ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΙΚΟΝΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ ΒΑΣΙΣΜΕΝΟ ΣΕ ΣΕΝΑΡΙΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αναστασιάδης Απόστολος

Επίβλεψη : Παύλος Σ. Γεωργιλάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Βασίλειος Ευαγγελόπουλος, Υποψήφιος Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2022

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΙΚΟΝΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ ΒΑΣΙΣΜΕΝΟ ΣΕ ΣΕΝΑΡΙΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αναστασιάδης Απόστολος

Επίβλεψη: Παύλος Σ. Γεωργιλάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π

Βασίλειος Α. Ευαγγελόπουλος, Υποψήφιος Διδάκτορας

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ..... Μαρτίου 2022.

.....	.....	.....
Παύλος Γεωργιλάκης, Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π	Γεώργιος Κορρές, Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Γκόνος Ιωάννης, Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2022

.....

Αναστασιάδης Απόστολος

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

Copyright © Αναστασιάδης Απόστολος, 2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η βέλτιστη διαχείριση των μονάδων διανεμημένης παραγωγής (ΜΔΠ) ενός εικονικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής (VPP) με τη χρήση στοχαστικού προγραμματισμού βασισμένου σε σενάρια για τη μεγιστοποίηση της κερδοφορίας του. Παράλληλα εξετάζεται και ο βαθμός επιρροής της κάθε μονάδας στη λειτουργία και κερδοφορία του συστήματος.

Στη διπλωματική εργασία αναπτύχθηκαν αλγόριθμοι προσομοίωσης με τη χρήση του προγραμματιστικού περιβάλλοντος GAMS, ενώ για την επεξεργασία και παρουσίαση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή Excel της Microsoft. Πιο συγκεκριμένα, έγινε προσομοίωση λειτουργίας ενός VPP σε χρονικό ορίζοντα 24 ωρών με σκοπό να εξεταστεί ποια είναι η βέλτιστη καμπύλη προσφοράς που οφείλει να καταθέσει ο Διαχειριστής του VPP στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και η καλύτερη διαχείριση των μονάδων διανεμημένης παραγωγής του VPP λαμβάνοντας υπόψη αβεβαιότητες. Θεωρήθηκε ότι οι τύποι ΜΔΠ του VPP είναι θερμικές μονάδες παραγωγής, ανεμογεννήτριες, ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας και ευέλικτα φορτία.

Για την πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής χρησιμοποιήθηκαν πέντε σενάρια με διαφορετικά επίπεδα παραγωγής κάθε ώρα και διαφορετικά βάρη. Για την αξιολόγηση της λειτουργίας και κερδοφορίας του VPP πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις ευαισθησίας για κάθε μια από τις ΜΔΠ του VPP, μεταβάλλοντας τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους όπως εγκατεστημένη ισχύς για τις θερμικές μονάδες, εγκατεστημένη χωρητικότητα και ικανότητα παροχής ισχύος για το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, επίπεδα τιμών στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας κ.ο.κ. Επιπλέον, εξετάστηκε η λειτουργία του VPP χωρίς τη χρήση συστήματος αποθήκευσης ενέργειας και ευέλικτων φορτίων.

Τα αποτελέσματα της μελέτης υποδεικνύουν ότι η χρήση του στοχαστικού προγραμματισμού αποτελεί μια αποτελεσματική μέθοδο διαχείρισης ενός VPP που περιλαμβάνει μη κατανεμόμενες μονάδες ΑΠΕ. Επιπρόσθετα, η ευελιξία που προσφέρουν τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και τα ευέλικτα φορτία οδηγούν στην αύξηση της συνολικής κερδοφορίας του VPP, αποτελώντας έτσι τομείς με επενδυτικό ενδιαφέρον, χωρίς όμως να είναι απαραίτητα για τη λειτουργία του VPP.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Εικονικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής, στοχαστικός προγραμματισμός, σενάρια, αγορά ηλεκτρικής ενέργεια, μη κατανεμόμενες μονάδες ΑΠΕ, συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, ευέλικτα φορτία, συμβατικοί σταθμοί παραγωγής

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to study the optimal management of the distributed energy resources (DERs) and the profitability of a virtual power plant (VPP) using stochastic scenario-based programming. At the same time, the influence of each of the individual DERs of a Virtual Power Plant on the stable operation and profitability of the system is examined.

All the necessary simulation algorithms were developed using the GAMS programming environment, while the Microsoft Excel application was used for data processing and presentation. More specifically, the operation of a VPP was simulated over a 24-hour period in order to examine what is the optimal supply curve to be submitted by the VPP Manager in the electricity market, as well as the most efficient operation of all the DERs of the VPP taking into account uncertainties. The DERs of the VPP were thermal power plants, wind turbines, an energy storage system and flexible loads.

Five scenarios with different production levels per hour and different weights were used as the wind production forecast. To evaluate the operation and profitability of the VPP, sensitivity analysis was conducted for each of the VPP's DERs by changing their technical characteristics such as maximum production capacity for thermal units, installed capacity for the energy storage system, price levels in the electricity market and so on. The operation of the VPP without the use of an energy storage system and of flexible loads was also examined.

The results of the study indicate that the use of stochastic programming is an effective method of managing a VPP that includes non-dispatchable renewable energy sources. In addition, the added flexibility offered by energy storage systems and flexible loads lead to an increase in the overall profitability of the VPP, making them areas with potential for investment, but not absolutely necessary for the stable operation of the VPP.

KEYWORDS

Virtual power plants, stochastic programming, scenarios, electricity market, renewable energy, energy storage systems, flexible loads, conventional power plants, non-dispatchable renewable energy sources

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2020-2022 υπό την επίβλεψη του κ. Παύλου Γεωργιλάκη, αναπληρωτή καθηγητή της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π., τον οποίον οφείλω να ευχαριστήσω για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου αυτό το πολύ ενδιαφέρον και δημιουργικό θέμα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον υποψήφιο διδάκτορα Ευαγγελόπουλο Βασίλειο για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, καθώς και για τον πολύτιμο χρόνο που μου αφιέρωσε.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου, καθώς και τους φίλους μου που ήταν πάντα δίπλα μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1
1.2 ΕΙΚΟΝΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ 1
1.3 ΑΝΑΝΕΣΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ 2
1.4 ΑΓΟΡΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ 2
1.5 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ 2
1.6 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΓΑΣΙΑΣ 3
1.7 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ 3

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΟΝΑΔΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ 5

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 5
2.2 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ 5
2.2.1 Ατμοηλεκτρικές Μονάδες Παραγωγής 5
2.2.2 Αεριοστροβιλικές μονάδες παραγωγής 6
2.2.3 Μονάδες ηλεκτροπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου 6
2.2.4 Μονάδες εσωτερικής καύσης 7
2.3 ΜΗ ΚΑΤΑΝΕΜΟΜΕΝΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΑΠΕ 8
2.3.1 Αιολικοί σταθμοί 8
2.3.2 Φωτοβολταϊκοί σταθμοί 9
2.4 ΚΑΤΑΝΕΜΟΜΕΝΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΑΠΕ 10
2.4.1 Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί 10
2.4.1.1 Υδροηλεκτρικοί σταθμοί δεξαμενής 10
2.4.1.2 Υδροηλεκτρικοί σταθμοί φυσικής ροής 11
2.4.1.3 Υδροηλεκτρικοί σταθμοί αντλησιοταμίευσης 12
2.4.2 Σταθμοί βιομάζας/βιοαερίου 14
2.5 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ 16
2.5.1 Συστήματα μηχανικής αποθήκευσης 16
2.5.2 Σύστημα ηλεκτρικής/ηλεκτρομαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας 17
2.5.3 Ηλεκτροχημικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας/μπαταρίες 17
2.5.4 Χημικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας 18

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΙΚΟΝΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ 20

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 20
3.2 ΕΙΚΟΝΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ 20
3.3 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΕΙΚΟΝΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΗΝ ΑΓΟΡΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ 22
3.3.1 Εισαγωγή 22
3.3.2 Ιστορική αναδρομή 22
3.3.3 Δομή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας 24

3.3.3.1 Αγορά Επόμενης Ημέρας (Day ahead market) 24
3.3.3.2 Ενδοημερήσια Αγορά (Intra-day Market) 25
3.3.3.3 Αγορά Εξισορρόπησης (Balancing Market) 25
3.3.4 Καμπύλη Προσφοράς 26
3.3.5 Καμπύλη Ζήτησης 27
3.3.6 Διαμόρφωση τιμών στην Αγορά Εξισορρόπησης 27
3.3.6.1 Μια Οριακή Τιμή Αποκλίσεων (One-Price Market) 27
3.3.6.2 Δυο Οριακές Τιμές Αποκλίσεων (Two-Price Market) 28
3.4 Η ΑΓΟΡΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ 28

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΙΚΟΝΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ 30

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 30
4.2 ΓΕΝΙΚΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ 30
4.2.1 Στοχαστικός προγραμματισμός δύο σταδίων 30
4.2.2 Πρόβλημα βελτιστοποίησης 31
4.3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΙΚΟΝΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ 31
4.3.1 Αντικειμενική συνάρτηση 32
4.3.2 Περιορισμοί προβλήματος 34
4.3.2.1 Ενεργειακό ισοζύγιο 34
4.3.2.2 Θερμικές Μονάδες 35
4.3.2.3 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας 37
4.3.2.4 Ευέλικτα Φορτία 38
4.3.2.5 Μη κατανεμόμενες Μονάδες Παραγωγής Ενέργειας 40
4.4 ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ 40

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΙΚΟΝΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ 43

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 43
5.2 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ 43
5.2.1 Το περιβάλλον του GAMS 44
5.2.2 Εισαγωγή δεδομένων 47
5.2.3 Εξαγωγή αποτελεσμάτων 49

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 53

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 53
6.2 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ 53
6.3 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ 54
6.3.1 Μη κατανεμόμενες μονάδες ΑΠΕ 54
6.3.2 Θερμικές μονάδες παραγωγής ενέργειας 59
6.3.3 Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (ESS) 64
6.3.4 Ευέλικτα φορτία 66
6.3.5 Φορτίο 71

6.3.6 Τιμή ενέργειας στην Αγορά Επόμενης Ημέρας 75
6.3.7 Τιμή ενέργειας στην Αγορά Εξισορρόπησης 79

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 84

7.1 ΣΥΝΟΨΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ 84
7.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ 85

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 87

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο ηλεκτρισμός είναι ένας θεμελιώδης πόρος στις σύγχρονες κοινωνίες. Χρησιμοποιείται παντού για την ικανοποίηση των βασικών αναγκών της ανθρωπότητας. Η ηλεκτρική ενέργεια είναι η ραχοκοκαλιά της οικονομίας κάθε χώρας, καθώς είναι βασική για τη δραστηριότητα τόσο στη μεταποιητική βιομηχανία όσο και στις βιομηχανίες υπηρεσιών. Λόγω της σημασίας του ηλεκτρικού ρεύματος στη σύγχρονη κοινωνία, είναι απαραίτητο η διαχείριση ολόκληρης της αλυσίδας, από την παραγωγή έως την παροχή ενέργειας στους τελικούς καταναλωτές, να γίνεται με αξιόπιστο και οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Σε μεγάλο αριθμό βιομηχανικών χωρών, αυτό πραγματοποιείται επί του παρόντος στο πλαίσιο των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας στο παρελθόν περιλάμβαναν σχεδόν αποκλειστικά συμβατικές μονάδες παραγωγής, όπως σταθμούς καύσης άνθρακα ή αερίου ή πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Σε αυτές τις συμβατικές μονάδες παραγωγής, τα επίπεδα παραγωγής ενέργειας εξαρτώνται (εντός των ορίων λειτουργίας τους) αποκλειστικά από τη βούληση του Διαχειριστή. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) παράγουν σήμερα ένα μικρό μέρος της συνολικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και έχουν μικρή επίδραση στη συνολική ποιότητα ή αξιοπιστία του δικτύου. Παρόλα αυτά, επί του παρόντος βρίσκονται σε εξέλιξη κυβερνητικές προσπάθειες για να αυξηθεί σημαντικά η διείσδυσή τους στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, προκειμένου να επιτευχθούν στόχοι που σχετίζονται με τη μείωση των εκπομπών ρύπων, την ενεργειακή ανεξαρτησία και τη βελτίωση της αξιοπιστίας των υποδομών. Ωστόσο, όταν η διείσδυση των ΑΠΕ, και πιο συγκεκριμένα των μη κατανεμόμενων μονάδων ΑΠΕ, φτάσει σε αρκετά υψηλά επίπεδα, η διακοπτόμενη φύση της παραγωγής τους μπορεί να έχει σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις σε ολόκληρο το δίκτυο.

Ο έλεγχος, η λειτουργία, ο σχεδιασμός και η ρύθμιση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που περιλαμβάνει έναν σημαντικό αριθμό μη κατανεμόμενων μονάδων ΑΠΕ διαφέρει αρκετά από εκείνο ενός συστήματος χωρίς αυτές. Αυτό είναι το άμεσο αποτέλεσμα της μεταβλητότητας και της περιορισμένης δυνατότητας στην πρόβλεψη των επιπέδων παραγωγής ενέργειας των μη κατανεμόμενων μονάδων ΑΠΕ, που καθιστούν απαραίτητη τη χρήση πολλαπλών ευέλικτων μέσων για την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας αυτής [1].

1.2 ΕΙΚΟΝΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια, τεχνολογικές καινοτομίες, ιδιαίτερα στους τομείς των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των έξυπνων δικτύων έχουν προκαλέσει αυξανόμενο ενδιαφέρον για την πλήρη αξιοποίηση των ετερογενών διανεμημένων ενεργειακών πόρων (Distributed Energy Resources - DER). Ένας εικονικός σταθμός παραγωγής ενέργειας (Virtual Power Plant - VPP) είναι μια οικονομική οντότητα που έχει βάση το νέφος και συγκεντρώνει τις δυνατότητες των διανεμημένων ενεργειακών πόρων με σκοπό την ενίσχυση της παραγωγής ενέργειας, καθώς και την εμπορία ενέργειας στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Ο κύριος σκοπός ενός VPP είναι να συντονίζει την παραγωγή και την κατανάλωση των στοιχείων που διαχειρίζεται με στόχο την μεγιστοποίηση του τελικού οικονομικού κέρδους. Με αυτό τον τρόπο το VPP διευκολύνει τη συμμετοχή των μονάδων διανεμημένης παραγωγής στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας επιτρέποντάς τη συμμετοχή τους σε αυτή ως ένας ενιαίος παραγωγός με αυξημένη ευελιξία [2].

1.3 ΑΝΑΝΕΣΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) ή ήπιες μορφές ενέργειας όπως ονομάζονται διαφορετικά είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με την οδηγία 2009/28/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, ως ενέργεια από ανανεώσιμες μη ορυκτές πηγές θεωρείται η αιολική, η ηλιακή, η γεωθερμική, η υδροθερμική και η ενέργεια των ωκεανών, η υδροηλεκτρική, η ενέργεια από βιομάζα, η ενέργεια από τα εκλυόμενα στους χώρους υγειονομικής ταφής αέρια, η ενέργεια από αέρια μονάδων επεξεργασίας λυμάτων και τέλος η ενέργεια από βιοαέρια [3].

Ο όρος «ήπιες» αναφέρεται σε δυο βασικά χαρακτηριστικά τους. Πρώτον, για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη ή άντληση, σε αντίθεση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας, αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Δεύτερον, πρόκειται για «καθαρές» μορφές ενέργειας, πιο «φιλικές» στο περιβάλλον, που δεν αποδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα στον ίδιο βαθμό με τις υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα. Έτσι, αποτελούν μία αφετηρία για την επίλυση των οικολογικών προβλημάτων που αντιμετωπίζει ο πλανήτης Γη. Κύριο χαρακτηριστικό των πιο διαδεδομένων μη κατανεμόμενων ΑΠΕ, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, είναι η στοχαστική φύση της παραγωγής τους καθώς και η δυσκολία στην πρόβλεψη των επιπέδων παραγωγής τους με ακρίβεια [4], [5].

1.4 ΑΓΟΡΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Σε οικονομικούς όρους, η ηλεκτρική ενέργεια είναι ένα εμπόρευμα που μπορεί να αγοράζεται και να πωλείται. Η εμπορία ηλεκτρικής ενέργειας είναι η διαδικασία κατά την οποία οι παραγωγοί ηλεκτρικής ενέργειας πωλούν την ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν σε προμηθευτές ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίοι στη συνέχεια μπορούν να πουλήσουν αυτήν την ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές. Ο Διαχειριστής του συστήματος επιβλέπει τη ροή ηλεκτρικής ενέργειας σε όλη τη χώρα και διασφαλίζει ότι τα επίπεδα παραγωγής θα ανταποκριθούν τελικά στη ζήτηση. Οι αγορές ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως λειτουργούν με διάφορους τρόπους. Ωστόσο, αυτές οι υλοποιήσεις μοιράζονται ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά. Το πρώτο κοινό χαρακτηριστικό είναι ο διαχωρισμός των δραστηριοτήτων παραγωγής, μεταφοράς, διανομής και αγοραπωλησίας. Οι αγορές προωθούν τον ανταγωνισμό στην παραγωγή και στο λιανικό εμπόριο, ενώ η μεταφορά παραμένει μονοπώλιο που διαχειρίζονται μη εμπορικοί οργανισμοί (Διαχειριστές Συστημάτων, εν συντομία SO). Η εμπορία ηλεκτρικής ενέργειας οργανώνεται σε ανταλλακτήρια. Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες συναλλαγών ανάλογα με την αμεσότητα της διαπραγμάτευσης: 1) μακροπρόθεσμες συναλλαγές (από μία εβδομάδα έως μερικά έτη πριν από την παράδοση ενέργειας), που πραγματοποιείται μέσω αγορών μελλοντικής εκπλήρωσης και μέσω ιδιωτικών διμερών συμβολαίων, και 2) βραχυπρόθεσμες συναλλαγές (από αρκετά λεπτά έως μία ημέρα πριν από την παράδοση ενέργειας).

1.5 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

Στον τομέα της μαθηματικής βελτιστοποίησης, ο στοχαστικός προγραμματισμός αποτελεί μαθηματικό εργαλείο που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση προβλημάτων βελτιστοποίησης που περιλαμβάνουν αβεβαιότητα. Ένα στοχαστικό πρόγραμμα είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης στο οποίο οι άγνωστες μεταβλητές κυμαίνονται εντός γνωστού εύρους τιμών και μπορούν να εκτιμηθούν με χρήση κατανομών πιθανοτήτων. Αντίθετα, στα αιτιοκρατικά προβλήματα, όλες οι παράμετροί τους υποτίθεται ότι είναι γνωστές και δεν απαιτούν τη χρήση προβλέψεων για την επίλυσή τους. Ο στόχος του στοχαστικού

προγραμματισμού είναι να βρει μια λύση η οποία τόσο βελτιστοποιεί ορισμένα κριτήρια που επιλέγονται από εκείνον που λαμβάνει την απόφαση, όσο και λαμβάνει κατάλληλα υπόψη την αβεβαιότητα των παραμέτρων του προβλήματος. Επειδή πολλές αποφάσεις στον πραγματικό κόσμο εμπεριέχουν αβεβαιότητα, ο στοχαστικός προγραμματισμός βρίσκει εφαρμογή σε διάφορους τομείς, από επίλυση χρηματοοικονομικών μοντέλων έως επίλυση προβλημάτων στον τομέα των μεταφορών και της ενέργειας [6].

1.6 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΓΑΣΙΑΣ

Ο προγραμματισμός λειτουργίας όλων των στοιχείων ενός εικονικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής παίζει πολύ σημαντικό ρόλο για την ικανοποίηση των υποχρεώσεών του αλλά και την τελική του κερδοφορία. Τεχνικοί και οικονομικοί περιορισμοί καθώς και αβεβαιότητες που αφορούν την τιμολόγηση και τα επίπεδα παραγωγής ενέργειας από τις μη κατανεμόμενες μονάδες ΑΠΕ, επηρεάζουν σημαντικά τον προγραμματισμό αυτό και τη λειτουργία του VPP στην αγορά ενέργειας. Σκοπός είναι να βρεθεί το βέλτιστο πλάνο λειτουργίας κάθε ελεγχόμενης ενεργειακής μονάδας του VPP για τη μεγιστοποίηση του κέρδους του, λαμβάνοντας υπόψη τους τεχνικούς περιορισμούς, την τιμή παραγωγής, αγοράς και πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και τις αβεβαιότητες που προκύπτουν από τη στοχαστική φύση της παραγωγής ενέργειας των μη κατανεμόμενων μονάδων ΑΠΕ.

1.7 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα εργασία οργανώνεται σε 8 κεφάλαια:

- Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται μια περιγραφή των διάφορων διαθέσιμων μονάδων παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιούνται σήμερα.
- Στο **Κεφάλαιο 3** περιγράφεται η συμμετοχή του εικονικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας.
- Στο **Κεφάλαιο 4** αναλύεται η μαθηματική μοντελοποίηση του VPP για τη βέλτιστη λειτουργία του στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας.
- Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζεται το περιβάλλον που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη της προσομοίωσης λειτουργίας του VPP.
- Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.
- Στο **Κεφάλαιο 7** γίνεται μια σύνοψη της διπλωματικής εργασίας και προτείνονται ενδεχόμενες μελλοντικές επεκτάσεις της.
- Στο **Κεφάλαιο 8** παρουσιάζεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε σε όλη την έκταση της εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ
2

ΜΟΝΑΔΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι θεμελιώδεις αρχές της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας διαμορφώθηκαν στη δεκαετία του 1820 και στις αρχές του 1830 από τον Βρετανό επιστήμονα Michael Faraday. Η μέθοδός του, που χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα, είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την κίνηση ενός βρόχου σύρματος, ή δίσκου Faraday, μεταξύ των πόλων ενός μαγνήτη. Σήμερα χρησιμοποιούνται ποικίλες πηγές ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, όπως καύση ορυκτών καυσίμων (λιγνίτης, πετρέλαιο, φυσικό αέριο, μαζούτ, άνθρακας), πυρηνική ενέργεια, κινητική ενέργεια μέσω της υδατόπτωσης (υδραυλική ενέργεια), αιολική ενέργεια, ηλιακή ενέργεια και γεωθερμική ενέργεια.

Εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής και της περιορισμένης διαθεσιμότητας ορυκτών πόρων, η διεθνής κοινότητα επενδύει μαζικά στην έρευνα που αποσκοπεί στη μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων και ταυτόχρονα επιδιώκει την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Προβλέπεται έτσι ότι στο άμεσο μέλλον τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας θα φιλοξενήσουν σημαντικό αριθμό μονάδων παραγωγής από ΑΠΕ, όπως ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκοί σταθμοί, σταθμοί βιομάζας και βιοαερίου κλπ. Επιπλέον, μεγάλο ενδιαφέρον συγκεντρώνεται σε εναλλακτικές λύσεις, όπως συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, προγράμματα ενεργειακής απόδοσης και διαχείριση ευέλικτων φορτίων (π.χ. μέσω προγραμμάτων απόκρισης ζήτησης (demand response)).

Στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού παρουσιάζονται οι κυριότερες κατηγορίες μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και τα βασικά τους τεχνικά χαρακτηριστικά. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι πιο διαδεδομένες τεχνολογίες μονάδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και τα βασικά τους τεχνικά χαρακτηριστικά.

2.2 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Οι θερμικές μονάδες παραγωγής (ή αλλιώς συμβατικές μονάδες παραγωγής) μετατρέπουν τη θερμική ενέργεια, συχνά από την καύση ενός ορυκτού καυσίμου, σε μηχανική ενέργεια (περιστροφή στον άξονα ενός στροβίλου) και στη συνέχεια αυτή μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Οι θερμικές μονάδες παραγωγής εντάσσονται στην κατηγορία των κατανεμόμενων (ελεγχόμενων) μονάδων παραγωγής.

2.2.1 Ατμοηλεκτρικές Μονάδες Παραγωγής

Στις ατμοηλεκτρικές μονάδες παραγωγής η ηλεκτρική γεννήτρια κινείται με ατμό. Το νερό θερμαίνεται από την καύση του ορυκτού καυσίμου, μετατρέπεται σε ατμό υψηλής πίεσης, ο οποίος περιστρέφει ένα ατμοστρόβιλο. Στον ατμοστρόβιλο η θερμική ενέργεια του ατμού γίνεται μηχανική ενέργεια που κινεί μία ηλεκτρική γεννήτρια. Αφού περάσει από τον ατμοστρόβιλο, ο ατμός συμπυκνώνεται σε ένα συμπυκνωτή. Η μεγαλύτερη διαφοροποίηση στον σχεδιασμό των ατμοηλεκτρικών μονάδων παραγωγής οφείλεται στις διαφορετικές πηγές καυσίμου. Η πλειοψηφία των θερμικών μονάδων παραγωγής, όπως μονάδες

παραγωγής από καύση άνθρακα, μονάδες παραγωγής από πυρηνική ενέργεια, γεωθερμικές μονάδες, ηλιοθερμικοί σταθμοί, μονάδες παραγωγής από αποτέφρωση απορριμμάτων καθώς και πολλοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής φυσικού αερίου χρησιμοποιούν ατμοστρόβιλους. Το φυσικό αέριο συχνά καίγεται σε αεριοστρόβιλους καθώς και σε λέβητες. Η απορριπτόμενη θερμότητα από έναν αεριοστρόβιλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανύψωση ατμού, σε μια μονάδα συνδυασμένου κύκλου που βελτιώνει τη συνολική απόδοση, όπως θα αναφερθεί αναλυτικότερα παρακάτω [7].

Η απόδοση μιας συμβατικής ατμοηλεκτρικής μονάδας, η οποία ορίζεται ως η ενέργεια που παράγεται από τη μονάδα διαιρούμενη με την θερμική ενέργεια που περιέχεται στο καύσιμο που καταναλώνεται από αυτήν, είναι συνήθως 33-48%, περιορισμένη όπως όλες οι θερμικές μηχανές από τους νόμους της θερμοδυναμικής. Η υπόλοιπη ενέργεια αποβάλλεται με τη μορφή θερμότητας. Δεδομένου ότι η απόδοση της εγκατάστασης περιορίζεται θεμελιωδώς από την αναλογία των απόλυτων θερμοκρασιών του ατμού στην είσοδο και την έξοδο του στροβίλου, η βελτίωση της απόδοσης απαιτεί τη χρήση υψηλότερης θερμοκρασίας και επομένως υψηλότερη πίεση ατμού [7], [8].

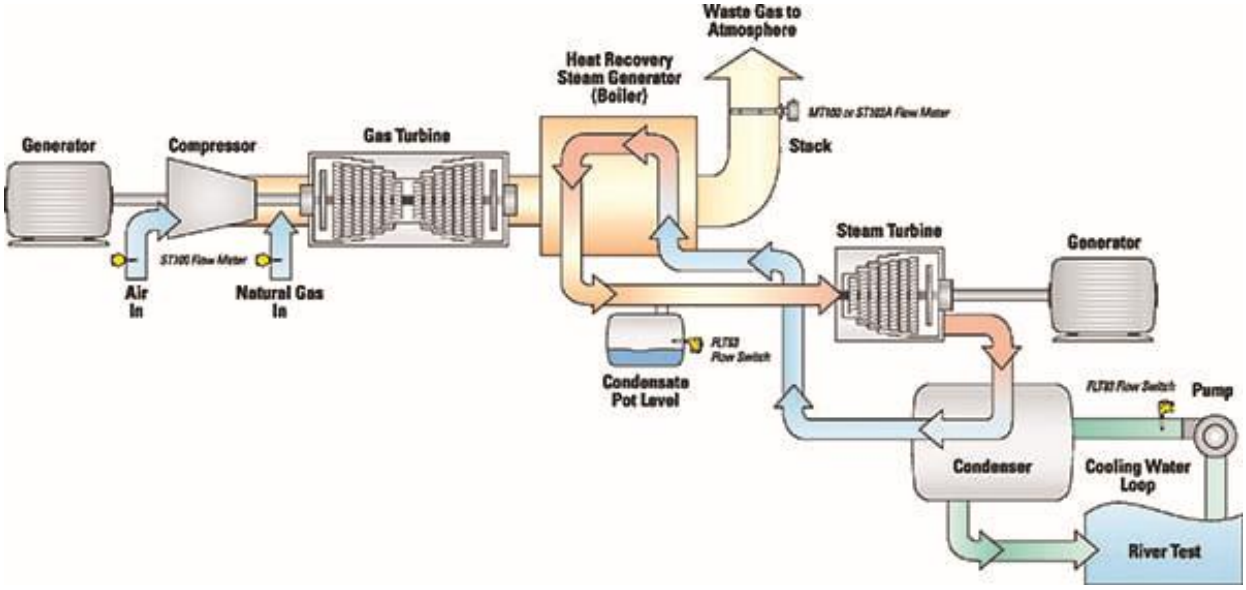
2.2.2 Αεριοστροβιλικές μονάδες παραγωγής

Οι εγκαταστάσεις αεριοστροβίλων χρησιμοποιούν τη δυναμική πίεση από τα ρέοντα αέρια (αέρας και προϊόντα καύσης) για να λειτουργήσουν απευθείας τον στρόβιλο που θα κινήσει μία ηλεκτρική γεννήτρια. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των αεριοστροβιλικών μονάδων παραγωγής είναι η ικανότητά τους να ενεργοποιούνται και να απενεργοποιούνται μέσα σε λίγα λεπτά (ταχεία απόκριση), παρέχοντας ισχύ κατά τη διάρκεια της αιχμής ζήτησης ή σε χρονικές περιόδους που υπάρχει ανάγκη για άμεση παροχή ενεργού ισχύος (π.χ. απώλεια μονάδας παραγωγής). Δεδομένου ότι οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ενός κύκλου (μόνο με αεριοστρόβιλο) είναι λιγότερο αποδοτικές από τις μονάδες συνδυασμένου κύκλου, χρησιμοποιούνται συνήθως ως μονάδες αιχμής, δηλαδή ως μονάδες παραγωγής που συνήθως λειτουργούν από μερικές ώρες την ημέρα έως μερικές δεκάδες ώρες τον χρόνο, ανάλογα με τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και την παραγωγική ικανότητα της περιοχής. Οι εγκαταστάσεις αεριοστροβίλων μπορεί να είναι σχετικά μικρές μονάδες, και μερικές φορές μη επανδρωμένες, δηλαδή μπορούν να λειτουργήσουν και να ελεγχθούν από απόσταση [9].

2.2.3 Μονάδες ηλεκτροπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου

Μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συνδυασμένου κύκλου είναι ένα σύνολο μηχανών θερμότητας που λειτουργούν παράλληλα με την ίδια πηγή θερμότητας, μετατρέποντάς την σε μηχανική ενέργεια. Ο πιο κοινός τύπος είναι ο αεριοστρόβιλος συνδυασμένου κύκλου (combined cycle gas turbine – CCGT). Η βασική αρχή είναι ότι μετά την ολοκλήρωση του κύκλου του στον πρώτο κινητήρα, το υγρό εργασίας (η εξάτμιση) είναι ακόμα αρκετά ζεστό ώστε ένας δεύτερος επόμενος θερμικός κινητήρας να μπορεί να εξάγει ενέργεια από την αυξημένη θερμότητα των καυσαερίων. Συνήθως η θερμότητα περνά μέσα από έναν εναλλάκτη θερμότητας, έτσι ώστε οι δύο κινητήρες να μπορούν να χρησιμοποιούν διαφορετικά υγρά εργασίας. Οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου τροφοδοτούνται συνήθως με φυσικό αέριο, αν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν μαζούτ, αέριο σύνθεσης ή άλλα καύσιμα. Το συμπληρωματικό καύσιμο μπορεί να είναι φυσικό αέριο, μαζούτ ή άνθρακας. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν βιοκαύσιμα. Οι ενσωματωμένοι σταθμοί ηλιακής ενέργειας συνδυασμένου κύκλου συνδυάζουν την ενέργεια που συλλέγεται από την ηλιακή ακτινοβολία με άλλο καύσιμο για να μειώσουν το κόστος των καυσίμων και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Πολλοί πυρηνικοί σταθμοί επόμενης γενιάς μπορούν να χρησιμοποιήσουν το υψηλότερο εύρος θερμοκρασίας ενός κύκλου Brayton, καθώς και την αύξηση της θερμικής απόδοσης που προσφέρει ένας κύκλος Rankine.

Όπου η επέκταση ενός αγωγού φυσικού αερίου δεν είναι πρακτική ή δεν μπορεί να δικαιολογηθεί οικονομικά, οι ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια σε απομακρυσμένες περιοχές μπορούν να καλυφθούν με μικρής κλίμακας μονάδες συνδυασμένου κύκλου που χρησιμοποιούν ανανεώσιμα καύσιμα. Αντί για φυσικό αέριο, αυτά αεριοποιούν και καίνε γεωργικά και δασικά απόβλητα, τα οποία είναι συχνά άμεσα διαθέσιμα στις αγροτικές περιοχές.



Σχήμα 2.1: Αναπαράσταση συνδυασμένου κύκλου παραγωγής ενέργειας [10].

Με την παραγωγή ενέργειας από πολλαπλές ροές εργασίας, η συνολική απόδοση του συστήματος μπορεί να αυξηθεί κατά 50-60%. Δηλαδή, από μια συνολική απόδοση για παράδειγμα 34% (για έναν απλό κύκλο), σε έως και 64% (για έναν συνδυασμένο κύκλο).

2.2.4 Μονάδες εσωτερικής καύσης

Οι μονάδες εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ) χρησιμοποιούνται για την παροχή ισχύος σε απομονωμένες κοινότητες και χρησιμοποιούνται συχνά για μικρές μονάδες συμπαραγωγής. Νοσοκομεία, κτίρια γραφείων, βιομηχανικές εγκαταστάσεις και άλλες κρίσιμες εγκαταστάσεις τα χρησιμοποιούν επίσης ως εφεδρικές μονάδες σε περίπτωση διακοπής ρεύματος. Αυτές συνήθως τροφοδοτούνται από ντίζελ, βαρύ πετρέλαιο ή φυσικό αέριο. Η καύση του καυσίμου γίνεται στο εσωτερικό σώμα της ίδιας της μηχανής (οπότε εκεί οφείλεται η ονομασία της), σε αντίθεση με την ατμομηχανή, όπου η καύση γίνεται εκτός της μηχανής, και συγκεκριμένα γίνεται στον λέβητα. Ως ΜΕΚ θεωρούνται γενικά οι αεριομηχανές, οι βενζινομηχανές, οι πετρελαιομηχανές και οι αεριοστρόβιλοι. Γενικά στις ΜΕΚ, "εργαζόμενο μέσο", ή "εργαζόμενη ουσία" είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας, ενώ στις ατμομηχανές είναι ο ατμός. Ένας άλλος τομέας που έχουν ευρεία εφαρμογή είναι σε οχήματα, όπως λεωφορεία, τρένα, πλοία, φορτηγά, αυτοκίνητα, μοτοσυκλέτες, κλπ

Βασική διάκριση των ΜΕΚ είναι σύμφωνα με τον τρόπο μετατροπής της θερμικής ενέργειας σε μηχανικό έργο, όπου και διακρίνονται σε εμβολοφόρες ή παλινδρομικές και σε περιστροφικές ή στροβίλους [11].

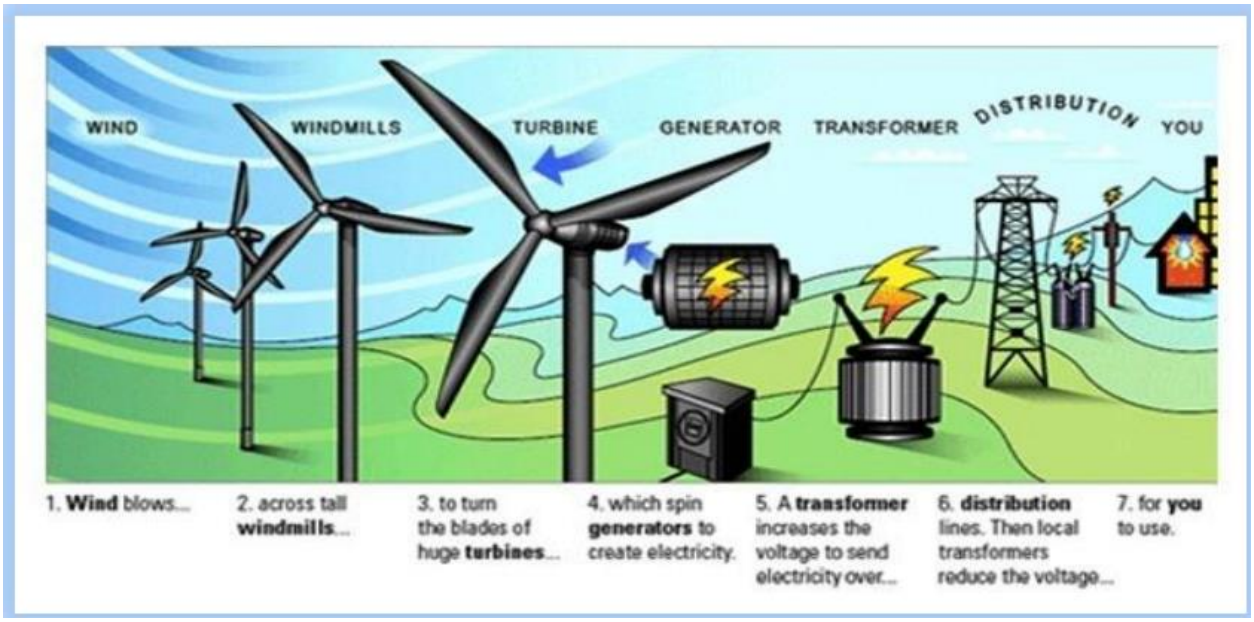
2.3 ΜΗ ΚΑΤΑΝΕΜΟΜΕΝΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΑΠΕ

Οι μη κατανεμόμενοι σταθμοί ΑΠΕ (ή μη κατανεμόμενες μονάδες ΑΠΕ στη συνέχεια της παρούσας εργασίας) είναι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, οι οποίες δεν μπορούν να προγραμματίσουν την παραγωγή τους λόγω της μεταβλητής φύσης της πρωτογενούς πηγής ενέργειας που χρησιμοποιούν. Ως μη κατανεμόμενοι σταθμοί ΑΠΕ θεωρούνται οι αιολικοί σταθμοί (σταθμός ΑΠΕ αποτελούμενος από μία ή περισσότερες ανεμογεννήτριες) και οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί (σταθμοί ΦΒ).

