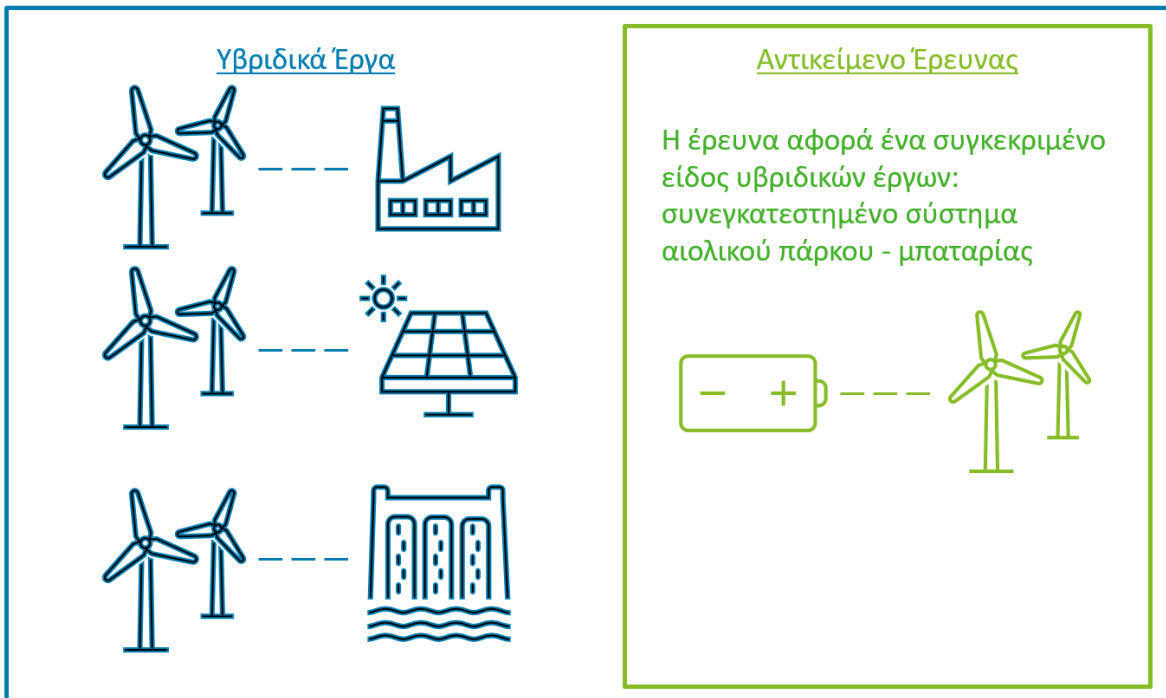
- Λειτουργία ενεργειακού arbitrage
- Λειτουργία μείωσης των σφαλμάτων πρόβλεψης

Στην συνέχεια εκτελώντας την οικονομική ανάλυση με την μέθοδο προεξοφλημένων ταμειακών ροών και εκτελώντας την ανάλογη διαχείριση ρίσκου με την βοήθεια της προσομοίωσης Monte Carlo, στοχεύει στην εξαγωγή πορισμάτων για την επένδυση και την πρόταση ενός θεσμικού πλαισίου λειτουργίας.

5.3 Οριοθέτηση

Ο όρος υβριδικό έργο πολλές φορές αναφέρεται σε οποιοδήποτε έργο συνδυάζει πολλαπλές μορφές παραγωγής ενέργειας, αποθήκευσης ή διαχείρισης ζήτησης ανεξάρτητα από το αν είναι τοποθετημένα στον ίδιο χώρο ή απλά επικοινωνούν. [5]

Η παρούσα ανάλυση βασίζεται σε σύστημα αιολικού-μπαταρίας που είναι εγκατεστημένο στον ίδιο χώρο (βλ. εικόνα 1), αλλά η βάση μοντελοποίησης είναι ίδια για οποιαδήποτε σχεδιασμό στοχαστικής μονάδας παραγωγής και αποθηκευτικού συστήματος, αλλάζοντας το προφίλ παραγωγής και τους τεχνικούς περιορισμούς αποθήκευσης αντίστοιχα.



Εικόνα 1: Αντικείμενο μελέτης εργασίας

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η επιλογή τοποθέτησης ενός αποθηκευτικού συστήματος με την δυνατότητα σύζευξης του με ένα έργο ΑΠΕ ή μεμονωμένης τοποθέτησης του. Η παρακάτω μελέτη εξετάζει την κερδοφορία των συζευγμένων υβριδικών συστημάτων, τα οποία επωφελούνται έναντι των μεμονωμένων σταθμών αποθήκευσης σε κόστη υποδομών και αδειοδότησης, διασύνδεσης και χώρου, προσφέροντας παράλληλα ευέλικτη λειτουργία στα έργα ΑΠΕ που συνδέονται. Βεβαίως, η επιλογή σύζευξης ορισμένες φορές προϋποθέτει την εγκατάσταση του αποθηκευτικού συστήματος σε κοινό σημείο διασύνδεσης που δημιουργεί λειτουργικούς περιορισμούς και μειώνει την αποδοτικότητα της μπαταρίας. Η εργασία δεν προβαίνει σε εκτενέστερη σύγκριση των δύο παραπάνω εναλλακτικών λύσεων και εξετάζει αποκλειστικά την συνθήκη σύζευξης. Περισσότερες πληροφορίες υπάρχουν στο επιστημονικό άρθρο [6], όπου αναλύονται οι δύο επιλογές και παρουσιάζονται τα οικονομικά κριτήρια επιλογής.

Επίσης, σε πολλές περιπτώσεις τα υβριδικά συστήματα παράγουν επιπλέον κερδοφορία από την ικανότητα φόρτισης από το δίκτυο και εκμετάλλευσης της παραπάνω ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, δίνεται η δυνατότητα φόρτισης από το δίκτυο σε ώρες χαμηλών τιμών που δεν υπάρχει παραγωγή από το πάρκο, με αποτέλεσμα η μπαταρία να μπορεί να δράσει ως ανεξάρτητη μονάδα και να παράξει κέρδος χωρίς την προσφορά ενέργειας από το πάρκο. Στην παρακάτω έρευνα ο υβριδικός σταθμός αντιμετωπίζεται σαν ενιαία οντότητα όπου η μπαταρία αντλεί ενέργεια μόνο από το συζευγμένο πάρκο και την αποδίδει στο δίκτυο, δίχως να εξετάζεται η ξεχωριστή λειτουργία πηγής και αποθηκευτικού σταθμού. Η παρακάτω έρευνα εξετάζει και συγκρίνει την περίπτωση ικανότητας φόρτισης από το δίκτυο με την περίπτωση απαγόρευσης. [6]

Η εργασία δεν συνοδεύεται από κάποιο μοντέλο πρόγνωσης τόσο για την πρόβλεψη αιολικής παραγωγής στην αγορά επόμενης μέρας όσο και για τις ΟΤΣ. Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων χρησιμοποιούνται παρελθοντικά δεδομένα και γίνονται λογικές παραδοχές αναφορικά με τα σφάλματα πρόβλεψης. Εκτενέστερη βιβλιογραφία αναφορικά με τα σφάλματα πρόβλεψης στο κομμάτι της αιολικής παραγωγής υπάρχει στο επιστημονικό άρθρο [7].

Η εργασία, ακόμα, δεν αναλύει τυχόν πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα αποθηκευτικά συστήματα στην αντιμετώπιση της περικοπής ενέργειας (curtailment) λόγω περιορισμών από τον διαχειριστή του συστήματος ή του δικτύου μεταφοράς. Η παραπάνω λειτουργία μπορεί κάλλιστα να συνδυαστεί με κάποια από τις λειτουργίες που παρουσιάζονται στην έρευνα, αλλά αποτελεί στοιχείο διερεύνησης για μεμονωμένα έργα ιδιαίτερων χαρακτηριστικών.

Τέλος, δεν υπάρχει ιδιαίτερη διερεύνηση ως προς την βέλτιστη τεχνολογία αποθήκευσης. Στην εργασία χρησιμοποιούνται τυπικές τιμές βαθμού απόδοσης, κόστους αγοράς και εγκατάστασης καθώς και χρόνου ζωής για μπαταρίες ιόντων λιθίου, ωστόσο, οποιοδήποτε σύστημα αποθήκευσης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί αντίστοιχα. Το άρθρο [8] περιέχει την οικονομική ανάλυση περίπτωσης υβριδικού έργου χρησιμοποιώντας ως σύστημα αποθήκευσης την αντλησιοταμίευση. Η παρακάτω ανάλυση περιέχει μόνο ένα κομμάτι στο οποίο παραμετροποιείται το μέγεθος της μπαταρίας ως ποσοστό της εγκατεστημένης ισχύος και εξετάζεται η βέλτιστη ενεργειακή χωρητικότητα μπαταρίας σύμφωνα με το εύρος οικονομικής απόδοσης της εκάστοτε περίπτωσης.

5.4 Μεθοδολογία

Για την ανάλυση συλλέχθηκαν τα δεδομένα παραγωγής ενός πάρκου που ανήκει στο διασυνδεδεμένο σύστημα της χώρας και οι ωριαίες τιμές ενέργειας για το αντίστοιχο διάστημα. Μέσα από την παραπάνω ανάλυση, η έρευνα αποσκοπεί στην εξαγωγή ενός γενικευμένου συμπεράσματος για την λειτουργία και την βιωσιμότητα συστημάτων αιολικού-μπαταρίας στην χώρα μας. Η χρήση στατιστικών εφαρμογών καθώς και η δημιουργία αβεβαιότητας εντός των μοντέλων που αναπτύσσονται επιθυμεί να εντάξει το ευρύ φάσμα αποτελεσμάτων που μπορεί να προκύψει σε παρόμοιες περιπτώσεις. Πολλά από τα πορίσματα της έρευνας παραμετροποιούνται και εξετάζεται πλήθος πιθανών εφαρμογών ώστε να καλυφθούν κατά το δυνατόν οι συνηθέστερες διαμορφώσεις υβριδικών συστημάτων αναφορικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους.

Η μεθοδολογία της έρευνας χωρίζεται σε 5 βασικά μέρη. Αρχικά, εισάγεται το μοντέλο σύγκρισης απλού και συζευγμένου έργου ΑΠΕ, μέσω του οποίου προκύπτει η αποτίμηση της οικονομικής προσφοράς της μπαταρίας στο σύστημα. Η εργασία, εισάγει δύο διακριτές λειτουργίες του αποθηκευτικού συστήματος, οι οποίες συγκρίνονται με τα αποτελέσματα λειτουργίας ενός απλού πάρκου. Στην συνέχεια, παρατίθενται οι εξισώσεις γραμμικού προγραμματισμού που συνθέτουν το πλαίσιο λειτουργίας για το πρόβλημα βελτιστοποίησης. Η τρίτη ενότητα αφορά την συλλογή δεδομένων που εισήχθησαν στη μοντελοποίηση, ενώ, η τέταρτη ενότητα περιέχει τα διαφορετικά σενάρια λειτουργίας, καθώς και την παραμετροποίηση των μεταβλητών που εισήχθησαν στην επίλυση. Η τελευταία ενότητα αναλύει τα οικονομικά αποτελέσματα που βασίζονται στα σενάρια λειτουργίας και συνοδεύεται από μια ανάλυση ρίσκου με την βοήθεια της μεθόδου Monte Carlo.

Αναλυτικότερα η δομή των κεφαλαίων έχει ως εξής:

6. [Βάση Συγκριτικής Ανάλυσης](#)
7. [Δομή Μοντέλου Βελτιστοποίησης](#)
8. [Αεδομένα Εισαγωγής](#)
9. [Αποτελέσματα Λειτουργίας](#)
10. [Οικονομική Ανάλυση και Διαχείριση Ρίσκου](#)
11. [Πορίσματα Έρευνας](#)

Το έκτο κεφάλαιο αφορά τον τρόπο αξιολόγησης της χρησιμότητας σύζευξης έργων ΑΠΕ με συστήματα αποθήκευσης. Εισάγει τους εναλλακτικούς τρόπους λειτουργίας της μπαταρίας και αναφέρει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους.

Στο έβδομο κεφάλαιο αναλύεται η διαδικασία μοντελοποίησης λειτουργίας του υβριδικού σταθμού. Αρχικά, αποτυπώνεται με τη βοήθεια γραμμικών εξισώσεων η λειτουργία του ενεργειακού arbitrage, σύμφωνα με την οποία το υβριδικό σύστημα είναι σε θέση να

παράξει επιπλέον κέρδος φορτίζοντας την μπαταρία σε ώρες χαμηλής οριακής τιμής συστήματος και εκφορτίζοντας τη σε υψηλές, εκμεταλλευόμενο την μεταβλητότητα των τιμών ενέργειας σε ημερήσια βάση. Σε όλο το μήκος της εργασίας χρησιμοποιείται ο αγγλικός όρος “arbitrage” καθώς δεν αντιστοιχεί άμεσα σε κάποιον ελληνικό. Μια αφηρημένη απόδοση του παραπάνω όρου είναι η αγορά και πώληση του ίδιου αγαθού σε διαφορετικές αγορές ή χρονικές στιγμές με σκοπό την εκμετάλλευση διαφοράς τιμής του. Στην συνέχεια ακολουθεί η ίδια διαδικασία για τη μοντελοποίηση μείωσης των σφαλμάτων πρόβλεψης μέσω της συμμετοχής του αποθηκευτικού συστήματος στην αγορά εξισορρόπησης. Με την παραπάνω μέθοδο ελαχιστοποιούνται τα χρήματα που ο παραγωγός οφείλει να καταβάλλει ως πρόστιμο για την απόκλιση μεταξύ της προβλεπόμενης και της πραγματικής παραγωγής ενός έργου.

Το όγδοο κεφάλαιο αναφέρεται στα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση. Πιο συγκεκριμένα, περιλαμβάνει την ανάλυση δεδομένων της ελληνικής αγοράς ενέργειας για την αγορά επόμενης ημέρας, όπου πραγματοποιείται ο μεγαλύτερος όγκος συναλλαγών και βάσει των τιμών της καθορίζονται οι λειτουργίες του υβριδικού συστήματος που εξετάζουμε. Ακόμα, παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά και οι μετρήσεις για το αιολικό πάρκο, τα οποία συσχετίζονται άμεσα με τα οικονομικά αποτελέσματα που προκύπτουν.

Το ένατο κεφάλαιο παρουσιάζει τα αποτελέσματα λειτουργίας για τον εκάστοτε προσανατολισμό χρήσης της μπαταρίας και παραμετροποιεί βασικές μεταβλητές εισαγωγής που εμπεριέχουν αβεβαιότητα. Τα παραπάνω συνθέτουν την διαγραμματική απεικόνιση για ένα φάσμα συνθηκών λειτουργίας και στην συνέχεια εισάγονται ως μεταβλητές κερδοφορίας στο οικονομικό μοντέλο.

Το δέκατο κεφάλαιο επικεντρώνεται στην οικονομική ανάλυση του υβριδικού συστήματος ώστε να αξιολογηθεί η προστιθέμενη αξία του αποθηκευτικού συστήματος. Για την αποτελεσματικότερη αξιολόγηση του επενδυτικού ρίσκου, χρησιμοποιείται η μέθοδος Monte-Carlo σύμφωνα με την οποία προκύπτουν πορίσματα για τη βιωσιμότητα της επένδυσης.

Το ενδέκατο κεφάλαιο συνοψίζει τα πορίσματα των παραπάνω ερευνών και προτείνει ένα πλαίσιο λειτουργίας για την ομαλή ένταξη και απορρόφηση των υβριδικών συστημάτων στην αγορά ενέργειας.

6. Βάση Συγκριτικής Ανάλυσης

Η εισαγωγή της έρευνας παρουσίασε τους λόγους για τους οποίους η προσθήκη των αποθηκευτικών συστημάτων παρουσιάζει οφέλη για όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη, πέραν του επενδυτή που χρήζει διερεύνησης και είναι το αντικείμενο έρευνας της εργασίας. Κύριο μέλημα για την αξιολόγηση προσθήκης ενός αποθηκευτικού συστήματος για τον επενδυτή αποτελεί η αύξηση της κερδοφορίας σε βαθμό που δικαιολογεί το κεφάλαιο που αρχικά διοχετεύει και το ρίσκο που αναλαμβάνει.

Βάση για να αξιολογηθούν τα παραπάνω, είναι η μοντελοποίηση των δύο εκδοχών, «απλού» και υβριδικού συστήματος και να αποτιμηθεί η συνεισφορά της μπαταρίας σε βάθος χρόνου. Στις περισσότερες χώρες όπου έχει υλοποιηθεί πλήθος τέτοιων έργων, υπάρχει η αντίστοιχη κρατική στήριξη καλύπτοντας ένα ποσό των κεφαλαιακών εξόδων που καθιστά την επένδυση πιο ελκυστική. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι ΗΠΑ, όπου μέχρι το τέλος του 2021 κάλυπταν τα κόστη επένδυσης της μπαταρίας κατά 30% εάν αυτές φορτιζόνταν αποκλειστικά από ΑΠΕ ή 22.5% εάν η συνεισφορά τους αποτελούσε τουλάχιστον 75% της συνολικής φόρτισης. [5] Μέσω της συγκριτικής ανάλυσης προκύπτει το αντίστοιχο πόρισμα οικονομικής βιωσιμότητας για τα ελληνικά δεδομένα και αξιολογείται η ανάγκη ύπαρξης ενός πλαισίου στήριξης υβριδικών έργων.

Το αποθηκευτικό σύστημα σε ένα έργο ΑΠΕ μπορεί να λειτουργήσει με διάφορους προσανατολισμούς, όπως το να αποθηκεύει «χαμένη» ενέργεια που λόγω περιορισμών θα περικοπτόταν, να αυξάνει την μέση τιμή πώλησης της ενέργειας απελευθερώνοντας ενέργεια τις ώρες υψηλών τιμών ή να διορθώνει την στοχαστικότητα παραγωγής. Στην παρούσα έρευνα εξετάζεται η λειτουργία του ενεργειακού arbitrage και η λειτουργία αντιμετώπισης των σφαλμάτων πρόβλεψης που εμπίπτουν στην δεύτερη και τρίτη κατηγορία αντίστοιχα.

Ο προσανατολισμός χρήσης της μπαταρίας εξαρτάται άμεσα από τις συνθήκες της αγοράς ενέργειας καθώς και τα χαρακτηριστικά του πάρκου. Η λειτουργία του ενεργειακού arbitrage παρουσιάζει μεγάλη κερδοφορία όταν υπάρχει μεγάλη μεταβλητότητα στις ωριαίες τιμές συστήματος και δημιουργούνται μεγάλες αποκλίσεις μέσα στην ημέρα. Η διαφορά τιμών που προκύπτει επιτρέπει στο υβριδικό σύστημα να φορτίζει τις ώρες χαμηλών τιμών και να αποφορτίζει τις ώρες υψηλής ζήτησης, αυξάνοντας έτσι την μέση τιμή πώλησης ενέργειας. Αντίστοιχα, η λειτουργία αντιμετώπισης των σφαλμάτων πρόβλεψης παρουσιάζει μεγάλη εξοικονόμηση χρημάτων για τον παραγωγό όταν η πρόγνωση παραγωγής της προηγούμενης μέρας αποκλίνει από την πραγματική παραγωγή την ώρα φυσικής παράδοσης. Αυτό συμβαίνει όταν το πλήθος και το μέγεθος των πάρκων που μπαίνει στην διαδικασία δήλωσης παραγωγής είναι μικρό, οπότε δεν αλληλοεξουδετερώνονται οι αποκλίσεις πρόβλεψης ή όταν το μοντέλο πρόγνωσης δεν εκμεταλλεύεται σωστά τα μετεωρολογικά στοιχεία που του εισάγονται. Στην περίπτωση αυτή η λειτουργία μείωσης σφάλματος καλύπτει το μεγάλο σφάλμα που υπό άλλες

συνθήκες θα επιβάρυνε τον καταναλωτή σε μορφή ποινής ή χαμηλής τιμής πώλησης και η κερδοφορία του συστήματος αυξάνεται.