Η δυνατότητα προγραμματισμού ή ρύθμισης της παραγωγής είναι η ικανότητα μιας δεδομένης μονάδας να αυξάνει ή/και να μειώνει γρήγορα την παραγωγή της κατά βούληση του Διαχειριστή. Με τη ρύθμιση της παραγωγής των μονάδων ο Διαχειριστής του συστήματος κατανέμει την παραγωγή έτσι ώστε η παραγόμενη ενέργεια να ακολουθεί τη ζήτηση του συστήματος [12].

2.3.1 Αιολικοί σταθμοί

Οι αιολικοί σταθμοί (ή αιολικά πάρκα) μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική και στη συνέχεια τη μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια. Η μετατροπή αυτή γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, μέσω της πτερωτής, μετατρέπεται η κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική ενέργεια με τη μορφή περιστροφής του άξονα της πτερωτής. Στο δεύτερο στάδιο, μέσω της γεννήτριας, επιτυγχάνεται η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Το κύριο μέγεθος που καθορίζει την ισχύ που παράγεται είναι η ταχύτητα του ανέμου [13]. Η αιολική ενέργεια είναι μια δημοφιλής, βιώσιμη, ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που έχει πολύ μικρότερο αντίκτυπο στο περιβάλλον από την καύση ορυκτών καυσίμων. Τα αιολικά πάρκα αποτελούνται συνήθως από πολλές μεμονωμένες ανεμογεννήτριες και συνδέονται στο σύστημα μεταφοράς (για σταθμούς εγκατεστημένης ισχύος μεγαλύτερης των 8 με 10 MW) ή στο δίκτυο διανομής (για σταθμούς εγκατεστημένης ισχύος μικρότερης των 8 με 10 MW).



Σχήμα 2.2: Λειτουργία ανεμογεννητριών και σύνδεση με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας [14]

Η παραγωγή των αιολικών σταθμών χαρακτηρίζεται από μεγάλη αβεβαιότητα με αποτέλεσμα η πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής να περιέχει σημαντικό σφάλμα και να μην μπορεί να προγραμματιστεί. Προς αυτή την κατεύθυνση, ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (International Energy Agency - IEA) έχει θέσει ως

στόχο τη βελτίωση της ακρίβειας των προβλέψεων αιολικής παραγωγής προκειμένου να μειωθούν οι επιπτώσεις στον προγραμματισμό λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας [15]. Προκειμένου να μειώνονται οι αποκλίσεις μεταξύ παραγωγής και ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται τεχνικές διαχείρισης ενέργειας, όπως υβριδικοί σταθμοί (π.χ ανεμογεννήτριες σε συνδυασμό με συσσωρευτές), υδροηλεκτρική ενέργεια ή άλλες ελεγχόμενες πηγές ενέργειας, στρεφόμενη εφεδρεία, εξαγωγή και εισαγωγή ενέργειας από γειτονικές περιοχές, αποθήκευση παραγόμενης ενέργειας και μείωση της ζήτησης όταν η αιολική παραγωγή είναι χαμηλή.

Τα αιολικά πάρκα μπορεί να βρίσκονται εγκατεστημένα τόσο στη στεριά (onshore) όσο και στη θάλασσα (offshore). Τα χερσαία αιολικά πάρκα έχουν μεγαλύτερο οπτικό αντίκτυπο στο τοπίο από άλλους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, καθώς πρέπει να απλωθούν σε περισσότερη έκταση γης και να κατασκευαστούν σε αγροτικές περιοχές. Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα έχουν μεγαλύτερη και πιο σταθερή παραγωγή ενέργειας από ό,τι στην ξηρά ενώ έχουν και μικρότερο οπτικό αντίκτυπο. Αν και παγκοσμίως υπάρχουν λιγότερα υπεράκτια πάρκα επί του παρόντος (34,4GW εγκατεστημένη ισχύς σε υπεράκτια πάρκα έναντι 743 GW εγκατεστημένη ισχύς σε χερσαία πάρκα [16],[17],[18]) και το κόστος κατασκευής και συντήρησής τους είναι υψηλότερο, αυτά προβλέπεται να επεκταθούν μελλοντικά [19].

Το 2020, πάνω από το 5% της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας προήλθε από τα αιολικά πάρκα, ποσοστό που αναμένεται να αυξηθεί [20], [21].

2.3.2 Φωτοβολταϊκοί σταθμοί

Ένας φωτοβολταϊκός σταθμός παραγωγής ενέργειας (σταθμός ΦΒ) είναι ένα μεγάλης κλίμακας φωτοβολταϊκό σύστημα (PV σύστημα). Οι φωτοβολταϊκές μονάδες μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Ωστόσο, αυτό διαφέρει και δεν πρέπει να συγχέεται με τους ηλιοθερμικούς σταθμούς (Concentrated Solar Power Plant-CSP), την άλλη μεγάλης κλίμακας τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την ηλιακή ακτινοβολία, η οποία χρησιμοποιεί θερμότητα για την τροφοδοσία μιας ποικιλίας συμβατικών συστημάτων γεννητριών. Και οι δύο προσεγγίσεις έχουν τα δικά τους πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, αλλά μέχρι σήμερα, για διάφορους λόγους, τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν πολύ ευρύτερη χρήση.

Η απόδοση ενός σταθμού ΦΒ εξαρτάται από τις κλιματικές συνθήκες, τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται και τη διαμόρφωση του συστήματος. Σημαντικός παράγοντας απωλειών και μείωσης της απόδοσης των φωτοβολταϊκών αποτελεί η ρύπανση των πάνελ με συσσώρευση σκόνης ή άλλων οργανικών υλικών στην επιφάνειά τους. Άλλος καθοριστικός παράγοντας της παραγωγής ενέργειας του συστήματος είναι η αποδοτικότητα μετατροπής των φωτοβολταϊκών στοιχείων, η οποία εξαρτάται από τον τύπο της ηλιακής κυψέλης που χρησιμοποιείται. Υπάρχουν επίσης απώλειες κατά τη μετατροπή του συνεχούς ρεύματος, που παράγουν τα φωτοβολταϊκά, σε εναλλασσόμενο που παρέχεται στο δίκτυο, λόγω ενός μεγάλου φάσματος παραγόντων, όπως η πτώση τάσης του καλωδίου, οι αποδόσεις μετατροπής και άλλες παρασιτικές απώλειες. Μια παράμετρος που ονομάζεται «λόγος απόδοσης» έχει δημιουργηθεί για την αξιολόγηση αυτών των απωλειών. Ο λόγος απόδοσης είναι ο λόγος της ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος που παρέχεται στο δίκτυο προς τη συνολική ισχύ συνεχούς ρεύματος που τα φωτοβολταϊκά στοιχεία θα πρέπει να μπορούν να παρέχουν υπό τις περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες λειτουργούν. Στους σύγχρονους σταθμούς ΦΒ η αναλογία απόδοσης υπερβαίνει το 80% [22]–[24].

Η παραγωγή ενέργειας από σταθμούς ΦΒ είναι πιο προβλέψιμη από την παραγωγή ενέργειας των αιολικών σταθμών, με μικρότερες μεταβολές και διακυμάνσεις. Οι μόνοι άγνωστοι παράγοντες για την πρόβλεψη της παραγωγής ενέργειας από σταθμούς ΦΒ είναι η νεφοκάλυψη, ο παγετός και το χιόνι.

2.4 ΚΑΤΑΝΕΜΟΜΕΝΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΑΠΕ

2.4.1 Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί

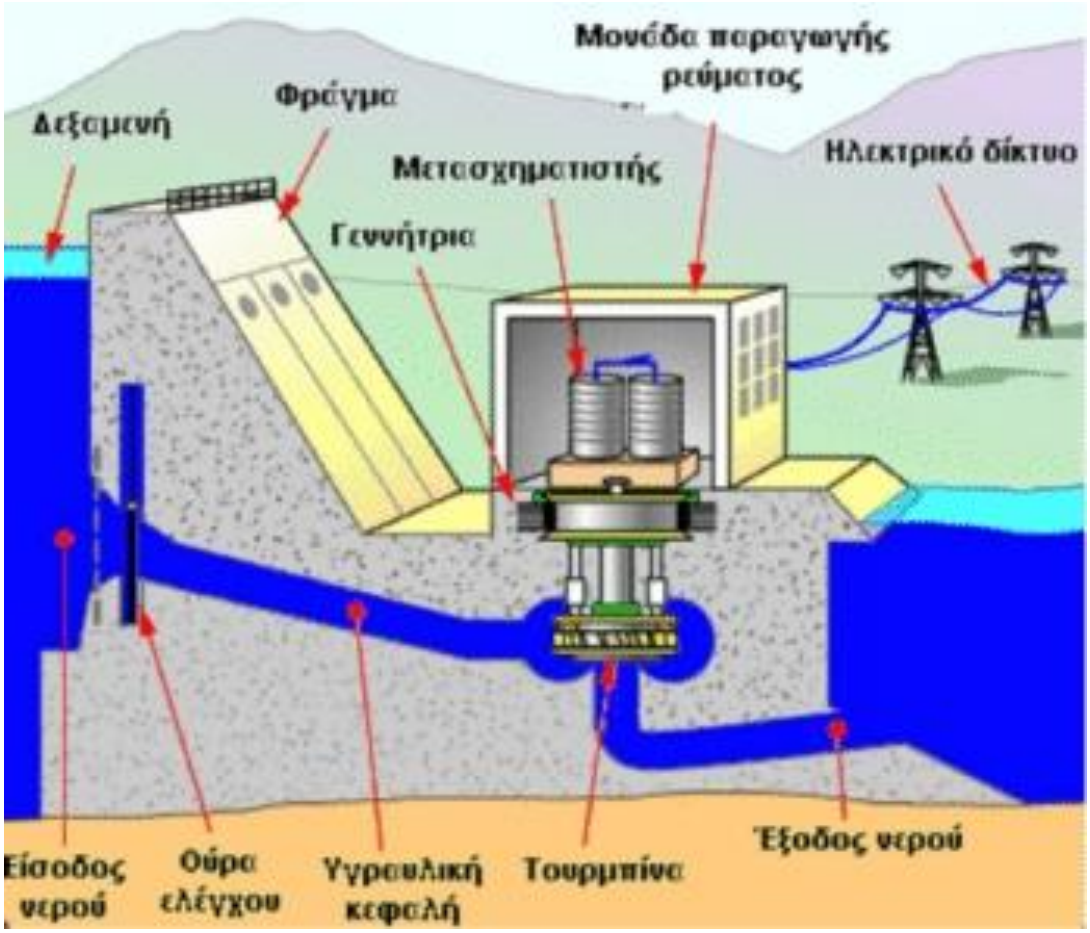
Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του τρεχούμενου νερού σε μηχανική και στη συνέχεια τη μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι σύγχρονοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί χρησιμοποιούν στροβίλους και γεννήτριες. Το κινούμενο νερό περιστρέφει τον δρομέα στον στρόβιλο, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με μια ηλεκτρομαγνητική γεννήτρια που παράγει ηλεκτρική ενέργεια όταν εκείνος περιστρέφεται [25]. Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μορφή ανανεώσιμης ενέργειας. Το 2019 αντιπροσώπευε περισσότερο από το 18% της συνολικής εγκατεστημένης ικανότητας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο.

Υπάρχουν τρεις τύποι υδροηλεκτρικών σταθμών: δεξαμενής, φυσικής ροής (run of the river) και εκείνοι που λειτουργούν με αντλησιοταμίευση ή αντλούμενη αποθήκευση (pumped storage).

2.4.1.1 Υδροηλεκτρικοί σταθμοί δεξαμενής

Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί δεξαμενής είναι οι πιο κοινοί σταθμοί παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας. Για την κατασκευή της δεξαμενής χρησιμοποιούνται χαράδρες από τις οποίες ρέει η φυσική κοίτη του νερού. Σε κάποιο σημείο εκροής, όπου το πλάτος είναι μικρό, φράζεται κατάλληλα η εκροή και δημιουργείται μια δεξαμενή μέσα στην οποία συσσωρεύεται νερό. Η χωρητικότητα της δεξαμενής νερού κυμαίνεται συνήθως από 1 έως 10 km^3. Αγωγοί με μεγάλη διάμετρο, π.χ. 8 m, μεταφέρουν το νερό από το κάτω μέρος της δεξαμενής στον υδροηλεκτρικό σταθμό. Προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η υψομετρική διαφορά της δεξαμενής και του σταθμού, η μορφολογία του εδάφους αξιοποιείται κατάλληλα. Έτσι ο σταθμός μπορεί να τοποθετηθεί έως και αρκετά χιλιόμετρα μακριά από το φράγμα.

Στην κατασκευή των φραγμάτων τοποθετούνται δύο αποφρακτικά όργανα. Το ένα επιτρέπει τη διακοπή της εκροής του νερού όταν πρόκειται να εκτελεστούν εργασίες συντήρησης των σωλήνων. Το άλλο αποφρακτικό όργανο επιτρέπει τη διακοπή της εισροής του νερού στον στρόβιλο. Εκτός των εργασιών συντήρησης, η αποφρακτική βάνα του στροβίλου είναι απαραίτητη και στην περίπτωση που ένας σωλήνας προσαγωγής τροφοδοτεί δύο ή περισσότερους στροβίλους. Η ρύθμιση της ισχύος γίνεται με βελονοειδείς βαλβίδες στους στροβίλους τύπου Pelton, ή με ρυθμιζόμενα πτερύγια στους στροβίλους τύπου Francis. Σε απότομες αλλαγές ισχύος δημιουργούνται κρουστικά υδραυλικά πλήγματα στις σωληνώσεις που μπορούν να τις καταστρέψουν. Για την αντιμετώπιση του υδραυλικού πλήγματος χρησιμοποιείται μια δεξαμενή απόσβεσης ή δεξαμενή εκτόνωσης. Τέτοιες εγκαταστάσεις συχνά εξυπηρετούν πολλαπλούς σκοπούς, εκτός από την παραγωγή ενέργειας, όπως η αστική ύδρευση, ο έλεγχος πλημμυρών και η άρδευση [26].

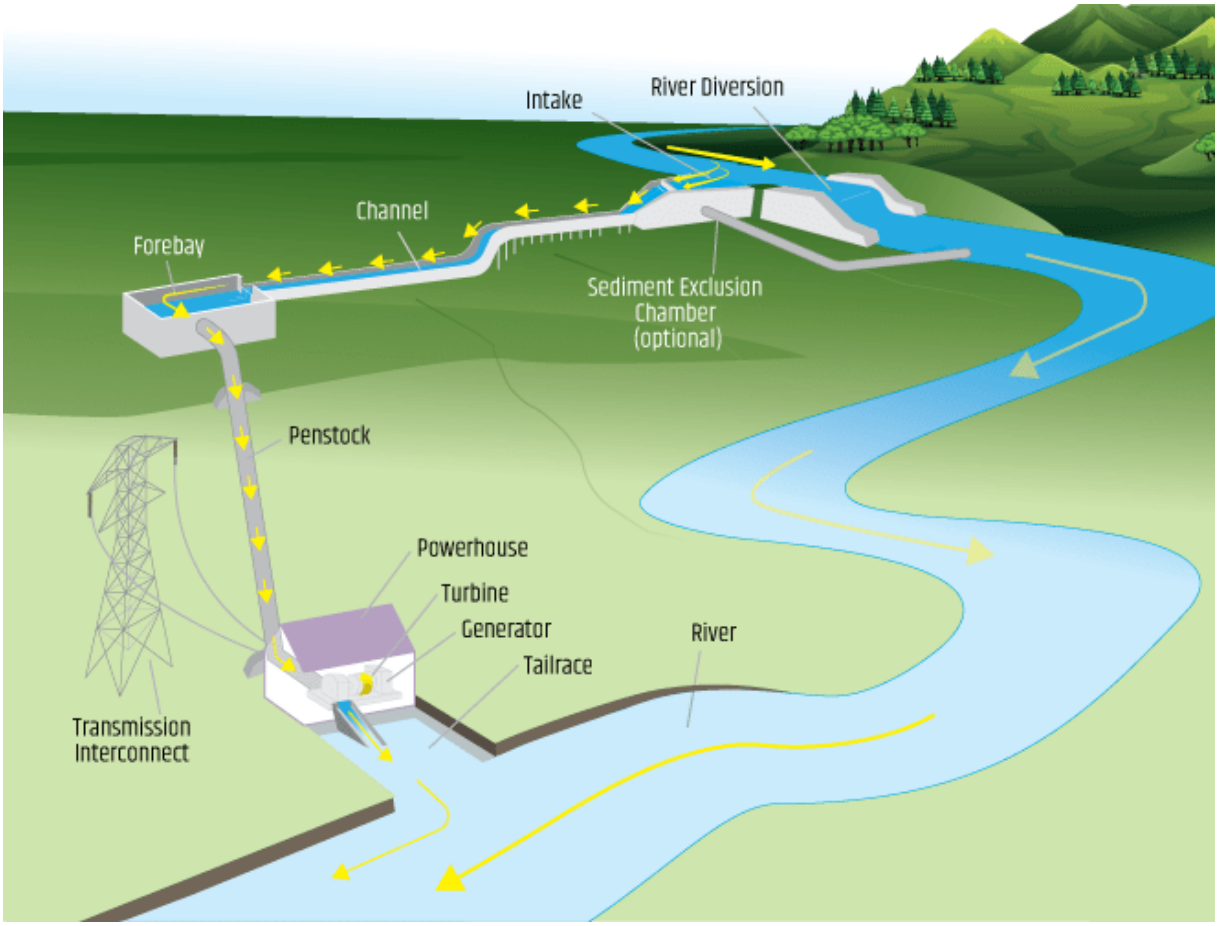


Σχήμα 2.3: Υδροηλεκτρικός σταθμός δεξαμενής [27]

2.4.1.2 Υδροηλεκτρικοί σταθμοί φυσικής ροής

Στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς φυσικής ροής, ένα τμήμα του ποταμού εκτρέπεται μέσω του στομίου εισόδου σε μια δεξαμενή, που λειτουργεί ως μέσο αποθήκευσης μικρής χωρητικότητας. Από εκεί το νερό μέσω ενός δικτύου σωληνώσεων μεταφέρεται υπό πίεση σε ένα στρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Οι στρόβιλοι στους οποίους το νερό διοχετεύεται, ελεγχόμενα, είναι συνήθως τύπου Kaplan ή Francis. Για να διευκολυνθεί η διέλευση των ψαριών και ενδεχομένως της ναυσιπλοΐας, μπορεί να υπάρχουν ιχθυόσκαλες ή κανάλια. Υπάρχει, κατά κανόνα, ένα κανάλι για πλοία και ψάρια. Επειδή δεν απαιτούν σημαντικά έργα υποδομής, δεν προκαλούν μεγάλη διατάραξη του οικοσυστήματος.

Οι σταθμοί φυσικής ροής τοποθετούνται σε σημεία όπου υπάρχει μεγάλη κλίση στο έδαφος και το πλάτος του ποταμού είναι σχετικά μικρό, με απότομες όχθες. Αν η διαμόρφωση του ποταμού δεν επιτρέπει την κατασκευή του σταθμού μέσα στον ποταμό, τότε γίνεται διάνοιξη ενός παράλληλου καναλιού για να τοποθετηθεί εκεί. Σε ποτάμια, όπου το επιτρέπει η κλίση του εδάφους, μπορεί να κατασκευαστούν αρκετοί υδροηλεκτρικοί σταθμοί φυσικής ροής, π.χ. όπως στον Ρήνο ανάμεσα στο Bodensee και το Basel όπου έχουν κατασκευαστεί 13 σταθμοί φυσικής ροής σε μια συνολική απόσταση 140 km [25].



Σχήμα 2.4: Υδροηλεκτρικός σταθμός φυσικής ροής [27]

2.4.1.3 Υδροηλεκτρικοί σταθμοί αντλησιοταμίευσης

Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί αντλησιοταμίευσης λειτουργούν ουσιαστικά σαν συστήματα αποθήκευσης ενέργειας που μπορούν να αποθηκεύσουν την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από άλλους μη κατανεμόμενους σταθμούς ΑΠΕ, όπως αιολικούς σταθμούς και φωτοβολταϊκούς σταθμούς, για χρήση σε μεταγενέστερο χρόνο. Σε αυτούς τους σταθμούς αποθηκεύεται ενέργεια αντλώντας νερό από μια δεξαμενή σε χαμηλότερο υψόμετρο και μεταφέροντάς το σε μια ανάντη δεξαμενή σε υψηλότερο υψόμετρο. Όταν αυξηθεί το φορτίο του δικτύου, ο σταθμός λειτουργεί σαν υδροηλεκτρικός σταθμός δεξαμενής και διοχετεύει την αποθηκευμένη ενέργεια στο δίκτυο. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης του κύκλου άντλησης – παραγωγής μπορεί να φτάσει το 75% με 85% αποτελώντας έτσι τον πιο οικονομικά αποδοτικό τρόπο αποθήκευσης ενέργειας επί του παρόντος [28].

Οι υδροαντλητικοί σταθμοί, όπως ονομάζονται αλλιώς, αποτελούνται από δυο δεξαμενές, την ανάντη δεξαμενή και την κατάντη δεξαμενή, από μια αντλία, ένα στρόβιλο και μια γεννήτρια. Ο στρόβιλος και η αντλία, πολλές φορές, είναι ενσωματωμένοι σε μια μηχανή, τον αντλιοστρόβιλο. Ο αντλιοστρόβιλος, ανάλογα με τη φορά περιστροφής του, είτε αντλεί νερό είτε περιστρέφεται από το νερό, δηλαδή απορροφά ή διοχετεύει αντίστοιχα ηλεκτρική ισχύ στο δίκτυο. Στην Ελλάδα, υπάρχουν δυο υδροαντλητικοί σταθμοί. Ο ένας είναι ο υδροηλεκτρικός σταθμός Σφηκιάς στον Αλιάκμονα και ο άλλος ο υδροηλεκτρικός σταθμός Θησαυρού στον Νέστο [25].

Σχήμα 2.5: Λειτουργία υδροηλεκτρικού σταθμού αντλησιοταμίευσης ως σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (φόρτιση) [27]

Σχήμα 2.6: Λειτουργία υδροηλεκτρικού σταθμού αντλησιοταμίευσης ως σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (εκφόρτιση) [27]

2.4.2 Σταθμοί βιομάζας/βιοαερίου

Ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (IEA) ορίζει τη βιομάζα ως οποιοδήποτε οργανικό υλικό που προέρχεται από τον φυτικό ή ζωικό κόσμο και διατίθεται με βιώσιμο τρόπο, δηλαδή να είναι διαθέσιμο σε ανανεώσιμη βάση. Η βιομάζα περιλαμβάνει το ξύλο, τις γεωργικές φυτείες και την οργανική φάση των αποβλήτων από αστικές και βιομηχανικές πηγές. Μπορεί να κατηγοριοποιηθεί γενικότερα σε καθαρή βιομάζα όπου ανήκουν τα ξύλα και οι ενεργειακές φυτικές καλλιέργειες και σε βιομάζα από απόβλητα που είναι δασικά απόβλητα, οργανικά προϊόντα ανακύκλωσης, αστικά και ζωικά απόβλητα. Η βιομάζα θεωρείται ανανεώσιμη πηγή ενέργειας μόνο εάν τα επίπεδα «παραγωγής» της είναι τουλάχιστον ίσα με τα επίπεδα κατανάλωσής της. Για παράδειγμα η χρήση ξύλου δεν πρέπει να οδηγήσει σε μείωση του αριθμού των δέντρων. Η βιομάζα αποτελείται κυρίως από τρία στοιχεία, το οξυγόνο, το υδρογόνο και τον άνθρακα [29], [30].

Η αεριοποίηση της βιομάζας περιγράφει την μετατροπή στερεής βιομάζας υπό υψηλές θερμοκρασίες σε ένα καθαρό εύφλεκτο αέριο. Είναι συναφής διεργασία με την πυρόλυση, με την διαφορά ότι στην αεριοποίηση ο παράγοντας παροχής οξυγονούχου αερίου είναι απαραίτητος, σε αντίθεση με την πυρόλυση

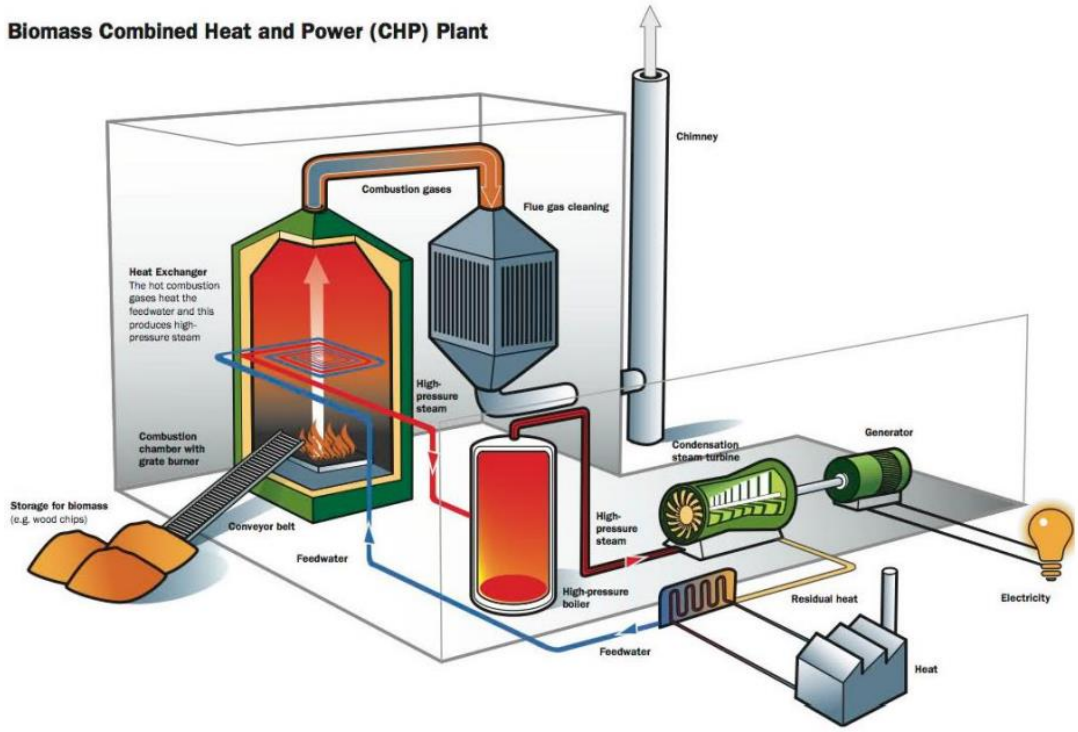
που δεν προστίθεται επιπλέον οξυγόνο. Ο κύριος στόχος αυτής της θερμοχημικής μετατροπής είναι να μεταφερθεί η μέγιστη ποσότητα χημικής ενέργειας που περιέχεται μέσα στην βιομάζα, σε αέριο καύσιμο.

Μία άλλη πηγή παραγωγής βιοαερίου είναι τα αέρια χωματερής LFG (Landfill Gasses). Εξαιτίας των τεράστιων ποσοτήτων αστικών, αγροτικών και ζωικών απορριμμάτων, δημιουργήθηκε η ανάγκη διαχείρισης και αποθήκευσης αυτών των αποβλήτων. Η αξιοποίηση των αποβλήτων αυτών έχει εκτός από οικονομικά οφέλη και περιβαλλοντικά, διότι αποτελούν πηγή εκπομπών μεθανίου στην ατμόσφαιρα αν δεν γίνει η περισυλλογή του LFG. Η διαδικασία συλλογής του LFG, περιλαμβάνει μερική κάλυψη του χώρου υγειονομικής ταφής και εισαγωγή συστημάτων συλλογής είτε με κατακόρυφα είτε με οριζόντια τοιχώματα, ανάλογα με τις συνθήκες. Καθώς το αέριο ταξιδεύει μέσω του συστήματος συλλογής, το συμπύκνωμα που παγιδεύεται σε υγρή μορφή συσσωρεύεται έτσι ώστε να επεξεργαστεί στη συνέχεια. Απαιτείται ελάχιστη επεξεργασία αν το προϊόν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε λέβητες ή στα περισσότερα συστήματα εσωτερικής καύσης. Άλλα όμως συστήματα εσωτερικής καύσης, όπως αεριοστρόβιλοι, απαιτούν πιο εξελιγμένες διαδικασίες (απορροφητικές κλίνες, βιολογικούς καθαριστές) για να απομακρυνθούν ουσίες, όπως το υδρόθειο. Η ατελής καύση του LFG μπορεί να παράγει τοξικά παραπροϊόντα. Προκειμένου να διασφαλιστεί ότι δεν θα υπάρχουν τοξικοί ρύποι θα πρέπει η διαδικασία καύσης να παρακολουθείται σε όλη τη διάρκειά της. Το LFG μπορεί να αναβαθμιστεί σε αέριο καύσιμο υψηλής ενεργειακής ποιότητας μέσω της κατάλληλης επεξεργασίας του, αυξάνοντας την περιεκτικότητά του σε μεθάνιο και μειώνοντας αντίστοιχα το περιεχόμενό του σε διοξείδιο του άνθρακα, άζωτο και υδρογόνο. Το αναβαθμισμένο LFG (ή ανανεώσιμο φυσικό αέριο RNG), είναι ισοδύναμο καύσιμο με το φυσικό αέριο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις εφαρμογές που χρησιμοποιούν συμπιεσμένο φυσικό αέριο (CNG) ή υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) [31],[32],[33].

Η αξιοποίηση του βιοκαυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ποικίλει ανάλογα με το είδος που έχει σκοπό να χρησιμοποιήσει ο σταθμός παραγωγής ενέργειας και κατά συνέπεια με τον τρόπο που έχει σχεδιαστεί. Τα εργοστάσια τα οποία μπορούν να χειριστούν βιοκαύσιμα σε μεγάλη κλίμακα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι τα θερμοηλεκτρικά και συγκεκριμένα οι ατμοηλεκτρικοί σταθμοί, οι αεριοστροβιλικοί σταθμοί και οι σταθμοί συνδυασμένου κύκλου [34]. Η διαδικασία περιλαμβάνει τρία στάδια:

1. Χρήση του βιοκαυσίμου για την παραγωγή θερμικής ενέργειας.
2. Μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε μηχανική.
3. Εκμετάλλευση της μηχανικής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Ακόμα, υπάρχουν σταθμοί συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού που αποτελούν μία από τις πιο αποδοτικές τεχνολογίες αξιοποίησης ενέργειας. Ουσιαστικά γίνεται εκμετάλλευση της απορριπτέας θερμότητας που θα κατέληγε στο περιβάλλον. Ο βαθμός αξιοποίησης του καυσίμου ξεπερνάει σε μεγάλους σταθμούς συμπαραγωγής το 80%, ωστόσο, ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης στην περίπτωση συμπαραγωγής είναι μικρότερος από εκείνον σε ένα συμβατικό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής με στροβίλους, εξαιτίας της ανάγκης για υψηλή πίεση και θερμοκρασία ατμού για τις θερμικές διεργασίες. Οι τεχνολογίες συμπαραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση βιομάζας αναπτύσσονται όλο και περισσότερο τα τελευταία χρόνια και αποτελούν την καλύτερη επιλογή για την ενεργειακή εκμετάλλευση των βιοκαυσίμων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν συστήματα συμπαραγωγής είτε με καύση στερεής βιομάζας (συνήθως δασικής ή γεωργικής προέλευσης), είτε με χρήση βιογενών αερίων ανάλογα το μέγεθος της εγκατάστασης και την διαθέσιμη βιομάζα [23],[29].



Σχήμα 2.7: Σταθμός Συμπαραγωγής θερμικής-ηλεκτρικής ενέργειας με βιομάζα [34]

2.5 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Μια συσκευή που αποθηκεύει ενέργεια ονομάζεται σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (Energy Storage System - ESS). Η αποθήκευση ενέργειας συνήθως περιλαμβάνει τη μετατροπή ενέργειας από μορφές που είναι δύσκολο να αποθηκευτούν σε πιο βολικές ή οικονομικές στην αποθήκευση μορφές. Ορισμένες τεχνολογίες παρέχουν βραχυπρόθεσμη αποθήκευση ενέργειας, ενώ άλλες πιο μακροπρόθεσμη. Η μαζική αποθήκευση ενέργειας επί του παρόντος επιτυγχάνεται από υδροηλεκτρικά φράγματα, τόσο συμβατικά όσο και αντλητικά, όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 2.4.1.

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, υπό συνθήκες, μπορούν να αντικαταστήσουν τη λειτουργία ενός σταθμού αιχμής ζήτησης, ο οποίος έχει υψηλό λειτουργικό κόστος. Η ενσωμάτωση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας στο ενεργειακό δίκτυο έχει καταστεί μία από τις πιο βιώσιμες λύσεις για τα προβλήματα που δημιουργούνται από την αυξημένη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα μιας χώρας.

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να ταξινομηθούν με βάση το είδος της ενέργειας που αποθηκεύουν σε συστήματα μηχανικής αποθήκευσης, ηλεκτροχημικά συστήματα αποθήκευσης, χημικά συστήματα αποθήκευσης και ηλεκτρομαγνητικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας [36].

2.5.1 Συστήματα μηχανικής αποθήκευσης

Η αποθήκευση ενέργειας με χρήση μηχανικών συστημάτων πραγματοποιείται με τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική, και αντίστροφα. Αυτοί οι τύποι συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας είναι χρήσιμοι λόγω της ευελιξίας τους και του χαμηλότερου κόστους σε σχέση με άλλες μορφές αποθήκευσης. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι συστημάτων μηχανικής αποθήκευσης ενέργειας είναι η

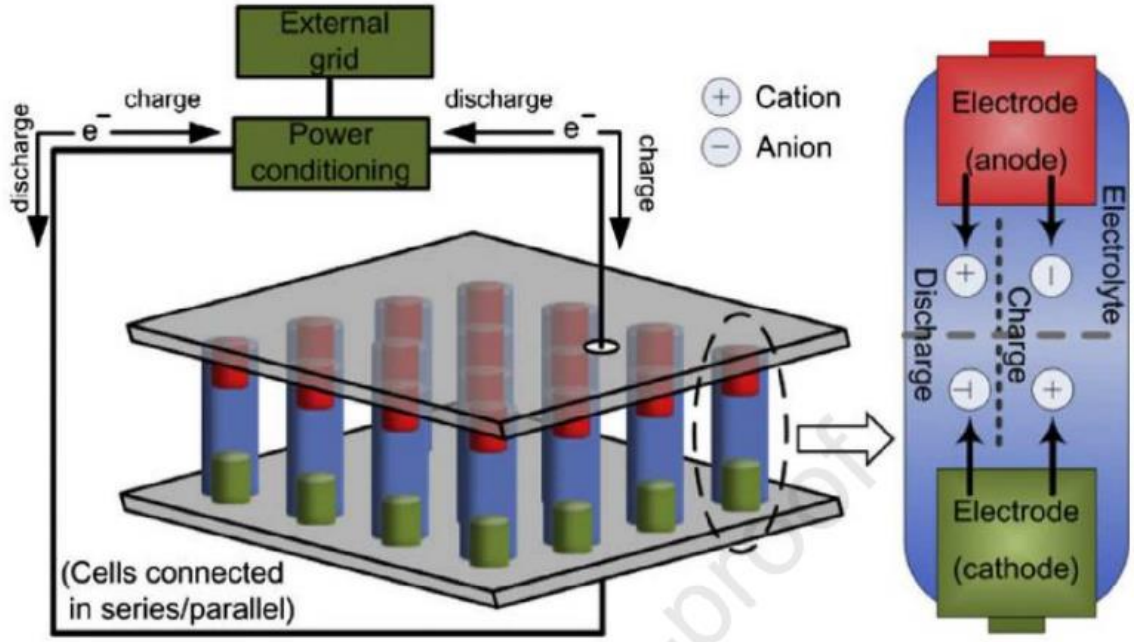
αντλησιοταμίευση (PHS), η αποθήκευση ενέργειας με στρεφόμενο σφόνδυλο (FES), η αποθήκευση ενέργειας με χρήση πεπιεσμένου αέρα (CAES) και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας βαρύτητας (GES) [37].

2.5.2 Σύστημα ηλεκτρικής/ηλεκτρομαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας

Στα συστήματα ηλεκτρικής/ηλεκτρομαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας περιλαμβάνονται οι υπερπυκνωτές, οι πυκνωτές και η υπεραγώγιμη αποθήκευση μαγνητικής ενέργειας. Τα υπεραγώγιμα συστήματα αποθήκευσης μαγνητικής ενέργειας χρησιμοποιούνται κυρίως σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας για τη σταθεροποίηση της παραγωγής ή σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καλύψουν αιχμές στη ζήτηση ενέργειας (π.χ. σε εργοστάσια χάλυβα ή σιδηροδρομικές γραμμές ταχείας διέλευσης). Οι υπερ-πυκνωτές είναι πυκνωτές, οι οποίοι αποθηκεύουν ενέργεια κάθε φορά που ασκείται τάση στους ακροδέκτες τους. Λειτουργούν όμοια με τους κοινούς πυκνωτές, με την διαφορά ότι οι υπερ-πυκνωτές έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα ενεργού επιφάνειας, η οποία εκτείνεται σε όλη τη μάζα των ηλεκτροδίων, σε αντίθεση με τους κοινούς πυκνωτές, των οποίων η ενεργός επιφάνεια περιορίζεται στο εξωτερικό των ηλεκτροδίων. Λόγω αυτού, μπορούν να αποθηκεύουν μεγαλύτερα ποσά ενέργειας σε σχέση με τους κοινούς πυκνωτές. Παρά το υψηλό τους κόστος (που αποτελεί και τροχοπέδη για την ευρεία χρήση τους στο εμπόριο) αποτελούν εναλλακτική των μπαταριών για εφεδρική τροφοδοσία, για να παρέχουν μικρής διάρκειας ισχύ.