Για την συγκριτική ανάλυση συνεπώς υπολογίζεται ο ετήσιος τζίρος του έργου στις εξής περιπτώσεις:

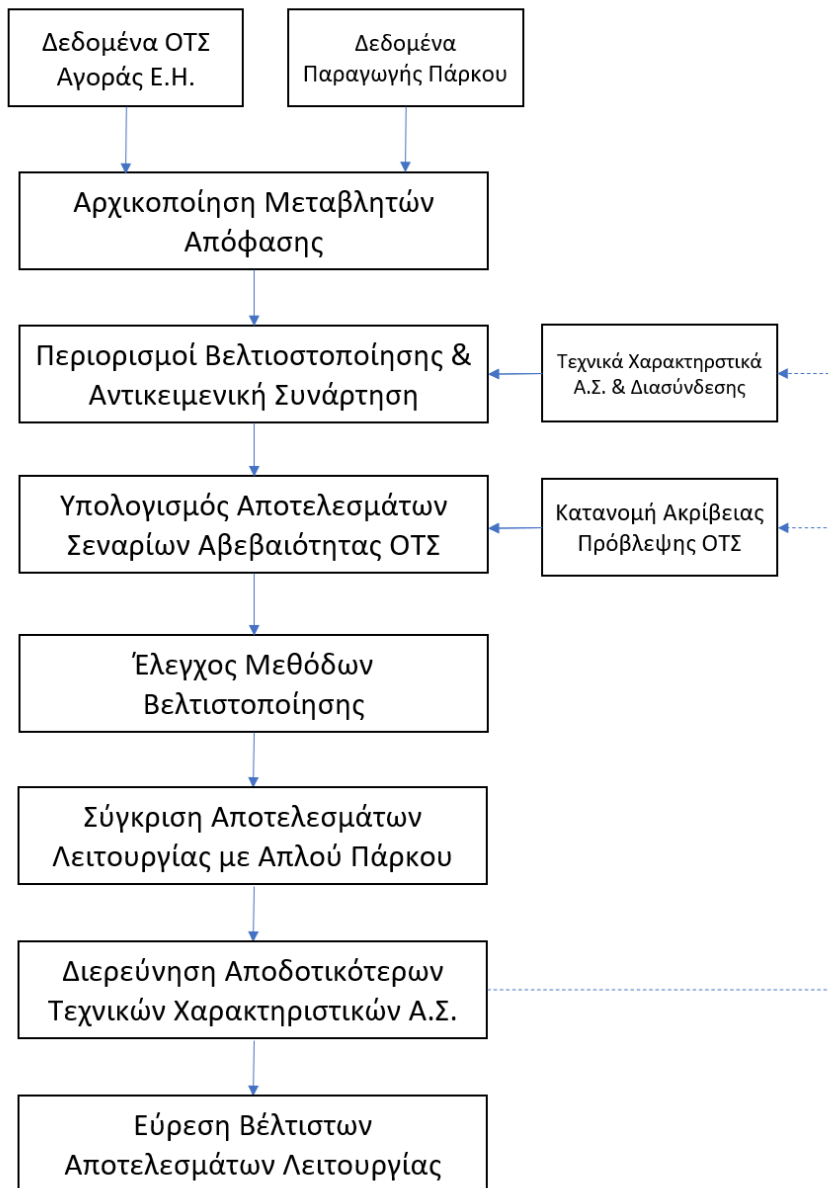
- Αιολικό πάρκο με PPA (feed-in tariff)
- Αιολικό πάρκο με συμμετοχή στο ENEX (Αγορά Επόμενης Ημέρας)
- Υβριδικό σύστημα με προσανατολισμό ενεργειακού arbitrage
- Υβριδικό σύστημα με προσανατολισμό αντιμετώπισης σφαλμάτων πρόβλεψης

Για την ανάλυση και βελτιστοποίηση λειτουργίας του υβριδικού συστήματος χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη PuLP, ένα μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού της γλώσσας python. Εισάγοντας τα δεδομένα πάρκου και αγοράς και καταστρώνοντας τις γραμμικές εξισώσεις και την αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου, οι solvers της βιβλιοθήκης υπολογίζουν την βέλτιστη τιμή συνάρτησης, που αντιστοιχεί στην βέλτιστη ημερήσια λειτουργία του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, για την επίλυση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν οι solvers GLPK και COIN-OR CLP/CBC και τα αποτελέσματα που προέκυψαν αποτυπώνονται στο [κεφάλαιο 9](#).

6.1 Λειτουργία Ενεργειακού Arbitrage

Η περιγραφή λειτουργίας του ενεργειακού arbitrage ξεκινάει από το διάγραμμα ροής, του οποίου οι επιμέρους διεργασίες αναλύονται στην πορεία της εργασίας. Η συλλογιστική του διαγράμματος αφορά το στήσιμο του μοντέλου βελτιστοποίησης λειτουργίας και τις επιμέρους δοκιμές τεχνικών χαρακτηριστικών, ώστε να προκύψουν τα αποτελέσματα της καλύτερης δυνατής διαμόρφωσης εντός ενός ρεαλιστικού πλαισίου λειτουργίας.

Στον πίνακα 1 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής:

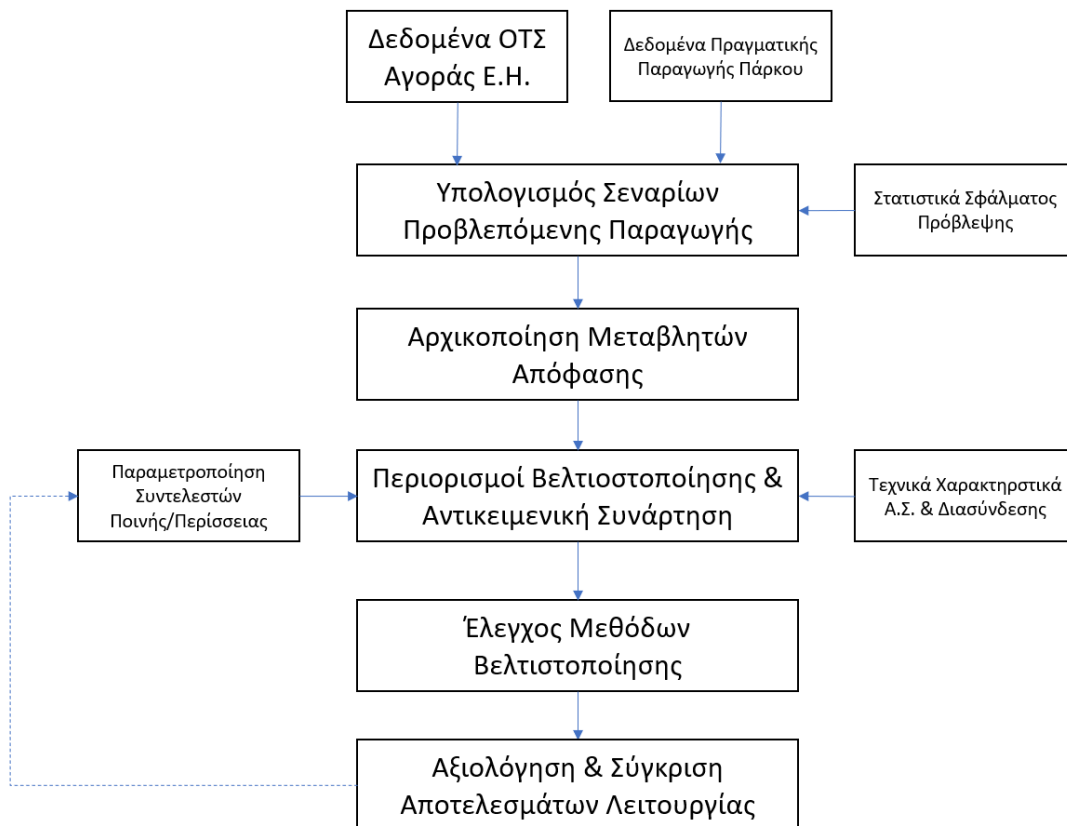


Πίνακας 1: Διάγραμμα ροής για την λειτουργία ενεργειακού arbitrage

6.2 Λειτουργία Μείωσης Σφαλμάτων Πρόβλεψης

Η αντίστοιχη δομή μοντελοποίησης ισχύει και για την λειτουργία μείωσης σφαλμάτων. Μοναδική διαφορά αποτελεί το γεγονός ότι η παραπάνω λειτουργία προαπαιτεί υποθέσεις για το ύψος των τιμών αγοράς εξισορρόπησης βάσει των οποίων γίνεται ο εκκαθαρισμός αποκλίσεων παραγωγής. Οι παραπάνω τιμές με την σειρά τους καθορίζουν την αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου γραμμικού προγραμματισμού. Η ανάλυση της λειτουργίας εμπεριέχει μια παραμετρική διερεύνηση για τους παραπάνω συντελεστές, σύμφωνα με τους οποίους προκύπτει ένα εύρος αποτελεσμάτων λειτουργίας.

Στον πίνακα 2 αποτυπώνεται το διάγραμμα ροής:



Πίνακας 2: Διάγραμμα ροής για την λειτουργία μείωσης σφαλμάτων πρόβλεψης

7. Δομή Μοντέλου Βελτιστοποίησης

Για την αναπαράσταση λειτουργίας των υβριδικών συστημάτων χρειάστηκε να στηθούν δύο προγράμματα βελτιστοποίησης σύμφωνα με τα οποία η μπαταρία θα φορτίζεται, θα αποφορτίζεται ή θα παραμένει αμέτοχη σε κάθε ώρα. Οι παραπάνω επιλογές βασίζονται σε ορισμένα δεδομένα εισαγωγής:

- την ωριαία παραγωγή του πάρκου
- τις οριακές τιμές συστήματος για την ΑΕΗ

Ενώ, παράλληλα, οι μεταβλητές απόφασης πρέπει να υπακούν σε περιορισμούς όπως:

- την χωρητικότητα ενέργειας της μπαταρίας
- τον περιορισμό ισχύος της μπαταρίας (battery to generation capacity)
- τον περιορισμό ισχύος διασύνδεσης (POI Capacity)
- τους περιορισμούς μη αρνητικότητας των μεταβλητών απόφασης (αντίθετη ροή ενέργειας)

Στην παραπάνω μοντελοποίηση καθοριστικό ρόλο διαδραματίζουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος μερικά από τα οποία παραμετροποιούνται για την καλύτερη εξαγωγή πορισμάτων και εμπεριέχονται αναλυτικά στον [πίνακα 3](#).

Η μαθηματική διατύπωση του μοντέλου σύμφωνα με την οποία προέκυψε η βέλτιστη λειτουργία του συστήματος διακρίνεται στις μεταβλητές απόφασης, των οποίων οι τιμές καθορίζονται από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης, στους περιορισμούς που αυτές πρέπει να υπακούν και στην αντικειμενική συνάρτηση που εν προκειμένω είναι η κερδοφορία του συστήματος και επιθυμούμε να μεγιστοποιήσουμε.

7.1 Λειτουργία Ενεργειακού Arbitrage

Στόχος του μοντέλου βελτιστοποίησης είναι να βρεθεί η ωριαία εξαγόμενη τιμή ενέργειας στην αγορά που μεγιστοποιεί το κέρδος του συστήματος. Η λειτουργία του ενεργειακού arbitrage βασίζεται στην ικανότητα φόρτισης της μπαταρίας τις ώρες χαμηλών ΟΤΣ και αποφόρτισης τις ώρες υψηλών, εκμεταλλευόμενη την μεταβλητότητα των τιμών ενέργειας. Η παραπάνω διαδικασία, ωστόσο, φράζεται από περιορισμούς που αφορούν την μπαταρία ή το ηλεκτρικό δίκτυο. Οι αποφάσεις για την εκμετάλλευση των παραπάνω διακυμάνσεων λαμβάνονται χρονικά κατά την δήλωση παραγωγής στην ΑΕΗ. Οι παραγωγοί που συμμετέχουν στην αγορά επόμενης ημέρας οφείλουν να καταβάλλουν τις προσφορές τους, οι οποίες αφορούν χρονικές περιόδους 12-36 ώρες μετά, την πρώτη και την τελευταία ώρα της αυριανής ημέρας. Συνεπώς, ο παραγωγός πρέπει να δηλώσει και να ρυθμίσει την λειτουργία φόρτισης-αποφόρτισης χωρίς να έχει ακριβή επίγνωση των τιμών ή της παραγωγής του, που θα οριστικοποιηθούν μετά τις δηλώσεις για την ΑΕΗ. Εφόσον η παραπάνω αβεβαιότητα είναι μεγάλη, μπορεί να στοιχίσει στον προγραμματισμό, εκτελώντας λάθος αποφάσεις φόρτισης και εκφόρτισης, μειώνοντας την κερδοφορία του συστήματος. Στην πορεία εξετάζεται η επιρροή της ακρίβειας πρόβλεψης οριακής τιμής συστήματος στα αποτελέσματα λειτουργίας του μοντέλου.

Αναλυτικότερα, οι μεταβλητές απόφασης:

- $e_w(i)$ = ποσό ενέργειας ωριαίας περιόδου i που μεταφέρεται από Α/Γ στο ηλ. σύστημα
- $e_c(i)$ = ποσό ενέργειας ωριαίας περιόδου i που μεταφέρεται από Α/Γ στην μπαταρία
- $e_d(i)$ = ποσό ενέργειας ωριαίας περιόδου i που μεταφέρεται από μπαταρία στο ηλ. σύστημα

Ο ορίζοντας βελτιστοποίησης είναι ημερήσιος για να αντιστοιχεί με το χρονοδιάγραμμα της ΑΕΗ και τα αποτελέσματα του προγραμματισμού να μπορούν να εφαρμοστούν στο πλαίσιο λειτουργίας της. Πιο συγκεκριμένα, η κάθε μεταβλητή απόφασης περιέχει 24 τιμές για κάθε ωριαία περίοδο της «επόμενης ημέρας» κι ο παραγωγός δηλώνει ως ωριαία εξαγόμενη ενέργεια το άθροισμα:

$$Εξαγόμενη_Ενέργεια(i) = e_w(i) + e_d(i), \text{ για } i = 1, 2, \dots, 24$$

Ακολουθούν οι περιορισμοί κατάστρωσης του προβλήματος:

Περιορισμός άνω και κάτω ορίων μεταβλητών απόφασης :

$$0 \leq e_w(i) \leq \text{Μέγιστη } \Omega\text{ριαία Παραγωγή Πάρκου}$$

$$0 \leq e_c(i) \leq \text{Δυναμικότητα Ισχύος Μπαταρίας}$$

$$0 \leq e_d(i) \leq \text{Δυναμικότητα Ισχύος Μπαταρίας}$$

Η αρνητική τιμή των μεταβλητών θα υποδηλώνει αντίθετη ροή ενέργειας από αυτήν που επιθυμούμε, ενώ η ενέργεια φόρτισης και εκφόρτισης περιορίζεται στο άνω άκρο της από τη δυναμικότητα ισχύος της μπαταρίας σε ωριαία βάση

Αρχή Διατήρησης Ενέργειας:

$$e_w(i) + e_c(i) = \text{Παραγωγή}(i)$$

Η παραγόμενη ενέργεια από το αιολικό πάρκο, δηλαδή, ισούται με την ενέργεια που κατευθύνεται απευθείας στο ηλεκτρικό δίκτυο και την ενέργεια που κατευθύνεται προς φόρτιση της μπαταρίας

Περιορισμός σημείου διασύνδεσης:

$$e_w(i) + e_d(i) \leq P_t$$

Η εξαγόμενη ενέργεια, δηλαδή, δεν πρέπει να υπερβαίνει τον περιορισμό ισχύος του σημείου διασύνδεσης

Στάθμη φόρτισης της μπαταρίας:

$$0 \leq B_{soc}(i) = \sum_1^i \left(\frac{e_c(i)}{\eta_{\text{φόρτισης}}} - e_d(i) \right) \leq B_{max}$$

Η στάθμη φόρτισης της μπαταρίας φράσσεται ως την μέγιστη ενεργειακή χωρητικότητα της ενώ, όπως είναι λογικό, η τιμή που αντιστοιχεί στην τελευταία ώρα της ημέρας ορίζεται ως εναρκτήριο τιμή για την επόμενη:

$$B_{soc(d-1)}(t = 24) = B_{soc(d)}(t = 1)$$

Αντικειμενική Συνάρτηση Βελτιστοποίησης:

$$Z = \sum_1^{8760} OT_{\Sigma_{AEH}}(i) (e_w(i) + \eta_{\text{εκφόρτισης}} * e_d(i))$$

Η αντικειμενική συνάρτηση υπολογίζει την βέλτιστη τιμή των ετήσιων εσόδων του υβριδικού συστήματος, τα οποία συγκρίνονται με την απλή περίπτωση έργου ΑΠΕ που συμμετέχει στο EN.EX:

$$\text{Σύγκριση Αντικειμενικής} = \sum_1^{8760} OT_{\Sigma_{AEH}}(i) * \text{Παραγωγή}(i)$$

Η διαφορά που προκύπτει αποτελεί το ετήσιο ποσό προσαύξησης του τζίρου που προσφέρει η μπαταρία στο σύστημα. Σε καμία εκ των δύο περιπτώσεων δεν υπολογίζεται η απώλεια κερδοφορίας λόγω σφαλμάτων πρόβλεψης, καθώς είναι κοινή και για τις δύο περιπτώσεις και απλοποιείται κατά την σύγκριση.

7.2 Λειτουργία Μείωσης Σφαλμάτων Πρόβλεψης

Αντίστοιχη λογική μοντελοποίησης χρησιμοποιείται και για την λειτουργία αποφυγής σφαλμάτων πρόβλεψης. Ειδοποιός διαφορά στις δύο λειτουργίες είναι η χρονική στιγμή λήψης των αποφάσεων. Σε αντίθεση με το ενεργειακό arbitrage όπου οι εντολές φόρτισης και εκφόρτισης έχουν δοθεί κατά την δήλωση παραγωγής στην ΑΕΗ, στην περίπτωση αυτή οι εντολές καθορίζονται λίγο πριν την ώρα της φυσικής παράδοσης όταν και οι αποκλίσεις μεταξύ πραγματικής και προγραμματιζόμενης ενέργειας έχουν καθοριστεί. Σε αυτή την χρονική στιγμή λαμβάνονται οι αποφάσεις φόρτισης, όταν η πραγματική παραγωγή έχει υποτιμηθεί στον προγραμματισμό και η ενέργεια θα πωλούνταν σε έκπτωση ως «περίσσεια» και εκφόρτισης όταν η παραγωγή έχει υπερεκτιμηθεί και υπό άλλες συνθήκες ο παραγωγός θα πλήρωνε πρόστιμο. Με τον παραπάνω τρόπο, το αποθηκευτικό σύστημα καταφέρνει να εξισορροπεί τις αστοχίες πρόβλεψης και να ελαχιστοποιεί τις δαπάνες που δημιουργούνται λόγω στοχαστικότητας των ΑΠΕ.

Για την μοντελοποίηση της παραπάνω λειτουργίας, οι περιορισμοί μπαταρίας και διασύνδεσης ακολουθούν την ίδια λογική, ενώ ως μεταβλητές απόφασης υπάρχουν μόνο οι e_c και e_d που συμμετέχουν στην αντικειμενική συνάρτηση. Οι παραπάνω μεταβλητές εκμεταλλεύονται μόνο τις αποκλίσεις προβλεπόμενης και πραγματικής παραγωγής:

$$\text{Forecasting Error}(i) = \text{Forecasted Production}(i) - \text{Actual Production}(i)$$

Αυτό συμβαίνει καθώς οι αποφάσεις έπονται χρονικά της δήλωσης παραγωγής και περαιτέρω αλλοίωση της δηλωμένης παραγωγής θα δημιουργούσε μεγαλύτερο κόστος από penalties.

Προφανώς ισχύει ότι εάν υπάρχει έλλειμα ενέργειας:

$$\text{Forecasting Error} \geq 0 \rightarrow e_c = 0$$

$$0 \leq e_d \leq \text{Forecasting Error}$$

Ενώ, στην περίπτωση περίσσειας ενέργειας:

$$\text{Forecasting Error} \leq 0 \rightarrow e_d = 0$$

$$0 \leq e_c \leq |\text{Forecasting Error}|$$

Εάν το σφάλμα ξεπερνά σε τιμή τον περιορισμό ισχύος της μπαταρίας, τότε ως άνω όριο των μεταβλητών απόφασης ορίζεται:

$$0 \leq e_{c,d}(i) \leq \text{Battery power capacity}$$

Ισχύουν, αντίστοιχα, οι περιορισμοί μπαταρίας παρότι τα τεχνικά χαρακτηριστικά βέλτιστης λειτουργίας ενδεχομένως να διαφέρουν ανά λειτουργία του αποθηκευτικού συστήματος:

$$0 \leq B_{soc}(i) = \sum_1^i \left(\frac{e_c(i)}{\eta_{charge}} - e_d(i) \right) \leq B_{max}$$

Η αντικειμενική συνάρτηση, τέλος, έχει την μορφή:

$$Z = \sum_1^{8760} c_p * SMP(i) * e_d(i) - c_d * SMP(i) * e_c(i)$$

Όπου c_p αντιστοιχεί στην σταθερά χρέωσης του ελλείματος ενέργειας και c_d στην σταθερά έκπτωσης που αγοράζεται η περίσσεια ενέργειας

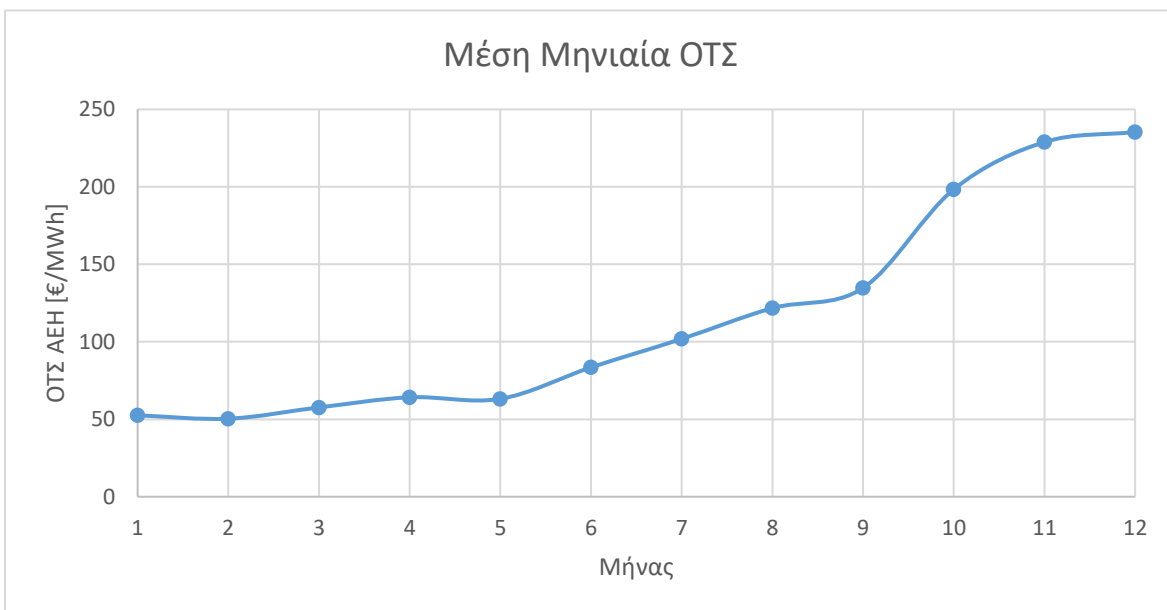
8. Δεδομένα Εισαγωγής

Τα δεδομένα που εισήχθησαν στο μοντέλο λειτουργίας αφορούν την παραγωγή ενός πρότυπου αιολικού πάρκου και τις τιμές της αγοράς ενέργειας. Τα παραπάνω δεδομένα επιδιώχθηκε να συμπίπτουν χρονικά, ώστε να αποτυπωθεί κατά το δυνατόν η συσχέτιση αιολικού δυναμικού και οριακής τιμής συστήματος.

8.1 Δεδομένα Αγοράς

Τα δεδομένα αγοράς αφορούν την Αγορά Επόμενης Ημέρας για το έτος 2021. Το συγκεκριμένο έτος παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς εμπεριέχει τόσο την αρχική προ ενεργειακής κρίσης κατάσταση, όσο και την σταδιακή αύξηση που υπήρξε στις τιμές φυσικού αερίου που παρέσυραν μαζί τους και την ΟΤΣ.