2.5.3 Ηλεκτροχημικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας/μπαταρίες

Οι μπαταρίες (Battery Energy Storage System - BESS) είναι συσκευές, οι οποίες αποθηκεύουν χημική ενέργεια και τη μετατρέπουν σε ηλεκτρική μέσω μιας ηλεκτροχημικής αντίδρασης οξείδωσης. Οι κυψέλες ενός BESS αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια αγωγών και έναν ηλεκτρολύτη, δεμένα μεταξύ τους σε ένα σφραγισμένο δοχείο και συνδεδεμένα με μια εξωτερική πηγή ή φορτίο. Η χημική αντίδραση περιλαμβάνει τη μεταφορά ηλεκτρονίων μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων με όλα τα ηλεκτρόνια να κινούνται μέσω ενός εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος/φορτίου [38]. Στο Σχήμα 2.8 παρουσιάζεται η βασική αρχή λειτουργίας των μπαταριών.



Σχήμα 2.8: Αρχή λειτουργίας μπαταριών [38]

Υπάρχουν διάφοροι τύποι μπαταριών, ανάλογα με τη χημική τους σύσταση. Κάποιες από αυτές είναι μπαταρίες μόλυβδου – οξέος, μπαταρίες νικελίου, μπαταρίες θείου νατρίου, μπαταρίες λιθίου μαγνησίου, λιθίου άνθρακα, λιθίου σιδήρου, λιθίου ιόντων και άλλες.

2.5.4 Χημικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας

Το υδρογόνο και τα βιοκαύσιμα ταξινομούνται στα χημικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Ένας τρόπος αξιοποίησης του υδρογόνου είναι μέσω των κυψελών καυσίμου (Fuel cells). Η κυψέλη καυσίμου είναι μια ηλεκτροχημική συσκευή, που μετατρέπει την χημική ενέργεια του καυσίμου απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Στην βασική της μορφή λειτουργεί ως εξής: υδρογόνο και οξυγόνο αντιδρούν, με την παρουσία ηλεκτρολύτη, και παράγουν νερό, ενώ ταυτόχρονα αναπτύσσεται ένα ηλεκτροχημικό δυναμικό που προκαλεί ροή ηλεκτρικού ρεύματος στο φορτίο. Βασικά πλεονεκτήματά τους είναι η αρθρωτή δομή, με την οποία διευκολύνεται η κατασκευή μονάδων με την επιθυμητή ονομαστική ισχύ, η ευκολία αυτοματισμού, καθώς και η διατήρηση υψηλού βαθμού απόδοσης, ανεξαρτήτως επιπέδου φόρτισης. Ωστόσο, λόγω του σχετικά μεγάλου χρόνου που απαιτείται για την μετατροπή της ενέργειας από χημική σε ηλεκτρική, δεν μπορούν να ανταποκριθούν άμεσα στα γρήγορα μεταβατικά ηλεκτρικά φαινόμενα. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να λυθεί με την χρήση υπερ-πυκνωτών ή συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με σφόνδυλο, ώστε να βελτιωθεί η δυναμική απόκριση του συστήματος. Άλλα μειονεκτήματα που εμποδίζουν, προς το παρόν, την ευρεία χρήση τους είναι το υψηλό κόστος κατασκευής τους και η σχετικά μικρή διάρκεια ζωής τους [39].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ
3

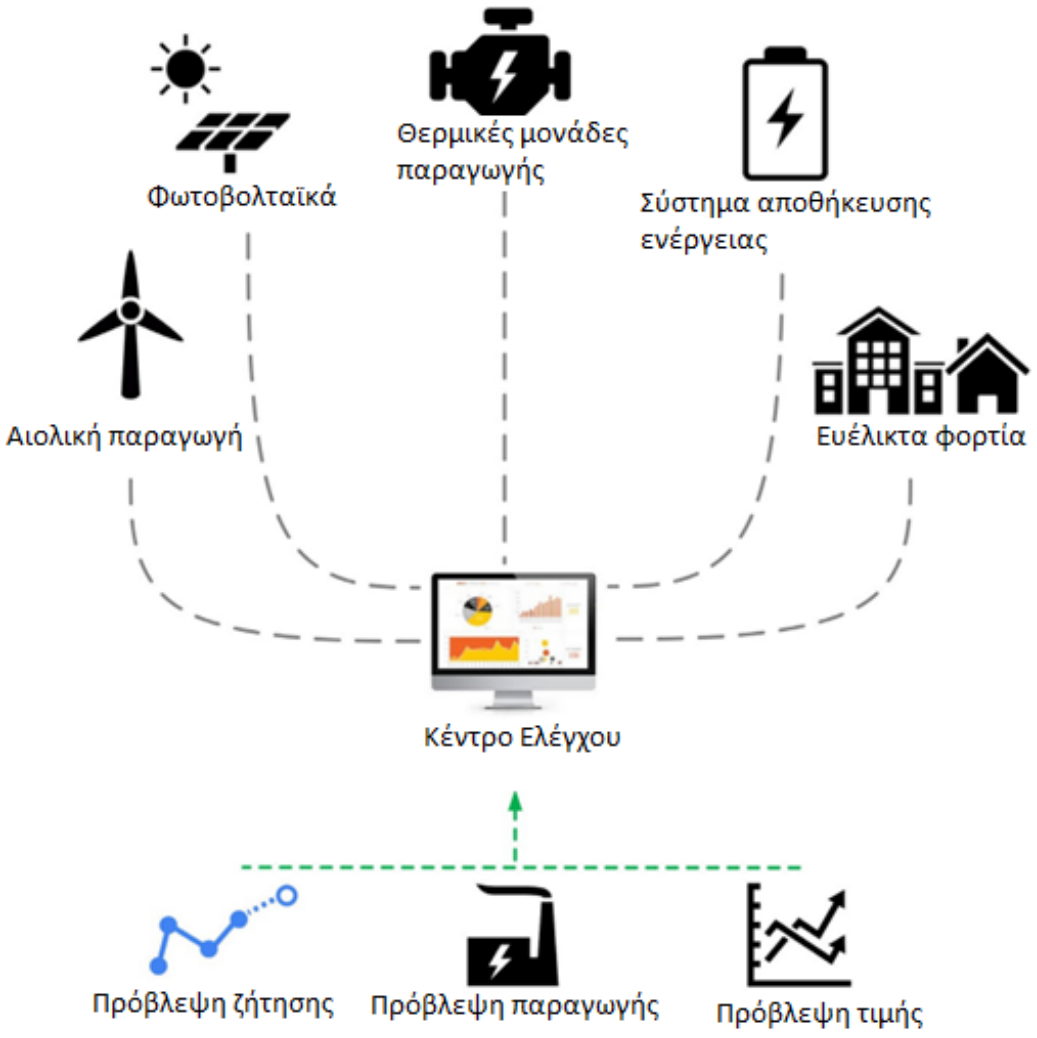
ΕΙΚΟΝΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ενσωμάτωση της διανεμημένης παραγωγής, και ιδιαίτερα των μη κατανεμόμενων μονάδων ΑΠΕ, παρουσιάζει μια σειρά νέων προκλήσεων για τους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις, τα δίκτυα ισχύος σχεδιάστηκαν για τη μεταφορά και διανομή ενέργειας από τα κεντρικά συστήματα παραγωγής προς τους καταναλωτές. Η ενσωμάτωση της διανεμημένης παραγωγής επιτρέπει στους συμμετέχοντες στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας να ανταποκρίνονται με ευέλικτο τρόπο στις μεταβαλλόμενες συνθήκες της αγοράς. Αυτή η ευελιξία είναι απαραίτητη σε μία ανοιχτή, απελευθερωμένη αγορά ηλεκτρικής ενέργειας καθώς καθιστά δυνατή τη γρήγορη προσαρμογή σε ένα μεταβαλλόμενο περιβάλλον. Όπως είναι αναμενόμενο, οι περισσότερες κυβερνητικές πολιτικές που στοχεύουν στην προώθηση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θα οδηγήσουν σε αυξημένη διείσδυση των τεχνολογιών κατανεμημένης παραγωγής, καθώς οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, εκτός από τις μεγάλες υδροηλεκτρικές, έχουν αποκεντρωμένο χαρακτήρα. Ένας τρόπος αντιμετώπισης αυτών των προκλήσεων αποτελούν οι εικονικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής.

3.2 ΕΙΚΟΝΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Ένας εικονικός σταθμός παραγωγής ενέργειας (Virtual Power Plant, VPP) είναι μια οικονομική οντότητα που συγκεντρώνει τις δυνατότητες ετερογενών κατανεμημένων ενεργειακών πόρων (Distributed Energy Resources, DER) με σκοπό την ενίσχυση της παραγωγής ενέργειας, καθώς και την εμπορία ενέργειας στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι ουσιαστικά ένα σύστημα που ενσωματώνει διάφορους τύπους πηγών ενέργειας για να παρέχει μια αξιόπιστη συνολική τροφοδοσία. Μπορεί να περιλαμβάνει γεννήτριες φυσικού αερίου, αιολικούς σταθμούς μικρής κλίμακας (WPP), φωτοβολταϊκά (ΦΒ-PV), υδροηλεκτρικούς σταθμούς, σταθμούς παραγωγής ενέργειας από βιομάζα, εφεδρικές γεννήτριες και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (ESS). Ένα VPP μπορεί να αντικαταστήσει μια συμβατική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παρέχοντας παράλληλα υψηλότερη απόδοση και μεγαλύτερη ευελιξία, γεγονός που επιτρέπει στο σύστημα να αντιδρά καλύτερα στις διακυμάνσεις του φορτίου. Το μειονέκτημα είναι η υψηλότερη πολυπλοκότητα του συστήματος, η οποία απαιτεί περίπλοκη βελτιστοποίηση, έλεγχο και ασφαλείς επικοινωνίες.



Σχήμα 3.9: Εικονικός σταθμός Ηλεκτροπαραγωγής [40].

Γενικά, ο στόχος ενός VPP είναι η ψηφιακή διασύνδεση κατανεμημένων ενεργειακών πόρων με σκοπό την παρακολούθηση, την πρόβλεψη, τη βελτιστοποίηση και την εμπορική διάθεση της ισχύος τους. Με αυτόν τον τρόπο, οι διακυμάνσεις στην παραγωγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορούν να εξισορροπηθούν αυξάνοντας ή μειώνοντας την παραγωγή και την κατανάλωση ενέργειας σε ελεγχόμενες μονάδες. Αλλά το VPP δεν βοηθά μόνο στη σταθεροποίηση των δικτύων ισχύος. Δημιουργεί επίσης τις προϋποθέσεις για την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στις αγορές. Οι μεμονωμένες μικρές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας δεν μπορούν γενικά να παρέχουν υπηρεσίες εξισορρόπησης ή να προσφέρουν την ευελιξία τους στα χρηματιστήρια ενέργειας. Αυτό συμβαίνει είτε επειδή το προφίλ παραγωγής τους ποικίλλει πολύ έντονα ή απλώς δεν πληρούν το ελάχιστο μέγεθος προσφοράς που είναι θεσμοθετημένο στις αγορές. Συγκεντρώνοντας την ισχύ πολλών μονάδων, ένα VPP μπορεί να παρέχει την ίδια υπηρεσία και στη συνέχεια να εμπορεύεται στις ίδιες αγορές με τους μεγάλους κεντρικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής ή τους βιομηχανικούς καταναλωτές. Το σύστημα ελέγχου αποτελεί τον τεχνολογικό πυρήνα ενός VPP. Όλα τα στοιχεία που είναι δικτυωμένα στο VPP μπορούν να παρακολουθούνται, να συντονίζονται και να ελέγχονται από το κεντρικό σύστημα ελέγχου. Οι εντολές ελέγχου και τα δεδομένα

μεταδίδονται μέσω ασφαλών συνδέσεων δεδομένων που προστατεύονται από πρωτόκολλα κρυπτογράφησης. Το σύστημα ελέγχου αποθηκεύει και αναλύει όλα τα δεδομένα που απαιτούνται για τον υπολογισμό του βέλτιστου προγραμματισμού λειτουργίας των κατανεμημένων ενεργειακών του πόρων. Η αμφίδρομη μεταφορά δεδομένων μεταξύ των κατανεμημένων ενεργειακών πόρων και του κέντρου ελέγχου του VPP, επιτρέπει όχι μόνο τη μετάδοση εντολών ελέγχου αλλά παρέχει επίσης δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για την αξιοποίηση της χωρητικότητας των δικτυωμένων μονάδων. Για παράδειγμα, τα επίπεδα παραγωγής ενέργειας από τους ηλιακούς και τους αιολικούς σταθμούς, καθώς και τα δεδομένα κατανάλωσης και τα επίπεδα χρέωσης αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία προβλέψεων ακριβείας για την εμπορία ηλεκτρικής ενέργειας και τον προγραμματισμό των ελεγχόμενων σταθμών παραγωγής ενέργειας [2].

Το μέγεθος της παγκόσμιας αγοράς των VPP αποτιμήθηκε σε 1,3 δισεκατομμύρια δολάρια το 2019 και αναμένεται να φτάσει τα 5,9 δισεκατομμύρια δολάρια έως το 2027, αυξανόμενο με σύνθετο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης (CAGR) 21,3% από το 2020 έως το 2027. Το επενδυτικό ενδιαφέρον είναι μεγάλο καθώς τα VPP μεγιστοποιούν την αξία τόσο για τον τελικό χρήστη όσο και για το δίκτυο διανομής [41].

3.3 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΕΙΚΟΝΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΗΝ ΑΓΟΡΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.3.1 Εισαγωγή

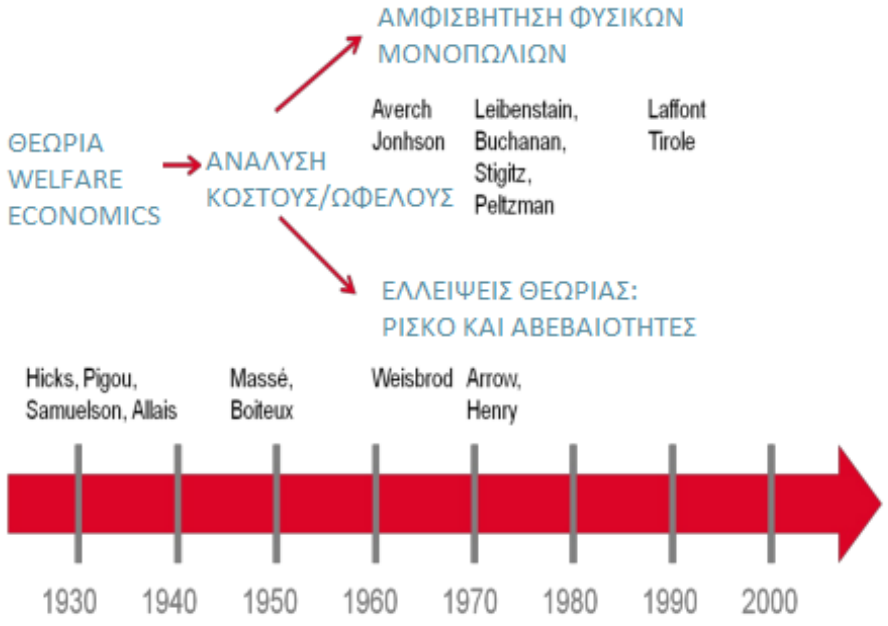
Σε οικονομικούς όρους, η ηλεκτρική ενέργεια είναι ένα προϊόν που μπορεί να αγοράζεται και να πωλείται. Η εμπορία ηλεκτρικής ενέργειας είναι η διαδικασία κατά την οποία οι παραγωγοί ηλεκτρικής ενέργειας πωλούν την ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν σε προμηθευτές ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίοι στη συνέχεια μπορούν να πουλήσουν αυτήν την ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές. Ο Διαχειριστής του συστήματος επιβλέπει τη ροή ηλεκτρικής ισχύος σε όλη τη χώρα και διασφαλίζει ότι τα ποσά που εμπορεύονται θα ανταποκριθούν τελικά στη ζήτηση. Ένας εικονικός σταθμός ηλεκτροπαραγωγής επιδιώκει να έχει το μέγεθος και την ευελιξία να συμμετέχει σε αυτό τον μηχανισμό με τον βέλτιστο τρόπο προκειμένου να μεγιστοποιήσει τα κέρδη του.

3.3.2 Ιστορική αναδρομή

Εδώ και πολλά χρόνια, το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργεί αποτελεσματικά με τη συστηματική χρήση δύο μοντέλων βελτιστοποίησης: α) τη βέλτιστη ροή ισχύος (OPF) που εξασφαλίζει τη βραχυπρόθεσμη βέλτιστη χρήση των εγκαταστάσεων, και β) την ένταξη μονάδων (UC) που προγραμματίζει με βέλτιστο τρόπο την παραγωγή των μονάδων σε συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα, για παράδειγμα, μιας ημέρας ή μιας εβδομάδας [42].

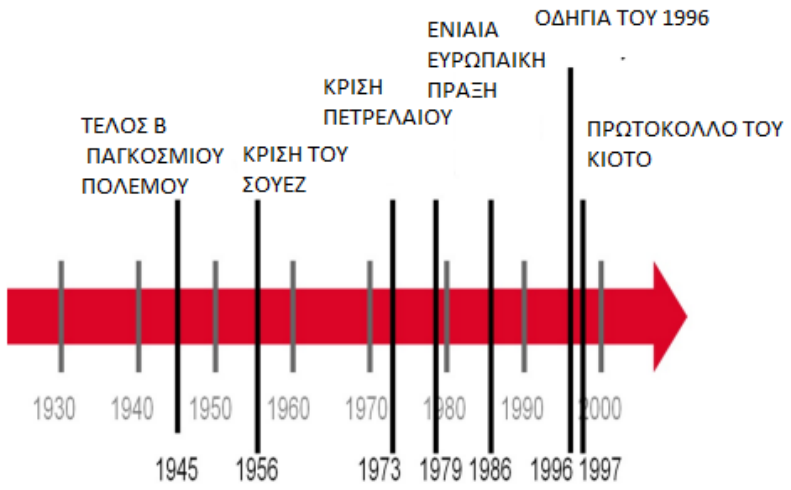
Η κυρίαρχη οικονομική θεωρία μετά τον πόλεμο, αυτή που χρησιμοποιήθηκε για να βοηθήσει στις επενδυτικές επιλογές είναι η ανάλυση κόστους-οφέλους που προκύπτει από τα Welfare Economics (οικονομία της ευημερίας) που συλλήφθηκαν τη δεκαετία του 1930 και του 1940 από τους Hicks, Pigou, Samuelson και Allais. Στις αρχές της δεκαετίας του '50, αυτή η θεωρία διαχέεται στη Γαλλία από τους Massé και Boiteux. Η εφαρμογή αυτών των θεωριών στις επενδύσεις ηλεκτρικής ενέργειας ξεκινά με την ανάλυση ζήτησης και τη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών μεθόδων παραγωγής ενέργειας (υδροηλεκτρικά και θερμικά εργοστάσια τότε). Το πρώτο μοντέλο βελτιστοποίησης κατασκευάστηκε το 1955: σύμφωνα με τον P. Massé, η βιομηχανία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχει βρει ένα αντικειμενικό εργαλείο για τη λήψη επενδυτικών αποφάσεων. Αυτή η θεωρία οδηγεί τις κρατικές επιλογές σχετικά με τις επενδύσεις

ηλεκτρικής ενέργειας κυρίως στη Γαλλία αλλά και σε άλλες ευρωπαϊκές χώρες. Παραμένει το κυρίαρχο ρεύμα μέχρι την έναρξη της διαδικασίας φιλελευθεροποίησης το 1986, αν και ήδη αρχίζει να αμφισβητείται τη δεκαετία του 1960 [43]. Ουσιαστικά, μετά την κρίση του Σουέζ το 1956, τα έργα των οικονομολόγων αρχίζουν να δείχνουν ορισμένες από τις ελλείψεις στην ανάλυση κόστους/οφέλους: δεν περιλαμβάνει σωστά τους πιθανούς κινδύνους και ιδίως τους εξωγενείς κινδύνους, όπως τον κίνδυνο στην προμήθεια καυσίμων. Στους υπολογισμούς των επενδύσεων ηλεκτρικής ενέργειας του Pierre Massé, εντοπίζονται οι κύριοι κίνδυνοι, αλλά δεν ενσωματώνονται στο μοντέλο, ή ενσωματώνονται μόνο με πολύ περιορισμένο τρόπο.



Σχήμα 3.2: Σύνοψη οικονομικών θεωριών [43].

Το 1973 και το 1979 συμβαίνουν οι δύο πετρελαϊκές κρίσεις που θα ξεκινήσουν την έναρξη μιας μεταβατικής περιόδου. Η τεράστια αύξηση των τιμών των ορυκτών καυσίμων συνεπάγεται μια μεγάλη αλλαγή στην τιμολόγηση της ηλεκτρικής ενέργειας. Γενικότερα, γίνεται σαφές ότι οι πολιτικές που προστατεύουν τις αναποτελεσματικές εγχώριες βιομηχανίες και στερούν από τους καταναλωτές φθηνότερη ηλεκτρική ενέργεια είναι αμφισβητήσιμες. Ο ανταγωνισμός στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται επομένως βιώσιμος για παραγωγούς με οικονομικά μετρίου μεγέθους επενδύσεις και φθηνό φυσικό αέριο.



Σχήμα 3.3: Ιστορικά ορόσημα στη διαμόρφωση της ευρωπαϊκής αγοράς ενέργειας [43].

Η Ενιαία Ευρωπαϊκή Πράξη το 1986 έχει ως στόχο τη δημιουργία μιας ενιαίας ευρωπαϊκής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας μαζί με την Οδηγία του 1996 για τους κοινούς κανόνες για την εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Η ολοκλήρωση της ευρωπαϊκής αγοράς έχει δύο στόχους: την προσφορά φθηνότερης ηλεκτρικής ενέργειας στον καταναλωτή χάρη στον ανταγωνισμό και τη διεύρυνση του διαμοιρασμού των πόρων για καλύτερη βελτιστοποίηση του συστήματος.

3.3.3 Δομή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Ανάλογα με την αμεσότητα της διαπραγμάτευσης, είναι διαθέσιμες δύο κατηγορίες συναλλαγών:

- Μακροπρόθεσμες συναλλαγές: από μία εβδομάδα έως μερικά έτη πριν από την παράδοση ενέργειας. Οι συναλλαγές πραγματοποιούνται μέσω αγορών μελλοντικής εκπλήρωσης και μέσω ιδιωτικών διμερών συμβολαίων.
- Βραχυπρόθεσμες συναλλαγές: από αρκετά λεπτά έως μία ημέρα πριν από την παράδοση ενέργειας. Στην κατηγορία αυτή συμμετέχει το VPP.

3.3.3.1 Αγορά Επόμενης Ημέρας (Day ahead market)

Συνήθως, η προτιμώμενη αγορά για βραχυπρόθεσμες συναλλαγές είναι η Αγορά Επόμενης Ημέρας. Αυτή οργανώνεται ως ένας διμερής πλειστηριασμός όπου οι παραγωγοί, οι λιανοπωλητές και οι μεγάλοι καταναλωτές υποβάλλουν προσφορές για πώληση και αγορά ηλεκτρικής ενέργειας για όλη την επόμενη ημέρα. Οι συμμετέχοντες στην αγορά πρέπει συνήθως να υποβάλουν συνολικά 24 προσφορές πώλησης/αγοράς, δηλαδή μία για κάθε ώρα της επόμενης ημέρας. Κάθε προσφορά προσδιορίζεται ως ένα σύνολο ζευγών τιμής και ποσότητας, υποδεικνύοντας την ποσότητα ενέργειας που είναι πρόθυμος να πουλήσει/αγοράσει ο συμμετέχων σε μια δεδομένη τιμή. Για την εκκαθάριση της αγοράς, ο Διαχειριστής της αγοράς καθορίζει τις συνολικές καμπύλες πώλησης και αγοράς ταξινομώντας τις προσφορές πώλησης κατά αύξουσα σειρά της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας και τις προσφορές αγοράς κατά φθίνουσα σειρά της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι παρόλο που το πρόγραμμα αγοράς λαμβάνει υπόψη τις δηλώσεις φορτίου των παραγωγών και καταναλωτών, αντίστοιχα, που έχουν δεσμευτεί για φυσική παράδοση, δεν

λαμβάνει υπόψη τους λειτουργικούς περιορισμούς του συστήματος. Για τον λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η ύπαρξη της ενδοημερήσιας αγοράς και της Αγοράς Εξισορρόπησης [44].

3.3.3.2 Ενδοημερήσια Αγορά (Intra-day Market)

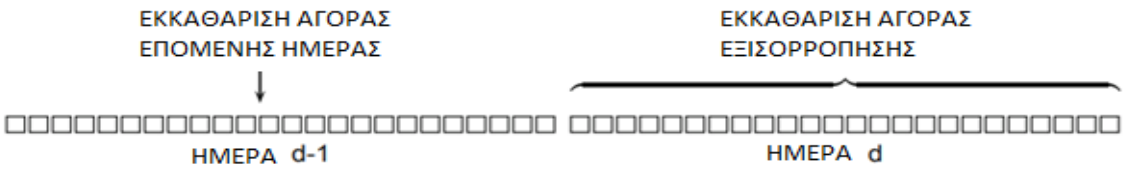
Ορισμένες αγορές ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνουν ενδιάμεσες ρυθμίσεις αγοράς μεταξύ των Αγορών Επόμενης Ημέρας και των Αγορών Εξισορρόπησης, με σκοπό την περαιτέρω αντιστάθμιση της αβεβαιότητας και για να επιτρέψουν διορθωτικές ενέργειες ως απάντηση σε απροσδόκητα γεγονότα και λάθη των παραγόντων της αγοράς. Αυτές οι συμφωνίες συναλλαγών ονομάζονται γενικά αγορές προσαρμογής ή αγορές εντός της ημέρας. Οι αγορές επιτρέπουν τη διαπραγμάτευση ηλεκτρικής ενέργειας μετά την εκκαθάριση της Αγοράς Επόμενης Ημέρας και συνήθως λαμβάνουν χώρα μία ή λίγες ώρες πριν από την παράδοση της ενέργειας. Είναι ιδιαίτερα σημαντικές για παραγωγούς μη κατανεμόμενων ΑΠΕ. Δεδομένου ότι σε τέτοιες αγορές η εκκαθάριση γίνεται πιο κοντά στην πραγματική παράδοση ενέργειας σε σχέση με την αγορά της επόμενης ημέρας, επιτρέπουν στους παραγωγούς να καταθέσουν την καμπύλη προσφοράς με αυξημένη βεβαιότητα για τα επίπεδα παραγωγής τους, το οποίο γενικά έχει ως αποτέλεσμα συγκριτικά υψηλότερα κέρδη και μείωση της αβεβαιότητας. Όμως, η λειτουργία της ενδοημερήσιας αγοράς αποτελεί μικρό ποσοστό της συνολικής ποσότητας ενέργειας που διακινείται στην χονδρική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας (wholesale market) [45].

3.3.3.3 Αγορά Εξισορρόπησης (Balancing Market)

Ένας από τους περιορισμούς της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι η ανάγκη να διατηρούνται η τάση και η συχνότητα του δικτύου εντός προκαθορισμένων ορίων. Επιπλέον, λόγω του υψηλού κόστους αποθήκευσης, η ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να παράγεται με βάση τη ζήτηση των καταναλωτών. Για τους παραπάνω λόγους, πριν από κάθε φυσική παράδοση πρέπει να ικανοποιούνται όλοι οι περιορισμοί του δικτύου. Η Αγορά Εξισορρόπησης λαμβάνει χώρα αρκετά λεπτά πριν από την παράδοση ενέργειας και αποτελεί τον τελευταίο μηχανισμό της αγοράς για την εξισορρόπηση της παραγωγής και της κατανάλωσης, προκειμένου να εξασφαλιστεί η ομαλή λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου.

Αυτή η αγορά είναι ιδιαίτερα σημαντική για τους παραγωγούς με αβεβαιότητα στην παραγωγή ενέργειας (π.χ. παραγωγούς αιολικής και ηλιακής ενέργειας) που δεν μπορούν να προβλέψουν με ακρίβεια τα επίπεδα παραγωγής τους πριν από το κλείσιμο της Αγοράς Επόμενης Ημέρας. Η Αγορά Εξισορρόπησης εκκαθαρίζεται από τον Διαχειριστή της αγοράς με παρόμοιο τρόπο όπως η αγορά της επόμενης ημέρας μέσω δημοπρασίας. Το αποτέλεσμα της εκκαθάρισης της αγοράς περιλαμβάνει προσαρμογές παραγωγής και κατανάλωσης και εξισορρόπηση των τιμών εκκαθάρισης. Η συνύπαρξη και των δύο αγορών είναι δικαιολογημένη. Από τη μία πλευρά, η Αγορά Επόμενης Ημέρας είναι χρήσιμη για τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής που χρειάζονται εκ των προτέρων προγραμματισμό προκειμένου να προσαρμόσουν αποτελεσματικά και αξιόπιστα τα επίπεδα παραγωγής τους. Εάν οι μεγάλες αλλαγές στη συνολική προσφορά καθοριστούν μόνο από την Αγορά Εξισορρόπησης, ορισμένες μονάδες παραγωγής θα περιόριζαν τη λειτουργία τους ή απλώς δεν θα μπορούσαν να ανταποκριθούν στα μηνύματα της αγοράς. Από την άλλη πλευρά, εάν οι συμμετέχοντες στην αγορά ήταν σε θέση να προβλέψουν τέλεια, αρκετή ώρα πριν την παράδοση, την ποσότητα ενέργειας που θα παράγουν ή θα καταναλώσουν, δεν θα χρειαζόταν να προβούν σε ενέργειες εξισορρόπησης. Ωστόσο, υπάρχουν πάντα ανισορροπίες στην πράξη, ιδιαίτερα σε συστήματα ισχύος με υψηλή διείσδυση μη κατανεμόμενων ΑΠΕ. Η Αγορά Εξισορρόπησης αποτελεί επομένως έναν ανταγωνιστικό μηχανισμό για την αποτελεσματική αντιμετώπιση αυτών των ενεργειακών

ανισορροπιών, επιτρέποντας στις ευέλικτες επιχειρήσεις να προσαρμόσουν τις θέσεις τους για την επόμενη μέρα [46].



Σχήμα 3.4: Οπτική απεικόνιση της λειτουργίας της αγοράς ενέργειας [46].

3.3.4 Καμπύλη Προσφοράς

Οι κανόνες της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας επιτρέπουν στους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας να υποβάλλουν καμπύλες προσφοράς αντί για μεμονωμένες προσφορές στην Αγορά Επόμενης Ημέρας. Καθορίζουν δηλαδή έναν ορισμένο αριθμό ζευγών παραγωγής-τιμής, όπου δηλώνουν πόση ενέργεια είναι διατεθειμένοι να παραδώσουν σε κάθε επίπεδο τιμής που αναφέρεται στην προσφορά. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούν να προσφέρουν ενέργεια που παράγεται από μονάδες που χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνολογίες, ενώ είναι βέβαιοι ότι η ανάκτηση του κόστους είναι εγγυημένη για τη συγκεκριμένη τιμή [46].

Στη συνέχεια, ο Διαχειριστής του συστήματος είναι υπεύθυνος για τη συλλογή όλων των προσφορών, την τακτοποίησή τους με αύξουσα σειρά τιμής, και τον προσδιορισμό των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής που θα ενεργοποιηθούν και πότε. Το κόστος παραγωγής μια μονάδας διαχωρίζεται στο μεταβλητό κόστος παραγωγής (variable cost) και στο σταθερό κόστος παραγωγής (fixed cost). Τα σταθερά κόστη παραγωγής δεν μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια λειτουργίας της μονάδας και κατά τη διάρκεια αλλαγών στην παραγωγή της. Το πιο συνηθισμένο μεταβλητό κόστος στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι το κόστος καυσίμων (fuel cost).

Σχήμα 3.5: Καμπύλη προσφοράς στην Αγορά Επόμενης Ημέρας [42].

3.3.5 Καμπύλη Ζήτησης

Στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, η ζήτηση ονομάζεται «φορτίο». Το φορτίο είναι απλώς το άθροισμα όλων των απαιτήσεων ηλεκτρικής ενέργειας σε μια αγορά ανά πάσα στιγμή. Η καμπύλη ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας θεωρείται μια κατακόρυφη γραμμή, η οποία επίσης περιγράφεται ως μια καμπύλη απολύτως ανελαστικής ζήτησης. Αυτό εξηγείται εύκολα με ένα παράδειγμα. Όταν ανοίγει μια τηλεόραση ή ένας υπολογιστής στο σπίτι, ή όταν ένα εργοστάσιο ξεκινά μια μηχανή, υποτίθεται ότι η απαραίτητη ενέργεια θα είναι διαθέσιμη, άμεσα. Επειδή το φορτίο αλλάζει αμέσως, υποτίθεται πως ότι ζητείται αμέσως είναι μια σταθερή και όχι μια μεταβλητή τιμή. Όποιο και να είναι το φορτίο πρέπει να ικανοποιείται, δηλαδή να μην αλλάζει ανάλογα με την τιμή. Αλλάζει από λεπτό σε λεπτό, από ώρα σε ώρα, και από εποχή σε εποχή, αλλά για κάθε διάστημα, μπορεί να θεωρηθεί σταθερό, και αν είναι σταθερό, θα είναι μια κάθετη γραμμή στην καμπύλη προσφοράς-ζήτησης. Έτσι, η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας ποικίλλει συνεχώς καθώς μετατοπίζεται η τομή της καμπύλης προσφοράς και της συνεχώς κινούμενης καμπύλης ζήτησης. Στην πραγματική ζωή, αυτός ο υπολογισμός γίνεται κάθε πέντε λεπτά, επομένως σε μια τυπική χονδρική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, θα υπάρχουν 12 τιμές την ώρα, που αλλάζουν μία φορά κάθε πέντε λεπτά [47].

3.3.6 Διαμόρφωση τιμών στην Αγορά Εξισορρόπησης

3.3.6.1 Μια Οριακή Τιμή Αποκλίσεων (One-Price Market)

Η λογική πίσω από τις Αγορές Εξισορρόπησης μιας τιμής είναι ότι οι αποκλίσεις από τον προγραμματισμό της επόμενης ημέρας διευθετούνται σε τιμή που είναι πιο ευνοϊκή από την τιμή της επόμενης ημέρας, εάν το πρόσημο της ανισορροπίας του συμμετέχοντος είναι αντίθετο από το πρόσημο της συνολικής απόκλισης του συστήματος. Για παράδειγμα, οι γεννήτριες που παράγουν περισσότερη ενέργεια από αυτή που δήλωσαν στην Αγορά Επόμενης Ημέρας, λαμβάνουν υψηλότερη τιμή για την πώληση της ενέργειας στην Αγορά Εξισορρόπησης εάν η ζήτηση είναι αυξημένη. Αντίθετα, οι γεννήτριες που παράγουν λιγότερη ενέργεια από την δηλωμένη στην Αγορά Επόμενης Ημέρας, όταν το σύστημα έχει περισσότερη παραγωγή

διαθέσιμη, πρέπει να πληρώσουν μια τιμή χαμηλότερη από την τιμή της Αγοράς Επόμενης Ημέρας, επιτυγχάνοντας έτσι κέρδος. Ο διακανονισμός ανισορροπίας μιας τιμής (one price imbalance settlement), επομένως, ανταμείβει τους συμμετέχοντες που βοηθούν στην αποκατάσταση της ισορροπίας του συστήματος με τις αποκλίσεις τους [47].

3.3.6.2 Δυο Οριακές Τιμές Αποκλίσεων (Two-Price Market)

Οι περισσότερες ευρωπαϊκές Αγορές Εξισορρόπησης λειτουργούν σύμφωνα με την αρχή του διακανονισμού ανισορροπίας δύο τιμών (ή διπλής τιμής). Σε αυτόν τον τύπο σχεδίασης αγοράς, μόνο οι επιθυμητές αποκλίσεις (δηλαδή από παραγωγούς κατανεμόμενων μονάδων) που είναι αντίθετες από την ανισορροπία του συστήματος ανταμείβονται οικονομικά με μια τιμή αγοράς που είναι πιο ευνοϊκή από εκείνη της τιμής της επόμενης ημέρας. Αντίθετα, οι αποκλίσεις από τους παραγωγούς μη κατανεμόμενων μονάδων είτε διακανονίζονται στην τιμή της επόμενης ημέρας (αν είναι αντίθετες με την ανισορροπία του συστήματος) είτε, όπως ακριβώς την αγορά μιας τιμής, στη λιγότερο ευνοϊκή τιμή της Αγοράς Εξισορρόπησης (αν είναι στην ίδια κατεύθυνση με την ανισορροπία του συστήματος) [47].

3.4 Η ΑΓΟΡΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Μια σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ της αγοράς ενέργειας και άλλων ελεύθερων αγορών αποτελεί η ύπαρξη αυστηρών κανόνων και περιορισμών που πρέπει να ικανοποιούνται από όλους τους συμμετέχοντες. Έτσι, κάθε αγορά ενέργειας επιβλέπεται από έναν αυτόνομο φορέα ο οποίος είναι υπεύθυνος για την ομαλή λειτουργία της αγοράς αλλά και του ηλεκτρικού δικτύου ως επέκταση. Στην Ελλάδα, ο Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ) είναι υπεύθυνος για τη λειτουργία του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, και το Ελληνικό Χρηματιστήριο Ενέργειας (ΕΧΕ) είναι υπεύθυνο για τη λειτουργία της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) είναι υπεύθυνη για τη σωστή λειτουργία της αγοράς ενέργειας αλλά οι αρμοδιότητές της επεκτείνονται και στην προστασία του περιβάλλοντος και την τήρηση των διεθνών υποχρεώσεων της χώρας, την ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας της εγχώριας παραγωγής και την αύξηση της παραγωγικότητας του δικτύου. Επιπλέον, η ΡΑΕ είναι υπεύθυνη για την έκδοση αδειών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικά καύσιμα καθώς και τη χορήγηση αδειών παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [44].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ
4

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΙΚΟΝΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η μοντελοποίηση των διάφορων διανεμημένων ενεργειακών πόρων (μονάδων παραγωγής και ευέλικτων φορτίων) ενός εικονικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής. Σκοπός είναι η προσομοίωση και βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η κερδοφορία για το Διαχειριστή του VPP. Επιπλέον, γίνεται μια εισαγωγή στον στοχαστικό προγραμματισμό που χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση του παραπάνω προβλήματος.

4.2 ΓΕΝΙΚΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ

Στον τομέα της μαθηματικής βελτιστοποίησης, ο στοχαστικός προγραμματισμός χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση προβλημάτων βελτιστοποίησης που περιλαμβάνουν αβεβαιότητα. Ένα στοχαστικό πρόγραμμα είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης στο οποίο ορισμένες ή όλες οι παράμετροι του προβλήματος είναι αβέβαιες, αλλά ακολουθούν γνωστές κατανομές πιθανοτήτων. Αντίθετα, στην αιτιοκρατική βελτιστοποίηση, όλες οι παράμετροι του προβλήματος υποτίθεται ότι είναι επακριβώς γνωστές. Ο στόχος του στοχαστικού προγραμματισμού είναι να βρει μια λύση η οποία τόσο βελτιστοποιεί ορισμένα κριτήρια που επιλέγονται από εκείνον που λαμβάνει την απόφαση, όσο και λαμβάνει κατάλληλα υπόψη την αβεβαιότητα των παραμέτρων του προβλήματος. Επειδή πολλές αποφάσεις στον πραγματικό κόσμο εμπεριέχουν αβεβαιότητα, ο στοχαστικός προγραμματισμός βρίσκει εφαρμογή σε διάφορους τομείς, από επίλυση χρηματοοικονομικών μοντέλων έως επίλυση προβλημάτων στον τομέα των μεταφορών και τον τομέα της ενέργειας. Ο στόχος του στοχαστικού προγραμματισμού είναι να βελτιστοποιήσει την αναμενόμενη τιμή μιας αντικειμενικής συνάρτησης, (πχ ελαχιστοποίηση του αναμενόμενου κόστους) σε όλα τα πιθανά σενάρια [48].

4.2.1 Στοχαστικός προγραμματισμός δύο σταδίων

Η μέθοδος στοχαστικού προγραμματισμού, που χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία, είναι εκείνη των δυο σταδίων (two-stage stochastic programming). Στον στοχαστικό προγραμματισμό δύο σταδίων οι αποφάσεις πρέπει να βασίζονται σε δεδομένα που είναι διαθέσιμα τη στιγμή που εκείνες λαμβάνονται και δεν μπορούν να εξαρτώνται από μελλοντικές παρατηρήσεις. Συγκεκριμένα, οι αποφάσεις του πρώτου σταδίου (αποφάσεις *here-and-now*) λαμβάνονται στην αρχή της περιόδου και στη συνέχεια ακολουθεί η επίλυση του προβλήματος. Οι αποφάσεις του δεύτερου σταδίου (αποφάσεις *wait-and-see*) λαμβάνονται ως διορθωτική ενέργεια στο τέλος της περιόδου[49].

4.2.2 Πρόβλημα βελτιστοποίησης

Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί γενικά να οριστεί ως η εύρεση της καλύτερης λύσης σε ένα μαθηματικό πρόβλημα από όλες τις εφικτές λύσεις. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στη βελτιστοποίηση ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο του προβλήματος και τις εμπλεκόμενες μεταβλητές. Τα προβλήματα βελτιστοποίησης με διακριτές μεταβλητές είναι γνωστά ως προβλήματα μεικτού ακέραιου μαθηματικού προγραμματισμού (mixed-integer programming - MIP). Εάν οι μεταβλητές στο πρόβλημα είναι συνεχείς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί απειροστικός λογισμός για να λυθεί το πρόβλημα.

Η έρευνα που είναι αφιερωμένη στον τομέα της βελτιστοποίησης είναι μεγάλη και υπάρχουν διάφορες τεχνικές για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης, οι οποίες εξαρτώνται από τη φύση του προβλήματος. Μερικές από τις κατηγορίες είναι:

- Γραμμικός προγραμματισμός, που περιλαμβάνει τη λύση μαθηματικών μοντέλων όπου όλες οι σχέσεις στο μοντέλο είναι γραμμικές.
- Ακέραιος προγραμματισμός, όπου όλες οι μεταβλητές είναι ακέραιες.
- Μεικτός ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός που αντιμετωπίζει προβλήματα όπου μόνο μερικές από τις μεταβλητές είναι ακέραιες, ενώ άλλες μεταβλητές μπορεί να είναι μη ακέραιες.
- Μη γραμμικός προγραμματισμός που επιλύει προβλήματα βελτιστοποίησης όπου ορισμένοι από τους περιορισμούς ή τις αντικειμενικές συναρτήσεις είναι μη γραμμικοί.

Περισσότερες πληροφορίες μπορούν να βρεθούν στην [50].

Μια σειρά εργαλείων λογισμικού είναι διαθέσιμα για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται ο επιλυτής CPLEX που σχεδιάστηκε από την IBM, ο οποίος μπορεί να λύσει προβλήματα ακέραιου προγραμματισμού, προβλήματα τετραγωνισμού προγραμματισμού και προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού [51].

4.3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΙΚΟΝΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Η μοντελοποίηση του VPP περιλαμβάνει τα ακόλουθα στοιχεία:

- Κατανεμόμενες μονάδες παραγωγής (συμβατικές/θερμικές μονάδες)
- Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με συσσωρευτές (μπαταρίες)
- Μη κατανεμόμενες μονάδες ΑΠΕ (αιολική ενέργεια)
- Ευέλικτα φορτία
- Υποβολή καμπύλης προσφοράς ενέργειας στην Αγορά Επόμενης Ημέρας (Day-ahead Market – DAM) και αγοραπωλησία ενέργειας στην Αγορά Εξισορρόπησης (Balancing Market – BM)

Έστω ένα VPP που αποτελείται από ένα σύνολο θερμικών μονάδων ισχύος G, ένα σύνολο ευέλικτων φορτίων D, ένα σύνολο συστημάτων αποθήκευσης ST και ένα σύνολο μονάδων ΑΠΕ R. Το πρόγραμμα λειτουργίας του VPP περιλαμβάνει τη βέλτιστη λειτουργία των επιμέρους ενεργειακών του πόρων για την επόμενη ημέρα λειτουργίας (day-ahead operational planning), δηλαδή για χρονικό ορίζοντα T=24h, με ωριαίο βήμα t=1h.

Το βέλτιστο πρόγραμμα λειτουργίας του VPP αποσκοπεί στην μεγιστοποίηση του κέρδους του Διαχειριστή του VPP (κάτοχος του VPP). Για τον σκοπό αυτό, θεωρείται ότι η τιμή που θα προσφέρει στην αγορά

ηλεκτρικής ενέργειας ισούται με το οριακό κόστος λειτουργίας του σε €/MWh. Από την πλευρά του VPP, η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να θεωρηθεί ως ένας άπειρος προμηθευτής ενέργειας ή καταναλωτής ηλεκτρικής ενέργειας που είναι πρόθυμος να πουλήσει ή να αγοράσει αντίστοιχα οποιαδήποτε ποσότητα ενέργειας σε χρονική περίοδο t με κόστος $\boldsymbol{\lambda_t}$, δηλαδή, την τιμή της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας (υποδηλώνεται εδώ η τιμή της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας ως $\boldsymbol{\lambda_t}$, επειδή στη συνέχεια θα συσχετιστεί με την Αγορά Επόμενης Ημέρας).

4.3.1 Αντικειμενική συνάρτηση

Η διαδικασία λήψης αποφάσεων του Διαχειριστή του VPP πραγματοποιείται σε δύο στάδια:

1. Πρώτο στάδιο: ο Διαχειριστής του VPP πρέπει να αποφασίσει για την ποσότητα ενέργειας που θα πουλήσει ή θα αγοράσει από την Αγορά Επόμενης Ημέρας.
2. Δεύτερο στάδιο: Μόλις διευθετηθεί η συναλλαγή με την Αγορά Επόμενης Ημέρας, ο Διαχειριστής του VPP πρέπει να λειτουργήσει το VPP σε πραγματικό χρόνο και να αντιμετωπίσει τις μεταβολές της παραγωγής των μη κατανεμόμενων μονάδων, εκπληρώνοντας τις υποχρεώσεις του με βάση την καμπύλη προσφοράς που έχει δηλώσει.

Ως εκ τούτου, το δεύτερο στάδιο αυτής της διαδικασίας λήψης αποφάσεων, το οποίο έχει να κάνει με την πραγματική λειτουργία του VPP, επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό τόσο από τις αποφάσεις που ελήφθησαν στο πρώτο στάδιο όσο και από τις αβεβαιότητες του δεύτερου σταδίου που σχετίζονται με την παραγωγή των μονάδων ΑΠΕ.

Η Αγορά Επόμενης Ημέρας επιτρέπει την αγοραπωλησία ηλεκτρικής ενέργειας μία ημέρα πριν από την παράδοση ενέργειας. Συνήθως η προσφορά εκκαθαρίζεται το μεσημέρι (π.χ. 12:00 μ.μ.) της προηγούμενης ημέρας από την ημέρα κατά την οποία η ενέργεια θα παραδοθεί (ημέρα φυσικής παράδοσης). Αυτή η διαδικασία συνεπάγεται 12ωρη αναμονή σε σχέση με την πρώτη ώρα φυσικής παράδοσης και 36ωρη αναμονή σε σχέση με την τελευταία ώρα φυσικής παράδοσης. Η πρόβλεψη για τον προγραμματισμό λειτουργίας και την υποβολή προσφορών ενέργειας στην Αγορά Επόμενης Ημέρας απαιτείται καθώς υπάρχουν τεχνικοί περιορισμοί στην ευελιξία της λειτουργίας ορισμένων μονάδων παραγωγής (π.χ. πυρηνικοί σταθμοί ή μονάδες άνθρακα) αλλά και για τη διασφάλιση/δέσμευση της φυσικής παράδοσης μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας σε καλύτερη τιμή.

Η ενδοημερήσια αγορά (Intra-Day Market – IDM) επιτρέπει την αγοραπωλησία ηλεκτρικής ενέργειας μετά την εκκαθάριση της Αγοράς Επόμενης Ημέρας και συνήθως έως μία ή λίγες ώρες πριν από την φυσική παράδοση ενέργειας. Η ενδοημερήσια αγορά είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για παραγωγούς ΑΠΕ, όπως αιολικούς σταθμούς και ΦΒ σταθμούς. Δεδομένου ότι αυτή η αγορά είναι πιο κοντά χρονικά στην πραγματική παραγωγή ενέργειας σε σχέση με την Αγορά Επόμενης Ημέρας, επιτρέπει στους παραγωγούς ΑΠΕ να προσφέρουν με χαμηλότερη αβεβαιότητα τα επίπεδα παραγωγής τους, γεγονός που γενικά οδηγεί σε συγκριτικά υψηλότερα κέρδη και μειωμένη αστάθεια σε αυτά. Η ενδοημερήσια αγορά εφαρμόζεται, αν και με διαφορετικούς κανόνες, στην πλειονότητα των Ευρωπαϊκών αγορών ηλεκτρικής ενέργειας, ωστόσο, η ρευστότητά της είναι πολύ περιορισμένη, με την αξιοσημείωτη εξαίρεση της Ιβηρικής αγοράς [45].

Η Αγορά Εξισορρόπησης, που ονομάζεται επίσης και αγορά σε πραγματικό χρόνο σε ορισμένες χώρες, είναι το τελευταίο στάδιο για την εξισορρόπηση μεταξύ παραγωγής και ζήτησης. Η αγορά αυτή λειτουργεί συνήθως σε χρονικά διαστήματα από 30 λεπτά έως μία ώρα πριν από την φυσική παράδοση ενέργειας και οι τιμές διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό από εκείνες της Αγοράς Επόμενης Ημέρας, δημιουργώντας έτσι ρίσκο

για τον παραγωγό σε περίπτωση μεγάλης απόκλισης από την προσφορά που έχει κάνει στην Αγορά Επόμενης Ημέρας.

Η ενέργεια που προσφέρει το VPP στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, P_t^{DAM}, μπορεί να ληφθεί από το πρόβλημα μεγιστοποίησης του κέρδους, όπως παρουσιάζεται στην εξίσωση (1).

$$\begin{aligned} max\ OF = profit = income - cost \\ = \sum_t \left(\lambda_t^{retail} \cdot P_t^D\right) + \sum_t (\lambda_t^{DAM} \cdot P_t^{DAM}) \\ - \sum_\omega \pi_\omega \left\{ \sum_{g,t} \left(FC_{g,t,\omega} + SUC_{g,t} + SDC_{g,t} + EMC * CO2_{g,t,\omega}\right) + \sum_t \left(\lambda^{DR} \cdot P_{t,\omega}^{DnR}\right) \right. \\ \left. + \sum_t (P_{t,\omega}^{B-} \cdot \lambda_t^{B-} - P_{t,\omega}^{B+} \cdot \lambda_t^{B+}) + \sum_t \lambda^{Curt} \cdot P_{t,\omega}^{Curt} \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

όπου:

λ^{retail}	η τιμή προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας στα ευέλικτα φορτία
λ_t^{DAM}	η τιμή προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας στην Αγορά Επόμενης Ημέρας τη χρονική περίοδο *t*
λ_t^{B-}	η τιμή εξισορρόπησης αρνητικών αποκλίσεων (upward regulation) τη χρονική περίοδο *t*, ίση με $(1 + 40\%) \cdot \lambda_t^{DAM}$
λ_t^{B+}	η τιμή εξισορρόπησης θετικών αποκλίσεων (downward regulation) τη χρονική περίοδο *t*, ίση με $(1 - 20\%) \cdot \lambda_t^{DAM}$
λ^{DR}	Χρηματικό κίνητρο για μείωση κατανάλωσης ίσο με ποσοστό επί της τιμής προμήθειας, π.χ. $10\% \cdot \lambda^{retail}$
$P_{t,\omega}^{B-}$	η ενέργεια που αναγκάζεται να αγοράσει (upward regulation) ο Διαχειριστής του VPP από την Αγορά Εξισορρόπησης προκειμένου να ικανοποιήσει την καμπύλη προσφοράς που έθεσε στην Αγορά Επόμενης Ημέρας τη χρονική περίοδο *t* για το σενάριο *ω*
$P_{t,\omega}^{B+}$	η ενέργεια που αναγκάζεται να πουλήσει (downward regulation) ο Διαχειριστής του VPP προκειμένου να ικανοποιήσει την προσφορά που έθεσε στην Αγορά Επόμενης Ημέρας τη χρονική περίοδο *t* για το σενάριο *ω*
EMC	Κόστος εκπομπών CO2 σε ευρώ/kg
$CO2_{g,t,\omega}$	Οι εκπομπές CO2 των θερμικών μονάδων

Ο όρος $\sum_t (P_{t,\omega}^{B-}(\lambda_t^{B-} - \lambda_t^{DAM}) + P_{t,\omega}^{B+}(\lambda_t^{DAM} - \lambda_t^{B+}))$ περιγράφει το κόστος ευκαιρίας (opportunity loss) που προκύπτει από την αγοραπωλησία στην Αγορά Εξισορρόπησης.

Για την απλοποίηση του προβλήματος και τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας, έχει γίνει η ακόλουθη παραδοχή:

1. Θεωρείται ότι στην Αγορά Εξισορρόπησης η τιμή αγοράς ενέργειας λ_t^{B+} είναι αυξημένη κατά 40% και η τιμή πώλησης ενέργειας λ_t^{B-} είναι μειωμένη κατά 20% σε σύγκριση με εκείνη της Αγοράς Επόμενης Ημέρας λ_t^{DAM}, προκειμένου να προσομοιωθεί έμμεσα το κόστος χρήσης της Αγοράς

Εξισορρόπησης, όταν η απόκλιση του VPP είναι στην ίδια κατεύθυνση με αυτή του συστήματος. Στην πραγματικότητα η διαμόρφωση των τιμών εξαρτάται από περισσότερους παράγοντες.

4.3.2 Περιορισμοί προβλήματος

4.3.2.1 Ενεργειακό ισοζύγιο

Το VPP και η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν ένα κλειστό ενεργειακό σύστημα που πρέπει να εξισορροπείται σε κάθε χρονική περίοδο *t*, πράγμα που σημαίνει ότι η ποσότητα ενέργειας που παράγεται τόσο από συμβατικές όσο και από μη κατανεμόμενες μονάδες παραγωγής ενέργειας και μονάδες αποθήκευσης πρέπει να είναι ίση με την ποσότητα ενέργειας που καταναλώνεται από τα ευέλικτα φορτία, που χρησιμοποιείται για τη φόρτιση των μονάδων αποθήκευσης και πωλείται στην αγορά για κάθε χρονική περίοδο *t*. Το ενεργειακό ισοζύγιο του VPP δίνεται από την εξίσωση (2).

$$P_{t,\omega}^{RES} - P_{t,\omega}^{Curt} + \sum_{g} P_{g,t,\omega}^{Th} + P_{t,\omega}^{Dch} = P_{t,\omega}^{FL} + P_{t,\omega}^{Ch} + P_{t}^{DAM} - P_{t,\omega}^{B-} + P_{t,\omega}^{B+} \qquad \forall t, \omega \quad (2)$$

Όπου:

$P_{t,\omega}^{RES}$ η προβλεπόμενη παραγωγή ενέργειας από τις μη κατανεμόμενες μονάδες παραγωγής τη χρονική περίοδο *t* για το σενάριο *ω*

$P_{t,\omega}^{Curt}$ η παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ που απορρίφθηκε τη χρονική περίοδο *t* για το σενάριο *ω*

$P_{g,t,\omega}^{Th}$ η παραγωγή ενέργειας από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής τη χρονική περίοδο *t* για το σενάριο *ω*

$P_{t,\omega}^{Dch}$ η έγχυση ενέργειας από το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας τη χρονική περίοδο *t* για το σενάριο *ω*

$P_{t,\omega}^{FL}$ η κατανάλωση ενέργειας από τα ευέλικτα φορτία τη χρονική περίοδο *t* για το σενάριο *ω*

$P_{t,\omega}^{Ch}$ η απορρόφηση ενέργειας για τη φόρτιση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας τη χρονική περίοδο *t* για το σενάριο *ω*

P_{t}^{DAM} η ενέργεια που προσφέρεται/πωλείται στην Αγορά Επόμενης Ημέρας τη χρονική περίοδο *t*. Αρνητική τιμή ισοδυναμεί με αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από το VPP.

$P_{t,\omega}^{B+}$ η ενέργεια που πωλείται στην Αγορά Εξισορρόπησης τη χρονική περίοδο *t* για το σενάριο *ω* όπου $P_{t,w}^{B+} \geq 0$

$P_{t,\omega}^{B-}$ η ενέργεια που αγοράζεται από την Αγορά Εξισορρόπησης τη χρονική περίοδο *t* για το σενάριο *ω* όπου $P_{t,w}^{B-} \geq 0$

Η εξίσωση του ενεργειακού ισοζυγίου, όπως παρουσιάζεται στην εξίσωση (2), περιλαμβάνει μεταβλητές διαφορετικής φύσης, οι οποίες μπορούν να ελεγχθούν με διαφορετικό τρόπο και τεχνολογία. Πιο συγκεκριμένα:

1. Η παραγωγή ενέργειας των μονάδων ΑΠΕ, $P_{t,\omega}^{RES}$ δεν είναι εύκολο να προβλεφθεί και είναι γνωστή μόνο σε πραγματικό χρόνο, καθώς η παραγωγή εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες. Επομένως, το $P_{t,\omega}^{RES}$ είναι μια παράμετρος στο πρόβλημα λειτουργίας VPP και όχι μια απόφαση που πρέπει να ληφθεί.

2. Οι μεταβλητές που αφορούν τα υπόλοιπα στοιχεία του VPP, δηλαδή $P_{g,t,\omega}^{Th}$, $P_{t,\omega}^{Dch}$,$P_{t,\omega}^{Ch}$ $P_{t,\omega}^{B+}$, $P_{t,\omega}^{B-}$, P_t^{DAM} και $P_{t,\omega}^{FL}$ θα αποφασιστούν μόλις γίνει γνωστή η ισχύς των μη κατανεμόμενων μονάδων παραγωγής ή σε χρονική στιγμή πολύ κοντά στην εκτίμηση της πραγματικής τιμής της ισχύος εξόδου των μονάδων ΑΠΕ. Με αυτόν τον τρόπο, οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας, τα ευέλικτα φορτία και οι μονάδες αποθήκευσης ενέργειας στο VPP λειτουργούν για να ικανοποιήσουν αποτελεσματικά την αβέβαιη παραγωγή ενέργειας από τις ΑΠΕ. Ως αποτέλεσμα, οι παραπάνω μεταβλητές είναι αποφάσεις που πρέπει να ληφθούν από το τελικό αποτέλεσμα του $P_{t,\omega}^{RES}$.
3. Η ενέργεια που προσφέρει το VPP με την Αγορά Επόμενης Ημέρας (day-ahead market – DAM), P_t^{DAM}, αποφασίζεται εκ των προτέρων, δηλαδή πριν γίνει γνωστή η τελική πραγματοποίηση του $P_{t,\omega}^{RES}$. Για παράδειγμα, η υποβολή προσφοράς ενέργειας για κάθε χρονική περίοδο t στην Αγορά Επόμενης Ημέρας, η οποία είναι σήμερα μια από τις πιο συνηθισμένες διαδικασίες συναλλαγής σε μια αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, πρέπει να υποβληθεί περίπου 14-38 ώρες πριν από την χρονική περίοδο φυσικής παράδοσης (δηλαδή τη χρονική περίοδο σε λειτουργία πραγματικού χρόνου). Κατά συνέπεια, η προσφορά παραγωγής, P_t^{DAM}, είναι μια μεταβλητή απόφασης, ανεξάρτητη από την πραγματική παραγωγή ενέργειας από τις μη κατανεμόμενες μονάδες παραγωγής ενέργειας και βασίζεται σε προβλέψεις για αυτήν, άρα απαιτεί προγραμματισμό.

Στην πραγματικότητα, δεδομένου ότι τα $P_{g,t,\omega}^{Th}$, $P_{t,\omega}^{Dch}$, $P_{t,\omega}^{Ch}$, $P_{t,\omega}^{B+}$, $P_{t,\omega}^{B-}$, P_t^{DAM} και $P_{t,\omega}^{FL}$ μπορούν να προσαρμοστούν, και έτσι να βελτιστοποιηθούν γύρω από οποιαδήποτε συγκεκριμένη πραγματοποίηση του $P_{t,\omega}^{RES}$, η εύρεση της βέλτιστης τιμής του P_t^{DAM} μετατρέπει το πρόβλημα διαχείρισης του VPP σε πρόβλημα λήψης αποφάσεων υπό αβεβαιότητα.

4.3.2.2 Θερμικές Μονάδες

Η μοντελοποίηση των θερμικών μονάδων παραγωγής πραγματοποιείται με τις εξισώσεις (3)–(7). Η εξίσωση (3) δίνει τη συνάρτηση κόστους καυσίμου, $FC_{g,t,\omega}$, με την οποία υπολογίζεται το κόστος (σε ευρώ) παραγωγής ενέργειας της θερμικής μονάδας g τη χρονική περίοδο t για το σενάριο ω.

$$FC_{g,t,\omega} = a_g P_{g,t,\omega}^2 + b_g P_{g,t,\omega} + u_{g,t} \cdot c_g \tag{3}$$

όπου:

a_g, b_g, c_g	συντελεστές κόστους καυσίμου της θερμικής μονάδας g
$P_{g,t,\omega}$	η παραγωγή ενέργειας από την θερμική μονάδα g τη χρονική περίοδο t για κάθε σενάριο ω

Οι συνολικές εκπομπές ρύπων (σε kg), *EM*, υπολογίζονται από την (4).

$$EM = \sum_{g,t,\omega} d_g \cdot P_{g,t,\omega}^2 + e_g \cdot P_{g,t,\omega} + u_{g,t} \cdot f_g \tag{4}$$

όπου:

d_g, e_g, f_g	οι συντελεστές εκπομπών της θερμικής μονάδας g

Οι τεχνικοί περιορισμοί λειτουργίας των θερμικών μονάδων ορίζονται από τις σχέσεις (5α)-(6η).

Σημειώνεται ότι οι μεταβλητές που σχετίζονται με το πρόγραμμα ένταξης μονάδων (unit commitment), u, u^{on}, u^{off} είναι μεταβλητές *here-and-now*. Η μεταβλητή $P_{g,t,\omega}^{Th}$είναι μεταβλητή wait-and-see και για αυτό σχετίζεται με κάθε σενάριο ω.

$$u_{g,t} \cdot P_g^{min} \leq P_{g,t,\omega}^{Th} \leq u_{g,t} \cdot P_g^{max} \qquad \forall g,t,\omega \qquad (5\alpha)$$

$$P_{g,t,\omega}^{Th} - P_{g,t-1,\omega}^{Th} \leq RU_g \cdot u_{g,t-1} + SU_g \cdot u_{g,t}^{on} \qquad \forall g,t,\omega \qquad (5\beta)$$

$$P_{g,t-1,\omega}^{Th} - P_{g,t,\omega}^{Th} \leq RD_g \cdot u_{g,t} + SD_g \cdot u_{g,t}^{off} \qquad \forall g,t,\omega \qquad (5\gamma)$$

$$u_{g,t} - u_{g,t-1} \leq u_{g,t}^{on} \qquad \forall g, t \neq 1 \qquad (6\alpha)$$

$$u_{g,t} - u_{g,t=0} \leq u_{g,t}^{on} \qquad \forall g, t = 1 \qquad (6\beta)$$

$$u_{g,t-1} - u_{g,t} \leq u_{g,t}^{off} \qquad \forall g, t \neq 1 \qquad (6\gamma)$$

$$u_{g,t=0} - u_{g,t} \leq u_{g,t}^{off} \qquad \forall g, t = 1 \qquad (6\delta)$$

$$u_{g,t} - u_{g,t-1} \leq u_{g,t}^{on} - u_{g,t}^{off} \qquad \forall g, t \neq 1 \qquad (6\varepsilon)$$

$$u_{g,t} - u_{g,t=0} \leq u_{g,t}^{on} - u_{g,t}^{off} \qquad \forall g, t = 1 \qquad (6\sigma\tau)$$

$$UT \cdot u_{g,t}^{on} \leq \sum_{h=t}^{t+UT-1} u_{g,h} \qquad \forall g,t \qquad (6\zeta)$$

$$DT \cdot u_{g,t}^{off} \leq \sum_{h=t}^{t+DT-1} (1 - u_{g,h}) \qquad \forall g,t \qquad (6\eta)$$

$u_{g,t}, u_{g,t}^{on}, u_{g,t}^{off} \in \{0,1\}$

όπου:

P_g^{min}	το τεχνικό ελάχιστο της θερμικής μονάδας g
P_g^{max}	η ονομαστική ισχύς (ή μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς) της θερμικής μονάδας g
RU_g , RD_g	ο ρυθμός ανόδου/ρυθμός καθόδου (ramp-up/ramp-down) της παραγωγής της θερμικής μονάδας g
SU_g , SD_g	η ισχύς εκκίνησης (start-up) και η ισχύς σβέσης (shut-down) της θερμικής μονάδας g
$u_{g,t}$	δυαδική μεταβλητή που ορίζει την κατάσταση λειτουργίας (ένταξη) της θερμικής μονάδας g τη χρονική περίοδο t (τιμή: 1 ενεργός, 0 ανενεργός),
$u_{g,t=0}$	δυαδική μεταβλητή που ορίζει την κατάσταση λειτουργίας (ένταξη) της θερμικής μονάδας g πριν από την πρώτη χρονική περίοδο (τιμή: 1 ενεργός, 0 ανενεργός),
$u_{g,t}^{on}$	δυαδική μεταβλητή που ορίζει την εκκίνηση λειτουργίας της θερμικής μονάδας g τη χρονική περίοδο t (τιμή: 1 εκκίνηση, 0 όχι εκκίνηση),
$u_{g,t}^{off}$	δυαδική μεταβλητή που ορίζει τη σβέση της θερμικής μονάδας g τη χρονική περίοδο t (τιμή: 1 σβέση, 0 όχι σβέση),

UT	ο ελάχιστος χρόνος κράτησης της θερμικής μονάδας g σε λειτουργία
DT	ο ελάχιστος χρόνος κράτησης της θερμικής μονάδας g εκτός λειτουργίας

Η παραγωγή ισχύος της θερμικής μονάδας g την χρονική περίοδο t θα πρέπει να είναι εντός των τεχνικών ορίων λειτουργίας, όπως δίνεται από την σχέση (5α). Οι περιορισμοί σχετικά με τους ρυθμούς αύξησης και μείωσης της παραγωγής που περιορίζουν τη δυνατότητα της μονάδας να αυξήσει ή να μειώσει την παραγόμενη ισχύ μεταξύ δύο διαδοχικών χρονικών περιόδων t–1 και t, δίνονται από τις σχέσεις (5β)–(5γ).

Οι σχέσεις (6α)–(6στ) μοντελοποιούν την κατάσταση λειτουργίας κάθε θερμικής μονάδας g. Οι σχέσεις (6ζ) και (6η) περιγράφουν τις απαιτήσεις του ελάχιστου χρόνου λειτουργίας και του ελάχιστου χρόνου εκτός λειτουργίας κάθε μονάδας g.

Το ρεαλιστικό κόστος εκκίνησης λειτουργίας και σβέσης της θερμικής μονάδας εξαρτάται από το πλήθος των χρονικών περιόδων που η μονάδα ενεργοποιείται ή απενεργοποιείται, αντίστοιχα. Ορισμένες εργασίες παρέχουν τη λεπτομερή διατύπωση για τη μοντελοποίηση αυτών των όρων κόστους [52]. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, για λόγους απλότητας, το κόστος εκκίνησης ($SUC_{g,t}$) και τερματισμού λειτουργίας ($SDC_{g,t}$) μοντελοποιούνται ως σταθερές τιμές όπως παρουσιάζεται στις εξισώσεις (7α) και (7β):

$$SUC_{g,t} = Csu_g \cdot u_{g,t}^{on} \qquad \forall g,t \qquad (7\alpha)$$

$$SDC_{g,t} = Csd_g \cdot u_{g,t}^{off} \qquad \forall g,t \qquad (7\beta)$$

Όπως φαίνεται, ο προγραμματισμός λειτουργίας ενός VPP δεν απαιτεί μόνο αποφάσεις σχετικά με την παραγόμενη ενέργεια κάθε θερμικής μονάδας, αλλά απαιτεί επίσης τον προσδιορισμό ενός προγράμματος ένταξης των θερμικών μονάδων. Με άλλα λόγια, εφόσον το κόστος εκκίνησης και τερματισμού λειτουργίας των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής μπορεί να είναι σημαντικό, οι αποφάσεις ενεργοποίησης/απενεργοποίησης πρέπει να καθορίζονται με βέλτιστο τρόπο σε συντονισμό με την παραγόμενη ενέργεια της θερμικής μονάδας.

Οι θερμικές μονάδες έχουν εγκατεστημένη ισχύς 15 MW. Αποτελούνται από 4 ντιζελογεννήτριες.

4.3.2.3 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας

Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (energy storage systems – ESS) είναι μια ελκυστική επιλογή για την αύξηση της ευελιξίας της λειτουργίας και του σχεδιασμού ενός ενεργειακού συστήματος. Οι μονάδες αποθήκευσης μπορούν να απορροφήσουν ενέργεια σε περιόδους χαμηλής τιμής ηλεκτρικής ενέργειας ή περίσσειας παραγωγής ΑΠΕ και να την επιστρέψουν σε περιόδους υψηλής τιμής ή χαμηλής παραγωγής ΑΠΕ.

Η μοντελοποίηση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας παρουσιάζεται από τις σχέσεις (8α)–(8ζ).

$$SOC_{t,\omega} = SOC_{t-1,\omega} + \left(P_{t,\omega}^{ch} \cdot \eta_c - \frac{P_{t,\omega}^{dch}}{\eta_d}\right) \cdot \Delta_t \qquad \forall t,\omega \qquad (8\alpha)$$

$$P_{min}^{ch} \le P_{t,\omega}^{ch} \le P_{max}^{ch} \qquad \forall t,\omega \qquad (8\beta)$$

$$P_{min}^{dch} \le P_{t,\omega}^{dch} \le P_{max}^{dch} \qquad \forall t,\omega \qquad (8\gamma)$$

$$SOC_{min} \leq SOC_{t,\omega} \leq SOC_{max} \qquad \forall t, \omega \qquad (8\delta)$$

$$P_{t,\omega}^{ch} < P_{max}^{ch} \cdot u_{t,\omega}^{ESS} \qquad \forall t, \omega \qquad (8\varepsilon)$$

$$P_{t,\omega}^{dch} < P_{max}^{dch} \cdot (1 - u_{t,\omega}^{ESS}) \qquad \forall t, \omega \qquad (8\sigma\tau)$$

$$u_{t,\omega}^{ESS} \in \{0,1\} \qquad \forall t, \omega \qquad (8\zeta)$$

όπου:

$SOC_{t,\omega}$	η κατάσταση φόρτισης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας τη χρονική περίοδο *t* για το σενάριο *ω*
SOC_{min}	η ελάχιστη κατάσταση φόρτισης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας
SOC_{max}	η μέγιστη κατάσταση φόρτισης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας
$P_{t,\omega}^{ch}$	ο ρυθμός φόρτισης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας τη χρονική περίοδο *t* για το σενάριο *ω*
P_{min}^{ch}	ο ελάχιστος ρυθμός φόρτισης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας
P_{max}^{ch}	ο μέγιστος ρυθμός φόρτισης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας
$P_{t,\omega}^{dch}$	ο ρυθμός εκφόρτισης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας τη χρονική περίοδο *t* για το σενάριο *ω*
P_{min}^{dch}	ο ελάχιστος ρυθμός εκφόρτισης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας
P_{max}^{dch}	ο μέγιστος ρυθμός φόρτισης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας
η_c	η αποδοτικότητα φόρτισης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας
η_d	η αποδοτικότητα εκφόρτισης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας
$u_{t,\omega}^{ESS}$	δυαδική μεταβλητή που ελέγχει τη φόρτιση/εκφόρτιση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας και διασφαλίζει ότι δεν θα πραγματοποιηθεί φόρτιση και εκφόρτιση την ίδια χρονική περίοδο

4.3.2.4 Ευέλικτα Φορτία

Η ευέλικτη ζήτηση έχει τη δυνατότητα να μειώσει, να αυξήσει ή να αναβάλει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ως απάντηση στις υψηλές τιμές της αγοράς ή στα κίνητρα της αγοράς.

Τα ευέλικτα (ή αλλιώς ελεγχόμενα) φορτία μπορούν να συμβάλουν στην ευελιξία του συστήματος μέσω μιας σειράς ενεργειών, και συγκεκριμένα:

1. Με τη μείωση του ρυθμού αύξησης σε περιόδους έντονης αύξησης της ζήτησης.
2. Μειώνοντας το ποσοστό μείωσης σε περιόδους έντονης μείωσης της υψηλής ζήτησης.
3. Με τη μείωση της μέγιστης ζήτησης.
4. Με την αύξηση της ελάχιστης ζήτησης.
5. Μετατοπίζοντας τη ζήτηση ενέργειας από τις περιόδους υψηλής ζήτησης σε περιόδους χαμηλής ζήτησης.

Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν στο VPP περιλαμβάνονται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως τα φωτοβολταϊκά που δεν παράγουν καθόλου ενέργεια το βράδυ και τα αιολικά πάρκα που συνήθως έχουν μικρή παραγωγή τις πρωινές ώρες.

Βέβαια είναι αυτονόητο ότι δεν είναι εφικτό να αυξομειώνεται η ζήτηση όσο είναι επιθυμητό και συνήθως τα μη ευέλικτα φορτία αποτελούν την πλειοψηφία.

Η μαθηματική μοντελοποίηση των ευέλικτων φορτίων παρουσιάζεται στις σχέσεις (9α)-(9η).

$$(1 - s_{min}) \cdot P_t^D \leq P_{t,\omega}^{FL} \leq (1 + s_{max}) \cdot P_t^D \qquad \forall t, \omega \qquad (9\alpha)$$

$$\sum_t P_{t,\omega}^{FL} = \sum_t P_t^D \qquad \forall \omega \qquad (9\beta)$$

$$P_{t,\omega}^{FL} = P_t^D + P_{t,\omega}^{UpR} - P_{t,\omega}^{DnR} \qquad \forall t, \omega \qquad (9\gamma)$$

$$P_{t,\omega}^{UpR} \leq s_{max} \cdot P_t^D \cdot u_{t,\omega}^{FL} \qquad \forall t, \omega \qquad (9\delta)$$

$$P_{t,\omega}^{DnR} \leq s_{min} \cdot P_t^D \cdot (1 - u_{t,\omega}^{FL}) \qquad \forall t, \omega \qquad (9\varepsilon)$$

$$P_{t,\omega}^{UpR} \geq 0 \qquad \forall t, \omega \qquad (9\sigma\tau)$$

$$P_{t,\omega}^{DnR} \geq 0 \qquad \forall t, \omega \qquad (9\zeta)$$

$$u_{t,\omega}^{FL} \in \{0,1\} \qquad \forall t, \omega \qquad (9\eta)$$

όπου

$P_{t,\omega}^{FL}$	η ζήτηση τη χρονική περίοδο *t* για το σενάριο *ω* μετά την μεταβολή του φορτίου
P_t^D	η αρχική ζήτηση τη χρονική περίοδο *t*
$(1 - s_{min})$	το κατώτατο όριο μεταβολής της ζήτησης
$(1 + s_{max})$	το ανώτατο όριο μεταβολής της ζήτησης
$P_{t,\omega}^{UpR}$	η αύξηση της κατανάλωσης λόγω της ευελιξίας του φορτίου τη χρονική περίοδο *t* για το σενάριο *ω*
$P_{t,\omega}^{DnR}$	η μείωση της κατανάλωσης λόγω της ευελιξίας του φορτίου τη χρονική περίοδο *t* για το σενάριο *ω*
$u_{t,\omega}^{FL}$	δυαδική μεταβλητή που ελέγχει την αύξηση ή μείωση του ευέλικτου φορτίου και διασφαλίζει πως δεν θα υπάρξει αύξηση και μείωση ταυτόχρονα κατά την ίδια χρονική περίοδο

Η εξίσωση (9β) ορίζει ότι η συνολική κατανάλωση πρέπει να παραμένει σταθερή καθώς στόχος των ευέλικτων φορτίων δεν είναι η μείωση ή αύξηση της ημερήσιας κατανάλωσης αλλά η μετατόπιση της ζήτησης σε περιόδους που η τιμή ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλότερη, π.χ. περιόδους με διαθέσιμη παραγωγή από μονάδες ΑΠΕ.