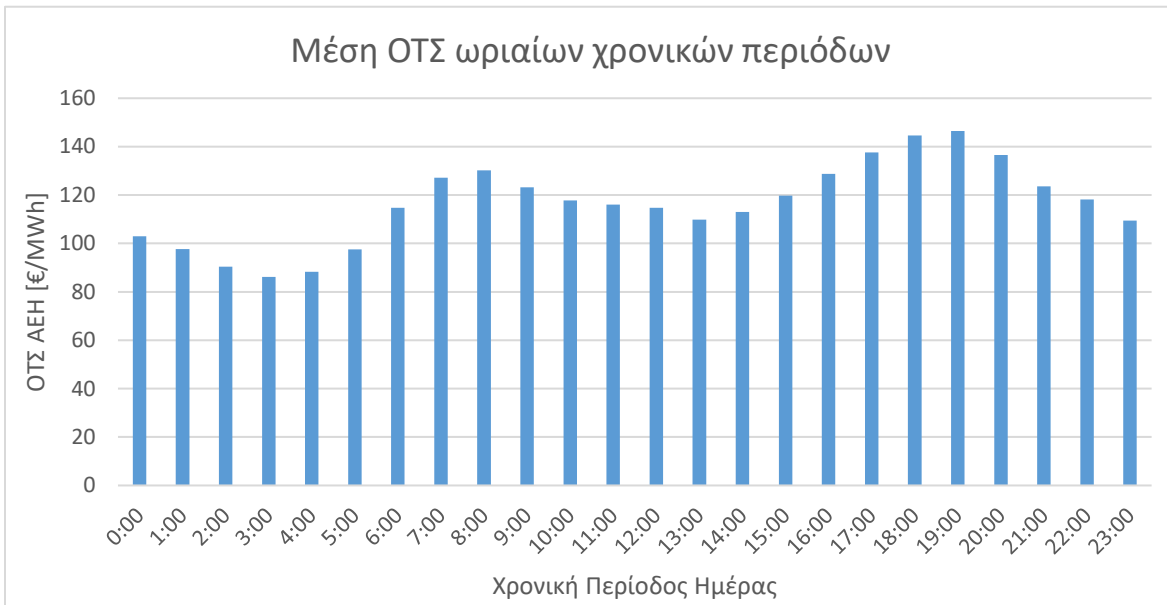
Το σχήμα 3 εμφανίζει την μέση μηνιαία ΟΤΣ για το 2021:



Σχήμα 3: Μηνιαία μέση τιμή ΟΤΣ για την Αγορά Επόμενης Ημέρας του έτους 2021

Το 2^ο τετράμηνο του έτους παρατηρείται γραμμική αύξηση της μέσης οριακής τιμής συστήματος και η τάση αυτή εντείνεται περαιτέρω το τελευταίο τετράμηνο, όπου παρατηρούνται μέσες τιμές πώλησης ενέργειας άνω των 200 €/MWh.

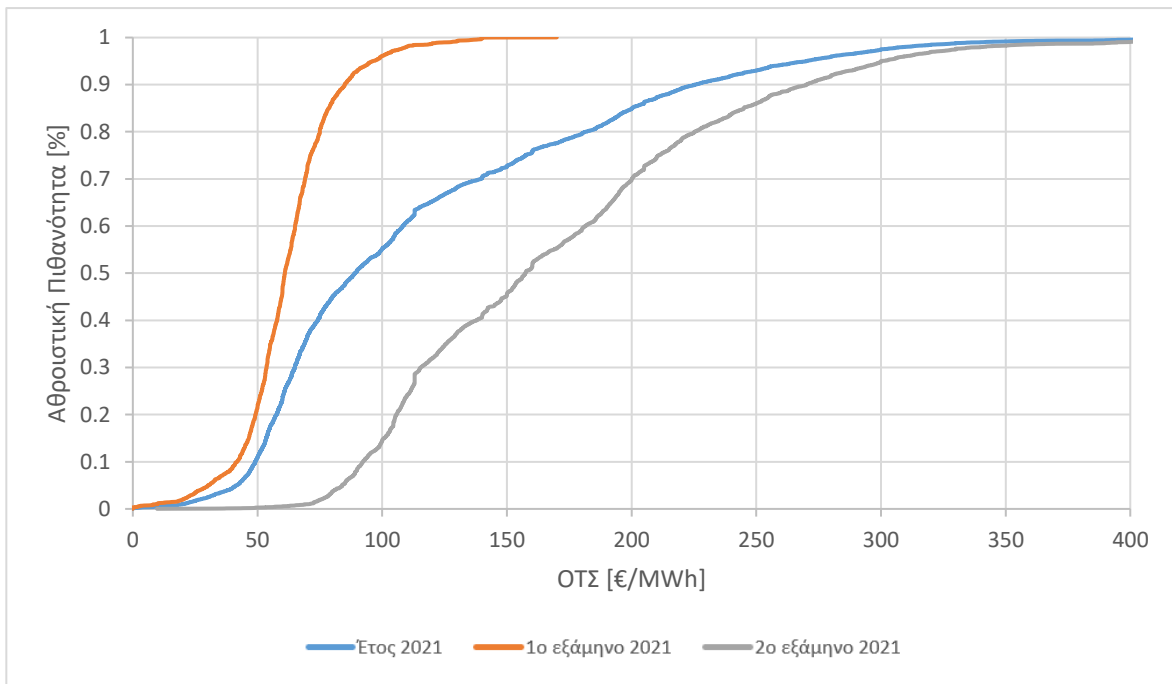
Αντίστοιχα αποτυπώνεται και η μέση διακύμανση των τιμών μέσα στην ημέρα:



Σχήμα 4: Ένδειξη μέσης ημερήσιας μεταβλητότητας για την Αγορά Επόμενης Ημέρας για το έτος 2021

Το ξημέρωμα παρατηρείται μια καμπή στην ΟΤΣ λόγω μειωμένης ζήτησης, ενώ οι υψηλότερες ΟΤΣ προκύπτουν τις ώρες αιχμής του πρωινού και του απογεύματος. Στις υψηλές απογευματινές τιμές συμβάλλει και το γεγονός ότι μειώνεται η ηλιακή ακτινοβολία με αποτέλεσμα να υπάρχει χαμηλή παραγωγή από τα ΦΒ. Παρατηρούμε ότι το εύρος μέσων τιμών εντός μιας ημέρας κυμαίνεται από 86 €/MWh, που είναι η ελάχιστη τιμή ενέργειας της χρονικής περιόδου 3:00-4:00 το ξημέρωμα, έως 146 €/MWh για την χρονική περίοδο 19:00-20:00 το απόγευμα.

Τέλος, στο σχήμα 5 παρουσιάζεται το διάγραμμα αθροιστικών πιθανοτήτων για όλη την χρονιά μαζί με τις καμπύλες του πρώτου και δευτέρου εξαμήνου:



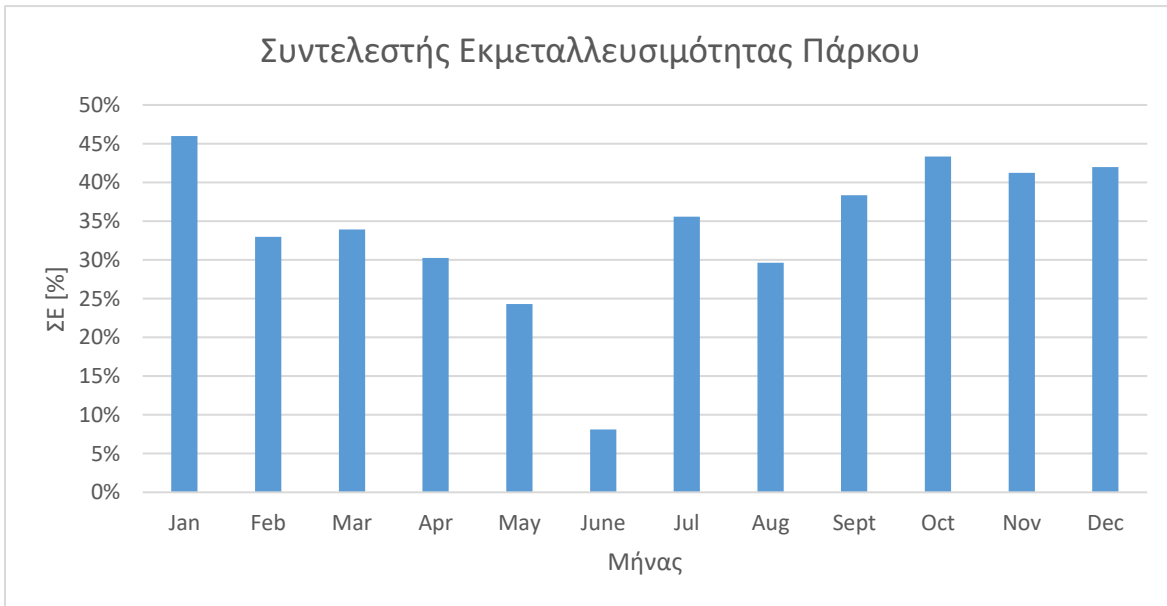
Σχήμα 5: Διαγράμματα αθροιστικών πιθανοτήτων για το 1^ο και 2^ο εξάμηνο του έτους καθώς και του έτους συνολικά

Οι καμπύλες αθροιστικής πιθανότητας του σχήματος 5 δίνουν την ευρύτερη εικόνα της αγοράς ενέργειας για το έτος. Στο πρώτο μισό τους έτους, πέραν του χαμηλού μέσου όρου τιμών, η μεγάλη κλίση της καμπύλης αναδεικνύει την πολύ χαμηλή διακύμανση των τιμών τόσο σε ενδοημερήσιο όσο και σε μηνιαίο επίπεδο. Αντίθετα, στο δεύτερο μισό παρατηρούμε ένα τεράστιο εύρος τιμών, που συνεπάγεται μεγάλη μεταβλητότητα και το κάτω όριο του οποίου είναι αρκετά υψηλότερο από την μέση τιμή του πρώτου εξαμήνου.

8.2 Δεδομένα Πάρκου

Για τους αντίστοιχους μήνες εισάγονται τα δεδομένα αιολικής παραγωγής ενός πάρκου στην περιοχή της νότιας Εύβοιας. Η έρευνα βασίζεται σε ένα πάρκο ισχύος 24 MWp που απαρτίζεται από 6 ίδιες ανεμογεννήτριες σε περιοχή αρκετά υψηλού αιολικού δυναμικού.

Στο σχήμα 6 αποτυπώνεται ο μηνιαίος συντελεστής εκμεταλλευσιμότητας του πάρκου:

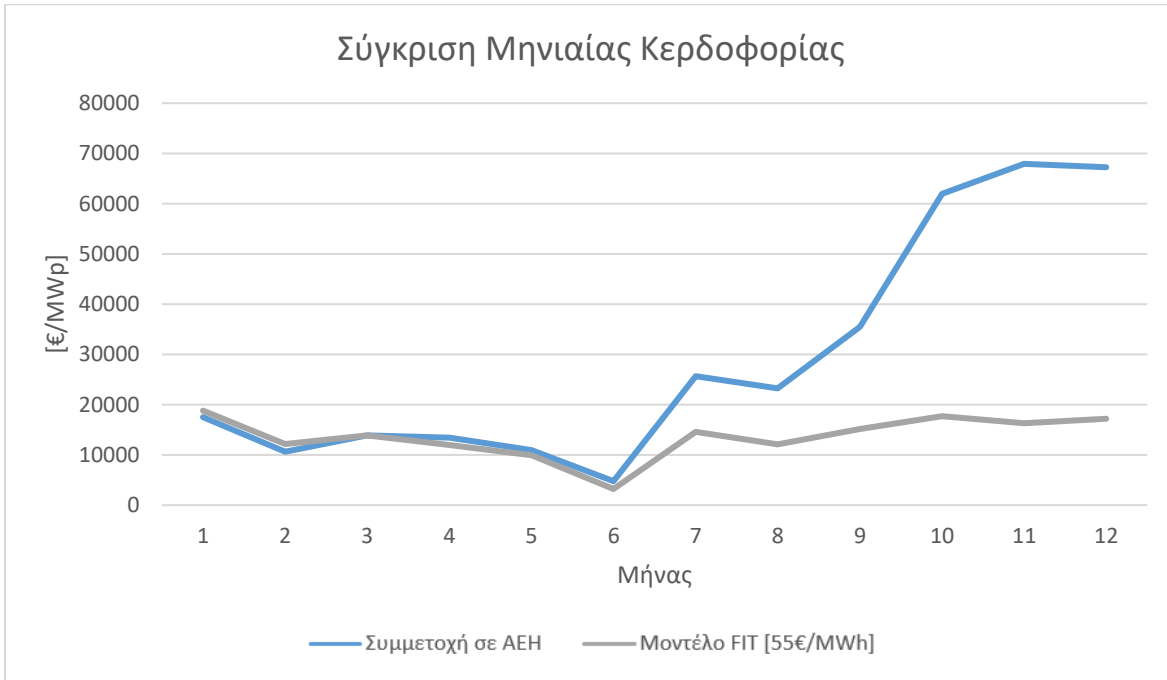


Σχήμα 6: Διάγραμμα μηνιαίου συντελεστή εκμεταλλευσιμότητας αιολικού πάρκου για το έτος 2021

Πέραν των αρκετά υψηλών συντελεστών για όλους τους μήνες παρατηρείται σημαντική μείωση της παραγωγής τον Ιούνιο με ΣΕ = 8.13%, η οποία οφείλεται και στην διαθεσιμότητα του πάρκου. Ο μέσος συντελεστής πλήρωσης είναι ΣΕ_{μέσος} = 33.8%.

Στην συνέχεια συγκρίνεται η μηνιαία απόδοση του πάρκου σε αδιαστατοποιημένες μονάδες για δύο διαφορετικές εκδοχές. Η πρώτη αφορά την μέχρι πρότινος διαδικασία λειτουργίας των μονάδων ΑΠΕ, η οποία βασίζεται σε συμβάσεις σταθερής τιμής πώλησης ρεύματος (Feed-in Tariff model), ενώ, η δεύτερη αφορά την επερχόμενη συμμετοχή των έργων ΑΠΕ στο χρηματιστήριο ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, η συμμετοχή του συγκεκριμένου έργου αφορά την Αγορά Επόμενης Ημέρας και τα αποτελέσματα βασίζονται στο σενάριο που ο παραγωγός δηλώνει αρνητικές ή μηδενικές τιμές προσφοράς ενέργειας, για να συμπεριληφθεί οπωσδήποτε στο ενεργειακό μείγμα για όλο το ποσό παραγωγής ενέργειας. Η παραπάνω υπόθεση λαμβάνεται δεδομένου ότι το περιθώριο κόστους παραγωγής ενέργειας από ένα αιολικό πάρκο είναι μηδενικό σε αντίθεση με συμβατικές μονάδες που υπάρχει κόστος καυσίμων και μπορεί να μην τους συμφέρει να παράγουν σε πολύ χαμηλές τιμές αγοράς ενέργειας.

Τα αποτελέσματα για την λειτουργία του πάρκου που χρησιμοποιείται στα δεδομένα μας με σύμβαση Feed-In-Tariff και με αποκλειστική συμμετοχή στην ΑΕΗ του EnEx παρουσιάζονται στο σχήμα 7:



Σχήμα 7: Σύγκριση κερδοφορίας μοντέλου Feed-in Tariff και συμμετοχής στην ΑΕΗ

Όπως είναι λογικό, ενώ τους πρώτους μήνες η κερδοφορία των δύο σεναρίων δεν παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις, το τελευταίο εξάμηνο η ραγδαία αύξηση των τιμών ευνοεί πολύ το σενάριο συμμετοχής του πάρκου στο χρηματιστήριο ενέργειας, δημιουργώντας πολλαπλάσια κέρδη. Στην καμπύλη του πάρκου που συμμετέχει στην Αγορά Επόμενης Ημέρας αγνοούνται οι αποκλίσεις προγραμματιζόμενης και πραγματικής παραγωγής, οι οποίες θα μείωναν ελαφρώς τα αποτελέσματα λειτουργίας.

Το παραπάνω διάγραμμα, καταδεικνύει ότι οι νέες τιμές σύμβασης που κυμαίνονται στα 50 με 60 €/MWh, αποφέρουν παρόμοια κέρδη σε σχέση με τις χρηματιστηριακές τιμές της ΑΕΗ, ακόμα και πριν ξεσπάσει η ενεργειακή κρίση. Συνεπώς, η ώρα μετάβασης των έργων ΑΠΕ στο επόμενο στάδιο έχει φτάσει και δεν απειλεί πλέον την βιωσιμότητα του έργου, αλλά μάλλον την καθιστά πιο ελκυστική. Η τεχνολογία των ΑΠΕ έχει πλέον ωριμάσει και το κόστος παραγωγής ενέργειας έχει πέσει σημαντικά, με αποτέλεσμα το ρίσκο κερδοφορίας του έργου λόγω αβεβαιότητας των τιμών να μειώνεται σημαντικά.

9. Αποτελέσματα Λειτουργίας

Εισάγοντας τα δεδομένα αγοράς και πάρκου και καταστρώνοντας το μοντέλο λειτουργίας σύμφωνα με τις εξισώσεις του [κεφαλαίου 7](#), προέκυψαν τα αντίστοιχα αποτελέσματα λειτουργίας. Τα αποτελέσματα αυτά διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με τις υποθέσεις και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Δεδομένου ότι η συμμετοχή αιολικών πάρκων και γενικότερα ΑΠΕ στον χρηματιστήριο ενέργειας βρίσκεται σε πιλοτικό στάδιο δεν υπάρχει πλήρης εικόνα του πλαισίου λειτουργίας. Συνεπώς, μερικές υποθέσεις και δεδομένα εισαγωγής βασίζονται στα πρότυπα συστημάτων ενέργειας του εξωτερικού ή υποθέσεις ειδικών που εργάζονται στον χώρο.

Οι τιμές των δεδομένων εισαγωγής βρίσκονται στον πίνακα 3:

Πίνακας Χαρακτηριστικών Μπαταρίας / Διασύνδεσης		
Χαρακτηριστικό	Λειτουργία Ενεργειακού Arbitrage	Λειτουργία Σφαλμάτων Πρόβλεψης
Ονομαστική Ισχύς Πάρκου [MW]	24	
Δυναμικότητα Ισχύος [MW]	25* Μέγιστη Ισχύ Πάρκου	25% * Μέγιστη Ισχύ Πάρκου
Διάρκεια Ισχύος [ώρες]	1 – 2 – 4	1 – 2
ηφόρτισης [%]	92.7	
ηεκφόρτισης [%]	92.7	
η _{ground-trip} [%]	86	
Χρόνος Ζωής [έτη]	20	
Περιορισμός Διασύνδεσης	Μέγιστη Ισχύς Πάρκου – Μέγιστης Ισχύς Πάρκου + Μπαταρίας	

Πίνακας 3: Τεχνικά στοιχεία υβριδικού συστήματος

Με bold σκίαση σημειώνονται οι τιμές του βασικού σεναρίου λειτουργίας που προέκυψαν ως βέλτιστες επιλογές από την διερεύνηση παραμετροποίησης των αποτελεσμάτων.