Η μεταβολή της ζήτησης μέσω της δυναμικής τιμολόγησης προσφέρει στον Διαχειριστή του VPP τη δυνατότητα να μειώσει ταυτόχρονα τον κίνδυνο και το κόστος που δημιουργείται από την αβεβαιότητα

στην παραγωγή των μη κατανεμόμενων μονάδων. Στην παρούσα διπλωματική εργασία αυτή η δυναμική τιμολόγηση έχει μοντελοποιηθεί με τη μείωση της τιμής πώλησης κατά 10% για τις χρονικές περιόδους όπου το ευέλικτο φορτίο είναι μικρότερο από την αρχική ζήτηση. Οι καταναλωτές που εκτίθενται σε δυναμικές τιμές σε πραγματικό χρόνο μπορούν να μειώσουν το κόστος προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας τροποποιώντας τη συμπεριφορά τους, ενδεχομένως θυσιάζοντας όμως μέρος της άνεσής τους.

4.3.2.5 Μη κατανεμόμενες Μονάδες Παραγωγής Ενέργειας

Με τον όρο μη κατανεμόμενες μονάδες παραγωγής ενέργειας νοούνται οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των οποίων η παραγωγή δεν μπορεί να προγραμματιστεί με ακρίβεια ή να μετατεθεί σε άλλη χρονική περίοδο πέραν από την χρονική περίοδο κατά την οποία η πηγή ενέργειας είναι διαθέσιμη, π.χ. ηλιακή, αιολική και κυματική ενέργεια. Οι πιο διαδεδομένες τεχνολογίες μη κατανεμόμενων μονάδων είναι αυτές της φωτοβολταϊκής παραγωγής (ΦΒ σταθμοί) και της αιολικής παραγωγής (αιολικοί σταθμοί). Η εκ των προτέρων εκτίμηση της ποσότητας ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από αυτές είναι εγγενώς αβέβαιη σε χρόνο και ποσότητα, και κάθε πρόβλεψη μελλοντικής αξιοποίησης τέτοιων μονάδων συνήθως έχει σημαντικά σφάλματα. Για να μοντελοποιηθεί η λειτουργία μιας μη κατανεμόμενης μονάδας παραγωγής σε ένα VPP, ο Διαχειριστής του VPP καταφεύγει σε προβλέψεις της παραγόμενης ενέργειας τέτοιων μονάδων.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι προβλέψεων που χρησιμοποιούνται όταν πρόκειται για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Στην παρούσα διπλωματική εργασία η πρόβλεψη της παραγωγής των μη κατανεμόμενων μονάδων βασίζεται σε σενάρια, το καθένα με πιθανότητα πραγματοποίησης $\pi_\omega \geq 0$ τέτοια ώστε $\sum_{\omega=1}^{N_\Omega} \pi_\omega = 1$.

Δεδομένου ότι οι μη κατανεμόμενες μονάδες παραγωγής παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από ΑΠΕ που είναι άφθονες και με σχετικά πολύ χαμηλό κόστος παραγωγής, το κόστος παραγωγής τους θεωρείται μηδενικό για τις ανάγκες των προσομοιώσεων.

Ορισμένες ή όλες οι ανεμογεννήτριες ενός αιολικού πάρκου μπορεί να χρειαστεί να τεθούν εκτός λειτουργίας για ορισμένη χρονική περίοδο προκειμένου να μετριαστούν προβλήματα που σχετίζονται με την υπερφόρτωσή τους, περιορισμούς στην εξαγωγή ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο κ.α. Η δυνατότητα απόρριψης παραγωγής ΑΠΕ μοντελοποιείται από τη σχέση (10).

$$0 \leq P_{t,\omega}^{curt} \leq P_{t,\omega}^{RES} \tag{10}$$

όπου:

$P_{t,\omega}^{curt}$ η απορριπτόμενη παραγωγή από τις ΑΠΕ τη χρονική περίοδο *t* για το σενάριο *ω*

$P_{t,\omega}^{RES}$ η παραγωγή ενέργειας από τις ΑΠΕ τη χρονική περίοδο *t* για το σενάριο *ω*

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, λόγω της σύνδεσης του VPP με την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και εξαιτίας της απλοποιημένης μοντελοποίησης της παραγωγής ενέργειας από τις μη κατανεμόμενες μονάδες, το $P_{t,\omega}^{curt}$ είναι μηδενικό.

4.4 ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Για την επίλυση του προβλήματος που εντάσσεται στην κατηγορία των προβλημάτων μεικτού ακέραιου προγραμματισμού με τετραγωνικούς περιορισμούς (mixed integer quadratically constrained programming – MIQCP) χρησιμοποιείται ο επιλυτής CPLEX [52] που προσφέρει το προγραμματιστικό περιβάλλον

GAMS**.** Τα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν για να γίνει η επίλυση του προβλήματος είναι κατά σειρά τα ακόλουθα**:**

1. Εισαγωγή των παραμέτρων του VPP
2. Εισαγωγή των περιορισμών λειτουργίας του VPP καθώς και της αντικειμενικής συνάρτησης που βελτιστοποιείται, σχέση (10)
3. Εισαγωγή της καμπύλης πρόβλεψης αιολικής παραγωγής, της ημερήσιας καμπύλης φορτίου του VPP και των τιμών της Αγοράς Επόμενης Ημέρας
4. Επίλυση του προβλήματος και εξαγωγή των αποτελεσμάτων

Από την επίλυση του προβλήματος υπολογίζεται όχι μόνο το αναμενόμενο κέρδος (σε ευρώ) που θα έχει ο Διαχειριστής του VPP αλλά και ο τρόπος λειτουργίας των επιμέρους μονάδων του VPP προκειμένου να επιτευχθεί αυτό. Όλα αυτά τα αποτελέσματα εξάγονται από το περιβάλλον GAMS σε αρχείο excel όπου στη συνέχεια είναι εύκολη η παρουσίασή τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΙΚΟΝΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται περιγραφή του λογισμικού που αναπτύχθηκε για την εύρεση του βέλτιστου προγράμματος λειτουργίας ενός εικονικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής που περιλαμβάνει μη κατανεμόμενες μονάδες παραγωγής ενέργειας. Αρχικά γίνεται μια σύντομη περιγραφή του περιβάλλοντος ανάπτυξης που χρησιμοποιήθηκε (GAMS) και των χρήσιμων εργαλείων, που προσφέρονται από αυτό για την εύκολη και γρήγορη εξαγωγή αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια, αναφέρονται οι απαιτήσεις του συστήματος για το συγκεκριμένο πρόγραμμα και παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη δημιουργία της μοντελοποίησης.

5.2 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

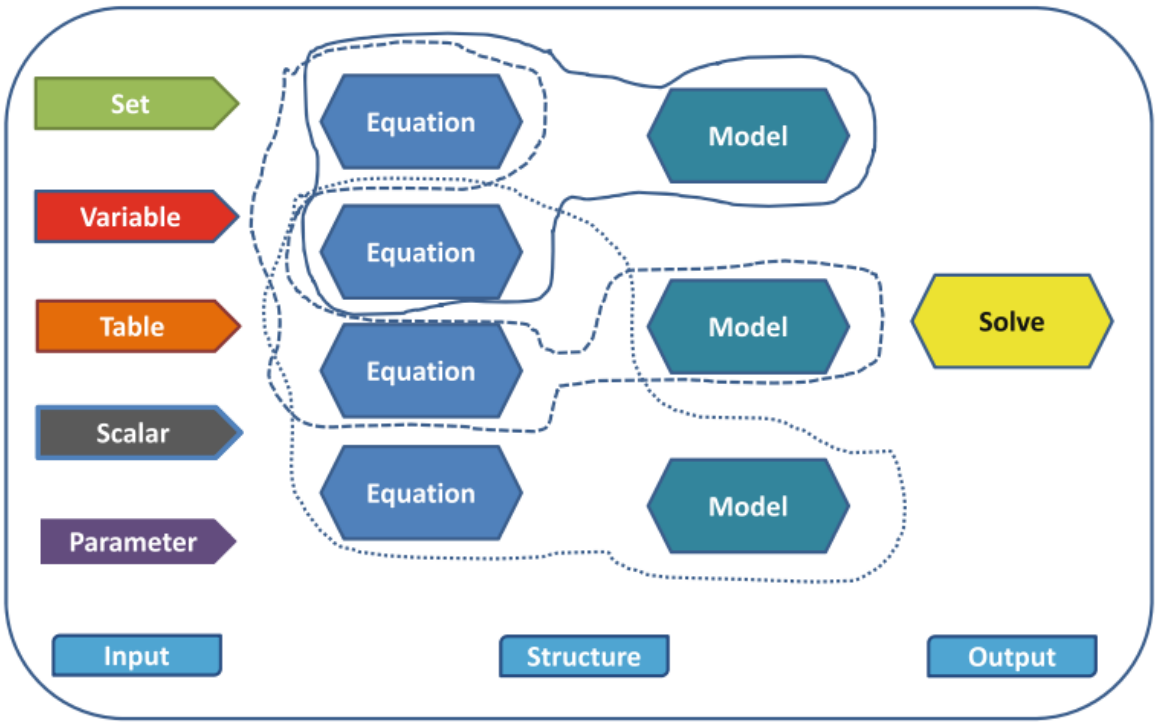
Το περιβάλλον που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη της εφαρμογής είναι το GAMS σε έκδοση 24.1.3 r41464.

Το GAMS (General Algebraic Modeling System) είναι ένα εργαλείο μοντελοποίησης για σκοπούς μαθηματικού προγραμματισμού και βελτιστοποίησης, που βοηθά στην επίλυση ενός μεγάλου φάσματος προβλημάτων βελτιστοποίησης συστημάτων ισχύος. Με τη βοήθεια του GAMS, οι ερευνητές μπορούν πλέον να θέσουν και να απαντήσουν ερωτήσεις που δεν μπορούσαν να κάνουν στο παρελθόν. Ξεκίνησε ως έργο στην Παγκόσμια Τράπεζα από μια ομάδα ανάλυσης οικονομικών μοντέλων τη δεκαετία του 1970. Ήταν το πρώτο σύστημα λογισμικού που συνδύασε τη γλώσσα της μαθηματικής άλγεβρας με τις παραδοσιακές έννοιες του προγραμματισμού υπολογιστών προκειμένου να περιγράψει αποτελεσματικά και να λύσει προβλήματα βελτιστοποίησης. Σήμερα, η αλγεβρική μοντελοποίηση θεωρείται ο πιο παραγωγικός τρόπος εφαρμογής μοντέλων βελτιστοποίησης και μεθόδων αποσύνθεσης για προβλήματα βελτιστοποίησης [53].

Κάθε μοντέλο στο GAMS αποτελείται από τα ακόλουθα κύρια στοιχεία:

- *Σύνολα*: τα σύνολα χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των δεικτών στις αλγεβρικές αναπαραστάσεις των μοντέλων. Για παράδειγμα, σύνολο μονάδων παραγωγής, χρονικών περιόδων, κλπ.
- *Δεδομένα*: Τα δεδομένα εισόδου κάθε μοντέλου στο GAMS εκφράζονται με τη μορφή παραμέτρων, πινάκων ή scalar. Οι παράμετροι και οι πίνακες καθορίζονται πάνω στα σύνολα. Τα scalars είναι ποσότητες με μοναδική αξία.
- Μεταβλητές: Οι μεταβλητές είναι σύνολα αποφάσεων και είναι άγνωστες πριν από την επίλυση του μοντέλου.
- Εξισώσεις: Οι εξισώσεις περιγράφουν τις σχέσεις μεταξύ των δεδομένων και των μεταβλητών.

- Δήλωση επίλυσης και μοντέλου: Το μοντέλο ορίζεται ως ένα σύνολο εξισώσεων που περιέχουν μια αντικειμενική συνάρτηση. Η δήλωση επίλυσης ζητά από το GAMS να λύσει το μοντέλο και να επιλέξει το είδος του προβλήματος (NLP, MIP, MINLP, κ.α.) και το είδος της βελτιστοποίησης που πραγματοποιείται επί της αντικειμενικής συνάρτησης (μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση).
- Επιλογή: Δίνεται η δυνατότητα καθορισμού μεγάλου αριθμού ρυθμίσεων, όπως είναι:
    - Το χρονικό όριο εκτέλεσης του προγράμματος.
    - Ο αριθμός των δεκαδικών ψηφίων των αποτελεσμάτων.
    - Η επιλογή συγκεκριμένου solver, κ.α.
- Έξοδος: Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να παρουσιαστούν οι έξοδοι του επιλυμένου μοντέλου, όπως αποθήκευση σε αρχείο Excel και εμφάνιση στην οθόνη [54].

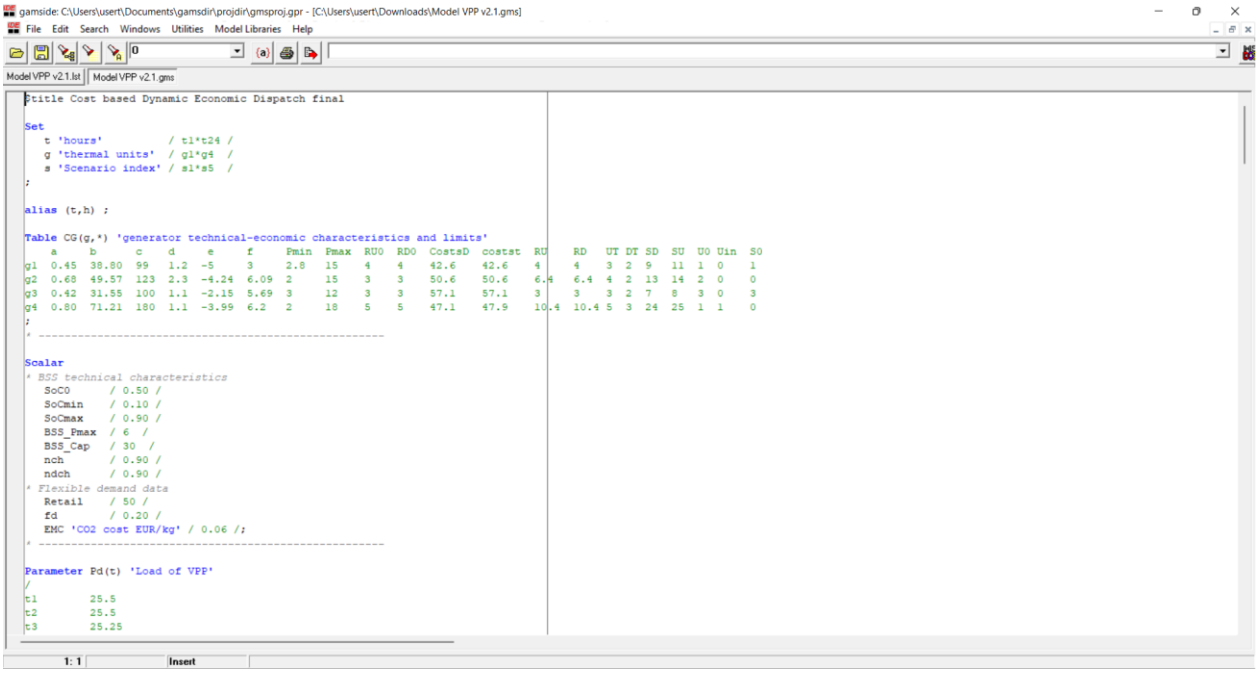


Σχήμα 5.1: Δομή των στοιχείων και του κώδικα [54]

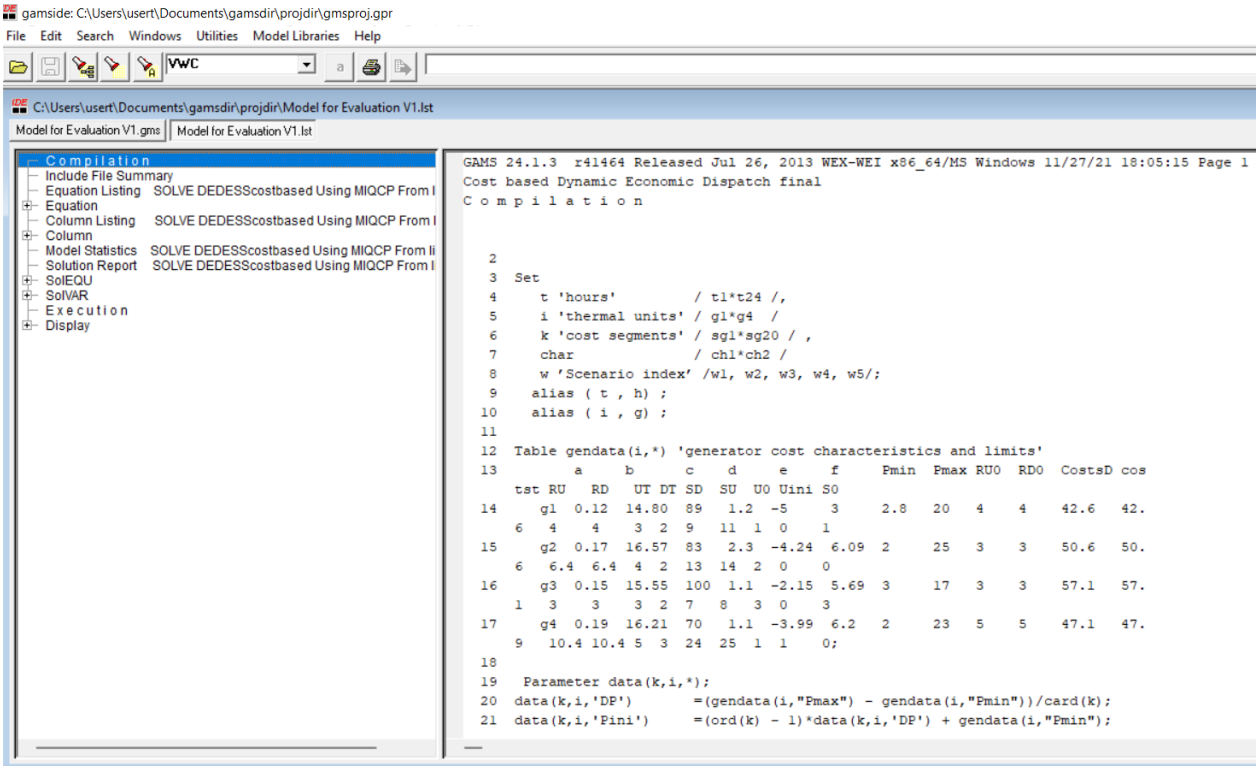
5.2.1 Το περιβάλλον του GAMS

Τα βασικότερα μέρη του περιβάλλοντος του GAMS είναι:

- Καρτέλα προγράμματος (Σχήμα 5.2): Μέσα στην καρτέλα αυτή γράφονται οι εντολές, περιλαμβάνει δηλαδή όλο τον κώδικα της μοντελοποίησης των διάφορων στοιχείων του VPP καθώς και εντολές που καθορίζουν ποιος επιλυτής θα χρησιμοποιηθεί, τι αποτελέσματα θα παρουσιαστούν, κλπ.

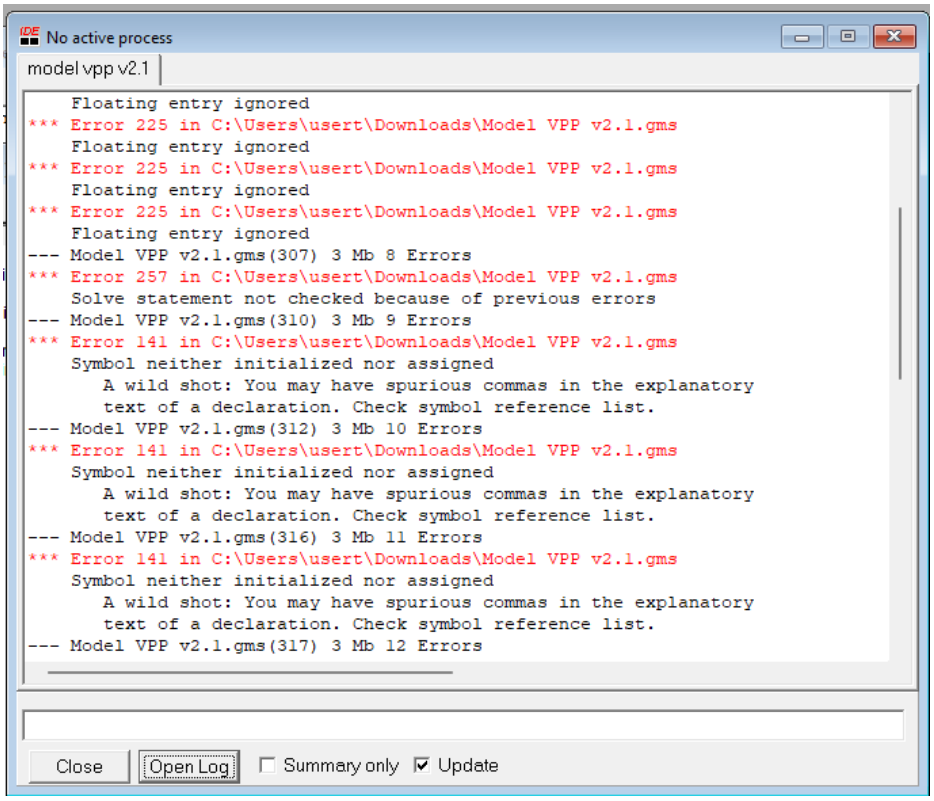


Σχήμα 5.2: Το περιβάλλον GAMS



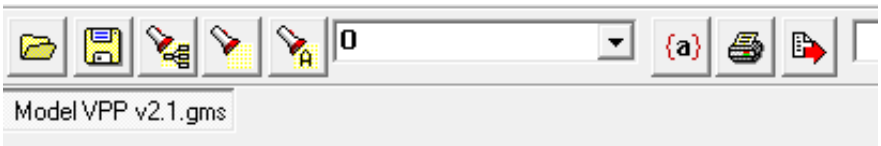
Σχήμα 5.3: Η δομή του αρχείου καταχώρισης GAMS

- Καρτέλα αποτελεσμάτων (Σχήμα 5.3): Σε αυτή την καρτέλα παρουσιάζονται όλες οι πληροφορίες που αφορούν την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Περιέχει όλα τα αποτελέσματα των εξισώσεων που έχουν επιλυθεί, τις τιμές όλων των μεταβλητών καθώς και τη βέλτιστη λύση της αντικειμενικής εξίσωσης.
- Process window, παράθυρο διεργασίας (Σχήμα 5.4): Σε αυτό το παράθυρο παρουσιάζεται η πρόοδος του προγράμματος κατά τη φάση της μεταγλώττισης και της επίλυσης του προβλήματος. Σε περίπτωση που υπάρχουν λάθη στον κώδικα που εμποδίζουν τη σωστή μεταγλώττιση και επίλυσή του, εμφανίζονται κωδικοί λάθους με κόκκινο χρώμα και έναν αριθμό. Ο κάθε αριθμός υποδηλώνει το είδος του προβλήματος προκειμένου να είναι πιο εύκολη η διόρθωση του λάθους. Ένα διπλό κλικ με το ποντίκι θα ανοίξει το αρχείο και θα τοποθετηθεί ο κέρσορας στο σημείο του κώδικα που βρίσκεται το σφάλμα.



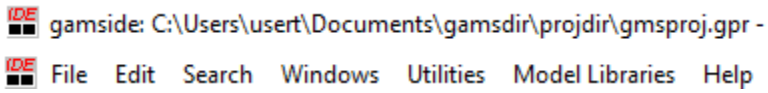
Σχήμα 5.4: Παράθυρο Log

- Γραμμή εργαλείων GAMS (Σχήμα 5.5): Στη γραμμή εργαλείων φαίνονται τα ονόματα των αρχείων που είναι ανοιγμένα και ο χρήστης μπορεί να τα επιλέξει και να πραγματοποιήσει διάφορες αλλαγές που επιθυμεί. Τα εικονίδια που υπάρχουν από αριστερά προς τα δεξιά είναι τα ακόλουθα: άνοιγμα αρχείου GAMS (σχήμα φακέλου), αποθήκευση αρχείου (σχήμα δίσκου), εύρεση σε πολλαπλά αρχεία, εύρεση σε ένα αρχείο, εύρεση επόμενου στοιχείου (σχήμα με τον φακό), πεδίο εισαγωγής της λέξης προς αναζήτηση, ταίριασμα παρενθέσεων (σχήμα με τα άγκιστρα), εκτύπωση αρχείου (εικονίδιο εκτυπωτή), εκτέλεση αρχείου (σχήμα με το κόκκινο βελάκι).



Σχήμα 5.5: Γραμμή εργαλείων

- Γραμμή εργασιών (Σχήμα 5.6): Στη γραμμή εργασιών υπάρχουν οι παρακάτω επιλογές:
    - File: Βασικές λειτουργίες όπως αποθήκευση, διαγραφή, μεταγλώττιση (compile), ανακατεύθυνση αρχείου
    - Edit: Υποστηρικτικές λειτουργίες επέμβασης επί του αρχείου
    - Search: Γίνεται αναζήτηση και εύρεση λέξεων μέσα στον κώδικα
    - Windows: Λειτουργίες επαναδιαμόρφωσης της επιφάνειας εργασίας
    - Utilities: Δυνατότητα εγγραφής (recordings) του αρχείου και επαναδιαμόρφωσης του editor
    - Model Libraries : Επιλογή κατάλληλης βιβλιοθήκης και δυνατότητα προβολής απλών παραδειγμάτων με στόχο την εξοικείωση του χρήστη με το λογισμικό
    - Help: Βοηθητικές πληροφορίες για διάφορες εντολές, δυνατότητες του GAMS και γενικά για το λογισμικό



Σχήμα 5.6: Γραμμή εργασιών

5.2.2 Εισαγωγή δεδομένων

Η είσοδος των δεδομένων μπορεί να γίνει απευθείας μέσω του κώδικα ή μέσω εξωτερικών πηγών. Η πρώτη περίπτωση κρίνεται ιδιαίτερα συμφέρουσα όταν τα δεδομένα προς εισαγωγή είναι μικρά σε όγκο, ωστόσο για πιο μεγάλες εφαρμογές δεν προτείνεται, καθώς η είσοδος των δεδομένων καταναλώνει πολύ χώρο κάνοντας τον κώδικα υπερβολικά μεγάλο και δυσανάγνωστο. Η εναλλακτική επιλογή για την εισαγωγή δεδομένων είναι με τη χρήση του προγράμματος Excel. Η σύνδεση μεταξύ GAMS και Excel είναι σχετικά απλή. Αρχικά, πρέπει να καθοριστούν τα δεδομένα τα οποία ο χρήστης επιθυμεί να εισάγει. Στη συνέχεια, αυτά θα πρέπει να αποτυπωθούν σε ένα αρχείο *.txt το οποίο θα αποτελέσει τον ενδιάμεσο κρίκο διασύνδεσης. Στο τελικό στάδιο του Excel θα πρέπει να αποτυπωθούν οι τιμές οι οποίες θα αποτελέσουν τα δεδομένα. Αρχικά δημιουργείται ένα GDX αρχείο το οποίο χρησιμοποιείται από το μοντέλο GAMS. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στο αρχείο Excel που περιλαμβάνει τα δεδομένα και στο αρχείο .txt. Μέσω του αρχείου txt γίνεται αντιστοίχιση μεταξύ των παραμέτρων και των φύλλων εργασίας του αρχείου Excel το οποίο περιέχει τις αντίστοιχες τιμές. Έτσι, με αυτόν τον τρόπο ολοκληρώνεται η είσοδος των δεδομένων.

```
$CALL GDXXRW INPUT_v13.xlsx @INPUTDATA_TEMPLATE_v13.txt


$GDXIN INPUTDATA_T.gdx
$LOAD  LN
$LOAD  Gdata
$LOAD  cost
$LOAD  Ldata
$LOAD  SOC
$GDXIN
```

Σχήμα 5.7: Εντολές εισόδου δεδομένων από Excel

```
o=.\INPUTDATA_T.gdx log=Input.log

Par = LN                rng=Line!A1     Rdim=2  Cdim=1
Par = Gdata             rng=Gene!A1     Rdim=1  Cdim=1
Par = cost              rng=costos!A1   Rdim=2  Cdim=1
Par = Ldata             rng=load1!A1    Rdim=2  Cdim=1
Par = SOC               rng=SOC!A1      Rdim=1  Cdim=1
```

Σχήμα 5.8: Αρχείο txt σύνδεσης GAMS με Excel

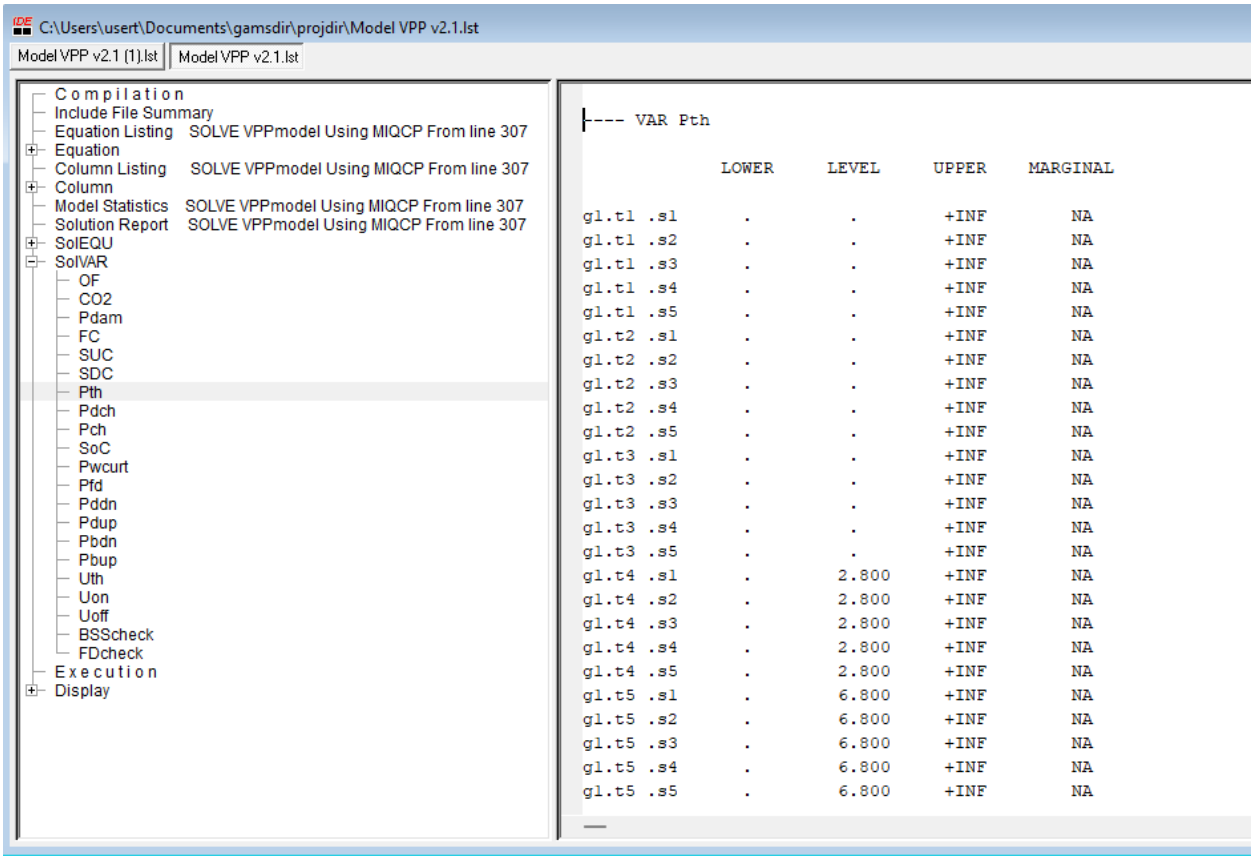
```
Table Pwl(t,s) 'Wind power output per scenario1'

       s1      s2      s3      s4      s5
t1     16.45   18.16   19.12   14.00   18.07
t2     28.53   21.92   26.59   21.31   21.94
t3     30.13   28.62   27.92   32.71   29.25
t4     30.33   25.75   26.95   31.56   28.09
t5     43.61   46.30   38.82   49.46   45.73
t6     39.66   47.66   47.70   48.96   43.99
t7     49.78   50.00   50.00   49.33   47.27
t8     50.00   50.00   49.48   50.00   50.00
t9     49.35   50.00   47.70   50.00   48.03
t10    47.66   50.00   50.00   50.00   48.60
t11    48.65   50.00   50.00   50.00   50.00
t12    43.05   50.00   50.00   47.54   49.29
t13    50.00   50.00   50.00   50.00   50.00
t14    50.00   50.00   50.00   50.00   49.84
t15    50.00   50.00   49.52   42.66   50.00
t16    50.00   50.00   50.00   50.00   50.00
t17    38.30   50.00   46.83   48.96   50.00
t18    48.26   50.00   42.33   50.00   46.61
t19    40.62   31.27   42.53   47.45   44.21
t20    31.53   37.21   30.02   40.14   33.37
t21    26.85   25.51   24.05   37.60   31.96
t22    19.48   25.79   19.71   20.93   22.66
t23    22.85   35.87   18.35   25.42   30.32
t24    50.00   38.94   39.08   48.60   24.73        ;
```

Σχήμα 5.9: Πίνακας εισαγωγής δεδομένων στο GAMS

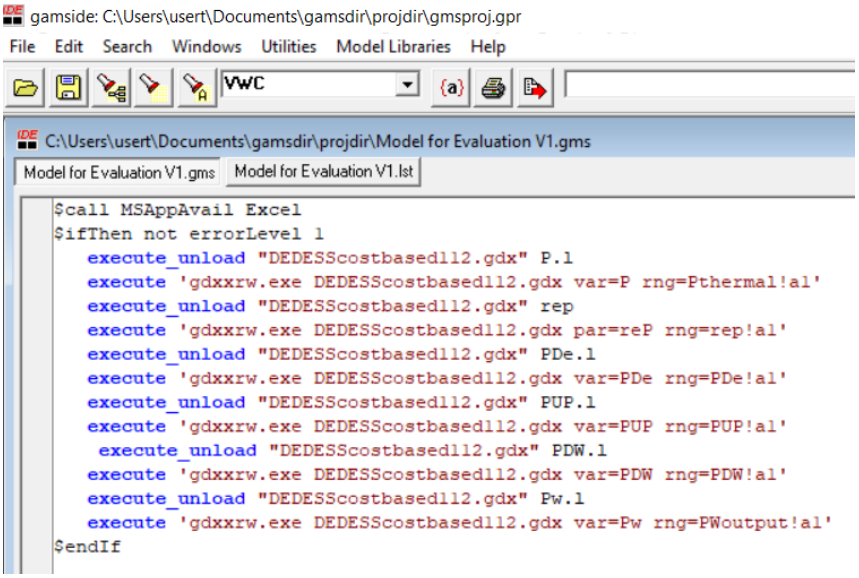
5.2.3 Εξαγωγή αποτελεσμάτων

Όμοια με την είσοδο δεδομένων, έτσι και με την έξοδο των αποτελεσμάτων, οι επιλογές είναι δύο. Η έξοδος των αποτελεσμάτων μπορεί να αποτυπωθεί και στο περιβάλλον GAMS (καρτέλα αποτελεσμάτων), αλλά και σε εξωτερική πηγή, στην προκειμένη περίπτωση το Excel. Στο Σχήμα 5.10 υπάρχει ένα παράδειγμα εξαγωγής αποτελεσμάτων εντός του λογισμικού. Το LEVEL υποδηλώνει την τιμή εξόδου, οι '.' το μηδέν, τα LOWER και UPPER τα άνω και κάτω όρια, το MARGINAL πόσο μια χαλάρωση των ορίων της μεταβλητής επηρεάζει την αντικειμενική συνάρτηση και το EPS πολύ μικρή τιμή.



Σχήμα 5.10: Αποτελέσματα GAMS

Στην έξοδο των αποτελεσμάτων σε Excel ακολουθείται η ίδια τακτική με την είσοδο των δεδομένων από Excel. Αρχικά, προηγείται η δημιουργία ενός αρχείου GDX, στη συνέχεια αποτυπώνονται στον κώδικα και στο αρχείο txt οι τιμές τις οποίες επιθυμεί να εξάγει και δημιουργείται αυτόματα ένα αρχείο Excel στο οποίο οι τιμές εξόδου αναγράφονται σε διαφορετικά φύλλα εργασίας. Αυτό διευκολύνει τη μετέπειτα επεξεργασία των δεδομένων με τη δημιουργία διαγραμμάτων και γραφικών παραστάσεων.



Σχήμα 5.11: Κώδικας για αποθήκευση αποτελεσμάτων σε αρχείο Excel

Εφόσον ολοκληρωθεί η συγγραφή του κώδικα, ο χρήστης θα πρέπει να αποθηκεύσει το πρόγραμμα με τη μορφή αρχείου filename.gms, στη συνέχεια να πατήσει το κουμπί Run και εφόσον δεν υπάρχει πρόβλημα με τη μεταγλώττιση του προγράμματος, θα εκτελεστεί το πρόγραμμα και θα εξαχθούν τα αποτελέσματα [55].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ
6

ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του λογισμικού που αναπτύχθηκε και περιεγράφηκε στο Κεφάλαιο 4. Οι προσομοιώσεις έγιναν με σκοπό να εξεταστεί ποια είναι η βέλτιστη καμπύλη προσφοράς στην Αγορά Επόμενης Ημέρας από το Διαχειριστή του VPP καθώς και η καλύτερη διαχείριση των πόρων του λαμβάνοντας υπόψιν αβεβαιότητες. Ακόμα, θα εξεταστεί κατά πόσο κάθε διαφορετικό στοιχείο της εγκατάστασης επηρεάζει την κερδοφορία για τον Διαχειριστή του VPP, και κατά συνέπεια αποτελεί τομέα με επενδυτικό ενδιαφέρον. Όλες οι εκτελέσεις έγιναν με τη βοήθεια Η/Υ με τα ακόλουθα τεχνικά χαρακτηριστικά:

- Επεξεργαστής AMD Ryzen 7 4700u 2,00GHz
- Μνήμη RAM: 16 GB
- Λειτουργικό Σύστημα: Microsoft Windows 11 Home

6.2 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Έστω εικονικός σταθμός ηλεκτροπαραγωγής (VPP) που αποτελείται από 4 ντιζελογεννήτριες με εγκατεστημένη ισχύς 15MW, ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με εγκατεστημένη χωρητικότητα 30 MWh και ένα αιολικό πάρκο με εγκατεστημένη ισχύς 50 MW. Ο χρονικός ορίζοντας που εξετάζεται η λειτουργία του VPP είναι 24 ώρες. Σε αυτό το διάστημα το VPP προμηθεύει φορτίο με φορτίο αιχμής 50 MW. Το φορτίο αυτό είναι ευέλικτο και υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης ισχύος ζήτησης κατά 20% προς τα πάνω ή προς τα κάτω κάθε ώρα, διατηρώντας όμως σταθερή τη συνολική κατανάλωση στο διάστημα των 24 ωρών. Παράλληλα, συμμετέχει στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Οφείλει λοιπόν να υποβάλει μια καμπύλη προφοράς για την ενέργεια που θα πουλήσει ή/και θα αγοράσει στην Αγορά Επόμενης Ημέρας για το ίδιο χρονικό διάστημα, 24 με 36 ώρες πριν λάβει χώρα η φυσική μεταφορά ενέργειας. Γι' αυτό το λόγο, ο προγραμματισμός λειτουργίας όλων των στοιχείων ενός εικονικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής παίζει πολύ σημαντικό ρόλο για την ικανοποίηση των υποχρεώσεών του αλλά και την τελική του κερδοφορία. Τεχνικοί και οικονομικοί περιορισμοί καθώς και αβεβαιότητες που αφορούν τα επίπεδα παραγωγής ενέργειας από τις μη κατανεμόμενες μονάδες ΑΠΕ, επηρεάζουν σημαντικά τον προγραμματισμό αυτό και τη λειτουργία του VPP στην αγορά ενέργειας. Σκοπός είναι να βρεθεί το βέλτιστο πλάνο λειτουργίας κάθε ελεγχόμενης ενεργειακής μονάδας του VPP, λαμβάνοντας υπόψιν τους τεχνικούς περιορισμούς της, την τιμή παραγωγής, αγοράς και πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και τις αβεβαιότητες που προκύπτουν από τη στοχαστική φύση στην παραγωγή ενέργειας των μη κατανεμόμενων μονάδων ΑΠΕ. Αντικειμενική συνάρτηση αποτελεί η μεγιστοποίηση του κέρδους όπως έχει περιγραφεί στην Ενότητα 4.3.1.