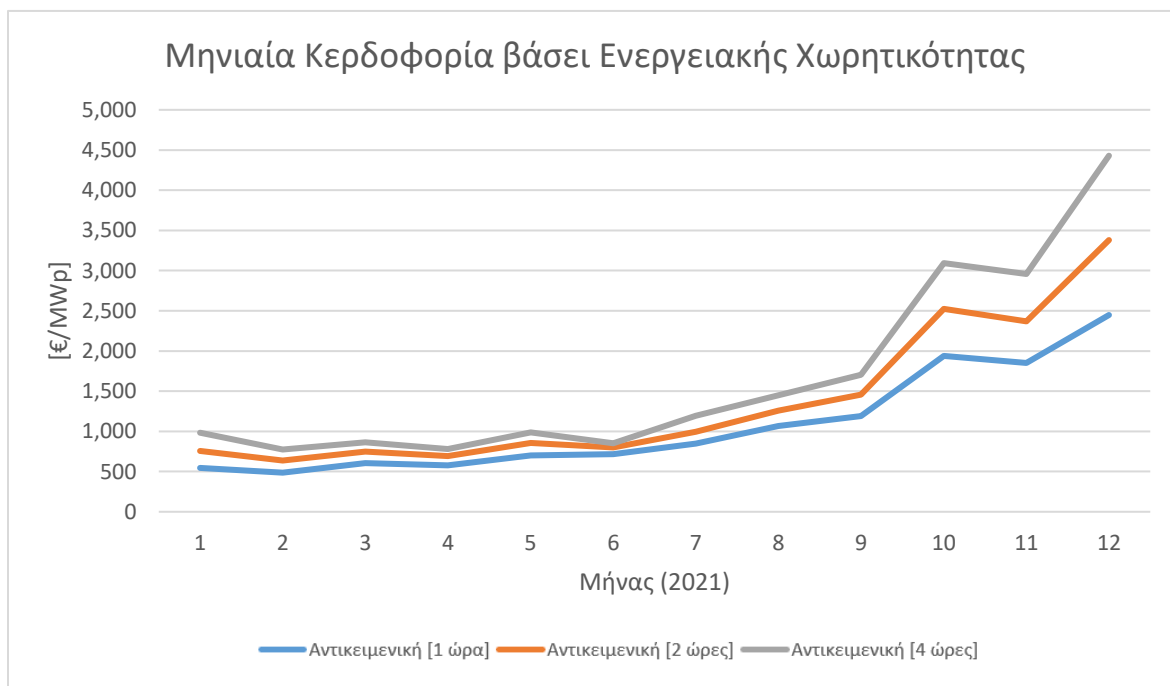
9.1 Λειτουργία Ενεργειακού Arbitrage

9.1.1 Διερεύνηση Ενεργειακής Χωρητικότητας Μπαταρίας

Η λειτουργία του ενεργειακού arbitrage χαρακτηρίζεται από την ικανότητα συσσώρευσης ενέργειας σε χαμηλές τιμές ενέργειας και αποφόρτισης μεγάλων ποσών ενέργειας όταν οι τιμές αυξάνουν. Προϋπόθεση για την αποδοτική λειτουργία της μεθόδου αποτελεί η μπαταρία να έχει μεγάλη χωρητικότητα ενέργειας ώστε να μπορεί να εκμεταλλευτεί πλήρως την μεταβλητότητα των τιμών συναλλάσσοντας μεγάλα ποσά ενέργειας. Συνεπώς, οριοθετώντας το battery-to-generation capacity στο 25%, σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία, ελέγξαμε τα αποτελέσματα λειτουργίας για 3 τιμές χωρητικότητας που παρουσιάζονται ως ποσοστό επί της μέγιστης ισχύος του πάρκου:

- 25% (1 hr duration)
- 50% (2 hrs duration)
- 100% (4 hrs duration)

Ο επιπρόσθετος μηνιαίος τζίρος που παράχθηκε από την μπαταρία αποτυπώνεται παρακάτω, έχοντας αδιαστατοποιηθεί ως προς την μέγιστη ισχύ του πάρκου:

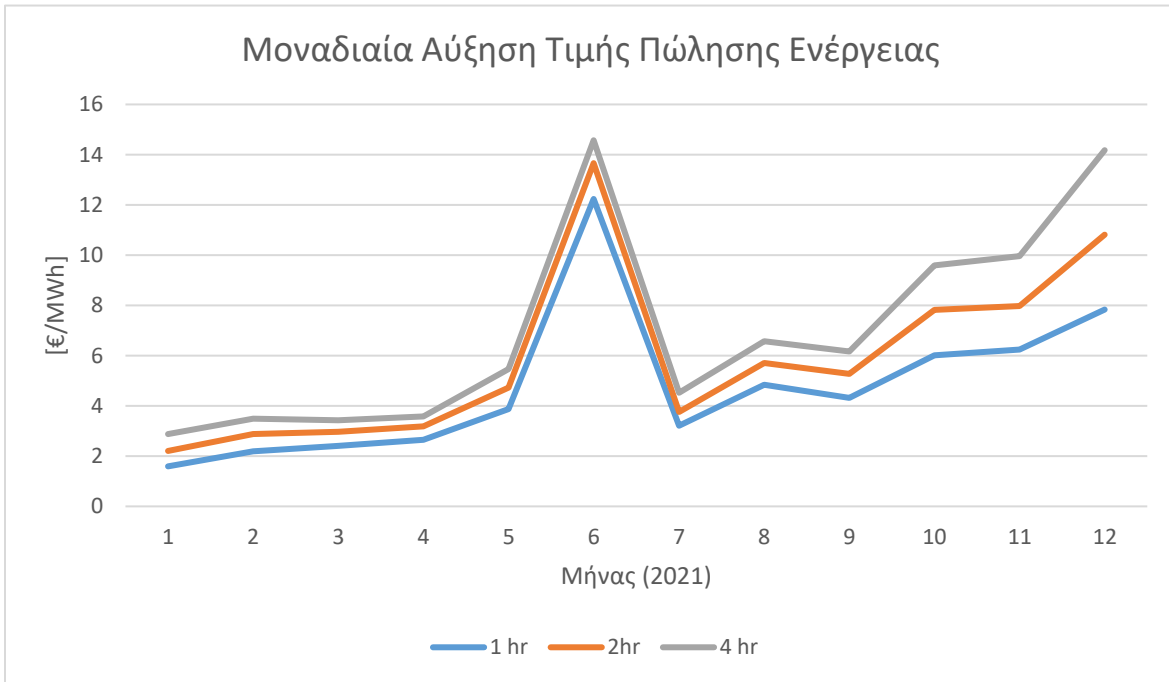


Σχήμα 8: Περιπτώσεις κερδοφορίας ενεργειακού arbitrage σύμφωνα με την ενεργειακή χωρητικότητα της μπαταρίας

Στο σχήμα 8 παρατηρείται ότι για τους πρώτους μήνες η αυξημένη ενεργειακή χωρητικότητα της μπαταρίας δεν αυξάνει ιδιαίτερα τα κέρδη του συστήματος και τα γενικότερα έσοδα παραμένουν χαμηλά. Οι αλλαγές στα τεχνικά χαρακτηριστικά της μπαταρίας δεν αυξάνουν τα κέρδη του συστήματος, καθώς επικρατεί σταθερότητα στην αγορά ενέργειας και μικρή ημερήσια μεταβλητότητα των τιμών για τα δύο πρώτα

τετράμηνα. Τα έσοδα για όλες τις περιπτώσεις μένουν χαμηλά αφού εμφανίζονται λίγες ευκαιρίες για arbitrage και ακόμα και σε αυτές, οι τιμές του συστήματος είναι αρκετά χαμηλά. Αντίθετα, το τελευταίο τετράμηνο όπου χαρακτηρίζεται από μεγάλη μεταβλητότητα αλλά και υψηλές τιμές ΟΤΣ, τα έσοδα αυξάνονται σημαντικά και η αύξηση χωρητικότητας παρουσιάζει σημαντικές διαφορές στην κερδοφορία.

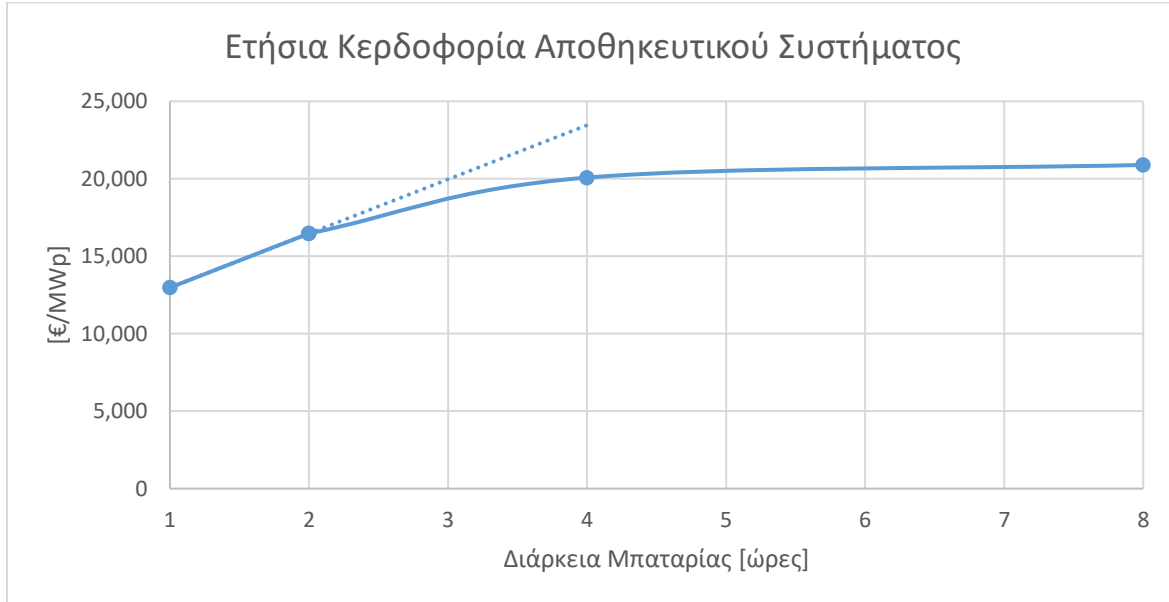
Οι παραπάνω παρατηρήσεις είναι εμφανείς και στο σχήμα 9 που παρουσιάζει τη μέση αύξησης τιμής πώλησης της ενέργειας:



Σχήμα 9: Περιπτώσεις αύξησης μέσης τιμής πώλησης ενέργειας σύμφωνα με την ενεργειακή χωρητικότητα της μπαταρίας

Παρατηρούμε ότι οι διαφορετικές χωρητικότητες αποθηκευτικού συστήματος αποδίδουν σχεδόν το ίδιο για τους πρώτους μήνες και τα αποτελέσματα τους αρχίζουν να αποκλίνουν από τον όγδοο μήνα και μετά. Ενδιαφέρον, ωστόσο, παρουσιάζει η κατακόρυφη αύξηση της μέσης τιμής πώλησης για τον Ιούνιο, δίχως να υπάρχει αντίστοιχη κερδοφορία στο [σχήμα 8](#) για τον μήνα αυτό. Η χαμηλή παραγωγή του πάρκου για τον μήνα αυτό (βλ. [σχήμα 6](#)) έδωσε την δυνατότητα στο αποθηκευτικό σύστημα να αποφορτίζει μεγάλο κομμάτι της στην υψηλότερη τιμή κάθε ημέρας, δημιουργώντας έτσι αύξηση της μέσης τιμής πώλησης κατά 12-15 €/MWh για μικρό όγκο ενέργειας.

Για την διερεύνηση της βέλτιστης ενεργειακής χωρητικότητας υπολογίστηκαν τα ετήσια έσοδα για κάθε περίπτωση που αποτυπώνονται στο σχήμα 10:



Σχήμα 10: Σύγκριση ετήσιας κερδοφορίας βάσει ενεργειακής χωρητικότητας μπαταρίας για την λειτουργία του ενεργειακού arbitrage

Παρατηρούμε ότι η αύξηση χωρητικότητας από 1 σε 2 ώρες, επιφέρει γραμμική αύξηση των εσόδων και η τάση αυτή φθίνει για τις περιπτώσεις των 4 και 8 ωρών. Δεδομένου ότι για τόσο μικρές αλλαγές τα κεφαλαιακά κόστη της μπαταρίας συμπεριφέρονται επίσης γραμμικά, επιλέξαμε ως επιλογές διερεύνησης τις 1 και 2 ώρες, που αντιστοιχούν σε ενεργειακή χωρητικότητα ίση με 25% και 50% της μέγιστης ισχύος του πάρκου.

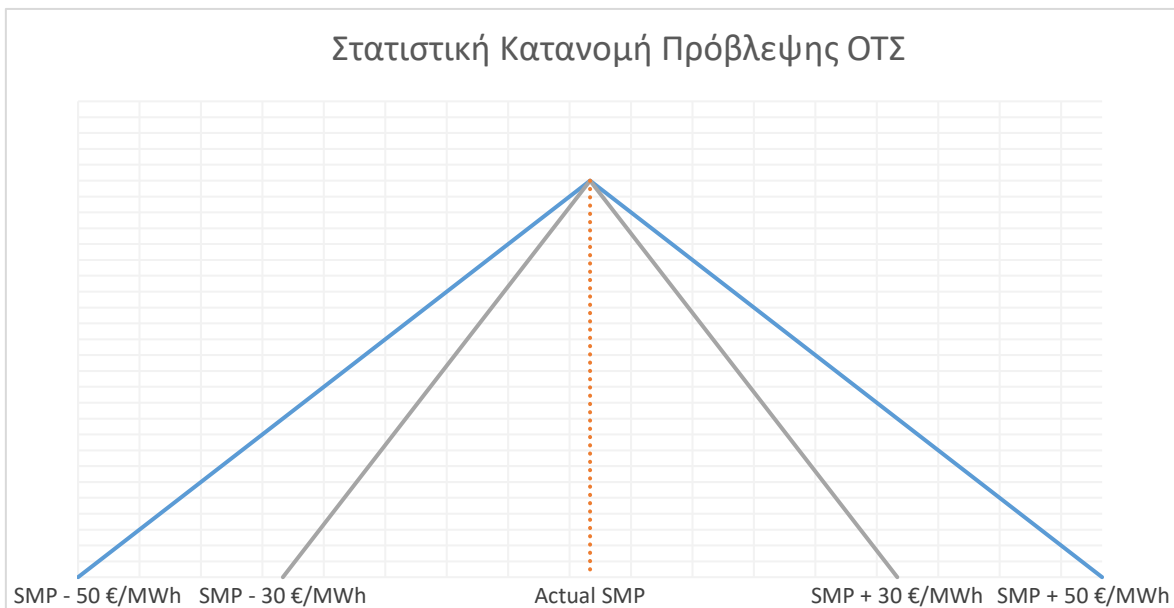
9.1.2 Διαχείριση Αβεβαιοτήτων Πρόβλεψης

Σημαντικό ρόλο στην αποδοτική λειτουργία του arbitrage διαδραματίζει η ικανότητα πρόβλεψης των τιμών ΟΤΣ, καθώς κατά την δήλωση παραγωγής δεν είναι γνωστές ακόμα οι τιμές επόμενης ημέρας που θα προκύψουν. Η ΟΤΣ εξαρτάται από πλήθος παραγόντων που ανάμεσα σε άλλα, αφορούν την δυναμικότητα και την διαθεσιμότητα αιολικών, φωτοβολταϊκών και υδροηλεκτρικών σε εθνικό επίπεδο, τις μετεωρολογικές συνθήκες της κάθε ώρας, το ισοζύγιο εισαγωγών-εξαγωγών με συνορεύοντα κράτη και την τιμή προμήθειας των ορυκτών καυσίμων. Ως αποτέλεσμα, η εκ των προτέρων πρόβλεψη των τιμών που θα οριστούν είναι σύνθετη και εμπεριέχει αβεβαιότητα.

Η παραπάνω αβεβαιότητα με την σειρά της δημιουργεί προβλήματα στην λειτουργία του αποθηκευτικού συστήματος, καθώς ενδέχεται να οδηγήσει σε λανθασμένες αποφάσεις φόρτισης και εκφόρτισης, οι οποίες να ήταν βέλτιστες για τις τιμές που προβλέφθηκαν, αλλά είναι ζημιολογικές για τα πραγματικά δεδομένα.

Η ανάλυση συνεπώς, επιδιώκει να εντάξει την αβεβαιότητα πρόβλεψης των τιμών στα αποτελέσματα λειτουργίας, εντάσσοντας την παραπάνω μεταβλητή εισαγωγής σε μια πιθανοτική κατανομή. Η κατανομή που επιλέχθηκε για την ΟΤΣ είναι η τριγωνική και δοκιμάστηκαν δύο περιπτώσεις ακρίβειας πρόβλεψης. Ως αποκλίσεις ορίστηκαν απόλυτες τιμές έναντι ποσοστού επί της επικρατούσας τιμής καθώς η ακρίβεια πρόβλεψης επιθυμούμε να παραμένει σταθερή και όχι να αυξάνει με την πάροδο του χρόνου.

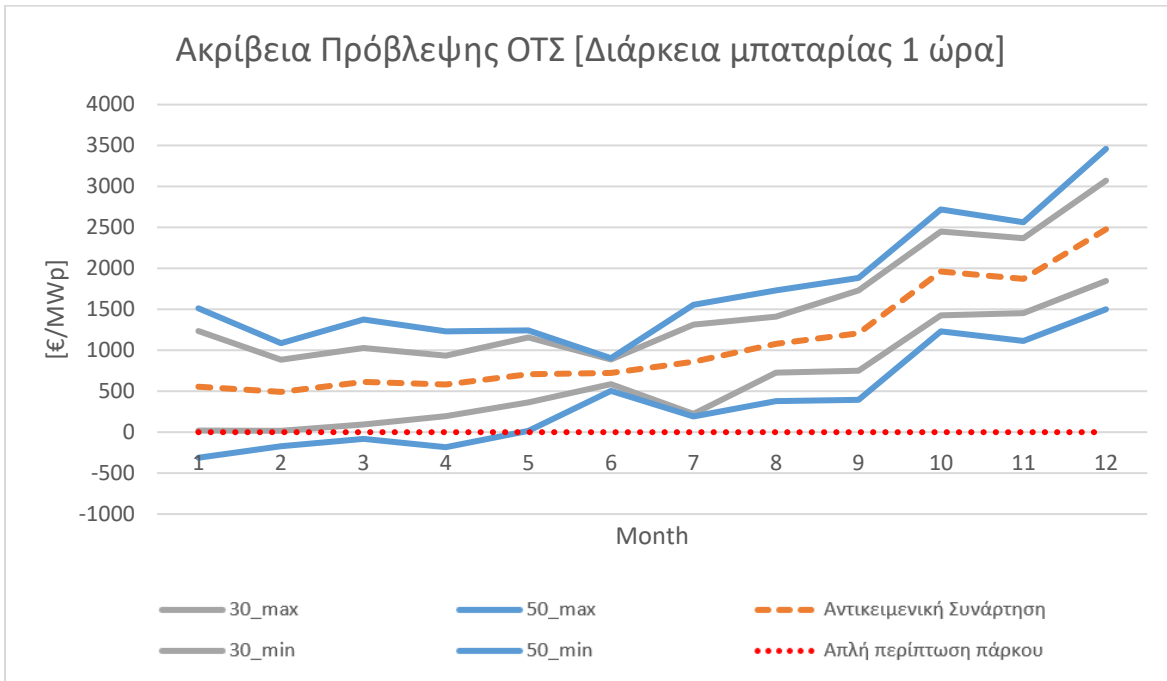
Οι κατανομές έχουν την παρακάτω μορφή:



Σχήμα 11: Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης ΟΤΣ

Οποιαδήποτε τιμή προέκυψε αρνητική μέσω των υπολογισμών της κατανομής αυτομάτως οριοθετήθηκε ως 0 για να είναι λογική η πρόβλεψη τιμής, δεδομένου ότι αρνητική τιμή συστήματος δεν έχει πρακτικό νόημα και δεν εμφανίστηκε στο έτος 2021.

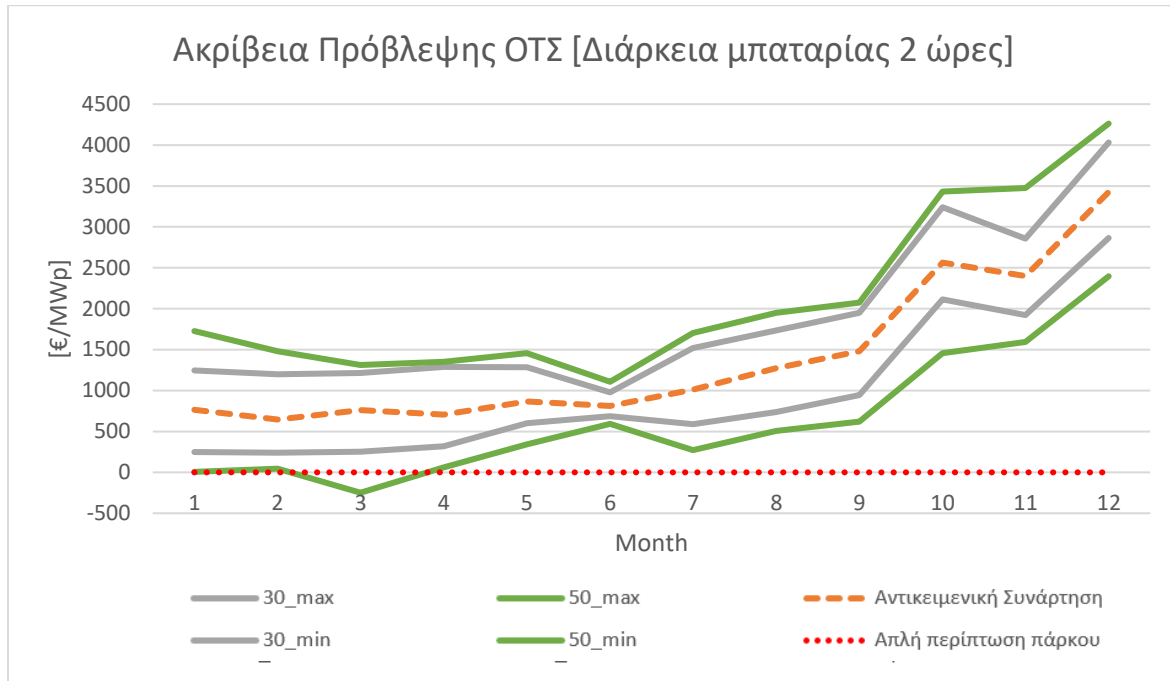
Τα αντίστοιχα αποτελέσματα λειτουργίας εντάσσοντας την αβεβαιότητα πρόβλεψης τιμών, συγκρίνονται με τις τιμές απλής λειτουργίας του αιολικού που αντιστοιχεί στην καμπύλη μηδενικού κέρδους (κόκκινο) και την αντικειμενική συνάρτηση (πορτοκαλί) στο σχήμα 12:



Σχήμα 12: Σενάρια κερδοφορίας για κάθε εύρος πρόβλεψης ΟΤΣ για μπαταρία διάρκειας 1 ώρας

Στην περίπτωση του σχήματος 12 για μπαταρία διάρκειας 1 ώρας παρατηρούμε ότι το υψηλό ποσοστό αβεβαιότητας στις ΟΤΣ μπορεί να είναι ζημιογόνο, καθώς μεγάλες αστοχίες στην πρόβλεψη σε μικρή μεταβλητότητα τιμών, συνεπάγεται λανθασμένες στιγμές φόρτισης και εκφόρτισης. Παράλληλα, ακόμα και αν η τιμή εκφόρτισης σε μία συνθήκη είναι μεγαλύτερη της τιμής φόρτισης, δεν συνεπάγεται κερδοφορία αφού πρέπει το κέρδος να αντισταθμίζει και τη χαμένη ενέργεια που εντάσσεται στο βαθμό απόδοσης της μπαταρίας.

Η αντίστοιχη διερεύνηση γίνεται και για την λειτουργία μπαταρίας 2 ωρών:



Σχήμα 13: Σενάρια κερδοφορίας για κάθε εύρος πρόβλεψης ΟΤΣ για μπαταρία διάρκειας 2 ωρών

Συνολικά, παρατηρείται ότι ακόμα και στην τριγωνική κατανομή απόκλισης 50 €/MWh που συνεπάγεται τυπική απόκλιση $\sigma = 20.4 \text{ €/MWh}$, η δυσμενέστερη περίπτωση σε 100 επαναλήψεις προκύπτει κερδοφόρα συγκριτικά με την περίπτωση του απλού ασύζευκτου αιολικού και για τις δύο περιπτώσεις. Η παραπάνω παρατήρηση δεν καθιστά το έργο οικονομικά βιώσιμο σε κάθε περίπτωση, ωστόσο, είναι ενδεικτική της ακρίβειας που απαιτείται για την αποδοτική λειτουργία του arbitrage.

Το ετήσια έσοδα από την λειτουργία του arbitrage σύμφωνα με την αντικειμενική συνάρτηση, που συνεπάγεται ακριβής πρόβλεψη τιμών, αντιστοιχούν σε 13,150 και 16,700 €/MWh, που για το πάρκο 24 MWh που ερευνούμε υπολογίζονται σε:

$$Revenues (1 \text{ hr battery cap.}) = 13.150 \frac{\text{€}}{\text{MWh} * \text{year}} * 24 \text{ MWh} = 315.000 \frac{\text{€}}{\text{year}}$$

$$Revenues (2 \text{ hrs battery cap.}) = 16.700 \frac{\text{€}}{\text{MWh} * \text{year}} * 24 \text{ MWh} = 400.000 \frac{\text{€}}{\text{year}}$$

Αντίστοιχα, ο πίνακας 4 παρουσιάζει τις υπόλοιπες περιπτώσεις:

Forecasting Accuracy	Worst Case [€/MWh έτος]		Best Case [€/MWh έτος]	
ΟΤΣ ± 30 €/MWh (1 hr/2 hrs)	7.700	11.510	18.470	22.540
ΟΤΣ ± 50 €/MWh (1 hr/2 hrs)	4.580	7.641	21.270	25.326
Τέλεια Πρόβλεψη (1 hr/2 hrs)	13.130		16.700	

Πίνακας 4: Σενάρια κερδοφορίας για κάθε εύρος πρόβλεψης ΟΤΣ για μπαταρία διάρκειας 1 και 2 ωρών

9.1.3 Διερεύνηση Περιορισμού Ισχύος Σημείου Διασύνδεσης

Ο περιορισμός ισχύος του σημείου διασύνδεσης αποτελεί ένα στοιχείο που διαφέρει σε κάθε πάρκο. Για την διάταξη στην οποία βασίζεται η παραπάνω ανάλυση έχει ληφθεί η υπόθεση ότι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να εξέρχεται ισούται με την μέγιστη δυνατότητα παραγωγής του πάρκου. Η θεώρηση αυτή ισχύει ως δυσμενέστερη περίπτωση σε όλα τα πάρκα για να μην περικόπτεται ενέργεια, ωστόσο, στην περίπτωση του υβριδικού συστήματος συνεπάγεται ότι όταν το πάρκο παράγει μέγιστη ισχύ, η μπαταρία δεν μπορεί να αποφορτίσει ενέργεια λόγω του περιορισμού διασύνδεσης.

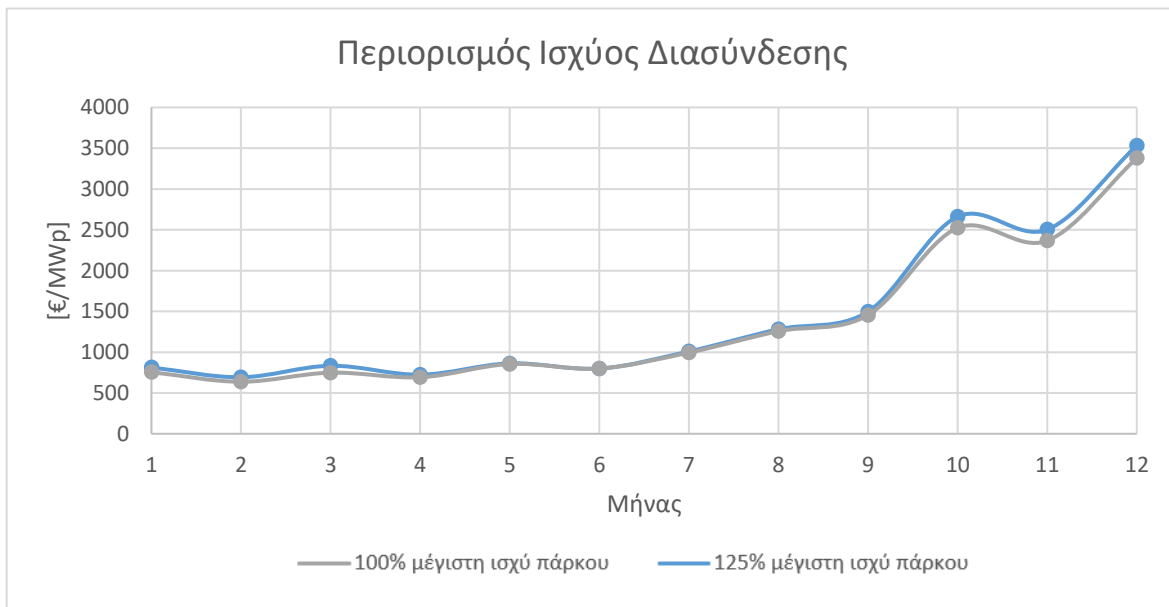
Στην ενότητα αυτή συγκρίνεται η περίπτωση που εξετάστηκε παραπάνω:

$$e_w(i) + e_d(i) \leq P_{t1} = \text{Μέγιστη Ισχύ Πάρκου}$$

Με την περίπτωση που το σημείο διασύνδεσης μπορεί να μεταφέρει την μέγιστη ισχύ και των δύο:

$$e_w(i) + e_d(i) \leq P_{t2} = \text{Μέγιστη Ισχύ Πάρκου} + \text{Δυναμικότητα Ισχύος Μπαταρίας}$$

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αδιαστατοποιημένα ως προς την μέγιστη ισχύ του πάρκου στο σχήμα 14:



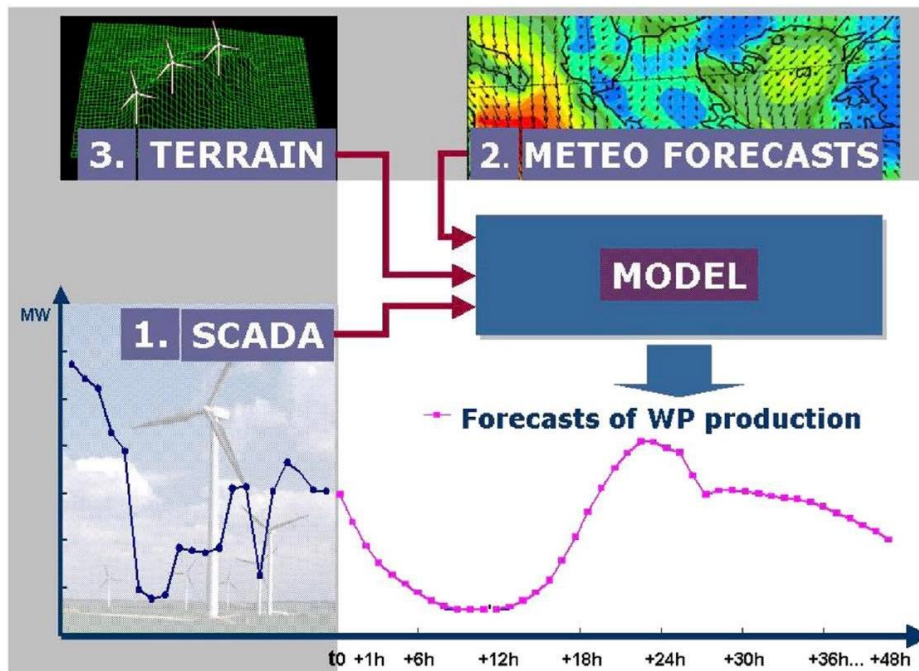
Σχήμα 14: Σύγκριση κερδοφορίας για αυξημένο περιορισμό ισχύος διασύνδεσης

Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στις δύο καμπύλες και κατ' επέκταση η αποδοτικότητα του υβριδικού συστήματος δεν επηρεάζεται από τον περιορισμό διασύνδεσης. Με άλλα λόγια, είναι σπάνιες οι φορές που οι υψηλές τιμές παραγωγής συνδυάζονται με υψηλές τιμές ΟΤΣ, ώστε η μπαταρία να μην μπορεί να αποφορτιστεί την στιγμή εκείνη.

9.2 Λειτουργία Μείωσης Σφαλμάτων Πρόβλεψης

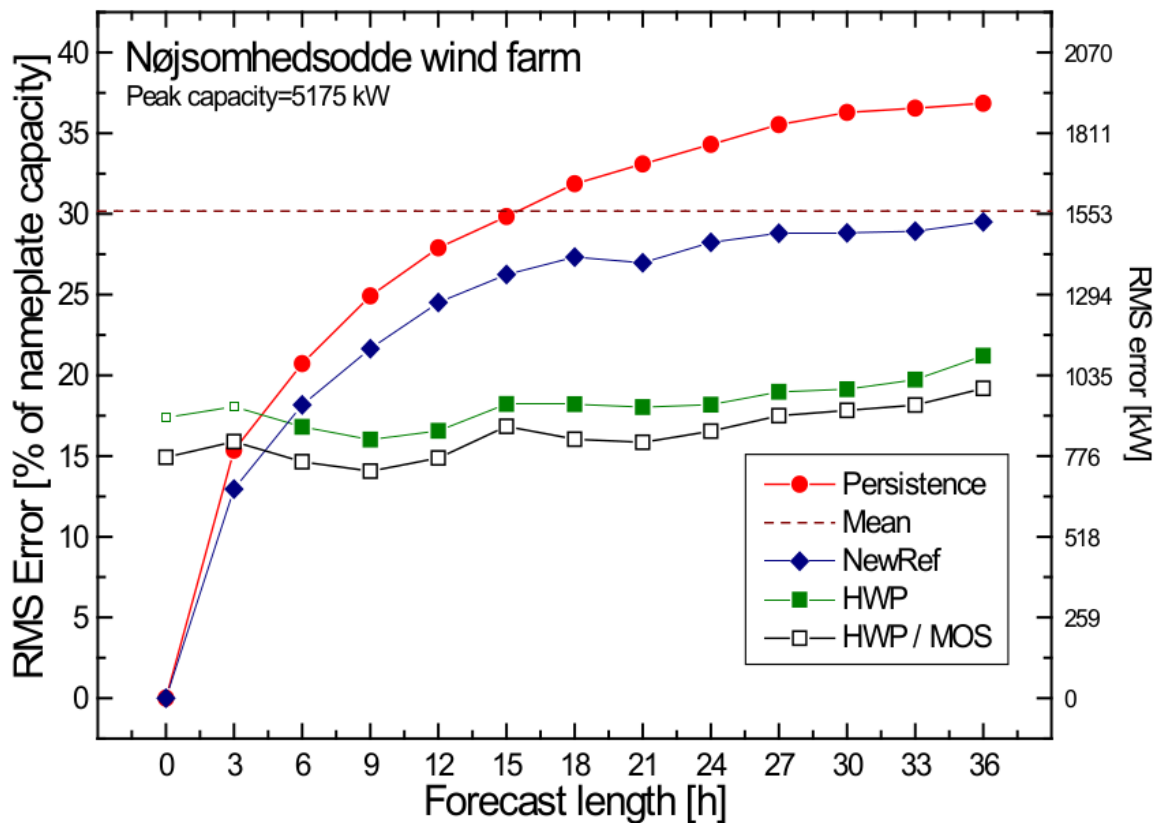
Η πρόβλεψη παραγωγής ενός αιολικού πάρκου αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία που είναι προαπαιτούμενη για την συμμετοχή του στην Αγορά Επόμενης Ημέρας. Τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται και η βαρύτητα που δίνεται στο καθένα για την πρόβλεψη αυτής διαφέρουν ανάλογα με τον ορίζοντα πρόβλεψης. Πιο συγκεκριμένα, σύντομες προβλέψεις με ορίζοντα μικρότερο των 6 ωρών βασίζονται κυρίως σε στατιστικές προσεγγίσεις σύμφωνα με τις τελευταίες τιμές παραγωγής που προέρχονται από τα συστήματα SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) του πάρκου. Όσο αυξάνεται ο ορίζοντας πρόβλεψης, οι υπολογισμοί βασίζονται παραπάνω σε μετεωρολογικές προβλέψεις οι οποίες ερμηνεύονται σε συνάρτηση με την ιδιαίτερη μορφολογία κάθε σημείου τοποθέτησης ανεμογεννήτριας. Όλα τα εργαλεία, συμπεριλαμβανομένων και των προβλέψεων καιρού που εντάσσονται στα NWP (Numerical Weather Prediction) μοντέλα περιορίζονται σε ορίζοντα πρόβλεψης έως 48 ώρες. [7]

Η εικόνα 2 παρουσιάζει τις διαθέσιμες πηγές δεδομένων, οι οποίες αποκτούν διαφορετική βαρύτητα εντός του μοντέλου ανάλογα με τον ορίζοντα πρόβλεψης:



Εικόνα 2: Εργαλεία μοντέλων πρόβλεψης αιολικής παραγωγής [7]

Στο σχήμα 15 αποτυπώνεται η ακρίβεια κάθε οργάνου πρόβλεψης:



Σχήμα 15: Μέσο σφάλμα οργάνων πρόβλεψης συναρτήσει του χρονικού ορίζοντα [9]

Η πράσινη και η μαύρη καμπύλη αποτελούν μετεωρολογικά μοντέλα, που αποκτούν συγκριτικό πλεονέκτημα για χρονικό ορίζοντα μεγαλύτερο των 6 ωρών, ενώ η κόκκινη και η μπλε καμπύλη αποτελούν στατιστικά μοντέλα βασισμένα σε χρονοσειρές παραγωγής και το σφάλμα τους αυξάνει σημαντικά μετά τον ορίζοντα των 3 ωρών. [9]

Η λειτουργία μείωσης σφαλμάτων εξαρτάται άμεσα από την ικανότητα πρόβλεψης της παραγωγής ενός ή περισσότερων πάρκων. Πιο συγκεκριμένα, τα περισσότερα πάρκα λειτουργούν στο χρηματιστήριο ενέργειας μέσω ενός φορέα σωρευτικής εκπροσώπησης (ΦοΣΕ), με αποτέλεσμα η συνολική παραγωγή των πάρκων που δηλώνεται να έχει κατά το δυνατόν μικρότερες αποκλίσεις έναντι μεμονωμένων δηλώσεων. Με αυτό τον τρόπο, τεράστιες τιμές αποκλίσεων που μπορεί να αντιμετώπιζε στην δήλωση του ένα μεμονωμένο πάρκο, εξισορροπούνται από τις υπόλοιπες παραγωγές και μειώνεται το ποσοστιαίο σφάλμα. Στην προκειμένη περίπτωση εξετάζεται η κερδοφορία μείωσης σφαλμάτων ενός πάρκου, αλλά η λογική παραμένει ίδια είτε το αποθηκευτικό σύστημα λειτουργεί για την κάλυψη αποκλίσεων ενός είτε περισσότερων πάρκων όταν δηλώνεται η αθροιστική παραγωγή τους.

Το σφάλμα πρόβλεψης όπως έχει αναφερθεί εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος του πάρκου/πάρκων που αντιπροσωπεύει και το διάστημα πρόβλεψης. Καθώς η δήλωση παραγωγής αφορά όλη την επόμενη μέρα, είναι λογικό οι πρώτες ώρες πρόβλεψης να έχουν μικρότερο σφάλμα συγκριτικά με τις τελευταίες. Ο ορίζοντας πρόβλεψης για τις πρώτες πρωινές ώρες είναι περίπου 12 ώρες ενώ για τις τελευταίες είναι σχεδόν 36, γεγονός που προκαλεί διαφορετικό εύρος αποκλίσεων. Βάσει της έρευνας του ευρωπαϊκού έργου ANEMOS, το μέσο σφάλμα εκτιμάται από 9-14% επί της ονομαστικής ισχύος για μεμονωμένα πάρκα, ενώ σε περιφερειακό ή εθνικό επίπεδο το αντίστοιχο ποσοστό μειώνεται στο 3-5%. [7]

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ελέγχονται 3 διακριτές περιπτώσεις που αντιστοιχούν σε κάθε συνθήκη:

- Σφάλμα 4% (περιφερειακό – εθνικό επίπεδο)
- Σφάλμα 7% (ΦοΣΕ)
- Σφάλμα 11% (μεμονωμένο πάρκο)

Για την έρευνα μας, οι τιμές πραγματικής παραγωγής προέκυψαν από τα δεδομένα του πάρκου, ενώ για κάθε μια από τις παραπάνω περιπτώσεις σφάλματος δημιουργήθηκαν οι αντίστοιχες τιμές πρόβλεψης σύμφωνα με τυχαίες τιμές από την παρακάτω μορφή κανονικής κατανομής (μέσος όρος, τυπική απόκλιση):

$$\text{Προβλεπόμενη Παραγωγή } (i, z) = K \cdot K \cdot (\text{Πραγμ. Παρ}(i), \text{st. dev.}_{\Sigma\Pi}(z) * \text{Πραγμ. Παρ}(i))$$

$$\text{όπου } z = 1,2,3 \text{ και } i = 1,2, \dots, 8760$$

Συνεπώς για κάθε ωριαία τιμή παραγωγής, προέκυψαν τρεις τιμές πρόβλεψης που αντιστοιχούν στις τρεις πιθανές περιπτώσεις σφάλματος.

Η διαδικασία εκκαθάρισης αποκλίσεων που προκύπτει από την στοχαστικότητα των ΑΠΕ αφορά την αγορά εξισορρόπησης, που αποτελεί ξεχωριστή οντότητα από την αγορά επόμενης ημέρας. Σκοπός της είναι η διόρθωση της ανισορροπίας μεταξύ παραγωγής και ζήτησης σε πραγματικό χρόνο και σύμφωνα με τις τιμές της αγοράς εξισορρόπησης καταβάλλονται οι αντίστοιχες πληρωμές στα συμβαλλόμενα μέρη με ευθύνη εξισορρόπησης για τις αποκλίσεις τους. [10] Οι παραπάνω τιμές ορίζονται από ένα νέο ισοζύγιο προσφοράς-ζήτησης σε μικρό χρονικό διάστημα πριν την φυσική παράδοση και ενώ επηρεάζονται από τις τιμές επόμενης ημέρας, δεν έχουν απαραίτητα ίδιες ή παρόμοιες τιμές. Στην παρακάτω έρευνα λαμβάνεται η λογική παραδοχή ότι η τιμή αγοράς ενέργειας στην αγορά εξισορρόπησης (BM) προκύπτει ως μια σταθερά c_p (>1) επί την εκάστοτε ΟΤΣ της ΑΕΗ και η αντίστοιχη τιμή πώλησης της περίσσειας ενέργειας ως μια σταθερά c_d (<1) επί της ΟΤΣ της ΑΕΗ.

Οι παραπάνω σταθερές ελέγχθηκαν ως 3 ζευγάρια πιθανών τιμών:

C_d [% of SMP]	C_p [% of SMP]
95%	105%
90%	110%
80%	120%

Πίνακας 5: Συντελεστές πληρωμών σε περίπτωση περίσσειας και έλλειψης ενέργειας

9.2.1 Αποτελέσματα Θεώρησης Σταθερών C_d - C_p

Η λειτουργία μείωσης σφαλμάτων πρόβλεψης διαφοροποιείται σε ανάγκες αποθήκευσης συγκριτικά με την λειτουργία του arbitrage, καθώς χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις αποκλίσεων, που συνήθως αφορούν μικρότερα ποσά ενέργειας. Προφανώς οι ανάγκες ενεργειακής χωρητικότητας διαφέρουν ανάλογα τόσο με το ποσοστό απόκλισης της πρόβλεψης όσο και με την θεώρηση σταθερών ποινής και περίσσειας. Παρατηρήθηκε ότι για όλες τις περιπτώσεις σφάλματος και συντελεστών το ποσοστό αύξηση κερδοφορίας του συστήματος με την αύξηση διάρκειας της μπαταρίας ήταν μικρότερο συγκριτικά με την περίπτωση του arbitrage που διερευνήθηκε και τα παρακάτω σενάρια εξετάστηκαν με κοινή διάρκεια μπαταρία 1 ώρας.

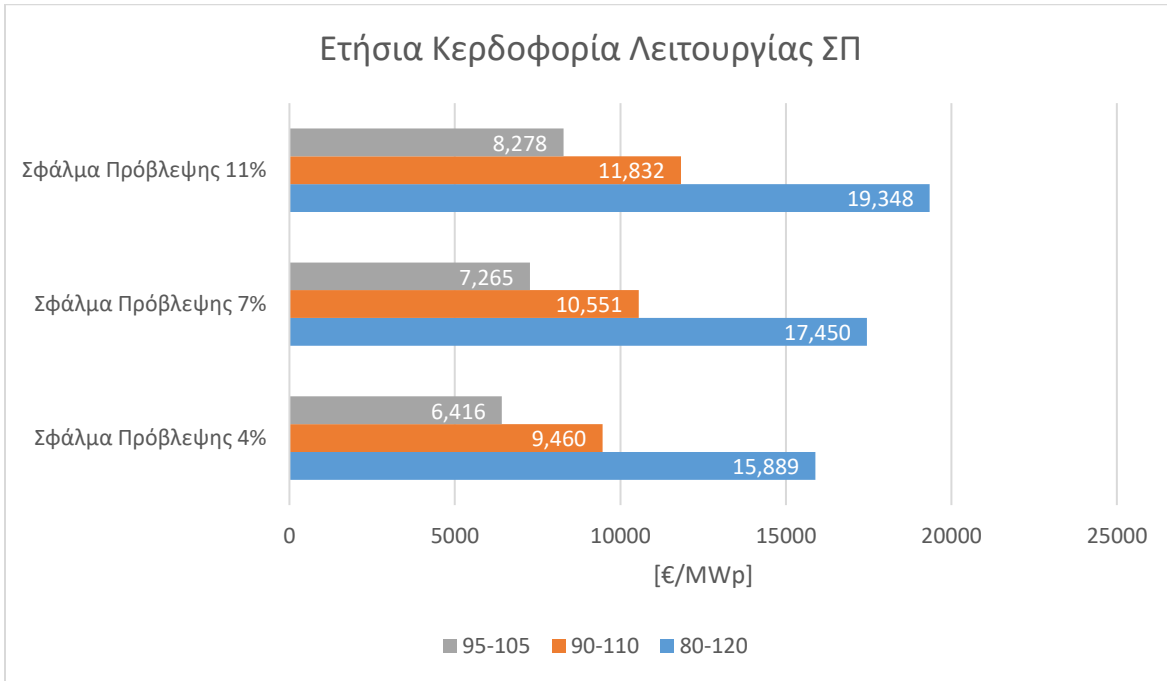
Για κάθε ζεύγος σταθερών C_d - C_p , αποτυπώθηκαν τα αντίστοιχα αποτελέσματα λειτουργίας, τα οποία σε επίπεδο οικονομικής ανάλυσης αποτελούν 3 διαφορετικά σενάρια τιμολόγησης και για κάθε περίπτωση απόκλισης, θεωρήθηκαν ως worst, base και best case scenario.