6.3 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Οι προσομοιώσεις και αναλύσεις ευαισθησίας που έγιναν παρουσιάζονται παρακάτω.

6.3.1 Μη κατανεμόμενες μονάδες ΑΠΕ

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4, στην παρούσα διπλωματική εργασία η πρόβλεψη της παραγωγής των μη ελεγχόμενων μονάδων βασίζεται σε σενάρια, το καθένα με πιθανότητα πραγματοποίησης $\pi_\omega \geq 0$ τέτοια ώστε $\sum_{\omega=1}^{N_\Omega} \pi_\omega = 1$. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 5 σενάρια παραγωγής αιολικής ενέργειας. Τα χαρακτηριστικά των σεναρίων που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1: Χαρακτηριστικά σεναρίων

Σενάρια	**Βάρος ή πιθανότητα**	**Ημερήσια παραγωγή ενέργειας (MWh)**
Σενάριο 1	11,2%	40
Σενάριο 2	20,3%	41
Σενάριο 3	12,1%	39,5
Σενάριο 4	7,5%	42
Σενάριο 5	48,9%	40

Στο βασικό σενάριο που εξετάστηκε, η εγκατεστημένη ισχύς των μη κατανεμόμενων μονάδων είναι 50MW. Στον Πίνακα 6.2 παρουσιάζεται η παραγωγή αιολικής ενέργειας σε MWh κάθε σεναρίου σε χρονικό διάστημα 24 ωρών.

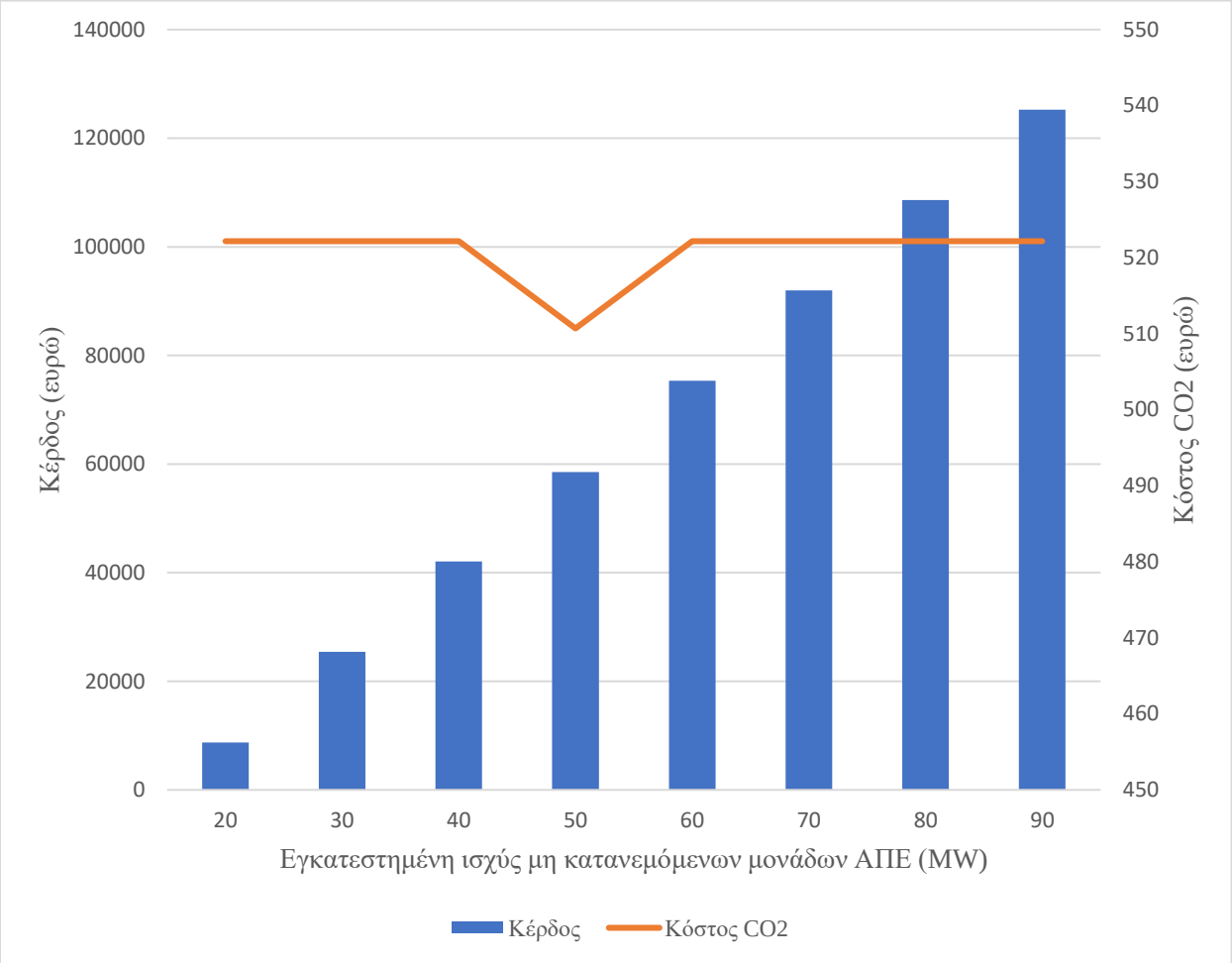
Πίνακας 6.2: Παραγωγή αιολικής ενέργειας σε MWh κάθε σεναρίου σε χρονικό διάστημα 24 ωρών

Ώρα της ημέρας	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4	Σενάριο 5
1	16.45	18.16	19.12	14.00	18.07
2	28.53	21.92	26.59	21.31	21.94
3	30.13	28.62	27.92	32.71	29.25
4	30.33	25.75	26.95	31.56	28.09
5	43.61	46.30	38.82	49.46	45.73
6	39.66	47.66	47.70	48.96	43.99
7	49.78	50.00	50.00	49.33	47.27
8	50.00	50.00	49.48	50.00	50.00
9	49.35	50.00	47.70	50.00	48.03
10	47.66	50.00	50.00	50.00	48.60
11	48.65	50.00	50.00	50.00	50.00
12	43.05	50.00	50.00	47.54	49.29
13	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00
14	50.00	50.00	50.00	50.00	49.84
15	50.00	50.00	49.52	42.66	50.00
16	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00
17	38.30	50.00	46.83	48.96	50.00
18	48.26	50.00	42.33	50.00	46.61
19	40.62	31.27	42.53	47.45	44.21
20	31.53	37.21	30.02	40.14	33.37
21	26.85	25.51	24.05	37.60	31.96
22	19.48	25.79	19.71	20.93	22.66
23	22.85	35.87	18.35	25.42	30.32
24	50.00	38.94	39.08	48.60	24.73

Στις προσομοιώσεις εξετάστηκε επίσης η λειτουργία και κερδοφορία του VPP όταν αυτό έχει εγκατεστημένη ισχύς 10MW, 20MW, 30MW, 40MW, 60MW, 70MW, 80MW και 90MW. Στον Πίνακα 6.3 και στα Σχήματα 6.1 έως 6.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για τις μη κατανεμόμενες μονάδες ΑΠΕ

Εγκατεστημένη ισχύς (MW)	**Κέρδος (ευρώ)**	**Κόστος CO_2 (ευρώ)**
20	8741,032	522,168
30	25409,86	522,168
40	42067,83	522,168
50	58509,56	510,694
60	75367,93	522,168
70	92005,81	522,168
80	108638,8	522,168
90	125270,1	522,168

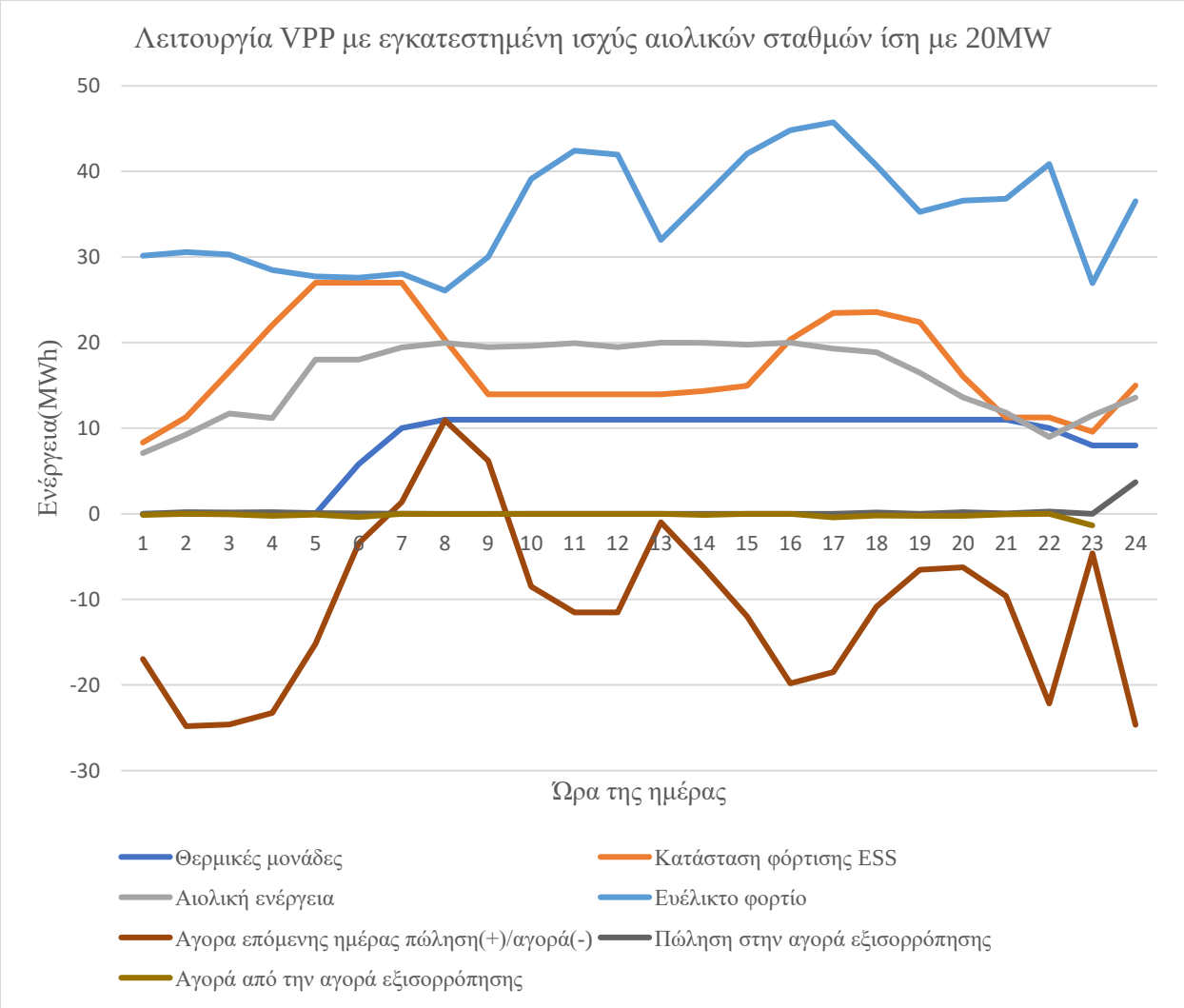


Σχήμα 6.1: Κέρδος VPP και κόστος CO_2

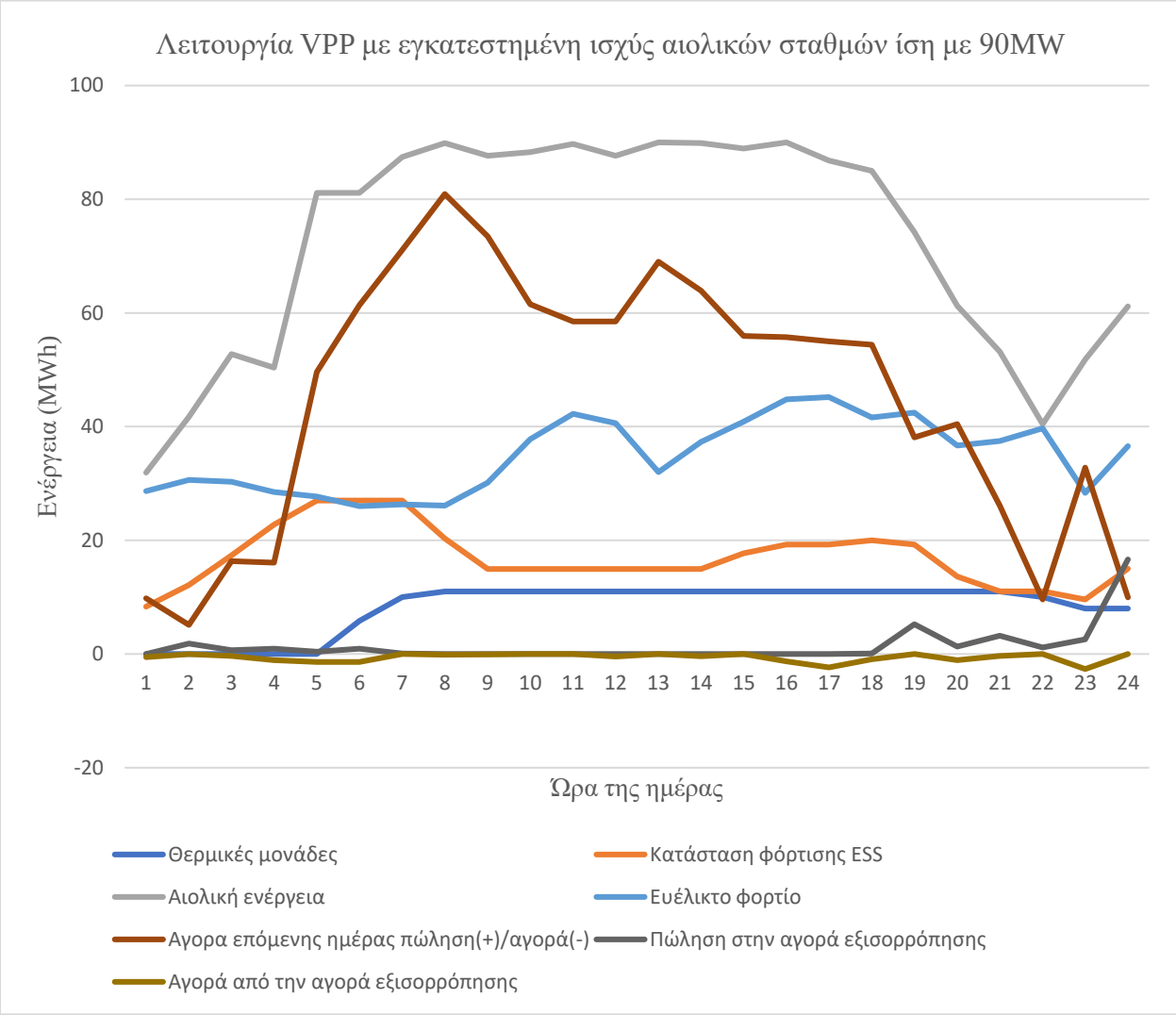
Στο Σχήμα 6.1 φαίνεται η αύξηση του κέρδους για τον Διαχειριστή του VPP με την αύξηση της εγκατεστημένης ισχύς των μη κατανεμόμενων μονάδων ΑΠΕ. Αντίθετα, όπως είναι αναμενόμενο, το κόστος CO_2, και άρα οι εκπομπές, παραμένουν σχεδόν αμετάβλητες αφού εξαρτώνται από τις θερμικές μονάδες. Για κάθε επέκταση της εγκατεστημένης ισχύς της τάξης των 10MW, το κέρδος αυξάνεται κατά περίπου 16600 ευρώ. Από τη γραμμική σχέση αύξησης της εγκατεστημένης ισχύς των μη κατανεμόμενων μονάδων ΑΠΕ και κέρδους φαίνεται ότι η επέκτασή τους αποτελεί επενδυτική ευκαιρία για τον Διαχειριστή του VPP. Τα μέσα που διαθέτει ο Διαχειριστής του VPP για την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας που προκύπτει από στοχαστική φύση στην παραγωγή ενέργειας των μη κατανεμόμενων μονάδων ΑΠΕ είναι αρκετά ώστε να μην εμποδίσουν την αύξηση της κερδοφορίας του.

Στα Σχήματα 6.2 και 6.3 παρουσιάζεται η λειτουργία του VPP στα σενάρια όπου η εγκατεστημένη ισχύς των μη κατανεμόμενων μονάδων ΑΠΕ είναι 20MW και 90MW, αντίστοιχα. Γίνεται εμφανές ότι στο τελευταίο σενάριο, η αυξημένη παραγωγή των μη κατανεμόμενων μονάδων ΑΠΕ, επιτρέπει στο VPP να πουλήσει μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας στην Αγορά Επόμενης Ημέρας. Για την ακρίβεια, το VPP δε χρειάζεται να αγοράσει καθόλου ενέργεια από την Αγορά Επόμενης Ημέρας προκειμένου να καλύψει τις υποχρεώσεις του. Αντίθετα, στο πρώτο σενάριο, το VPP όχι μόνο πουλάει λιγότερη ενέργεια στην αγορά ενέργειας αλλά αναγκάζεται σε ορισμένα χρονικά διαστήματα να αγοράσει ενέργεια, μειώνοντας

περαιτέρω την κερδοφορία του. Τα επίπεδα παραγωγής των θερμικών μονάδων παραμένουν σταθερά και στις δύο περιπτώσεις καθώς η λειτουργία τους εξαρτάται μόνο από το κόστος παραγωγής τους και την τιμή πώλησης στην Αγορά Επόμενης Ημέρας.



Σχήμα 6.2: Λειτουργία VPP με εγκατεστημένη ισχύς αιολικών σταθμών ίση με 20MW



Σχήμα 6.3: Λειτουργία VPP με εγκατεστημένη ισχύς αιολικών σταθμών ίση με 90MW

6.3.2 Θερμικές μονάδες παραγωγής ενέργειας

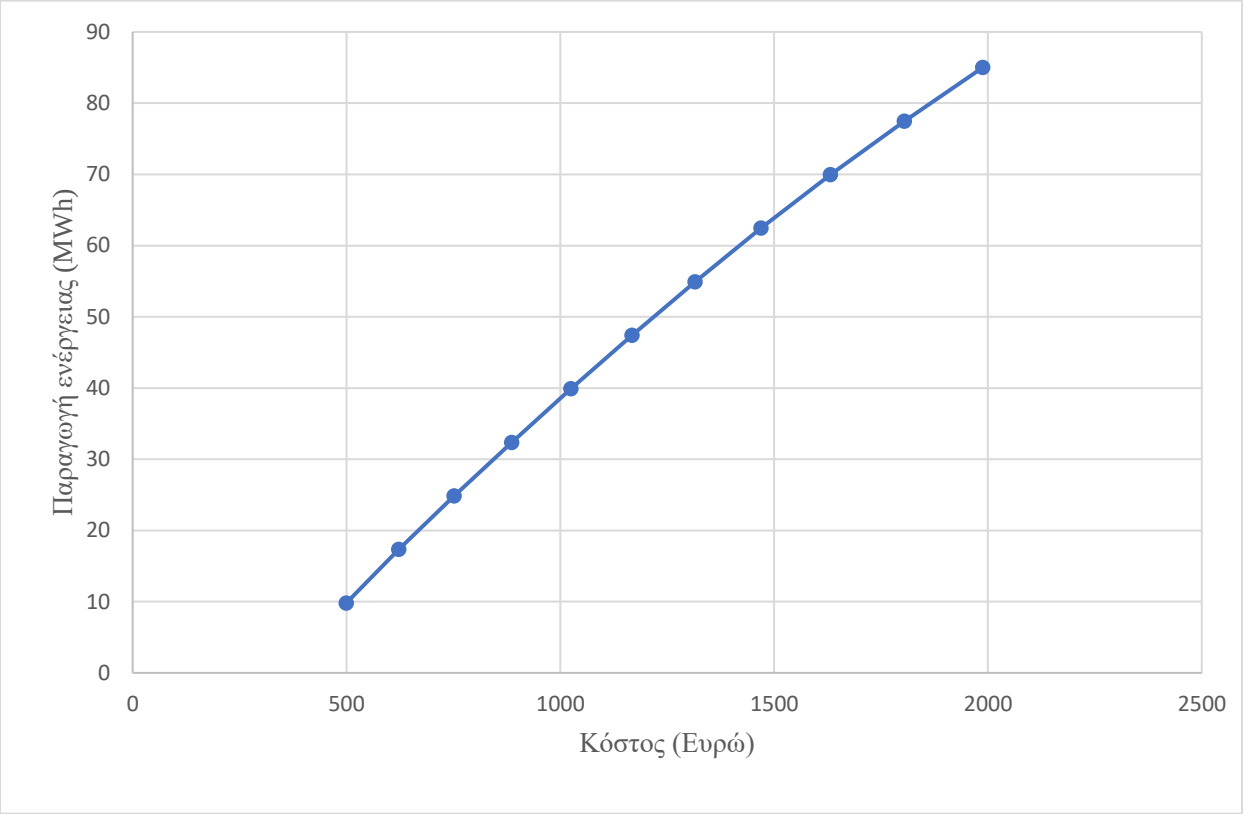
Προκειμένου να αντιμετωπιστεί η αβεβαιότητα στα επίπεδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ένα από τα βασικά μέσα που διαθέτει ο Διαχειριστής του VPP είναι οι θερμικές μονάδες που αποτελούν ελεγχόμενες μονάδες παραγωγής ενέργειας. Οι παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος παραγωγής είναι η απόδοση της γεννήτριας, το κόστος καυσίμου και οι απώλειες μετατροπής ενέργειας. Η πιο αποδοτική γεννήτρια μπορεί όμως να μη δίνει το ελάχιστο κόστος σε κάθε περίπτωση, καθώς μπορεί να βρίσκεται σε μέρος όπου το κόστος καυσίμου είναι υψηλό. Για αυτό μερικές φορές χρειάζεται να γίνει ανάλυση ευαισθησίας της λειτουργίας των γεννητριών. Για παράδειγμα, ίσως χρειαστεί να διερευνηθεί πώς θα άλλαζε το μοτίβο λειτουργίας των γεννητριών εάν αλλάξει η τιμή του φορτίου. Επίσης, η μέγιστη ικανότητα παραγωγής των γεννητριών επηρεάζει τη λειτουργία και την κερδοφορία του VPP.

Οι θερμικές μονάδες παραγωγής ενέργειας του VPP είναι 4 ντιζελογεννήτριες, με εγκατεστημένη ισχύς 15MW. Στα σενάρια που εξετάστηκαν όμως, έγιναν προσομοιώσεις με εύρος στην εγκατεστημένη ισχύς των συμβατικών μονάδων που κυμαίνεται από 15MW έως και 170MW. Στον Πίνακα 6.4 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των θερμικών μονάδων παραγωγής.

Πίνακας 6.4: Τεχνικά χαρακτηριστικά των θερμικών μονάδων παραγωγής[55]

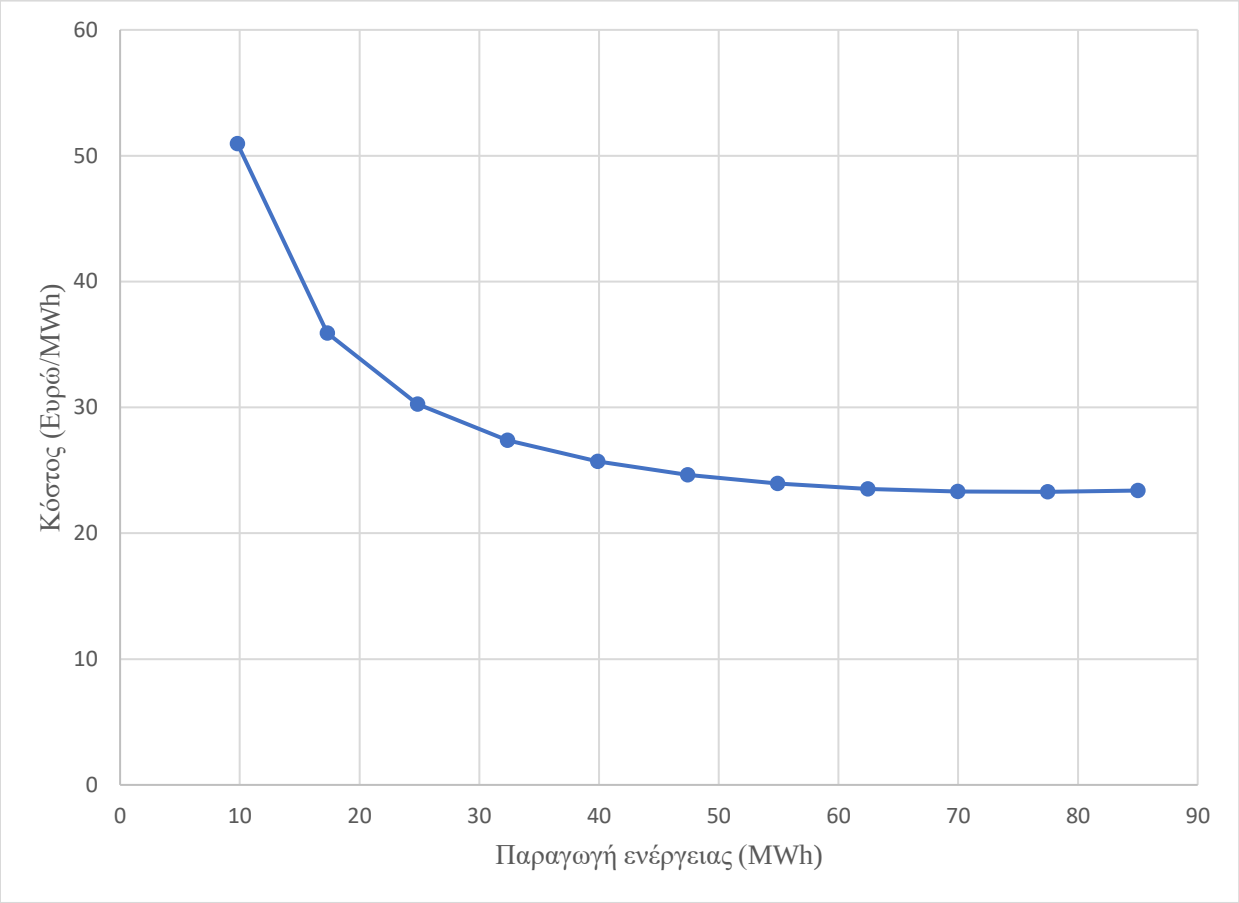
Παράμετροι	**Θερμική μονάδα**			
	G1	***G2***	***G3***	***G4***
a_g *(€/MW²)*	0,45	0,68	0,42	0,80
b_g *(€/MW)*	38,8	49,57	31,55	71,21
c_g *(€)*	99	123	100	180
d_g *(kg/MW²)*	1,2	2,3	1,1	1,1
e_g *(kg/MW)*	-5	-4,24	-2,15	-3,99
f_g *(kg)*	3	6,09	5,69	6,2
P_g^{min} *(MW)*	2,8	2,0	3,0	2,0
P_g^{max} *(MW)*	15	15	12	18
Csd_g	42,6	50,6	57,1	47,1
Csu_g	42,6	50,6	57,1	47,9
RU_g *(MW/h)*	4	6,4	3	10,4
RD_g *(MW/h)*	4	6,4	3	10,4
UT_g *(h)*	3	4	3	5
DT_g *(h)*	2	2	2	3
SD_g *(MW/h)*	9	13	7	24
SU_g *(MW/h)*	11	14	8	25
$u_{g,t=0}$	0	0	0	1
U_g^0 *(h)*	1	2	3	1
S_g^0 *(h)*	1	0	3	0

Στο Σχήμα 6.4 παρουσιάζεται η συνάρτηση κόστους των θερμικών μονάδων παραγωγής για εγκατεστημένη ισχύς έως και 85MW.



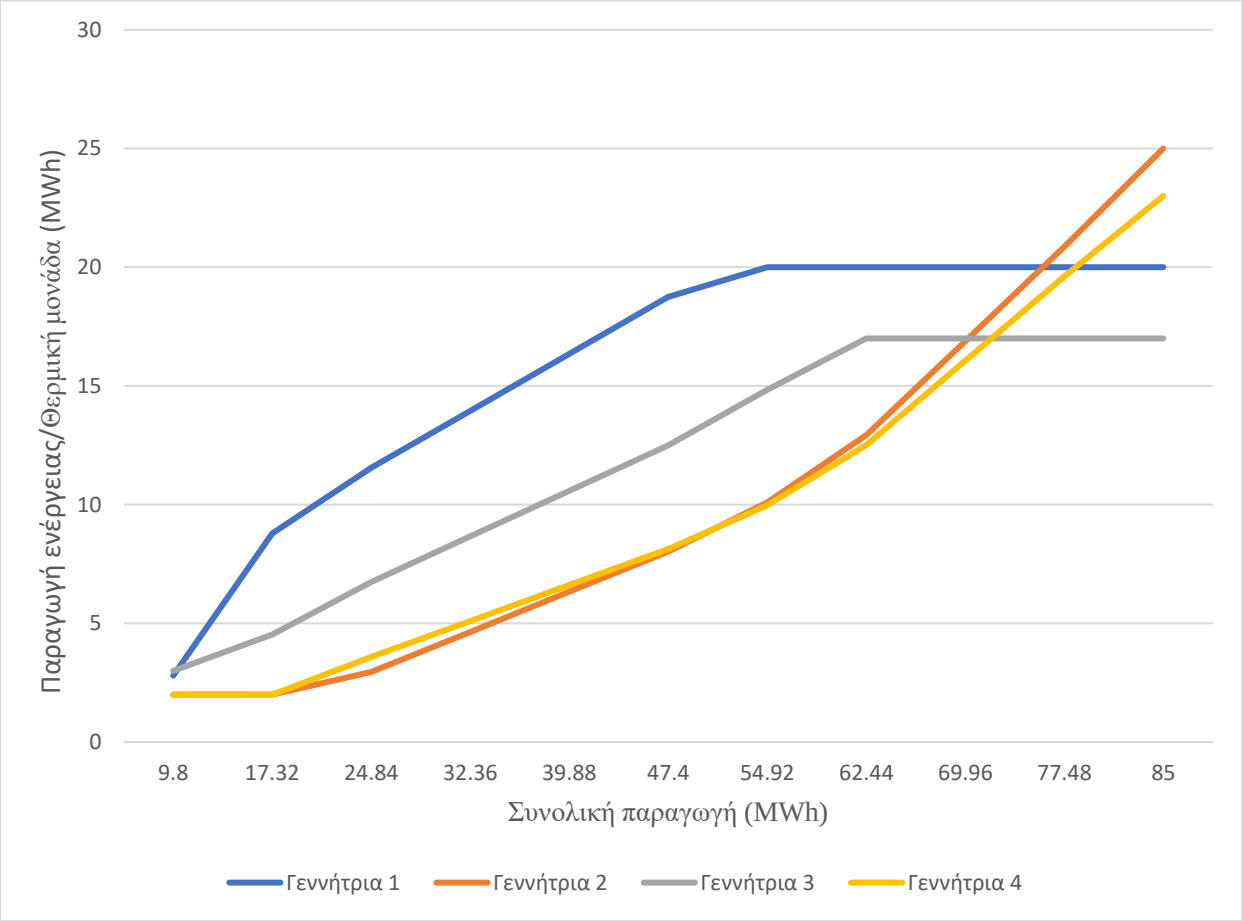
Σχήμα 6.4: Κόστος παραγωγής ενέργειας θερμικών μονάδων

Από το Σχήμα 6.4 συμπεραίνεται ότι το κόστος παραγωγής ενέργειας αυξάνεται με την αύξηση της παραγωγής αλλά όχι με γραμμικό τρόπο. Αυτό σημαίνει ότι η αποδοτικότητα των θερμικών μονάδων είναι διαφορετική για τα διάφορα επίπεδα παραγωγής τους. Επίσης, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4, οι θερμικές μονάδες εκτός από μέγιστο όριο παραγωγής, έχουν και ελάχιστο όριο παραγωγής. Συνεπώς, έχουν ελάχιστο κόστος λειτουργίας που δεν είναι μηδενικό.



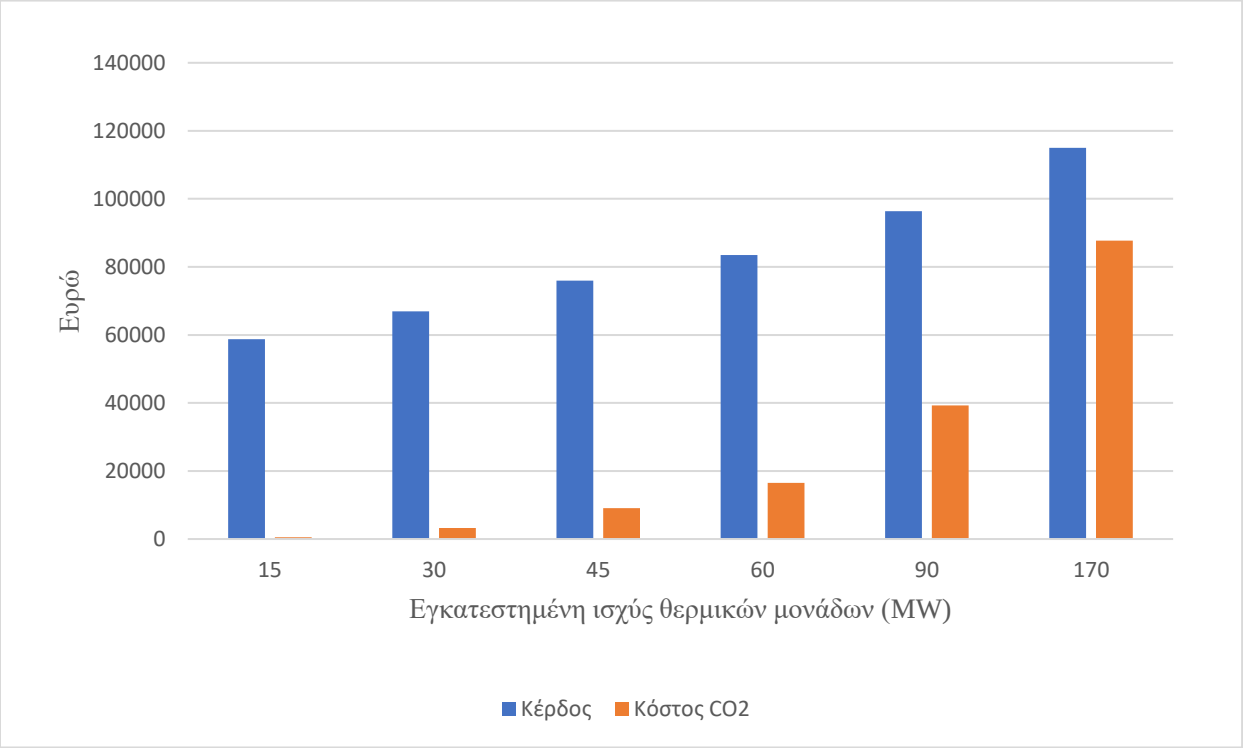
Σχήμα 6.5: Κόστος παραγωγής ενέργειας θερμικών μονάδων σε ευρώ/MWh

Στο Σχήμα 6.5 παρουσιάζεται το κόστος παραγωγής ενέργειας των θερμικών μονάδων σε ευρώ/MWh για κάθε επίπεδο παραγωγής τους, όταν η εγκατεστημένη ισχύς τους είναι 85MW. Το κόστος μειώνεται, όσο αυξάνεται η συνολική παραγωγή των γεννητριών. Η μείωση τους κόστους παραγωγής είναι πολύ μεγαλύτερη κατά την αρχική αύξηση της παραγωγής ενέργειας από τις γεννήτριες. Από τις 40MWh και έπειτα, η μείωση στο κόστος παραγωγής περιορίζεται αρκετά, ενώ γύρω στις 70MWh και μέχρι τις 85MWh, που είναι και η μέγιστη ικανότητα παραγωγής τους στα σενάρια που εξετάστηκαν, παραμένει σχεδόν σταθερή. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι η βέλτιστη αποδοτικότητα των θερμικών μονάδων επιτυγχάνεται όταν αυτές λειτουργούν κοντά στο μέγιστο της ικανότητας παραγωγής τους.



Σχήμα 6.6: Παραγωγή ενέργειας ανά θερμική μονάδα

Από το Σχήμα 6.6, στο οποίο παρουσιάζεται η λειτουργία κάθε γεννήτριας ξεχωριστά, φαίνεται ότι δεν χρησιμοποιούνται με τον ίδιο τρόπο, καθώς τα χαρακτηριστικά τους, και επομένως τα κόστη λειτουργίας τους και τα βέλτιστα σημεία αποδοτικότητάς τους διαφέρουν. Η γεννήτρια 1 φτάνει στο μέγιστο της ικανότητας παραγωγής της πρώτη, ακολουθούμενη από την γεννήτρια 3 και στη συνέχεια τη 2 και τη 4. Το μοτίβο λειτουργίας των γεννητριών 2 και 4 είναι πανομοιότυπο, που υποδεικνύει ότι έχουν παρόμοια συνάρτηση κόστους.