Τα αποτελέσματα λειτουργίας εμφανίζονται παρακάτω (βλ. πίνακα 6) για κάθε σενάριο απόκλισης πρόβλεψης, καθώς και τα ποσά που εξοικονομούνται αδιαστατοποιημένα ως προς την ετήσια παραγωγή του πάρκου:

Αύξηση Μέσης Τιμής Ενέργειας [€/MWh]			
Σταθερές Περίσσειας-Ποινής	Τυπική Απόκλιση Σφάλματος Πρόβλεψης 4%	Τυπική Απόκλιση Σφάλματος Πρόβλεψης 7%	Τυπική Απόκλιση Σφάλματος Πρόβλεψης 11%
95-105	2.17	2.45	2.79
90-110	3.19	3.54	3.99
80-120	5.36	5.88	6.52

Πίνακας 6: Περιπτώσεις αύξησης μέσης τιμής πώλησης ενέργειας για λειτουργία εξάλειψης σφαλμάτων

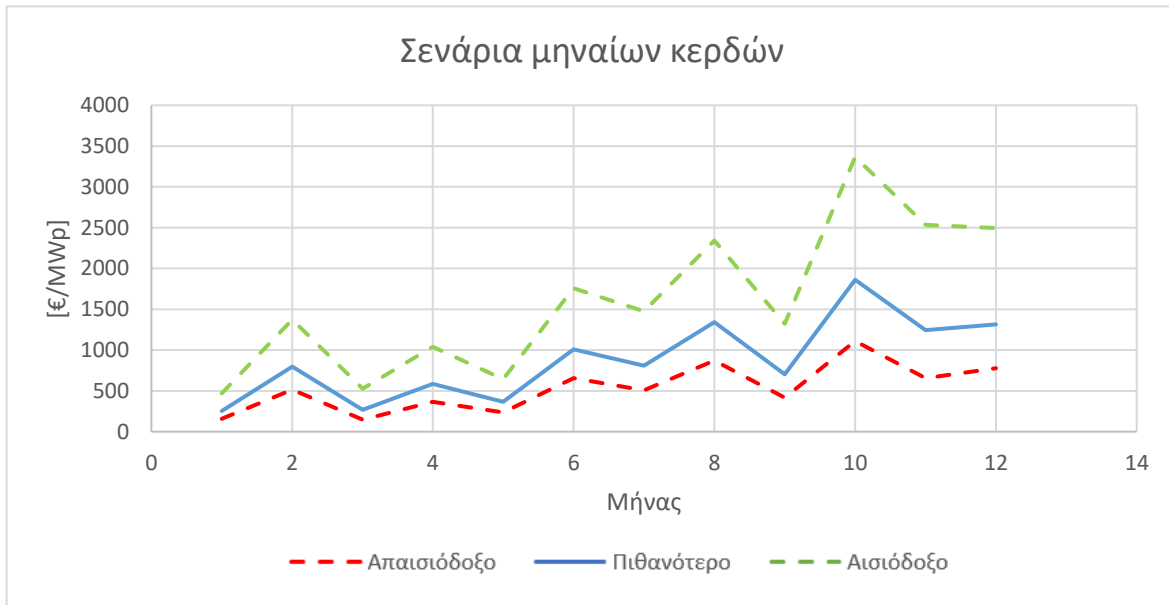
Τα αντίστοιχα αποτελέσματα από την λειτουργία αντιμετώπισης σφαλμάτων πρόβλεψις αναπαρίστανται στο σχήμα 16, αδιαστατοποιημένα ως προς την μέγιστη ισχύ του πάρκου:



Σχήμα 16: Ετήσια κερδοφορία για την λειτουργία εξάλειψης σφαλμάτων βάσει υποθέσεων

Συνεπώς, ανάλογα με την περίπτωση και το θεσμικό πλαίσιο στο οποίο εντάσσεται το πάρκο, η περίπτωση προσθήκης αποθηκευτικού συστήματος στο πάρκο 24 MWp που εξετάζουμε, μπορεί να ενισχύσει το κερδοφορία από 154.000 έως 465.000 € ετησίως.

Τα μηνιαία αποτελέσματα για την καλύτερη, την χειρότερη και πιθανέστερη περίπτωση παρουσιάζονται παρακάτω:



Σχήμα 17: Σενάρια κερδοφορίας για την λειτουργία εξάλειψης σφαλμάτων πρόβλεψης

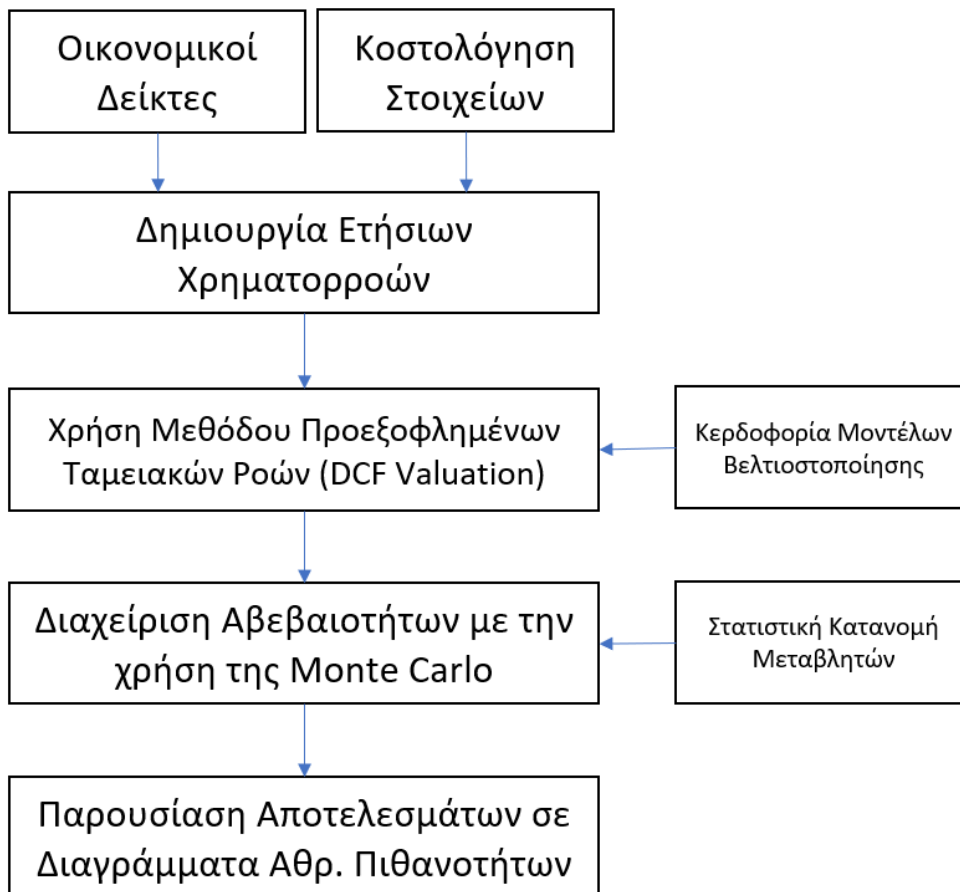
Τα παραπάνω σενάρια για κάθε εκδοχή συντελεστή σφάλματος εισάγονται ως μεταβλητές εισόδου στην οικονομική ανάλυση. Πιο συγκεκριμένα, η παραμετροποιημένη κερδοφορία που εμφανίζεται στο [σχήμα 16](#) για κάθε συντελεστή σφάλματος, εισάγεται στην οικονομική ανάλυση με μορφή τριγωνικής κατανομής. Η κερδοφορία των συντελεστών περίσσειας-ποινής 95-105 αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή της κατανομής, οι συντελεστές 90-110 στην διάμεσο και οι συντελεστές 80-120 στην μέγιστη δυνατή κερδοφορία για το εκάστοτε σφάλμα πρόβλεψης.

10. Οικονομική Ανάλυση και Διαχείριση Ρίσκου

Το κεφάλαιο της οικονομικής αξιολόγησης απoσκοπεί στην σύγκριση των παραπάνω αποτελεσμάτων λειτουργίας με την αξία αγοράς, εγκατάστασης και συντήρησης ενός αποθηκευτικού συστήματος. Για την αποτίμηση της επένδυσης χρησιμοποιείται η μέθοδος προεξοφλημένων ταμειακών ροών (DCF valuation) σε συνδυασμό με την προσομοίωση Monte Carlo για την διαχείριση των αβεβαιοτήτων των μεταβλητών.

Η Monte Carlo στη συνέχεια, με την βοήθεια τυχαίων δειγματοληψιών υποδεικνύει το εύρος οικονομικών αποτελεσμάτων που μπορούμε να λάβουμε. Τα παραπάνω αποτελέσματα αποτυπώνονται με την βοήθεια διαγραμμάτων αθροιστικής πιθανότητας ώστε να φανεί η μεταβλητότητα του αποτελέσματος, η μέγιστη και ελάχιστη τιμή καθώς και το ποσοστό του όγκου αποτελεσμάτων επιτυγχάνει την τιμή-στόχο, που εν προκειμένω είναι η ελάχιστος αποδεκτός συντελεστής απόδοσης (MARR).

Ο πίνακας 7 παρουσιάζει το διάγραμμα ροής για την διαδικασία οικονομική ανάλυσης και διαχείρισης ρίσκου:



Πίνακας 7: Διάγραμμα ροής οικονομικής ανάλυσης και διαχείρισης ρίσκου

10.1 Μεταβλητές Εισόδου

Κάθε ένα από τα αποτελέσματα λειτουργίας λειτουργεί ως μεταβλητή εισόδου της ετήσιας κερδοφορίας στο μοντέλο οικονομικής αποτίμησης μαζί με άλλα βασικά στοιχεία κοστολόγησης όπως:

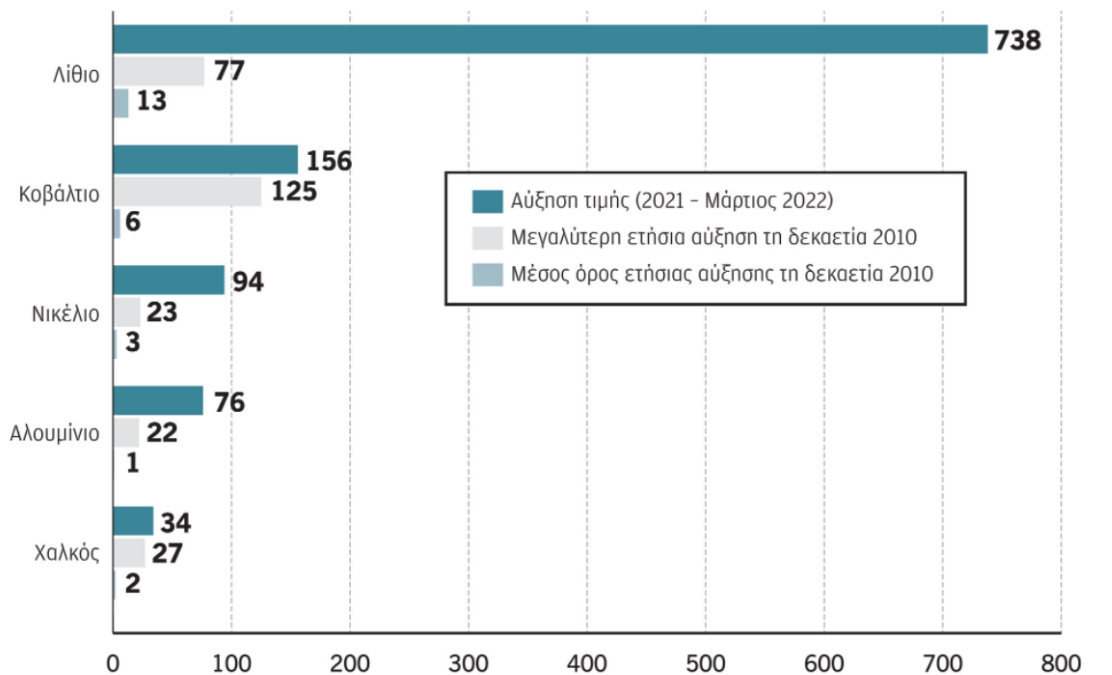
- Κεφαλαικό κόστος Α.Σ. DC [€/KWh]
- Κεφαλαικό κόστος Α.Σ. AC [€/KW]

Το συνολικό κεφαλαιακό κόστος χωρίζεται σε δύο συνιστάμενες καθώς το κόστος της μπαταρίας βασίζεται στα δύο κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά της. Κομμάτι του κόστους μπορεί να εκφραστεί ως προς την ενεργειακή χωρητικότητα της μπαταρίας ενώ το άλλο κομμάτι αφορά στην ικανότητα ισχύος και αδιαστατοποιούνται ως προς την αντίστοιχη μονάδα μέτρησης.

Πολλές από τις τιμές μεταβλητών μεταβάλλονται ραγδαία τον τελευταίο καιρό με σημαντικότερο παράγοντα αυτόν του κεφαλαιακού κόστους του αποθηκευτικού συστήματος. Σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες, το λίθιο έχει καταγράψει άνοδο 738% στην τιμή του από τον Μάρτιο του 2021 έως τον Μάρτιο του 2022 (βλ. σχήμα 18), αυξάνοντας κατακόρυφα το αρχικό κόστος επένδυσης. [11]

Εκτόξευση τιμών σε επιλεγμένα ορυκτά και μέταλλα πράσινης μετάβασης

(%)



ΠΗΓΗ: IEA

Η ΚΑΘΗΜΕΡΙΝΗ

Σχήμα 18: Μεταβολή κόστους ορυκτών υλών (Λίθιο) [11]

Για την μοντελοποίηση του παραπάνω στοιχείου κόστους χρησιμοποιήθηκε μια τριγωνική κατανομή με μέγιστη τιμή, την μεγαλύτερη και κατ' επέκταση πιο πρόσφατη τιμή που βρέθηκε στην βιβλιογραφία, ελάχιστη τιμή, την μικρότερη τιμή που βρέθηκε σε πρόσφατη πηγή και συνηθέστερη τιμή των μέσο όρο των ευρημάτων.

- Κόστος εγκατάστασης [€]

Για τον υπολογισμό του κόστους εγκατάστασης χρησιμοποιήθηκε μια ομοιόμορφη κατανομή αφού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ιδιαιτερότητα και τις δυσκολίες που θα παρουσιάσει κάθε έργο. Παράλληλα, ιδιαίτερη σημασία έχει αν το έργο εγκαθίσταται παράλληλα με το πάρκο καθώς διαμοιράζονται κάποια κόστη υποδομών και διασύνδεσης. Σε περίπτωση που η εγκατάσταση γίνεται σε μεταγενέστερο χρόνο, παίζει ρόλο η δομή και ποιότητα της προϋπάρχουσας εγκατάστασης.

- Κόστος λειτουργίας και συντήρησης [€/KWh]

Αντίστοιχη έρευνα υπήρξε και για το κόστος λειτουργίας και συντήρησης του αποθηκευτικού συστήματος, όπου χρησιμοποιήθηκε μια ομοιόμορφη κατανομή με μέγιστη και ελάχιστη τιμή, την ανώτερη και κατώτερη τιμή που βρέθηκαν. Τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης έχουν μεγάλο εύρος τιμών καθώς εμπεριέχουν ενδεχόμενες αντικαταστάσεις εξαρτημάτων της μπαταρίας με σκοπό την αντιμετώπιση υποβιβασμού (degradation) της μπαταρίας μετά τα πρώτα χρόνια που θα έχει υποστεί αρκετούς κύκλους φόρτισης.

- Χρόνος ζωής μπαταρίας [έτη] → Κόστος απόσβεσης [€/έτος]

Ο χρόνος λειτουργίας εκτιμήθηκε στα 20 έτη, όπως συμβαίνει για τις περισσότερες περιπτώσεις υβριδικών συστημάτων, δεδομένου ότι υπάρχει λιγότερη χρήση της μπαταρίας απ' ότι σε μεμονωμένα αποθηκευτικά συστήματα. Ωστόσο, η έρευνα δεν υπολογίζει αναλυτικά τους κύκλους φόρτισης της μπαταρίας, ούτε χρησιμοποιείται κάποιος περιορισμός φόρτισης-αποφόρτισης για την μειωμένη χρήση της (degradation penalty).

- Υπολειμματική αξία εξοπλισμού [% του ΚΚ]

Για το υπολογισμό των ετήσιων αποσβέσεων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος γραμμικής απόσβεσης δεδομένων των σταθερών ετήσιων εσόδων που παράγει το σύστημα, ενώ η υπολειμματική αξία ορίστηκε 16%

Τα αναλυτικά μεγέθη των παραπάνω μεταβλητών:

Κοστολογικά Στοιχεία Εξοπλισμού		
Ονομασία	Στατιστική Κατανομή	Τιμές
Κεφαλαικό DC [€/KWh]	Τριγωνική (min/ml/max)	(209/266/424)
Κεφαλαικό AC [€/KW]	Τριγωνική (min/ml/max)	(55/72/117)
Κόστος Εγκατάστασης [€/KWh]	Ομοιόμορφη(min/max)	(2/5)
Κόστος Λειτουργία & Συντήρησης [€/KWh έτος]	Ομοιόμορφη(min/max)	(0.4/18.1)
Χρόνος Ζωής Μπαταρίας [έτη]	-	20
Κόστος Απόσβεσης [Γραμμική Μέθοδος]	-	Variable
Υπολειμματική Αξία [% του ΚΚ]	-	16

Πίνακας 8: Τιμές και στατιστικές κατανομές κοστολογικών στοιχείων

Τα υπόλοιπα οικονομικά μεγέθη που χρειάστηκαν:

- Επιτόκιο δανεισμού

Αντίστοιχα, το τραπεζικό περιβάλλον διανύει μια ταραχώδη περίοδο με τις πολύ υψηλές ενδείξεις πληθωρισμού να ασκούν πιέσεις στα επιτόκια δανεισμού. Σύμφωνα με ενδείξεις το επιτόκιο δανεισμού μεσαίων και μεγάλων επιχειρήσεων έχει ανέβει κατά 88 ποσοστιαίες μονάδες σε μόλις 4 μήνες, στο 3,49% έναντι 2.61% τον Φεβρουάριο του 2022. [12]

Συνεπώς, επιλέχθηκε για την αναπαράσταση της μεταβλητότητας των επιτοκίων μια κανονική κατανομή με μέση τιμή το τρέχον επιτόκιο δανεισμού 3,50% και τυπική απόκλιση 10% επί της τρέχουσα τιμής.

- Συντελεστής φορολόγησης (ΦΠΑ)

Ο συντελεστής φορολόγησης συμπεριλαμβάνει τόσο τον φόρο εισοδήματος ύψους 22%, όσο και τα δημοτικά τέλη που αντιστοιχούν στο 3% του τζίρου και οφείλει κάθε πάρκο να καταβάλλει.

- Ελάχιστος αποδεκτός συντελεστής απόδοσης της επένδυσης (MARR)

Οι τιμές των παραπάνω μεταβλητών:

Οικονομικά Μεγέθη		
Όνομασία	Στατιστική Κατανομή	Τιμές
Τζίρος Συστήματος	Κανονική (mean/st.dev)	(Variable/7%)
Επιτόκιο Δανεισμού [%]	Κανονική (mean/st.dev)	(4%/0.4%)
Συντελεστής Φορολόγησης [%]	-	(22+3)%
Ελάχιστος Αποδεκτός Συντελεστής Απόδοσης (MARR) [%]	-	10

Πίνακας 9: Τιμές και στατιστικές κατανομές οικονομικών στοιχείων για την λειτουργία του ενεργειακού arbitrage

Οι παραπάνω αβεβαιότητες μοντελοποιούνται με την βοήθεια της ανάλυσης Monte Carlo, σύμφωνα με την οποία οι παραπάνω μεταβλητές που εμπεριέχουν αβεβαιότητα λειτουργούν ως μεταβλητές εισόδου. Κάθε μια ακολουθεί μια στατιστική κατανομή που περιγράφει το εύρος πιθανών τιμών της και μέσα από συνεχείς επαναλήψεις προκύπτει ένα εύρος αποτελεσμάτων εξόδου, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων. [13]

Τέλος η ανάλυση βασίζεται σε δύο εκδοχές χρηματοδότησης. Η πρώτη αφορά την πλήρη οικονομική κάλυψη του έργου από ίδια κεφάλαια ή δανεισμό ενώ ερευνάται η περίπτωση επιδότησης σε μορφή φορολογικής ελάφρυνσης. Η παραπάνω πρωτοβουλία είχε λειτουργήσει στο πλαίσιο στήριξης επενδύσεων αποθήκευσης στις ΗΠΑ και εξετάζουμε το αντίκτυπο που θα είχε η αντίστοιχη στήριξη έργων σε Ευρωπαϊκό πλαίσιο.

- Ποσοστά κάλυψης επένδυσης:
 - Ίδια κεφάλαια [% επί της αρχικής επένδυσης]
 - Δανεισμός [% επί της αρχικής επένδυσης]

Η επιδότηση φορολογικής ελάφρυνσης (Investment Tax Credit) εμπίπτει στις ετήσιες χρηματοροές, όπου μειώνει τα ποσά φορολόγησης ανά τα χρόνια έως την επιδοτούμενη τιμή.