Σχήμα 6.7: Κέρδος VPP και κόστος CO_2

Η κερδοφορία για τον Διαχειριστή του VPP αυξάνεται όσο αυξάνεται και η εγκατεστημένη ισχύς των θερμικών μονάδων. Παράλληλα αυξάνεται και το κόστος του CO_2, άρα και οι εκπομπές CO_2 όπως είναι αναμενόμενο. Οι αυξήσεις αυτές δεν είναι γραμμικές. Για κάθε διπλασιασμό της εγκατεστημένης ισχύς των θερμικών μονάδων, το κέρδος αυξάνεται από 14% έως και 20%, ενώ το κόστος του CO_2 υπερδιπλασιάζεται.

6.3.3 Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (ESS)

Παρακάτω θα εξεταστεί η χρήση ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας για την αύξηση της κερδοφορίας του VPP και την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας που προκύπτει από τη στοχαστική φύση στην παραγωγή ενέργειας των μη κατανεμόμενων μονάδων ΑΠΕ. Στο βασικό σενάριο που εξετάζεται, το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας αποτελείται από συσσωρευτές με εγκατεστημένη χωρητικότητα 30 MWh και ικανότητα παροχής ισχύος 6 MW. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.5.

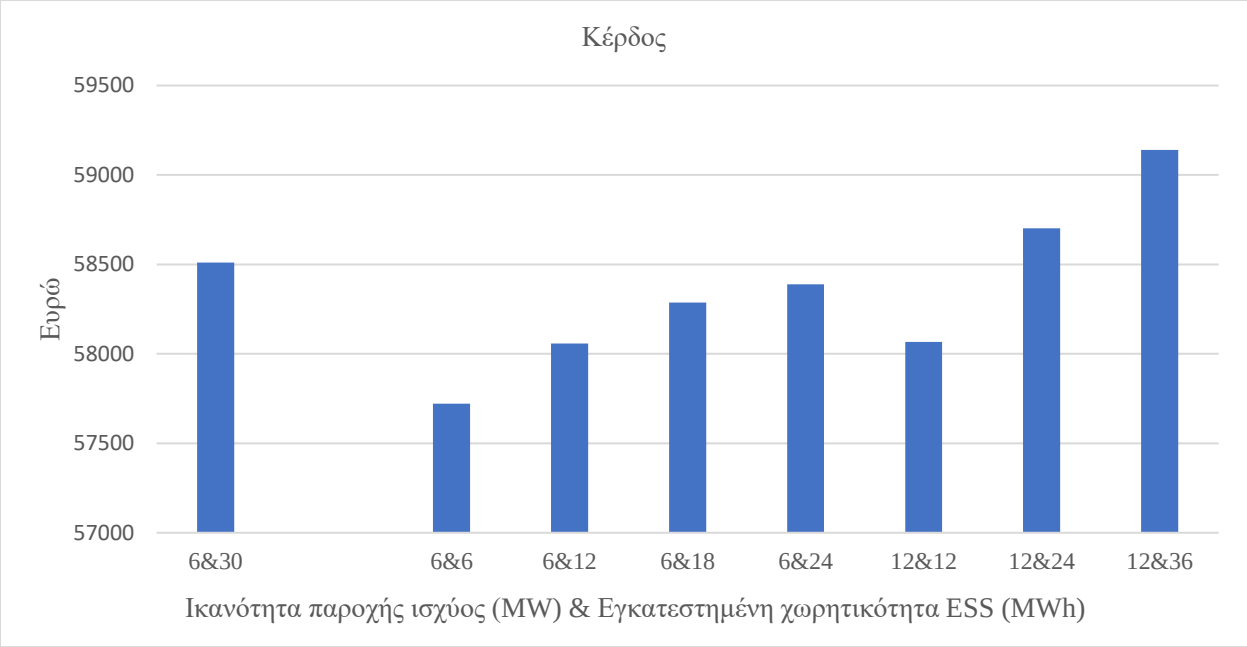
Πίνακας 6.5: Τεχνικά χαρακτηριστικά συστήματος αποθήκευσης ενέργειας

Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας	
Παράμετρος	**Τιμή**
E_{bss}^{Cap}	30 MWh
P_{max}^{ch}	6 MW
P_{min}^{ch}	0
P_{min}^{dch}	6 MW
P_{min}^{dch}	0
SOC_{max}	27 MWh (90% · E_{bss}^{Cap})
SOC_{min}	3 MWh (10% · E_{bss}^{Cap})
η_c	90%
η_d	90%

Προκειμένου να γίνει η ανάλυση ευαισθησίας για την αξιολόγηση του ESS στην κερδοφορία του VPP, εξετάστηκαν τα σενάρια που φαίνονται στην πρώτη στήλη του Πίνακα 6.6 και προέκυψαν τα αποτελέσματα που φαίνονται στις υπόλοιπες δύο στήλες του Πίνακα 6.6.

Πίνακας 6.6: Αποτελέσματα προσομοιώσεων λειτουργίας του VPP

Σενάρια	**Κέρδος (ευρώ)**	**Κόστος CO_2 (ευρώ)**
Εγκατεστημένη χωρητικότητα: 30 MWh Ικανότητα παροχής ισχύος: 6MW	58509,56	510,694
Εγκατεστημένη χωρητικότητα: 6 MWh Ικανότητα παροχής ισχύος: 6 MW	57721,96	508,985
Εγκατεστημένη χωρητικότητα: 12 MWh Ικανότητα παροχής ισχύος: 6 MW	58057,32	508,636
Εγκατεστημένη χωρητικότητα: 18 MWh Ικανότητα παροχής ισχύος: 6 MW	58286,65	508,975
Εγκατεστημένη χωρητικότητα: 24 MWh Ικανότητα παροχής ισχύος: 6 MW	58389,46	509,387
Εγκατεστημένη χωρητικότητα: 12 MWh Ικανότητα παροχής ισχύος: 12 MW	58067,35	508,064
Εγκατεστημένη χωρητικότητα: 24 MWh Ικανότητα παροχής ισχύος: 12 MW	58701,64	507,717
Εγκατεστημένη χωρητικότητα: 36 MWh Ικανότητα παροχής ισχύος: 12 MW	59140,34	508,151



Σχήμα 6.8: Κέρδος VPP

Τόσο η αύξηση της ικανότητας παροχής ισχύος, όσο και η αύξηση της εγκατεστημένης χωρητικότητας του ESS έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της κερδοφορίας του VPP. Συγκεκριμένα, αυτή η αύξηση είναι 1419 ευρώ ημερησίως όταν γίνεται σύγκριση του σεναρίου με τη μικρότερη ικανότητα παροχής ισχύος (6 MW) και εγκατεστημένη χωρητικότητα (6 MWh) και εκείνου με τη μεγαλύτερη (12 MW και 36 MWh αντίστοιχα). Αυτό αποτελεί αύξηση περίπου 2,5% για διπλασιασμό της ικανότητας παροχής ισχύος και εξαπλασιασμό της εγκατεστημένης χωρητικότητας. Συγκριτικά με το βασικό σενάριο, το κέρδος αυξάνεται κατά 1,07% στην περίπτωση του σεναρίου με την υψηλότερη ικανότητα παροχής ισχύος και εγκατεστημένης χωρητικότητας, ενώ μειώνεται κατά 1,34% σε σχέση με εκείνο με τη χαμηλότερη. Τόσο η ικανότητα παροχής ισχύος, όσο και η εγκατεστημένη χωρητικότητα του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας συμβάλλουν στη μεταβολή της κερδοφορίας του VPP. Η περιορισμένη αύξηση του κέρδους όμως σημαίνει ότι η επέκταση του ESS αποτελεί επενδυτική ευκαιρία μόνο αν συνυπολογιστούν κι άλλοι παράγοντες όπως το κόστος απόκτησής του.

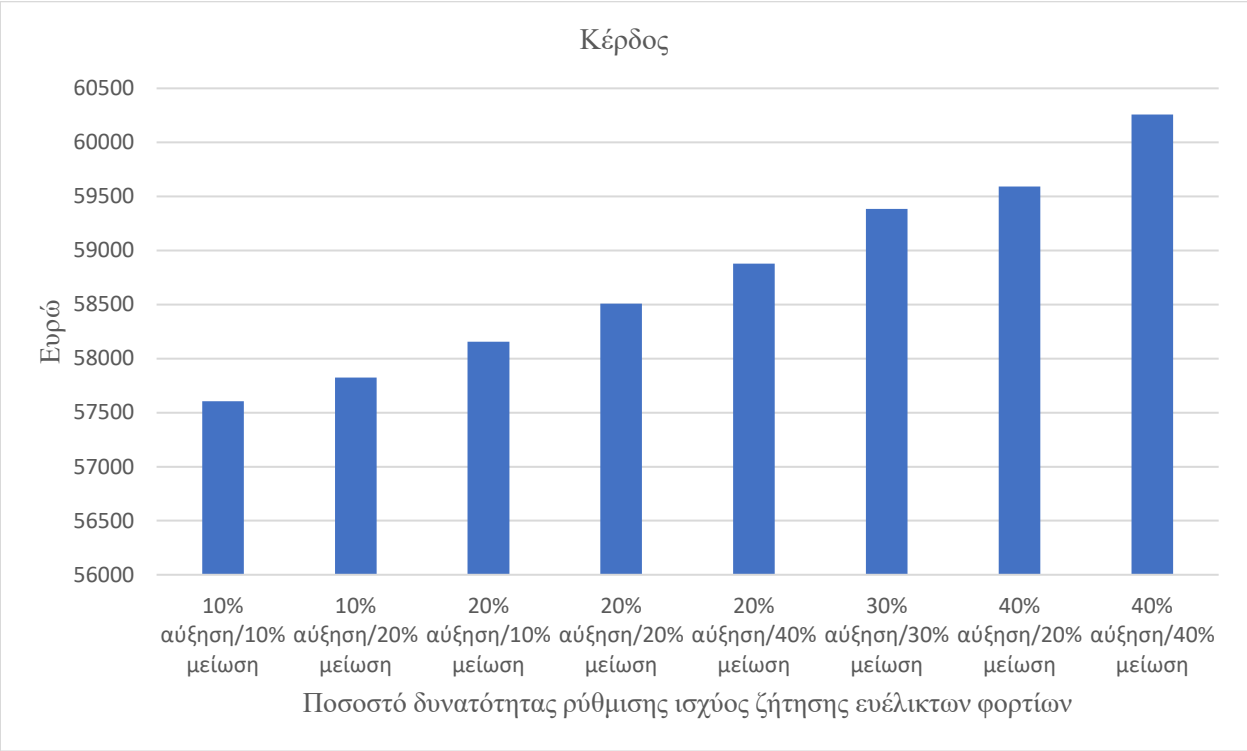
6.3.4 Ευέλικτα φορτία

Άλλη μια τεχνολογία που συμβάλει στην κερδοφορία του VPP είναι εκείνη των ευέλικτων φορτίων. Στο βασικό σενάριο που εξετάζεται, ο Διαχειριστής του VPP έχει τη δυνατότητα ρύθμισης ισχύος ζήτησης κατά 20% (αύξηση και μείωση), με δύο περιορισμούς. Πρώτον, η συνολική κατανάλωση πρέπει να παραμείνει σταθερή σε διάστημα 24 ωρών. Και δεύτερον, ως κίνητρο για τους καταναλωτές, στα χρονικά διαστήματα όπου ο Διαχειριστής ρυθμίζει τη ζήτηση στέλνοντας εντολή μείωσης, η τιμή πώλησης της ενέργειας είναι μειωμένη κατά 10%. Για την ανάλυση ευαισθησίας εξετάστηκαν τα σενάρια που φαίνονται στην πρώτη

στήλη του Πίνακα 6.7 και προέκυψαν τα αποτελέσματα που φαίνονται στις υπόλοιπες δύο στήλες του Πίνακα 6.7.

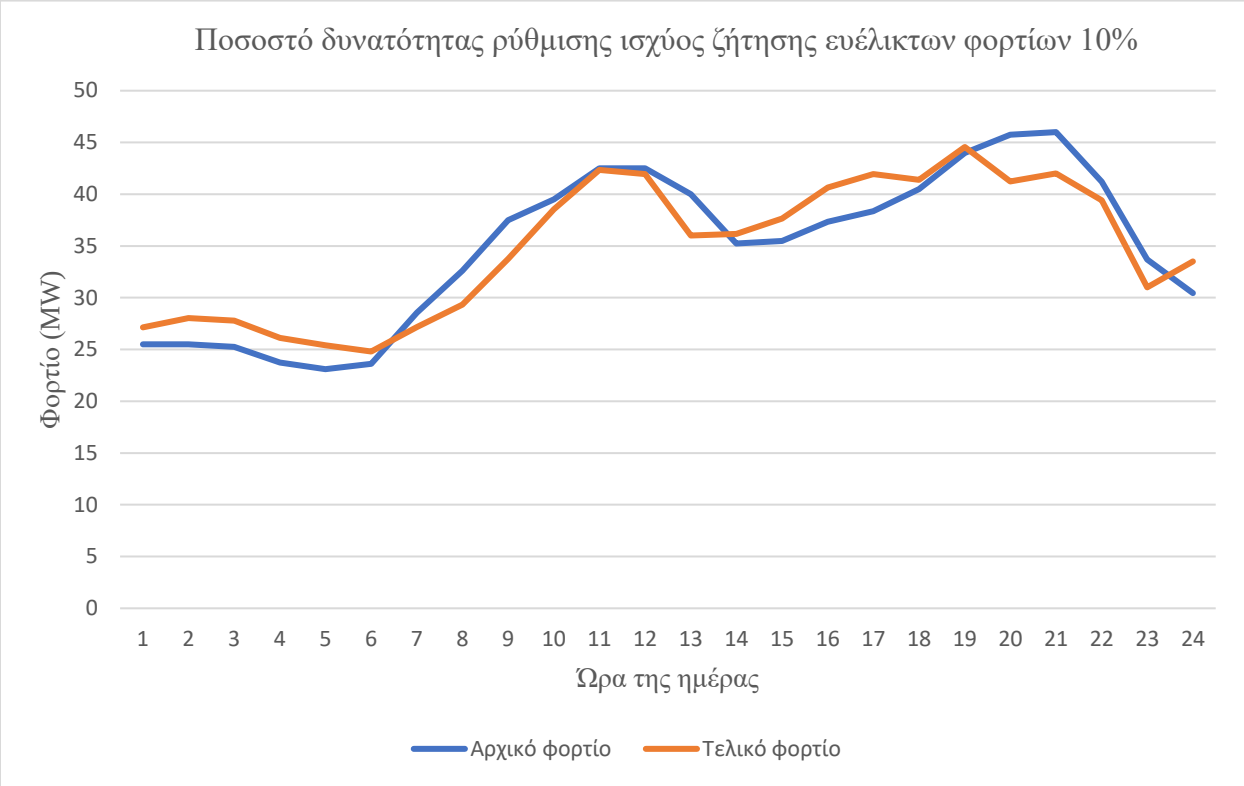
Πίνακας 6.7: Αποτελέσματα προσομοιώσεων λειτουργείας VPP

Σενάρια	**Κέρδος(Ευρώ)**	**Κόστος CO_2 (ευρώ)**
Ποσοστό δυνατότητας ρύθμισης ισχύος ζήτησης ευέλικτων φορτίων Αύξηση: 20% Μείωση: 20%	58509,56	512,975
Ποσοστό δυνατότητας ρύθμισης ισχύος ζήτησης ευέλικτων φορτίων Αύξηση: 10% Μείωση: 10%	57604,8	510,694
Ποσοστό δυνατότητας ρύθμισης ισχύος ζήτησης ευέλικτων φορτίων Αύξηση: 30% Μείωση: 30%	59384,37	510,98
Ποσοστό δυνατότητας ρύθμισης ισχύος ζήτησης ευέλικτων φορτίων Αύξηση: 40% Μείωση: 40%	60257,71	510,98
Ποσοστό δυνατότητας ρύθμισης ισχύος ζήτησης ευέλικτων φορτίων Αύξηση: 10% Μείωση: 20%	57823,611	510,827
Ποσοστό δυνατότητας ρύθμισης ισχύος ζήτησης ευέλικτων φορτίων Αύξηση: 20% Μείωση: 40%	58878,29	509,445
Ποσοστό δυνατότητας ρύθμισης ισχύος ζήτησης ευέλικτων φορτίων Αύξηση: 20% Μείωση: 10%	58155,77	511,476
Ποσοστό δυνατότητας ρύθμισης ισχύος ζήτησης ευέλικτων φορτίων Αύξηση: 40% Μείωση: 10%	59591,21	512,224

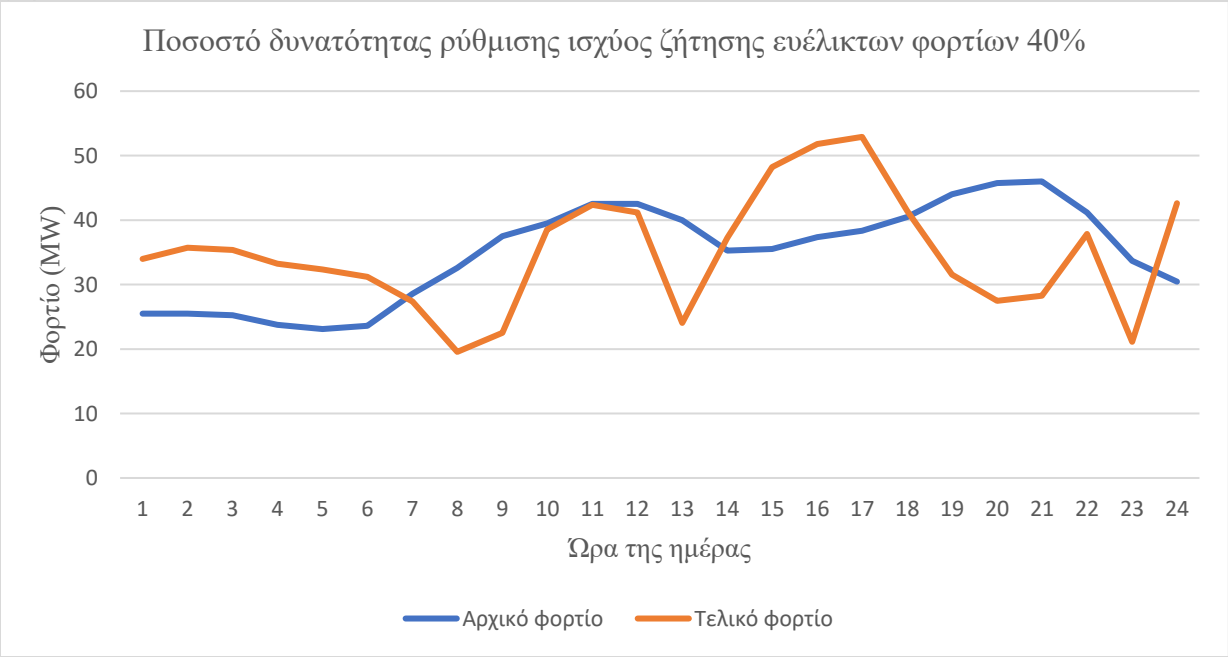


Σχήμα 6.9: Κέρδος VPP

Στα σενάρια που εξετάστηκαν, εκείνο με το μικρότερο ποσοστό δυνατότητας ρύθμισης ισχύος ζήτησης ευέλικτων φορτίων ήταν 10%, ενώ με το μεγαλύτερο, 40%. Στο σενάριο όπου το ποσοστό δυνατότητας ρύθμισης ισχύος ζήτησης ευέλικτων φορτίων περιορίζεται στο 10%, το κέρδος του VPP είναι 57604 ευρώ. Στο σενάριο όπου το ποσοστό δυνατότητας ρύθμισης ισχύος ζήτησης ευέλικτων φορτίων είναι 40%, το κέρδος είναι 60257 ευρώ. Αυτό αποτελεί αύξηση 4,6% στην κερδοφορία του VPP. Συγκριτικά με το βασικό σενάριο όπου το κέρδος ήταν 58509 ευρώ, η αύξηση στην κερδοφορία σε σχέση με το πρώτο σενάριο είναι 1,57% ενώ η μείωση σε σχέση με το δεύτερο σενάριο είναι 2,9%. Το κόστος του CO_2, όπως είναι αναμενόμενο, ουσιαστικά παραμένει αμετάβλητο. Είναι εμφανές ότι η δυνατότητα ρύθμισης ισχύος ζήτησης ευέλικτων φορτίων από τον Διαχειριστή του VPP αυξάνει την κερδοφορία. Το τελικό φορτίο όταν η δυνατότητα ρύθμισης είναι 10% και 40% παρουσιάζεται στα Σχήματα 6.10 και 6.11, αντίστοιχα.



Σχήμα 6.10: Αρχικό και τελικό φορτίο για ποσοστό δυνατότητας ρύθμισης ισχύος ζήτησης ευέλικτων φορτίων 10%



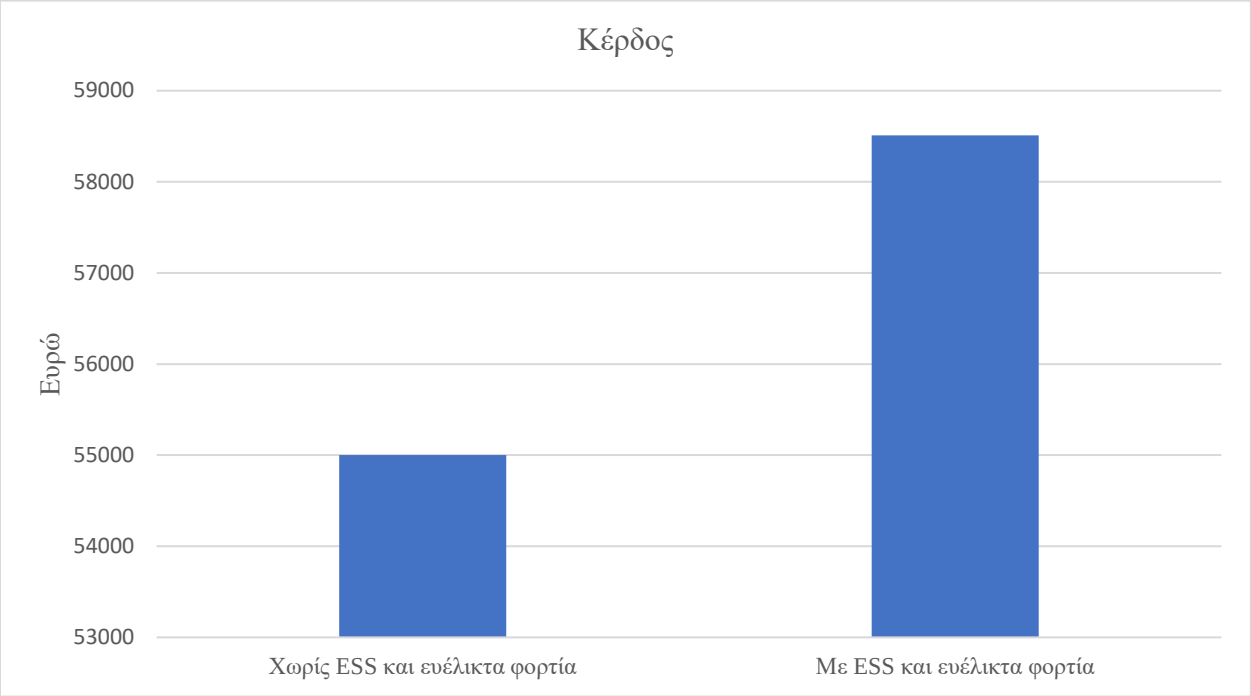
Σχήμα 6.11: Αρχικό και τελικό φορτίο για ποσοστό δυνατότητας ρύθμισης ισχύος ζήτησης ευέλικτων φορτίων 40%

Πίνακας 6.8: Τιμή ενέργειας στην Αγορά Επόμενης Ημέρας

Ώρα της ημέρας	Τιμή (ευρώ/MWh)
1	82,01
2	42,45
3	41,07
4	40,93
5	41,87
6	79,68
7	93,26
8	106,56
9	108,45
10	95,91
11	95,05
12	94,58
13	100,02
14	86,94
15	85,14
16	83,56
17	84,83
18	90,73
19	101,78
20	113,59
21	111,44
22	95,05
23	104,59
24	55,06

Η έντονη διακύμανση του τελικού φορτίου στο σενάριο με 40% μέγιστη δυνατότητα μεταβολής του φορτίου υποδεικνύει ότι η ευελιξία αυτή αξιοποιείται από τον Διαχειριστή του VPP προκειμένου να αυξηθεί η κερδοφορία. Εάν εξεταστεί και η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας στην Αγορά Επόμενης Ημέρας, που παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.8, φαίνεται ότι τα χρονικά διαστήματα όπου η ενέργεια είναι φθηνότερη, το φορτίο αυξάνεται, ενώ συμβαίνει το αντίθετο για τα χρονικά διαστήματα όπου η τιμή της ενέργειας είναι υψηλότερη. Αυτή είναι και η αναμενόμενη λειτουργία των ευέλικτων φορτίων.

Ακόμα, εξετάστηκε και το σενάριο όπου το VPP λειτουργεί χωρίς σύστημα αποθήκευσης ενέργειας και χωρίς τη δυνατότητα ρύθμισης της ισχύος ζήτησης του φορτίου.



Σχήμα 6.12: Κέρδος VPP

Σε αυτό το σενάριο, το κέρδος μειώθηκε στα 55000 ευρώ, ή αλλιώς μειώθηκε κατά 6% συγκριτικά με το βασικό σενάριο. Το συμπέρασμα από αυτή τη σύγκριση είναι ότι η αφαίρεση της δυνατότητας ρύθμισης της ισχύος ζήτησης των ευέλικτων φορτίων και του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, δε δημιουργεί πρόβλημα στη λειτουργικότητα του VPP. Μειώνει όμως την κερδοφορία του, οπότε η προσθήκη τους αποτελεί επιλογή με επενδυτικό ενδιαφέρον.

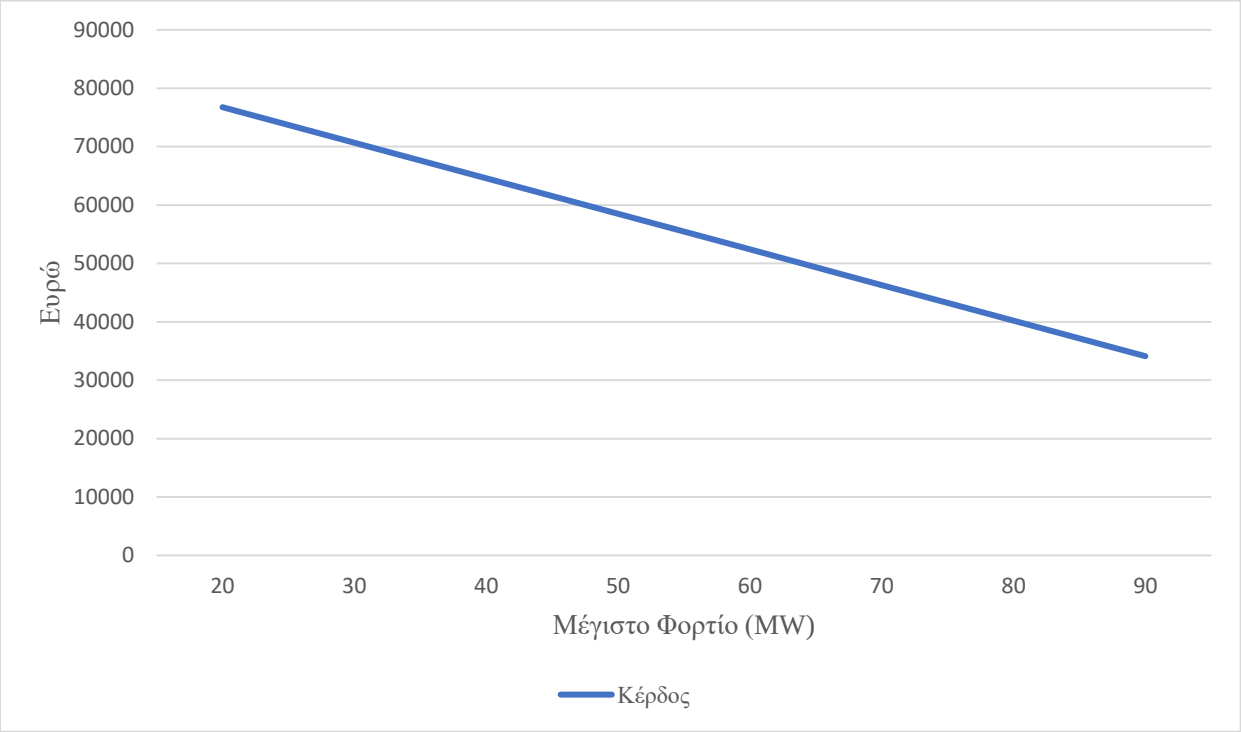
6.3.5 Φορτίο

Στο βασικό σενάριο που εξετάζεται, το φορτίο αιχμής που πρέπει να καλύψει το VPP είναι 50MW. Στον Πίνακα 6.9 παρουσιάζεται το φορτίο.

Πίνακας 6.9: Φορτίο εκφρασμένο σε MW και κανονικοποιημένο ως προς το μέγιστο φορτίο

Ώρα της ημέρας	**Φορτίο (MW)**	**Φορτίο (Κανονικοποιημένο ως προς το μέγιστο φορτίο)**
1	25,5	0,51
2	25,5	0,51
3	25,25	0,505
4	23,75	0,475
5	23,1	0,462
6	23,6	0,472
7	28,55	0,571
8	32,6	0,652
9	37,5	0,75
10	39,5	0,79
11	42,5	0,85
12	42,5	0,85
13	40	0,8
14	35,25	0,705
15	35,5	0,71
16	37,35	0,747
17	38,35	0,767
18	40,5	0,81
19	44	0,88
20	45,75	0,915
21	46	0,92
22	41,2	0,824
23	33,7	0,674
24	30,45	0,609

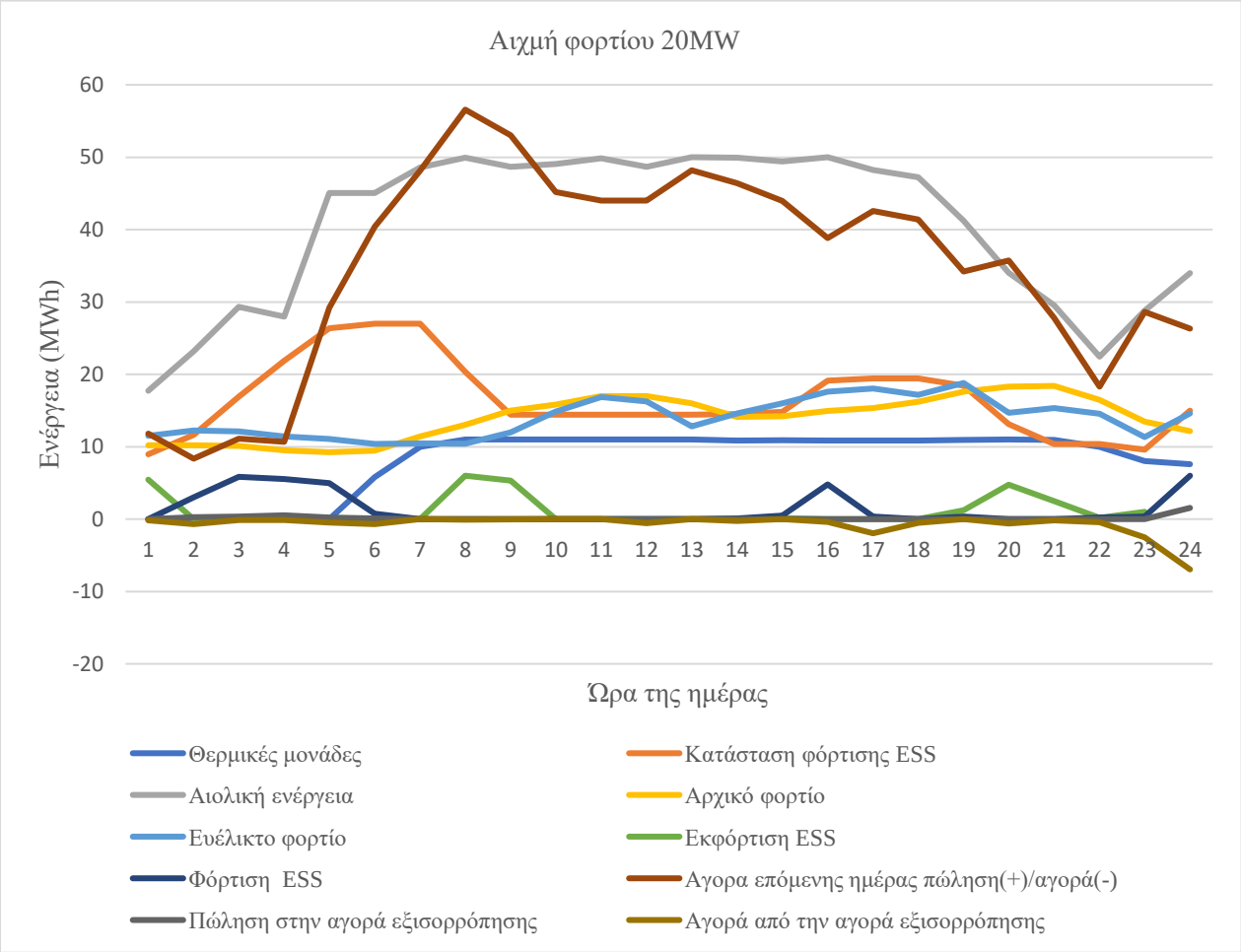
Προκειμένου να γίνει η ανάλυση ευαισθησίας, εξετάστηκαν σενάρια με αιχμή φορτίου 20MW, 30MW, 40MW, 60MW, 70MW, 80MW και 90MW.



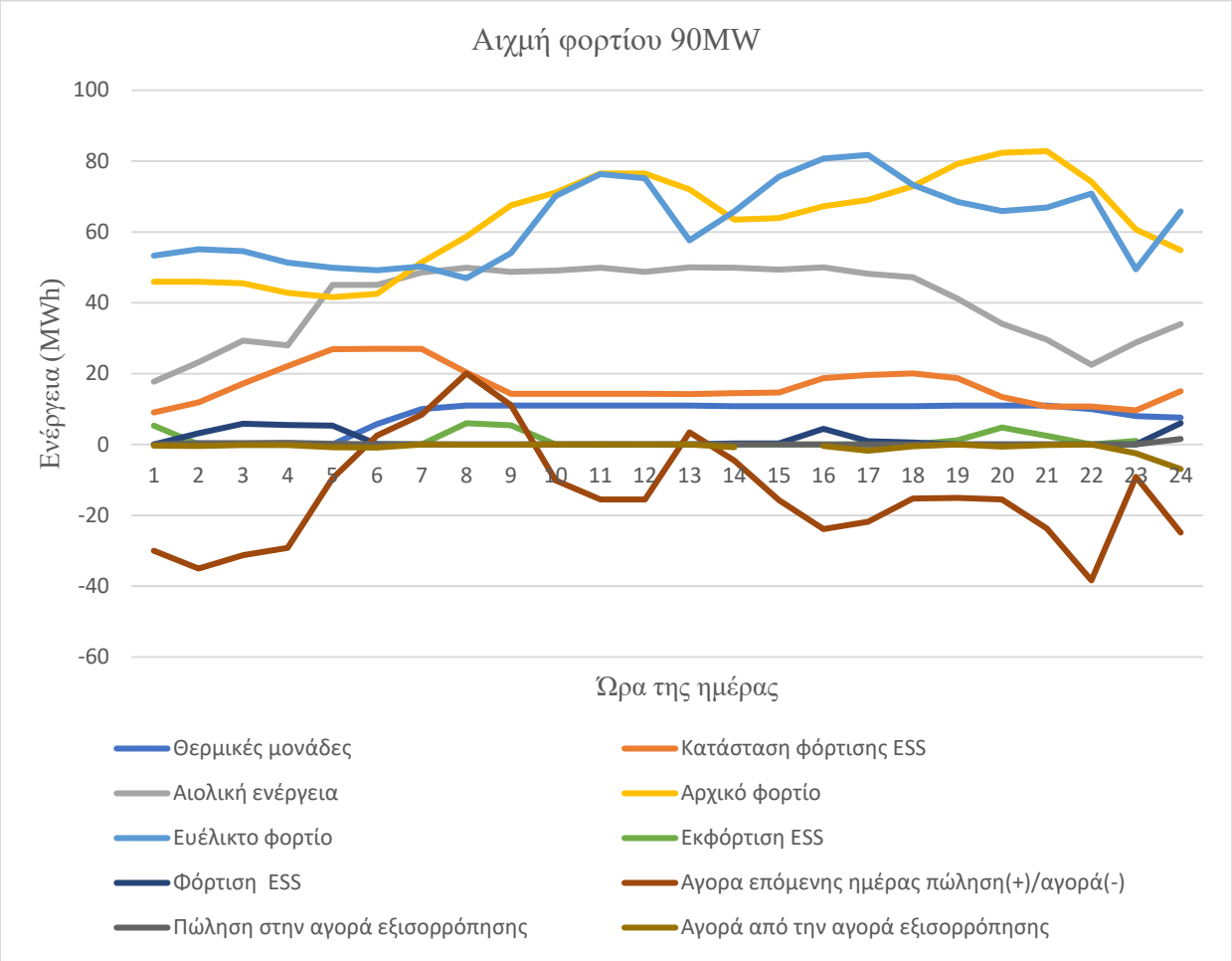
Σχήμα 6.13: Κέρδος VPP

Στο Σχήμα 6.11 φαίνεται ξεκάθαρα η σχέση φορτίου-κέρδους. Όσο αυξάνεται το φορτίο που έχει να καλύψει το VPP, τόσο μειώνεται το κέρδος του. Συγκεκριμένα στο σενάριο όπου η αιχμή φορτίου είναι 20MW , το κέρδος είναι 76762 ευρώ, ενώ στο σενάριο που είναι 90MW, έχει μειωθεί στα 34114 ευρώ. Η μείωση της κερδοφορίας κατά 55% είναι τεράστια και εξηγείται αν ληφθεί υπόψιν η τιμή πώλησης ενέργειας στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και του φορτίου. Στον Πίνακα 6.8 παρουσιάστηκε αναλυτικά η τιμολόγηση της ηλεκτρικής ενέργειας στην Αγορά Επόμενης Ημέρας. Η τιμή πώλησης ενέργειας του φορτίου είναι σταθερή και ισούται με 50 ευρώ/MWh.