Οι αναλογίες πληρωμής-δανεισμού είναι ίδιες και για τα δύο σενάρια με μοναδική διαφορά την ύπαρξη οικονομικού κινήτρου φοροελάφρυνσης:

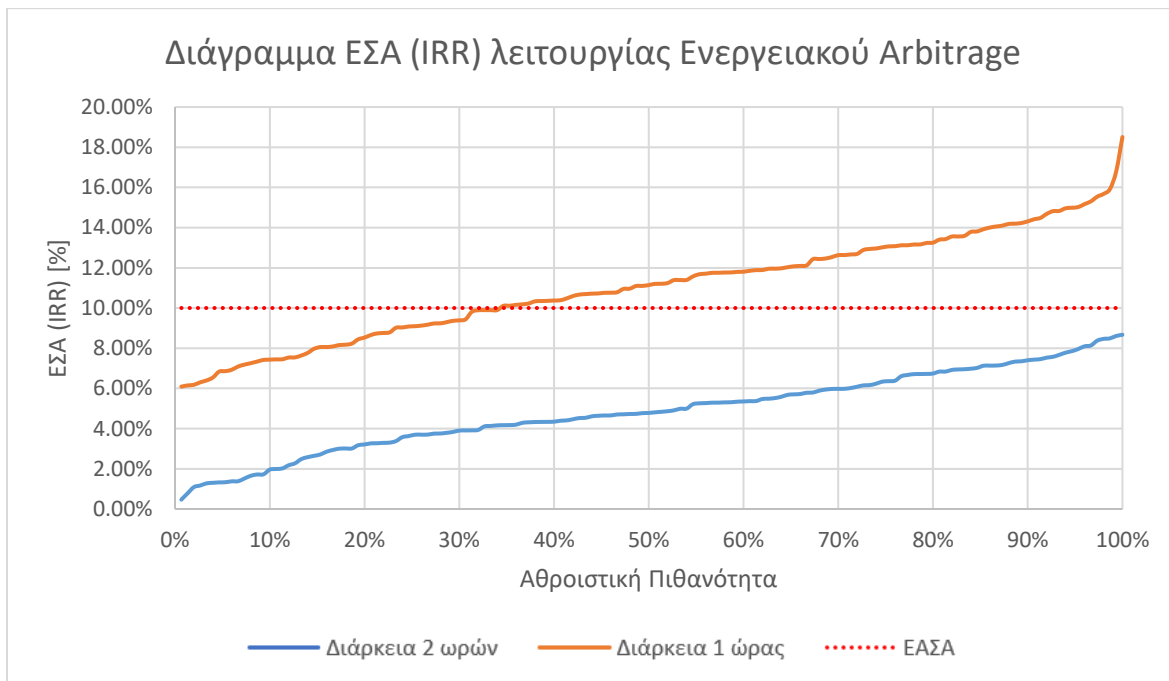
Συντελεστές Κάλυψης Επένδυσης		
Ονομασία	Περίπτωση Ιδιωτικής Χρηματοδότησης	Περίπτωση Επιδότησης Επένδυσης
Ίδια κεφάλαια [% επί της συνολικής επένδυσης]	30	
Δανεισμός [% επί της συνολικής επένδυσης]	70	
ΚΦ [% επί της συνολικής επένδυσης]	0	30

Πίνακας 10: Ποσοστά χρηματοδότησης επένδυσης

10.2 Οικονομικά Αποτελέσματα Λειτουργίας Ενεργειακού Arbitrage

Τα οικονομικά αποτελέσματα αναδεικνύουν τελικά την βέλτιστη επιλογή διάρκειας μπαταρίας ενώ τα ετήσια έσοδα αντιστοιχούν στους υπολογισμούς της ενότητας των [αποτελεσμάτων λειτουργίας](#). Πέραν του κόστους της μπαταρίας και των κερδών λειτουργίας, τα υπόλοιπα οικονομικά μεγέθη περιγράφηκαν παραπάνω και παραμένουν κοινά για όλες τις διερευνήσεις.

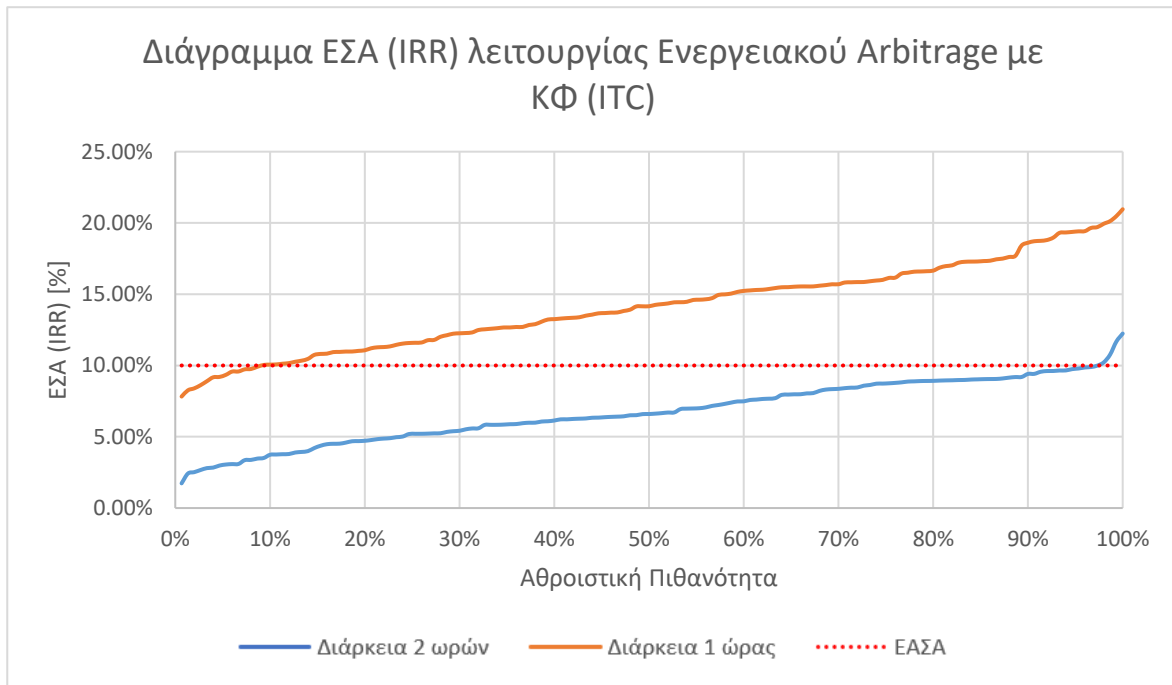
Το παρακάτω γράφημα περιέχει τα διαγράμματα αθροιστικών πιθανοτήτων για τις δύο περιπτώσεις ενεργειακής χωρητικότητας της μπαταρίας:



Σχήμα 19: Διάγραμμα εσωτερικού συντελεστή απόδοσης (IRR) για την λειτουργία ενεργειακού arbitrage χωρίς κίνητρο φοροαπαλλαγής (ITC)

Στο σχήμα 19 παρατηρείται ότι η μπαταρία μικρότερης ενεργειακής χωρητικότητας κυμαίνεται σε πολύ υψηλότερα επίπεδα αποδόσεων και η απόκλιση αυτή αποδίδεται στην μεγάλη αύξηση του κόστους αγοράς. Παρότι στα αποτελέσματα λειτουργίας, η αύξηση της διάρκειας της μπαταρίας προσέφερε σημαντική ενίσχυση των εσόδων του συστήματος (βλ. [σχήμα 10](#)), οι πολύ υψηλές τιμές κεφαλαιακού κόστους που επικρατούν και η απότομη αύξηση τους λόγω αύξησης της ενεργειακής χωρητικότητας, καθιστά την επένδυση μη βιώσιμη. Πιο συγκεκριμένα, καμία από τις προσομοιώσεις Monte Carlo για την μπαταρία 2 ωρών δεν ξεπέρασε τον ελάχιστο επιτρεπτό συντελεστή απόδοσης του 10%. Αντίθετα, η μπαταρία 1 ώρας ξεπέρασε τον παραπάνω στόχο τις 102 από τις 150 επαναλήψεις, ποσοστό που αντιστοιχεί στο 68%.

Το παρακάτω διάγραμμα καλύπτει την περίπτωση οικονομικού κινήτρου διατηρώντας τα υπόλοιπα στοιχεία της ανάλυση ίδια:



Σχήμα 20: Διάγραμμα αθροιστικής πιθανότητας εσωτερικού συντελεστή απόδοσης (IRR) για την λειτουργία ενεργειακού arbitrage με κίνητρο φοροαπαλλαγής (ITC)

Συγκριτικά με το σχήμα 19, στο σχήμα 20 παρατηρείται ότι και οι δύο καμπύλες έχουν μετατοπιστεί προς τα επάνω, ωστόσο, η περίπτωση της δώρης διάρκειας συνεχίζει να βρίσκεται κάτω από το επίπεδο του ελάχιστου αποδεκτού συντελεστή απόδοσης (MARR). Αντίθετα, στην περίπτωση της μπαταρίας 1 ώρας, το 90% των προσομοιώσεων παράγουν αποτελέσματα μεγαλύτερα του επιθυμητού συντελεστή.

10.3 Οικονομικά Αποτελέσματα Λειτουργίας Μείωσης Σφαλμάτων Πρόβλεψης

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων για την λειτουργία εξάλειψης σφαλμάτων πρόβλεψης. Η ετήσια κερδοφορία για κάθε συντελεστή σφάλματος προκύπτει ως τριγωνική κατανομή με μέγιστη, διάμεσο και ελάχιστη τιμή, τις τιμές των αποτελεσμάτων λειτουργίας για τους συντελεστές περίσσειας-ποινής 80-120%, 90-110% και 95-105% αντίστοιχα. Συνεπώς, ο πίνακας οικονομικών μεγεθών (βλ. πίνακας 11) διαφέρει σε σχέση με εκείνον του ενεργειακού arbitrage μόνο στο κομμάτι προσομοίωσης του ετήσιου τζίρου:

Οικονομικά Μεγέθη		
Όνομασία	Στατιστική Κατανομή	Τιμές
Τζίρος Συστήματος	Τριγωνική (max/mode/min)	(variable/variable/variable)
Επιτόκιο Δανεισμού [%]	Κανονική (mean/st.dev)	(4/10%)
Συντελεστής Φορολόγησης [%]	-	(22+3)%
Ελάχιστη Αποδεκτή Απόδοση (MARR) [%]	-	10

Πίνακας 11: Οικονομικά μεγέθη λειτουργίας εξάλειψης σφαλμάτων πρόβλεψης

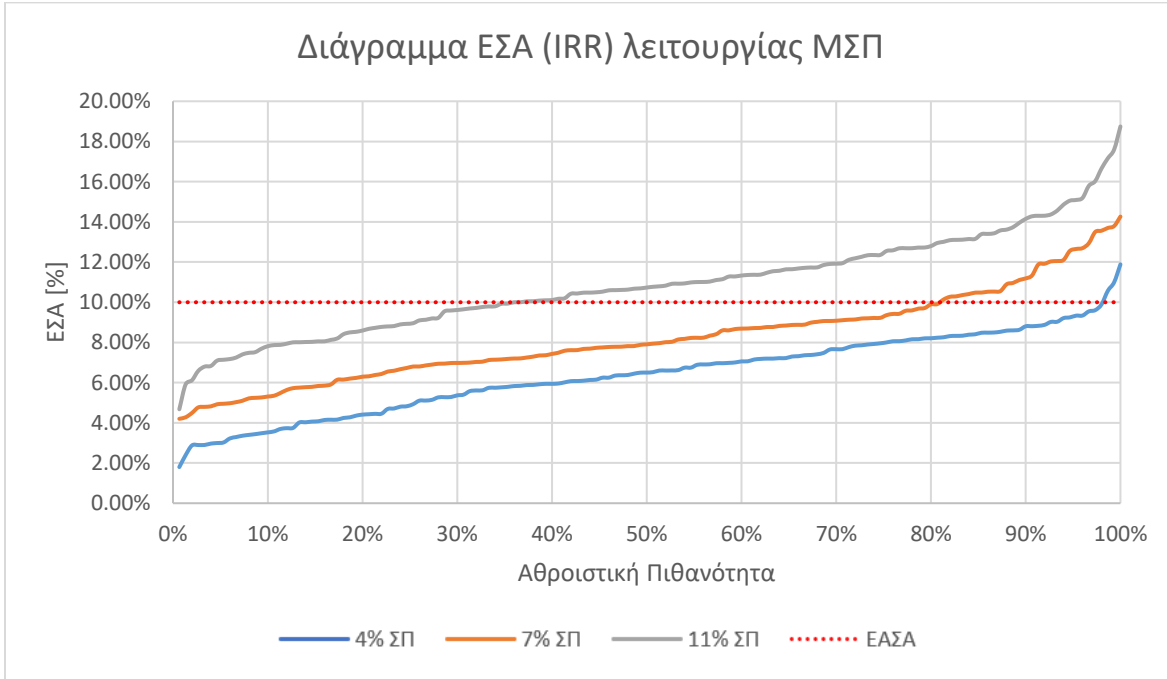
Ο πίνακας 12 αποτελεί τους υπολογισμούς τριγωνικών κατανομών για εύρος σφάλματος πρόβλεψης:

Έσοδα [€/ΜWp έτος]			
Σφάλμα Πρόβλεψης	4%	7%	11%
95-105 [min]	6,375	7,250	8,208
90-110 [most likely]	9,458	10,500	11,708
80-120 [max]	15,917	17,458	19,333

Πίνακας 12: Τιμές τριγωνικής κατανομής ετήσιου τζίρου για κάθε συντελεστή σφάλματος

Η ενεργειακή χωρητικότητα της μπαταρίας αντιστοιχεί στο 25% της μέγιστης ισχύος του πάρκου και είναι διάρκειας 1 ώρας, όπως ήταν και στα αποτελέσματα λειτουργίας.

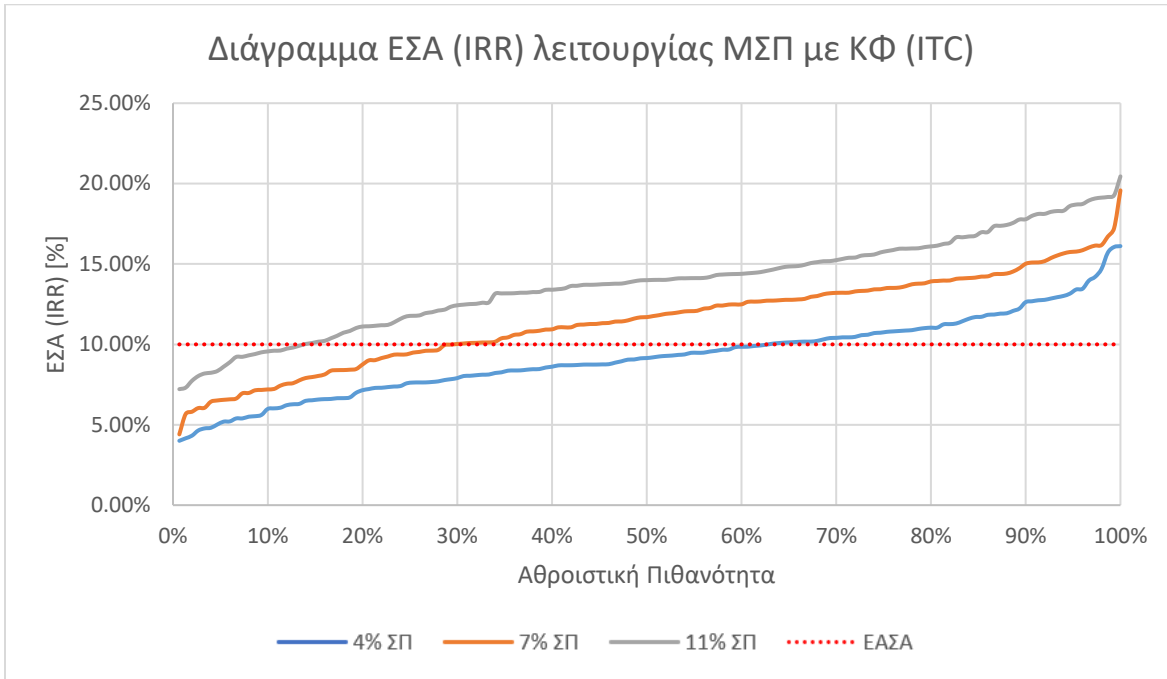
Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 21 για κάθε εύρος σφάλματος πρόβλεψης:



Σχήμα 21: Διάγραμμα αθροιστικών πιθανοτήτων εσωτερικού συντελεστή απόδοσης (IRR) για την λειτουργία μείωσης σφαλμάτων πρόβλεψης χωρίς κίνητρο φοροαπαλλαγής (ITC)

Στο διάγραμμα παρατηρείται ότι για ποσοστό σφάλματος πρόβλεψης ίσο με 11%, μόλις το 60% των προσομοιώσεων προέκυψε πάνω από τον στόχο ελάχιστης απόδοσης. Αντίστοιχα, στην περίπτωση που η μέση τιμή του συντελεστή πέσει στο 7%, τότε μόλις 20% των περιπτώσεων ξεπερνούν το επιθυμητό όριο απόδοσης. Τέλος, στην περίπτωση ελάχιστου σφάλματος πρόβλεψης, το όριο απόδοσης ξεπεράστηκε μόλις σε 3 από τις 150 επαναλήψεις της Monte Carlo, που αντιστοιχεί σε ποσοστό 2%.

Η αντίστοιχη διερεύνηση γίνεται για την περίπτωση κινήτρου φοροαπαλλαγής εμφανίζεται στο σχήμα 22:



Σχήμα 22: ΔΑΠ εσωτερικού συντελεστή απόδοσης (IRR) για την λειτουργία μείωσης σφαλμάτων πρόβλεψης με κίνητρο φοροαπαλλαγής (ITC)

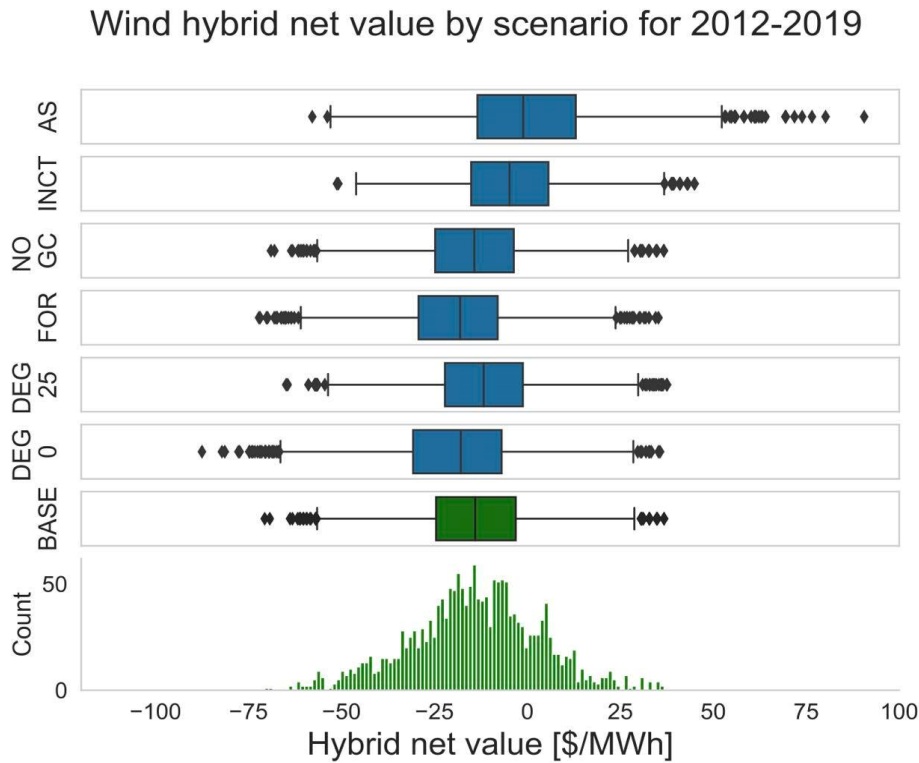
Παρατηρείται ότι στην περίπτωση οικονομικού κινήτρου υπάρχει σημαντική μείωση του ρίσκου στην περίπτωση σφάλματος 11%, με το ποσοστό άνω του επιθυμητού ορίου οικονομικής απόδοσης να είναι κοντά στο 85% και η ελάχιστη τιμή της καμπύλης να έχει τιμή 7.2%. Το κίνητρο φοροαπαλλαγής καθιστά την επένδυση βιώσιμη και για τις μικρότερες τιμές σφάλματος πρόβλεψης, όπου ακόμα και για την κατώτερη τιμή, σχεδόν 40% των προσομοιώσεων πληρούν την απαίτηση MARR.

11. Πορίσματα Έρευνας

11.1 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Η έρευνα υπολόγισε επιτυχημένα τα αποτελέσματα βέλτιστης λειτουργίας υβριδικών συστημάτων για δύο διακριτές λειτουργίες και προχώρησε στην οικονομική αξιολόγηση τους. Συνοψίζοντας τα ευρήματα της, τα υβριδικά συστήματα συνεισφέρουν τόσο σε δίκτυο και καταναλωτές όσο και στον επενδυτή, εφόσον υπάρχουν οι κατάλληλες προϋποθέσεις. Η έρευνα μας περιορίστηκε σε δύο από τις πολλές λειτουργίες που μπορεί να διατελέσει ένα αποθηκευτικό σύστημα που συνεγκαθίσταται με ένα έργο ΑΠΕ, με την κάθε μια να εμφανίζει δικές της αβεβαιότητες και συνθήκες αποδοτικής λειτουργίας. Όλες οι εκδοχές που εξετάστηκαν είχαν θετικούς συντελεστές απόδοσης, ενώ οι περιπτώσεις επιδοτούμενων έργων υπερέβησαν σε μεγάλο ποσοστό επαναλήψεων το επιθυμητό όριο απόδοσης (MARR) που θέσαμε. Συνεπώς, τα δεδομένα της Ελληνικής αγοράς και οι προσομοιώσεις λειτουργίας συμβαδίζουν με την βιβλιογραφία υπολοίπων χωρών που υποστηρίζουν ότι τα υβριδικά συστήματα αποφέρουν κέρδος και λειτουργούν προς όφελος όλων. Συγκριτικά με αντίστοιχη έρευνα για τις 7 επιμέρους αγορές ενέργειας των ΗΠΑ για τα έτη 2012-2019, αντίστοιχα έργα αποδεικνύονται πιο κερδοφόρα στην δική μας έρευνα, γεγονός που κυρίως αποδίδεται στις τιμές και την μεταβλητότητα της ενεργειακής κρίσης για τα δεδομένα του έτους 2021 που χρησιμοποιήθηκαν. [14]

Τα αποτελέσματα της αμερικάνικης έρευνας αφορούν διαφορετικά σενάρια, σε αντιστοιχία με την δική μας έρευνα και αποτυπώνονται παρακάτω:



Σχήμα 23: Προστιθέμενη καθαρή αξία ενέργειας υβριδικού συστήματος στις ενεργειακές αγορές των ΗΠΑ [14]

Παρατηρούμε ότι τόσο στο βασικό σενάριο (BASE) όσο και στο σενάριο οικονομικού κινήτρου (INCT) ο μέσος όρος καθαρής αξίας είναι αρνητικός ή κοντά στο μηδέν, σε αντίθεση με τα σενάρια της έρευνας μας, όπου στο εύρος αποτελεσμάτων των δύο λειτουργιών δεν υπήρξε αρνητική τιμή απόδοσης.

Παράλληλα, διερευνήθηκε η βέλτιστη ενεργειακή χωρητικότητα μπαταρίας, η επιρροή της δυναμικότητας του σημείου διασύνδεσης και η παραμετροποίηση των συντελεστών αγοράς εξισορρόπησης. Σε αντίθεση με την βιβλιογραφία που προτείνει μπαταρίες διάρκειας 2 ωρών ως βέλτιστη επιλογή για την κερδοφορία υβριδικών συστημάτων [6], η βέλτιστη διάρκεια μπαταρίας προέκυψε 1 ώρα και για τις δύο λειτουργίες. Η παραπάνω ασυμφωνία αποδίδεται στο αυξημένο κόστος αγοράς της μπαταρίας, καθώς οι περισσότερες έρευνες εμπεριέχουν τιμές πριν την ενεργειακή κρίση, όπου το κεφαλαικό κόστος του συστήματος αποθήκευσης ήταν σημαντικά μικρότερο. Ο διπλασιασμός της ενεργειακής χωρητικότητας, δημιουργούσε κατακόρυφη αύξηση του κεφαλαιακού κόστους δεδομένου ότι ο αδιαστατοποιημένος συντελεστής ενέργειας ήταν πολύ υψηλός

(βλ. [πίνακα 8](#)), με αποτέλεσμα παρά την σημαντική αύξηση του τζίρου, η αυξημένη διάρκεια να παρουσιάζει χαμηλότερα οικονομικά αποτελέσματα. Αντίστοιχα, μελετήθηκε και το θεσμικό πλαίσιο στήριξης συστημάτων αποθήκευσης των ΗΠΑ με το σχέδιο του Investment Tax Credit. [15] Παρατηρήθηκε ότι το παραπάνω μέτρο ώθησε τους περισσότερους σχεδιασμούς συστημάτων χαμηλού εύρους αποδόσεων πάνω από το ελάχιστο όριο οικονομικής απόδοσης MARR, που καθιστά την απόδοση ελκυστική. Ως αποτέλεσμα, το κίνητρο φοροαπαλλαγής είναι ένα μέτρο που θα μπορούσε να εφαρμοστεί και στην περίπτωση της Ελλάδας για να μειώσει το ρίσκο των επενδυτών και να επιτευχθεί ταχύτερη ανάπτυξη αποθηκευτικών έργων.

11.2 Μελλοντική Πορεία Αγορών Ενέργειας

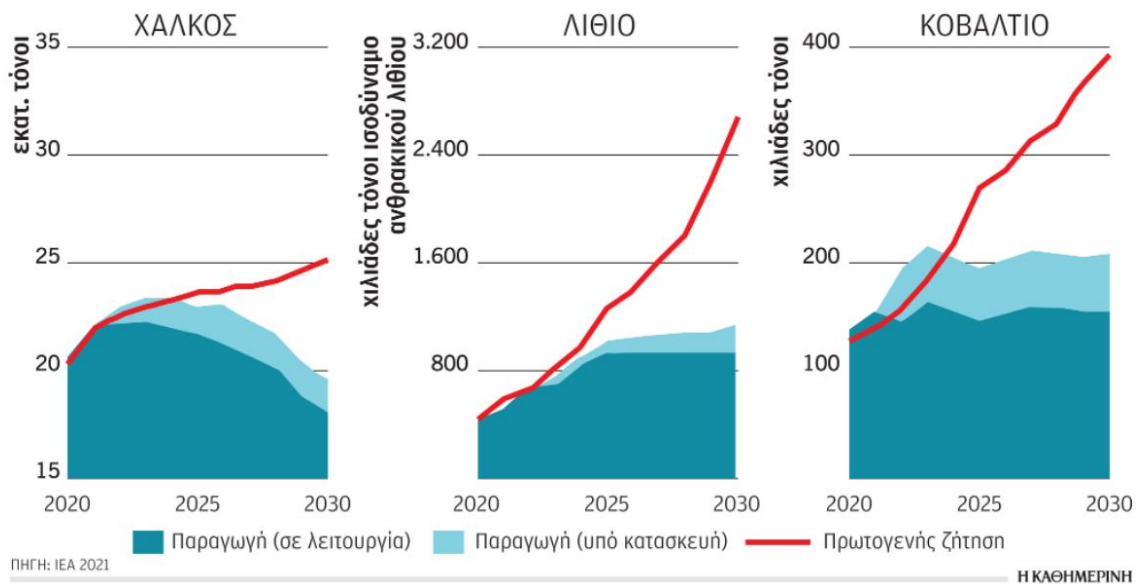
Σημαντικότερο ρόλο στην αξιολόγηση της επένδυσης έχει η κατάσταση της αγοράς για το διάστημα ζωής του έργου. Στα αποτελέσματα λειτουργίας εμφανίστηκαν δύο διαφορετικές συμπεριφορές για κάθε εξάμηνο του έτους. Παρατηρήθηκε ότι η έντονη μεταβλητότητα που προκλήθηκε από την ενεργειακή κρίση, ευνόησε πολύ την συχνότητα ευκαιριών arbitrage και αύξησε τις ανάγκες χωρητικότητας μπαταρίας. Οι υψηλές τιμές που επικράτησαν, αντίστοιχα, ευνοήσαν και τις δύο λειτουργίες, με τα οικονομικά αποτελέσματα τους να είναι πολλαπλάσια του πρώτου εξαμήνου. Η ταραχή που επικρατεί στις ενεργειακές αγορές αποτελεί σημαντική ευκαιρία προς εκμετάλλευση από τα υβριδικά συστήματα που ανάμεσα στα πολλαπλά πλεονεκτήματά τους, προσφέρουν κέρδος και στον επενδυτή.

Ζήτημα, ωστόσο, αποτελεί ποια θα είναι η μελλοντική κατάσταση των τιμών ενέργειας. Δεδομένου ότι ο χρόνος ζωής της επένδυσης είναι 20 έτη, πρέπει να εκτιμηθεί η κατάσταση των χρηματιστηρίων ενέργειας για τον αντίστοιχα ορίζοντα. Αν οι τιμές επανέλθουν σύντομα στα επίπεδα του πρώτου εξαμήνου του 2021, τότε τα αποθηκευτικά συστήματα δεν θα παρέχουν αντίστοιχα αποτελέσματα, ενώ αν οι τιμές αντιστοιχούν σε αυτές του δεύτερου εξαμήνου, τότε σίγουρα η επένδυση θα είναι συμφέρουσα. Το έτος επιλογής μας παρέχει και τις δύο εικόνες με αποτέλεσμα να αποτελεί μια μέση συνθήκη των δύο προαναφερθέντων σεναρίων, σύμφωνα με το οποίο η βιωσιμότητα του έργου ήταν κοντά, αν όχι πάνω από τα επιθυμητά όρια συντελεστών οικονομικής απόδοσης.

11.3 Πορεία Κεφαλαιακού Κόστους Αποθηκευτικών Συστημάτων

Τα πολύ καλά αποτελέσματα λειτουργίας ωστόσο, αντισταθμίζονται από τα πολύ υψηλά κεφαλαιακά κόστη των αποθηκευτικών συστημάτων. Η ραγδαία αύξηση χρήσης μπαταριών σε τομείς όπως η αποθήκευση ενέργειας και η ηλεκτροκίνηση έχει δημιουργήσει πρωτοφανή ζήτηση για λίθιο και άλλες ορυκτές ύλες. Ως αποτέλεσμα η περιορισμένη διαθεσιμότητα ορυκτών υλών έχει οδηγήσει τις τιμές αγοράς αυτών στα ύψη και η παραπάνω ανισοσκελία προσφοράς και ζήτησης δεν θα συγκλίνει σύντομα.

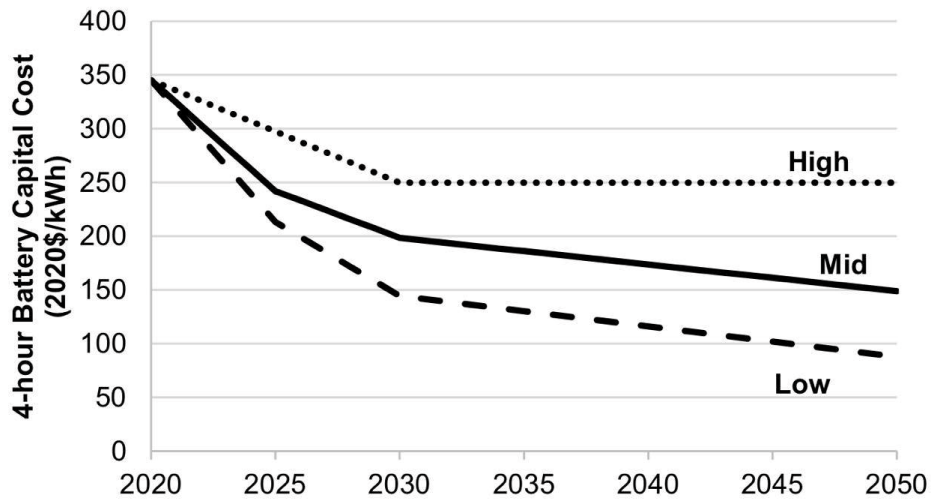
Χαρακτηριστικά, παρατίθενται η αναντιστοιχία προσφοράς-ζήτησης (βλ. σχήμα 24) για τρεις βασικές ύλες που είναι αναγκαίες για το σενάριο βιώσιμης ανάπτυξης τα επόμενα χρόνια:



Σχήμα 24: Δεσμευμένη παραγωγή ορυχείων και πρωτογενής ζήτηση στο σενάριο βιώσιμης ανάπτυξης (SDS) για επιλεγμένα ορυκτά [16]

Αντίθετα, το εθνικό εργαστήριο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (NREL) αναμένει σταδιακή μείωση των τιμών για την αγορά μπαταριών σε ανανεωμένη αναφορά που δημοσίευσε τον Ιούνιο του 2021.

Στο σχήμα 25 αποτυπώνεται το διάγραμμα τιμών, όπου ακόμα και στο ενδεχόμενο υψηλής κοστολογικής πρόβλεψης, καταγράφεται πτωτική τάση έως το τέλος του 2030:



Σχήμα 25: Προβλέψεις κόστους μπαταρίας ιόντων λιθίου διάρκειας 4 ωρών έως το 2050 [17]

Η μελλοντική πορεία κόστους του αποθηκευτικού συστήματος έχει άμεση επίπτωση στην βιωσιμότητα της επένδυσης. Συνεπώς, τόσο το μέγεθος των μπαταριών όσο και το πλήθος έργων ΑΠΕ που θα εξοπλιστούν μελλοντικά θα εξαρτηθεί από την τιμή του εξοπλισμού.

11.4 Προτάσεις Μελλοντικής Έρευνας

Το χρηματιστήριο ενέργειας και η συμμετοχή των ΑΠΕ σε αυτό αποτελεί μια νέα συνθήκη, όπου πολλά πράγματα σταδιακά διαμορφώνονται και υπάρχει μεγάλο βάθος περαιτέρω διερεύνησης. Αντίστοιχα, η δημιουργία υβριδικών συστημάτων στην χώρα βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο και τόσο το θεσμικό πλαίσιο ανάπτυξης του έργου όσο και η λειτουργία του εντός του EnEx ακόμα εξελίσσονται. Συνεπώς, υπάρχουν περιθώρια επέκτασης και βελτίωσης της παραπάνω έρευνας που θα μοντελοποιούν καλύτερα την λειτουργία του συστήματος και θα παρέχουν καλύτερη εικόνα της οικονομικής βιωσιμότητας και των δυνατοτήτων του έργου.

Μια συνθήκη που θα είχε μεγάλο ενδιαφέρον, είναι η συνδυαστική λειτουργία του αποθηκευτικού συστήματος. Δηλαδή, η αντίστοιχη μοντελοποίηση των δύο διακριτών λειτουργιών που εξετάστηκαν, ενωμένες σε ένα αποθηκευτικό σύστημα που θα αλλάζει τον προσανατολισμό του σύμφωνα με την πιο συμφέρουσα τακτική ή θα εκτελεί και τις δύο ταυτόχρονα.

Σημαντική προσθήκη στην μοντελοποίηση του συστήματος αποτελεί και η ποινή υποβιβασμού της μπαταρίας (degradation penalty). Πιο συγκεκριμένα, ορισμένες αποφάσεις του παρόντος μοντέλου μπορεί να δημιουργούσαν κέρδος στο σύστημα αλλά αυτό να μην αντισταθμιζε το κόστος φθοράς που υπόκεινται η μπαταρία. Συνεπώς, θα μπορούσε να ορισθεί ένα ελάχιστο όριο κέρδους για το οποίο θα είχε νόημα η μπαταρία να φορτιστεί και να εκφορτιστεί. Αντίστοιχα, πρέπει να συνυπολογιστεί το γεγονός ότι η χωρητικότητα της μπαταρίας φθίνει όσο αυξάνουν οι κύκλοι φόρτισης με αποτέλεσμα, το αποθηκευτικό σύστημα να μην είναι το ίδιο αποδοτικό σε όλα τα έτη λειτουργίας του. Η παραπάνω έρευνα εντάσσει μερικώς τα παραπάνω φαινόμενα αυξάνοντας σημαντικά τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης ώστε να μπορούν να αλλαχθούν επιμέρους εξαρτήματα και να μην αλλοιωθούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μπαταρίας αλλά δεν εντάσσει τα παραπάνω δεδομένα στο μοντέλο λειτουργίας της, καθώς αυξάνει σημαντικά το υπολογιστικό κόστος του μοντέλου βελτιστοποίησης.

Μεγάλο ενδιαφέρον, τέλος παρουσιάζει η λειτουργία σε περισσότερες ενεργειακές αγορές για υβριδικά συστήματα. Πιο συγκεκριμένα, το υβριδικό σύστημα μπορεί να έχει ενεργό ρόλο τόσο στην αγορά επόμενη ημέρας όσο και σε άλλες αγορές όπως η αγορά εξισορρόπησης κι οι ενδοημερήσιες αγορές ενέργειας. Η εφεδρεία ενέργειας που δημιουργείται από το αποθηκευτικό σύστημα μπορεί να παρουσιάζει επιπρόσθετη κερδοφορία από την συμμετοχή και πρόσβαση σε περισσότερες αγορές που έπονται της ΑΕΗ, με αποτέλεσμα να είναι ακόμα πιο ελκυστική η δυνατότητα σύζευξης.

Η συνδυαστική συμμετοχή στην ΑΕΗ και τις περιφερειακές ενδοημερήσιες δημοπρασίες (CRIDAs) επιτρέπει στους παραγωγούς να διορθώσουν τις προβλέψεις τους σε στιγμές μεταγενέστερες των δηλώσεων της ΑΕΗ που υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια μετεωρολογικών δεδομένων. Η παραπάνω δυνατότητα ενδεχομένως να επηρεάζει την κερδοφορία της λειτουργίας μείωσης σφαλμάτων, καθώς μπορούν να παρθούν αποφάσεις διόρθωσης σε στιγμή μεταγενέστερη των δηλώσεων ΑΕΗ.

Στον πίνακα παρατίθενται το ωράριο λειτουργίας των τριών ενδοημερησίων αγορών καθώς και η χρονική απόσταση πρόβλεψης της κάθε μιας για τις χρονικές περιόδους της επόμενης ημέρας:

Αγορά	Κλείσιμο	Πρώτη αγοραία χρονική μονάδα	Τελευταία αγοραία χρονική μονάδα	Ελάχιστη χρονική απόσταση	Μέγιστη χρονική απόσταση
CRIDA 1	16:00 d-1	00:00-1:00	23:00-00:00	8	32
CRIDA 2	23:00 d-1	00:00-1:00	23:00-00:00	1	25
CRIDA 3	11:00 d	12:00-13:00	23:00-00:00	1	13

Πίνακας 13: Ωράριο λειτουργίας και όριζοντα αποφάσεων των περιφερειακών ενδοημερησίων αγορών [18]

Οι δηλώσεις κατά την ΑΕΗ έχουν κατά μέσο όρο ορίζοντα πρόβλεψης 25 ωρών με αποτέλεσμα οι ενδοημερησίες αγορές να βοηθούν στην μεταγενέστερη διόρθωση δηλώσεων όσο τα δεδομένα ανανεώνονται. Η παραπάνω δυνατότητα δεν συμπεριλήφθηκε στην παρούσα έρευνα καθώς κάθε μια από τις παραπάνω αγορές αντιστοιχεί στο 0.96%, 0.94% και 0.58% του συνολικού όγκου συναλλαγών. Συνεπώς, το 2.48% του όγκου συναλλασσόμενης ενέργειας λαμβάνει χώρα στις ενδοημερησίες αγορές των οποίων η μέση χρονική απόσταση παράδοσης της ενέργειας είναι 7 ώρες. [18] Τα παραπάνω στοιχεία είναι ενδεικτικά της χαμηλής ρευστότητας της συγκεκριμένης αγοράς που επιτρέπει μόνο πολύ μικρές αλλαγές και της σημαντικής χρονικής απόστασης από την πρόβλεψη έως την παραγωγή που δημιουργεί μικρότερα αλλά σε καμία περίπτωση αμελητέα περιθώρια σφάλματος. Συνεπώς, εκτενέστερη έρευνα επάνω στη λειτουργία μείωσης σφαλμάτων πρόβλεψης θα μπορούσε να συμπεριλαμβάνει την παραπάνω δυνατότητα διόρθωσης τιμών στις ενδοημερησίες αγορές και την επίπτωση που έχει στην κερδοφορία του συστήματος.

12. Κατάλογος Αναφορών

- [1] S. Reddy και J. Momoh, «Realistic and Transparent Optimum Scheduling Strategy for Hybrid Power System,» *IEEE*, 2014.
- [2] «EnEx,» 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.enexgroup.gr/el/web/guest/energy-markets>. [Πρόσβαση 10 06 2022].
- [3] G. Diaz, J. Coto και J. Gomez-Aleixandre, «Optimal operation value of combined wind power and energy storage in multi-stage electricity markets,» *Applied Energy*, 2019.
- [4] ΑΔΜΗΕ, «ADMIE,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.admie.gr/agora/genika/perigrafia>. [Πρόσβαση 06 2022].
- [5] W. Gorman, A. Mills, M. Bolinger, R. Wiser, N. Singhal, E. Ela και E. O'Shaughnessy, «Motivation and options for deploying hybrid generator-plus-battery projects within the bulk power system,» *The Electricity Journal*, 2020.
- [6] W. Gorman, C. Montanes Crespo, A. Mills, J. Hyungkwan Kim, D. Millstein και R. Wiser, «Are coupled renewable-battery power plants more valuable than independently sited installations,» *Science Direct*, 2021.
- [7] G. Giebel και G. Kariniotakis, «Wind Power Forecasting - a review of the state of the art,» Elsevier Ltd, 2017.
- [8] Z. Shushu, Y. Weijia, L. Xudong, Z. Zhigao, W. Ran και L. Yulan, «Economic evaluation of wind-pv-pumped storage hybrid system considering carbon emissions,» σε *2nd International Conference on Power Engineering (ICPE 2021)*, 2022.
- [9] G. Giebel, «The State of the Art in Short-Term Prediction of Wind Power,» ANEMOS.plus, 2011.
- [10] «Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.rae.gr/agora-exisorropisis/>. [Πρόσβαση 01 06 2022].
- [11] Γ. Μανιάτης, «Άλμα εσόδων για πετρελαιοπαραγωγούς,» *Καθημερινή*, 2022.
- [12] Ε. Τζώρτζη, «Ακριβότερα γίνονται τα δάνεια προς επιχειρήσεις,» *Καθημερινή*, 2022.
- [13] G. Caralis, D. Diakoulaki, P. Yang, Z. Gao, A. Zervos και K. Rados, «Profitability of wind energy investments in China using a Monte Carlo approach for the treatment of uncertainties,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014.

- [14] C. Crespo Montanes, W. Gorman και A. Mills, «Exploring the impacts of configuration choices on the recent economics of solar-plus-battery and wind-plus-battery hybrid energy plants,» Lawrence Berkeley National Laboratory, 2021.
- [15] W. Gorman, A. Mills, M. Bolinger, R. Wiser, N. Singhal, E. Ela και E. O'Shaughnessy, «Motivations and options for deploying hybrid generator-plus-battery projects within the bulk power system,» *The Electricity Journal*, 2020.
- [16] Γ. Μανιάτης, «Υπερκατανάλωση Φυσικών Πόρων,» *Καθημερινή*, 2022.
- [17] W. Cole, W. Frazier και C. Augustine, «Cost Projection for Utility-Scale Battery Storage: 2021 Update,» National Renewable Energy Laboratory, 2021.
- [18] Wootis AE, Forena Energy, ΕΣΜΥΕ και Solar Energy Soumpasis, «Δημόσια Διαβούλευση της ΡΑΕ επί της εισήγησης της ΔΑΠΕΕΠ Α.Ε. για την τροποποίηση του πίνακα αριθμητικών τιμών των παραμέτρων χρέωσης MBBAΠ,» 2022.
- [19] Α. Ζερβός και Γ. Κάραλης, Σημειώσεις Αιολικής Ενέργειας, Αθήνα: ΕΜΠ, 2018.
- [20] H. Ding, P. Pinson, Z. Hu και Y. Song, «Optimal Offering and Operating Strategies for Wind-Storage Systems with Linear Decision Rules,» *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016.

--- Τέλος εγγράφου ---