Κατά τα περισσότερα χρονικά διαστήματα, η τιμή πώλησης/αγοράς στην Αγορά Επόμενης Ημέρας είναι μεγαλύτερη, έως και υπερδιπλάσια, συγκριτικά με την τιμή πώλησης του φορτίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του κέρδους του VPP όσο αυξάνεται το φορτίο που πρέπει να προμηθεύσει το VPP. Αυτός είναι και ένας λόγος που τα ευέλικτα φορτία και το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας συμβάλλουν στην αύξηση του κέρδους του VPP , καθώς επιτρέπουν στον Διαχειριστή να αξιοποιήσει καλύτερα τους διαθέσιμους πόρους και να πουλήσει ενέργεια τα χρονικά διαστήματα που είναι πιο επικερδές.



Σχήμα 6.14: Λειτουργία VPP



Σχήμα 6.15: Λειτουργία VPP

Τα Σχήματα 6.14 και 6.15 απεικονίζουν τη λειτουργία του VPP σε διάστημα 24 ωρών για τα σενάρια όπου η αιχμή φορτίου είναι 20MW και 90MW, αντίστοιχα. Στο σενάριο όπου το φορτίο που έχει να καλύψει το VPP είναι μικρότερο, η ενέργεια που πωλείται στην Αγορά Επόμενης Ημέρας είναι πολύ περισσότερη συγκριτικά με το σενάριο όπου το φορτίο είναι μεγαλύτερο (και στο οποίο κατά ένα μεγάλο μέρος της ημέρας, το VPP αναγκάζεται να αγοράσει ενέργεια για να καλύψει τις υποχρεώσεις του, μειώνοντας περαιτέρω το κέρδος του).

6.3.6 Τιμή ενέργειας στην Αγορά Επόμενης Ημέρας

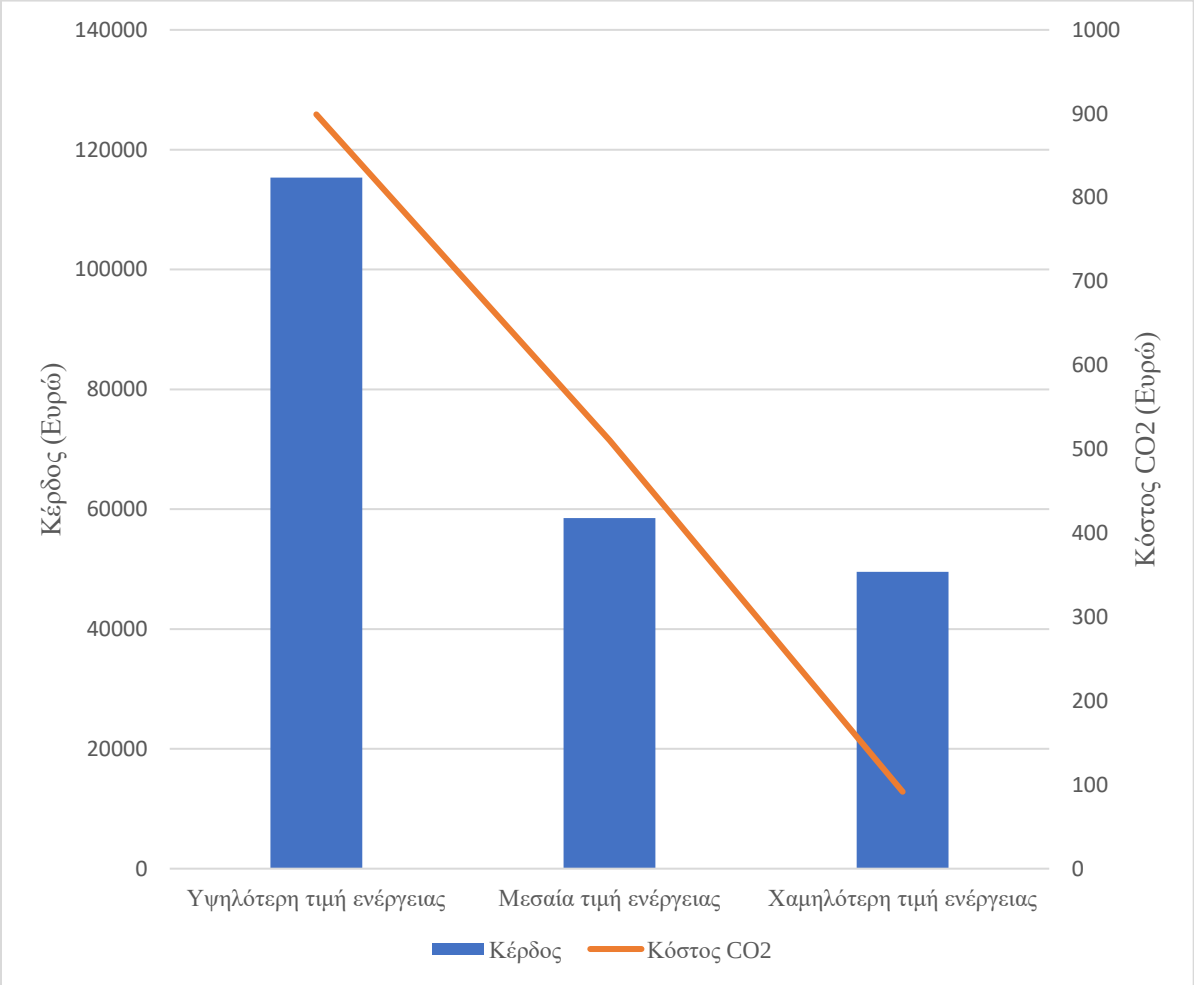
Όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.8, οι τιμές στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι σταθερές. Αντίθετα, μεταβάλλονται ωριαία και καθορίζονται από διάφορους παράγοντες που ξεφεύγουν από το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Για αυτό τον λόγο είναι όμως σημαντικό να εξεταστεί η λειτουργία του VPP και η κερδοφορία του υπό διαφορετικές συνθήκες όσον αφορά τις τιμές στην Αγορά Επόμενης Ημέρας. Στο βασικό σενάριο που εξετάστηκε, χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές της αγοράς της Λετονίας για την 27/08/2021. Για την ανάλυση ευαισθησίας εξετάστηκε η λειτουργία του VPP σε δύο ακόμη σενάρια, ένα

με χαμηλότερες τιμές και ένα με υψηλότερες συγκριτικά με το βασικό σενάριο. Οι αναλυτικές τιμές ανά ώρα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.10.

Πίνακας 6.10: Τιμή ενέργειας στην Αγορά Επόμενης Ημέρας

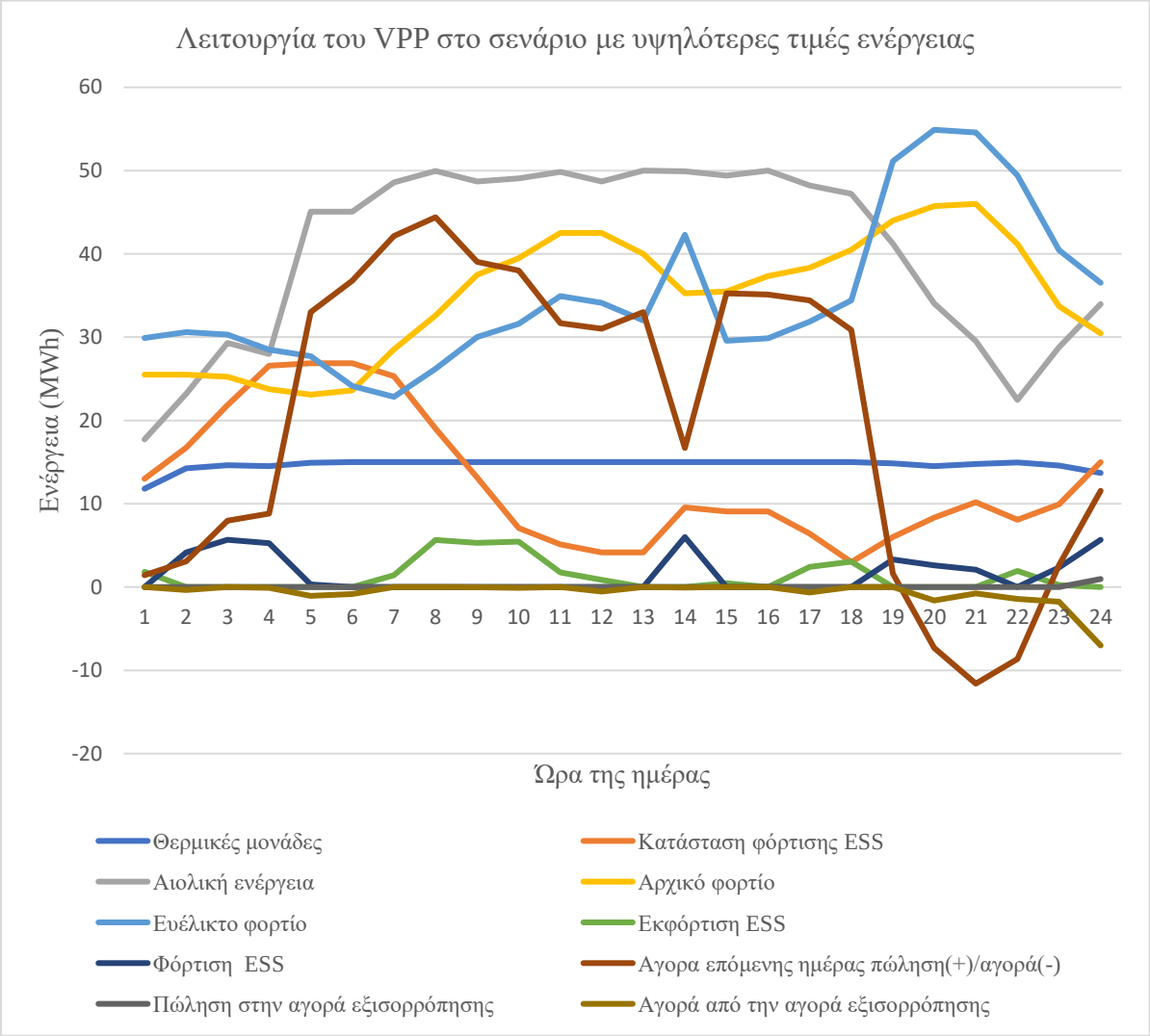
Ώρα της ημέρας	Σενάριο 1 Τιμή (ευρώ/MWh)	Βασικό σενάριο Τιμή (ευρώ/MWh)	Σενάριο 2 Τιμή (ευρώ/MWh)
1	40,35	82,01	155,78
2	36,18	42,45	113,43
3	36,12	41,07	88.,5
4	23,09	40,93	113,43
5	23,08	41,87	151,50
6	40,11	79,68	215,09
7	47,25	93,26	226,24
8	47,70	106,56	226,28
9	59,15	108,45	290,51
10	61,88	95,91	226,30
11	60,86	95,05	226,27
12	64,48	94,58	226,21
13	64,98	100,02	226,21
14	64,42	86,94	147,00
15	61,86	85,14	226,20
16	40,10	83,56	225,06
17	44,73	84,83	226,26
18	44,71	90,73	226,23
19	51,80	101,78	143,93
20	54,45	113,59	141,43
21	50,63	111,44	143,93
22	40,05	95,05	171,34
23	36,19	104,59	142,94
24	23,18	55,06	101,94

Οι τιμές για το Σενάριο 1 που αντιπροσωπεύει τη χαμηλότερη τιμή ενέργειας στην Αγορά Επόμενης Ημέρας αφορούν την αγορά της Λετονίας για την 16/06/2020. Για το σενάριο 2 που αντιπροσωπεύει την υψηλότερη τιμή ενέργειας, αφορούν ξανά την αγορά της Λετονίας για την 25/01/2022. Οι διαφορές που παρουσιάζουν οι τιμές μεταξύ των διαφορετικών σεναρίων είναι ιδιαίτερα μεγάλες. Σε ορισμένες περιπτώσεις η αύξηση μπορεί να είναι ακόμη και μεγαλύτερη από τετραπλάσια μεταξύ των σεναρίων 1 και 2 ή τριπλάσια μεταξύ του σεναρίου 2 και του βασικού. Το γεγονός ότι το σενάριο 2 και το βασικό απέχουν χρονικά μόλις μερικούς μήνες υποδεικνύει πόσο σημαντικό είναι για την κερδοφορία του VPP να παρουσιάζει μεγάλη ευελιξία στη λειτουργία του.



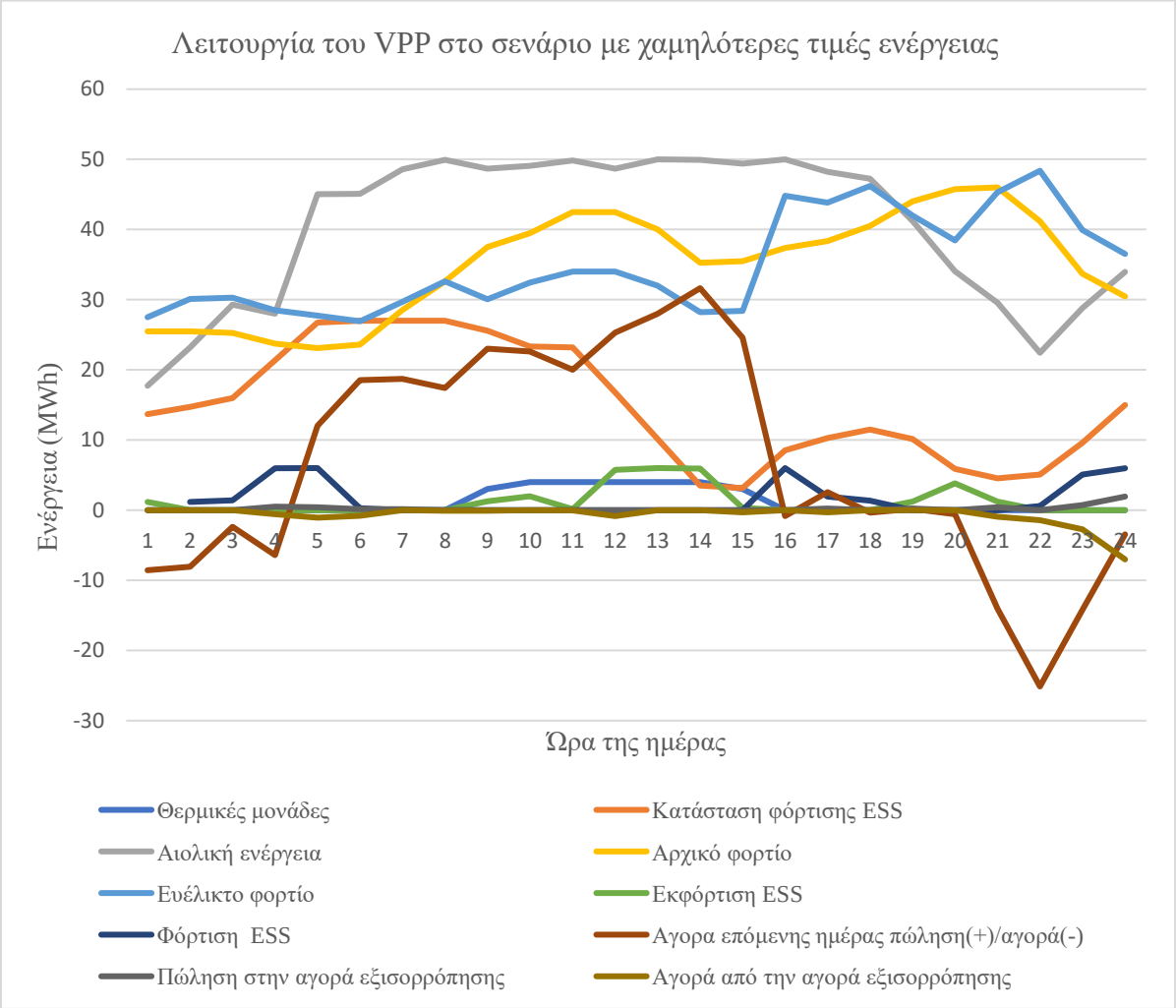
Σχήμα 6.16: Κέρδος VPP και κόστος CO_2

Στο Σχήμα 6.16 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όσον αφορά την κερδοφορία του VPP υπό τα τρία διαφορετικά σενάρια καθώς και το κόστος του CO_2. Όπως είναι αναμενόμενο, τα κέρδη του VPP είναι χαμηλότερα στο σενάριο με τη χαμηλότερη τιμή ενέργειας και υψηλότερα σε εκείνο με την υψηλότερη τιμή ενέργειας. Παράλληλα, στο σενάριο με τη χαμηλότερη τιμή ενέργειας, είναι μειωμένο και το κόστος CO_2 που σημαίνει ότι μειώνεται και η παραγωγή CO_2 , άρα και η λειτουργία των θερμικών μονάδων. Πιο συγκεκριμένα, από 115368 ευρώ που είναι το κέρδος στο σενάριο με την υψηλότερη τιμή ενέργειας, μειώνεται στα 58509 ευρώ στο βασικό σενάριο και έπειτα 49528 στο σενάριο με τη χαμηλότερη τιμή ενέργειας. Αυτό αποτελεί μείωση 49% και 57%, αντίστοιχα. Η μείωση όμως στο κέρδος από το βασικό σενάριο σε εκείνο με τη χαμηλότερη τιμή ενέργειας περιορίζεται στο 15%, παρόλο που οι τιμές στα περισσότερα χρονικά διαστήματα είναι περίπου οι μισές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το VPP δεν εμπορεύεται το 100% της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει στην Αγορά Επόμενης Ημέρας, αλλά αντίθετα οφείλει να καλύψει και ένα φορτίο στην σταθερή τιμή των 50 ευρώ. Σε κάθε ένα από τα σενάρια που εξετάστηκαν, το VPP κατάφερε να διατηρήσει την κερδοφορία του.



Σχήμα 6.17: Λειτουργία VPP

Εξετάζοντας πιο αναλυτικά τη λειτουργία του VPP στο σενάριο με υψηλότερες τιμές ενέργειας στην Αγορά Εξισορρόπησης, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.17, φαίνεται ότι οι θερμικές μονάδες λειτουργούν στο μέγιστο, ή κοντά στο μέγιστο της ισχύος τους, που σημαίνει ότι το κόστος λειτουργίας τους είναι μικρότερο από την τιμή πώλησης της ενέργειας που παράγουν. Ακόμα, είναι εμφανές πως το VPP εκμεταλλεύεται την ωριαία διακύμανση των τιμών της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας προκειμένου να μεγιστοποιήσει το κέρδος του. Για παράδειγμα, το χρονικό διάστημα *14*, όπου σύμφωνα με τον Πίνακα 6.10 η τιμή ενέργειας στην Αγορά Επόμενης Ημέρας παρουσιάζει πτώση (συγκριτικά με τις αμέσως προηγούμενες και επόμενες χρονικές περιόδους), παρουσιάζεται αύξηση τόσο στο ευέλικτο φορτίο όσο και στην κατάσταση φόρτισης του ESS, ενώ μειώνεται η ενέργεια που πουλάει το VPP στην Αγορά Επόμενης Ημέρας.



Σχήμα 6.18: Λειτουργία VPP

Στο σενάριο με χαμηλότερες τιμές ενέργειας, η λειτουργία του VPP παρουσιάζει διαφορές σε σχέση με πριν. Σε αυτή την περίπτωση, οι θερμικές μονάδες δεν βρίσκονται σε λειτουργία για το μεγαλύτερο διάστημα των 24 ωρών. Οι τιμές αγοράς και πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας είναι αρκετά χαμηλές (χαμηλότερες από το κόστος παραγωγής των θερμικών μονάδων) έτσι ώστε να μην είναι επικερδές για το VPP η συνεχής λειτουργία τους. Για αυτό τον λόγο η ποσότητα ενέργειας που αγοράζει το VPP από την Αγορά Επόμενης Ημέρας στο χρονικό διάστημα των 24 ωρών είναι συνολικά μεγαλύτερη.

6.3.7 Τιμή ενέργειας στην Αγορά Εξισορρόπησης

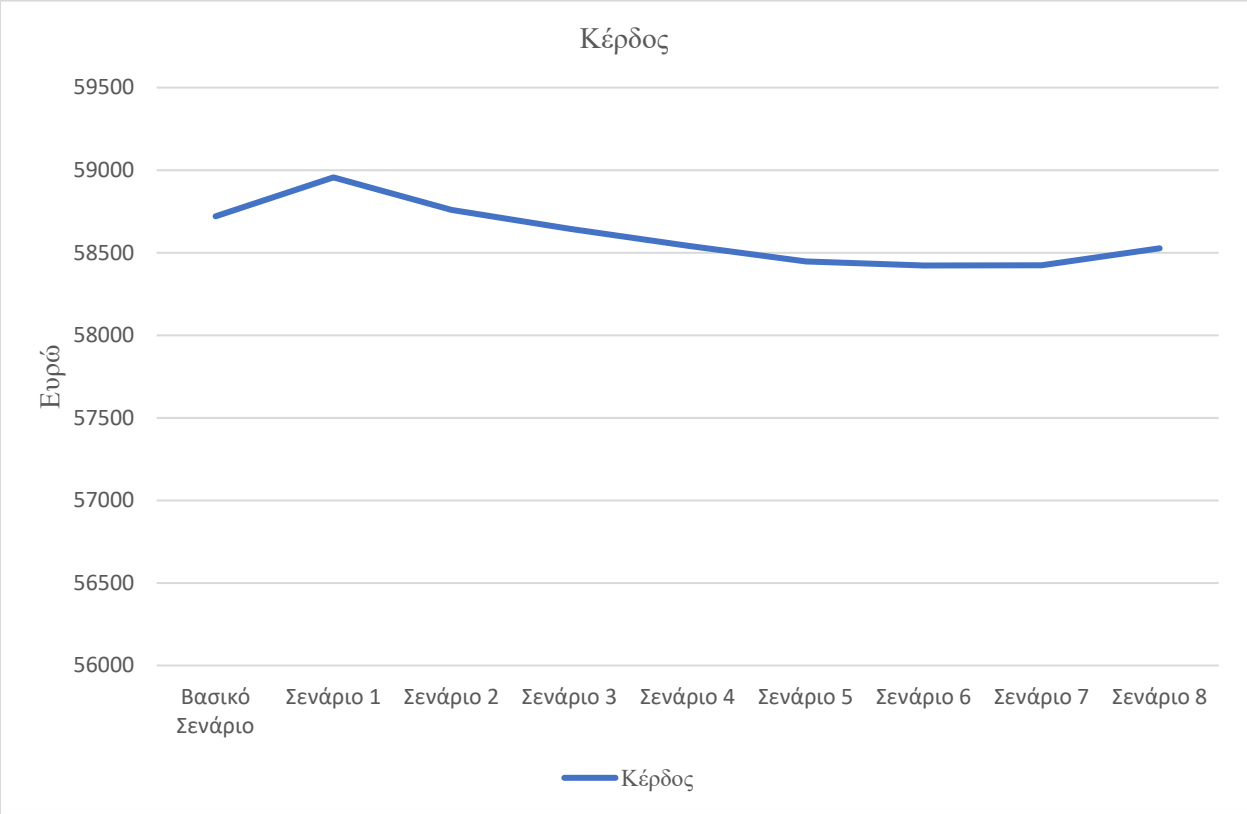
Εκτός από την Αγορά Επόμενης Ημέρας, το VPP χρησιμοποιεί και την Αγορά Εξισορρόπησης, προκειμένου να διορθώσει τυχόν αποκλίσεις που προκύπτουν από σφάλματα στην πρόβλεψη παραγωγής των μη κατανεμόμενων μονάδων ΑΠΕ. Στην Αγορά Εξισορρόπησης, η τιμολόγηση είναι λιγότερο συμφέρουσα σε σύγκριση με εκείνη της Αγορά Επόμενης Ημέρας. Πιο συγκεκριμένα, στο βασικό σενάριο που εξετάζεται, για θετική απόκλιση, δηλαδή όπου η ζήτηση είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή, η τιμή

της MWh είναι κατά 40% υψηλότερη. Ενώ για αρνητική απόκλιση, δηλαδή όπου η ζήτηση είναι μικρότερη της παραγωγής, η τιμή είναι μειωμένη κατά 20%. Αυτό αποτελεί κίνητρο ώστε οι συμμετέχοντες στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας να μην βασίζονται στην Αγορά Εξισορρόπησης για όλες τις αποκλίσεις από την καμπύλη προσφοράς στην Αγορά Επόμενης Ημέρας, αλλά να αξιοποιούν και άλλα μέσα. Κάποια από αυτά έχουν ενσωματωθεί και στο σενάριο που εξετάζεται, όπως συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, ευέλικτα φορτία, κλπ, ενώ κάποια άλλα όχι, όπως εφεδρεία στις θερμικές μονάδες.

Προκειμένου να γίνει η ανάλυση ευαισθησίας εξετάστηκαν σενάρια όπου η τιμολόγηση στην Αγορά Εξισορρόπησης διαμορφώνεται σύμφωνα με τα σενάρια του Πίνακα 6.11. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.19.

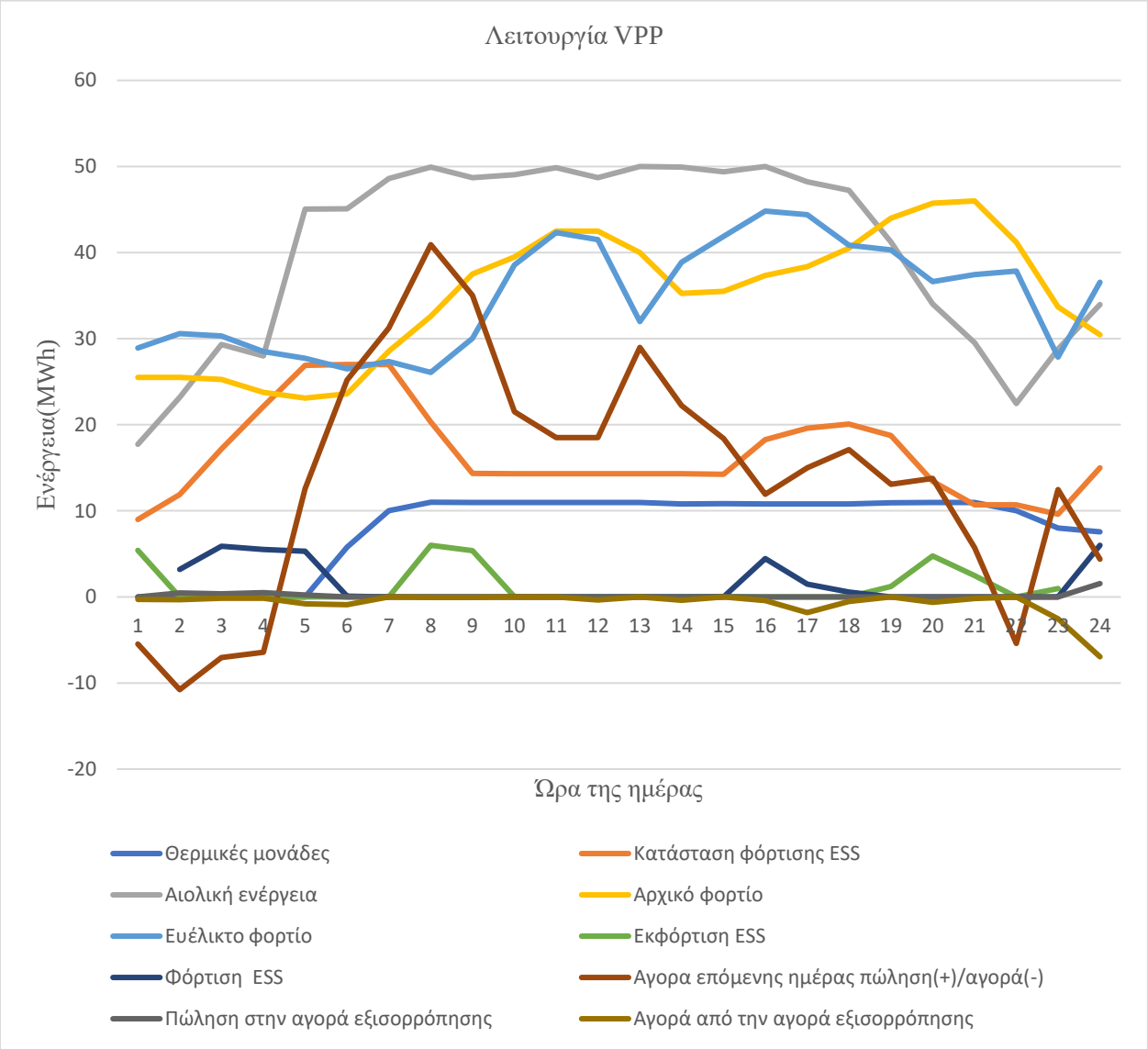
Πίνακας 6.11: Σενάρια προσομοίωσης λειτουργίας VPP

Σενάριο	**Τιμή στην Αγορά Εξισορρόπησης για θετική απόκλιση (ζήτηση > παραγωγή)**	**Τιμή στην Αγορά Εξισορρόπησης για αρνητική απόκλιση (ζήτηση < παραγωγή)**
Βασικό σενάριο	+40% (συγκριτικά με την Αγορά Επόμενης Ημέρας)	-20% (συγκριτικά με την Αγορά Επόμενης Ημέρας)
Σενάριο 1	+10% (συγκριτικά με την Αγορά Επόμενης Ημέρας)	-90% (συγκριτικά με την Αγορά Επόμενης Ημέρας)
Σενάριο 2	+20% (συγκριτικά με την Αγορά Επόμενης Ημέρας)	-80% (συγκριτικά με την Αγορά Επόμενης Ημέρας)
Σενάριο 3	+30% (συγκριτικά με την Αγορά Επόμενης Ημέρας)	-70% (συγκριτικά με την Αγορά Επόμενης Ημέρας)
Σενάριο 4	+40% (συγκριτικά με την Αγορά Επόμενης Ημέρας)	-60% (συγκριτικά με την Αγορά Επόμενης Ημέρας)
Σενάριο 5	+50% (συγκριτικά με την Αγορά Επόμενης Ημέρας)	-50% (συγκριτικά με την Αγορά Επόμενης Ημέρας)
Σενάριο 6	+60% (συγκριτικά με την Αγορά Επόμενης Ημέρας)	-40% (συγκριτικά με την Αγορά Επόμενης Ημέρας)
Σενάριο 7	+70% (συγκριτικά με την Αγορά Επόμενης Ημέρας)	-30% (συγκριτικά με την Αγορά Επόμενης Ημέρας)
Σενάριο 8	+80% (συγκριτικά με την Αγορά Επόμενης Ημέρας)	-20% (συγκριτικά με την Αγορά Επόμενης Ημέρας)



Σχήμα 6.19: Κέρδος VPP

Το κέρδος σε κάθε σενάριο παραμένει σχεδόν αμετάβλητο. Δεν παρατηρείται μεταβολή στο κέρδος μεγαλύτερη από 1%. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι το VPP πραγματοποιεί πολύ περιορισμένη χρήση της Αγοράς Εξισορρόπησης. Κάτι τέτοιο γίνεται εμφανές και από το Σχήμα 6.20 όπου παρουσιάζεται η λειτουργία του VPP στο βασικό σενάριο. Η χρήση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, των ευέλικτων φορτίων και των θερμικών μονάδων (που αποτελούν κατανεμόμενες μονάδες) περιορίζει την ανάγκη χρήσης της Αγοράς Εξισορρόπησης, στην οποία η τιμολόγηση δεν είναι ιδιαίτερα συμφέρουσα για τον Διαχειριστή του VPP. Αυτό τελικά αυξάνει όχι μόνο την κερδοφορία για τον Διαχειριστή του VPP αλλά και την ικανότητά του να ικανοποιεί τις υποχρεώσεις του ανεξάρτητα από τις μεταβολές στην τελική παραγωγή από τις μη κατανεμόμενες μονάδες ΑΠΕ.



Σχήμα 6.20: Λειτουργία VPP

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 ΣΥΝΟΨΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η βέλτιστη διαχείριση των μονάδων διανεμημένης παραγωγής (ΜΔΠ) ενός εικονικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής με τη χρήση στοχαστικού προγραμματισμού βασισμένου σε σενάρια για τη μεγιστοποίηση της κερδοφορίας του. Πιο συγκεκριμένα, έγινε προσομοίωση λειτουργίας ενός VPP σε χρονικό ορίζοντα 24 ωρών με σκοπό να εξεταστεί ποια είναι η βέλτιστη καμπύλη προσφοράς που πρέπει να καταθέσει ο Διαχειριστής του VPP στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και η καλύτερη διαχείριση των ΜΔΠ του VPP λαμβάνοντας υπόψη αβεβαιότητες. Θεωρήθηκε ότι οι τύποι ΜΔΠ του VPP είναι θερμικές μονάδες παραγωγής, ανεμογεννήτριες, ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας και ευέλικτα φορτία.

Για την επίλυση του προβλήματος αναπτύχθηκε λογισμικό προσομοίωσης στο προγραμματιστικό περιβάλλον GAMS (General Algebraic Modeling System) το οποίο βοηθά στην επίλυση ενός μεγάλου φάσματος προβλημάτων βελτιστοποίησης. Διαθέτει γραφικό περιβάλλον (GUI) φιλικό προς τον χρήστη για την ευκολότερη χρήση του προγράμματος. Για την επεξεργασία και παρουσίαση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Microsoft Office Excel.

Πιο αναλυτικά, στο Κεφάλαιο 6, ως βασικό σενάριο θεωρήθηκε ένα VPP που αποτελείται από 4 ντιζελογεννήτριες με εγκατεστημένη ισχύς 15MW, ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με εγκατεστημένη χωρητικότητα 30 MWh και ένα αιολικό πάρκο με εγκατεστημένη ισχύς 50 MW. Στο διάστημα των 24 ωρών που εξετάστηκε η λειτουργία του, το VPP οφείλει να καλύψει φορτίο αιχμής 50 MW. Το φορτίο αυτό είναι ευέλικτο με ποσοστό δυνατότητας ρύθμισης ισχύος ζήτησης (αύξηση και μείωση) 20%. Παράλληλα, συμμετέχει στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και άρα οφείλει να υποβάλει μια καμπύλη προφοράς για την ενέργεια που θα πουλήσει ή/και αγοράσει στην Αγορά Επόμενης Ημέρας για το ίδιο χρονικό διάστημα, 24 με 36 ώρες πριν λάβει χώρα η φυσική μεταφορά ενέργειας. Προκειμένου να εξεταστεί κατά πόσο οι τεχνικοί και οι οικονομικοί περιορισμοί καθώς και οι αβεβαιότητες που αφορούν τα επίπεδα παραγωγής ενέργειας από τις μη κατανεμόμενες μονάδες ΑΠΕ επηρεάζουν τη λειτουργία του VPP στην αγορά ενέργειας και την κερδοφορία του, έγιναν επιπλέον προσομοιώσεις όπου το VPP:

- έχει εγκατεστημένη ισχύς μη κατανεμόμενων μονάδων ΑΠΕ 20 MW, 30 MW, 40 MW, 60 MW, 70 MW, 80 MW και 90MW
- έχει εγκατεστημένη ισχύς θερμικών μονάδων 30MW, 45 MW, 60 MW, 90 MW και 170 MW
- έχει σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με εγκατεστημένη χωρητικότητα 6MWh, 12MWh, 18MWh και 24 MWh και μέγιστη ικανότητα παροχής ισχύος 12MW
- έχει ποσοστό δυνατότητας ρύθμισης ισχύος ζήτησης ευέλικτων φορτίων (αύξηση και μείωση) από 10% έως και 40%
- δεν περιλαμβάνει σύστημα αποθήκευσης ενέργειας και ευέλικτα φορτία

Τα αποτελέσματα των παραπάνω προσομοιώσεων έδειξαν ότι η κερδοφορία του VPP μεταβάλλεται σε κάθε σενάριο, παρουσιάζοντας όμως τη μεγαλύτερη μεταβολή κατά τις αλλαγές της εγκατεστημένης ισχύς των μη κατανεμόμενων μονάδων ΑΠΕ και κατά τις αλλαγές της εγκατεστημένης ισχύς των θερμικών

μονάδων. Αντίθετα, οι μεταβολές στην κερδοφορία ήταν αρκετά μικρότερες από τις αλλαγές στο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας και στο ποσοστό δυνατότητας ρύθμισης ισχύος ζήτησης των ευέλικτων φορτίων. Σε κάθε προσομοίωση που διενεργήθηκε, η κερδοφορία του VPP διατηρήθηκε.

Επιπλέον, έγιναν και προσομοιώσεις μεταβάλλοντας τις τιμές ενέργειας στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, όπου εξετάστηκαν τρία σενάρια με διαφορετικές τιμές. Στο πρώτο σενάριο, οι τιμές ήταν οι χαμηλότερες ενώ στο τρίτο σενάριο, οι τιμές ήταν οι υψηλότερες. Η κερδοφορία του VPP αυξήθηκε με κάθε αύξηση στις τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας. Σε κάθε προσομοίωση που έγινε, αντικειμενική συνάρτηση ήταν η μεγιστοποίηση του κέρδους.

7.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία μπορεί μελλοντικά να επεκταθεί ως ακολούθως:

- Εξέταση και μελέτη της λειτουργίας του VPP κάνοντας χρήση περισσότερων σεναρίων για την πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής, προκειμένου να αυξηθεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και να ελεγχθεί ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος με περισσότερα δεδομένα. Αυτό αποτελεί και ένα πιο ρεαλιστικό σενάριο λειτουργίας ενός VPP.
- Εξέταση και μελέτη λειτουργίας του VPP όταν αυτό δεν είναι συνδεδεμένο με την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η περίπτωση έχει εφαρμογή σε νησιωτικά ηλεκτρικά συστήματα που λειτουργούν αυτόνομα και που δεν είναι συνδεδεμένα με το ηλεκτρικό δίκτυο. Ακόμα, η σύγκριση της κερδοφορίας του VPP πριν και μετά τη σύνδεση με την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας θα δείξει κατά πόσο η συμμετοχή στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί επενδυτική ευκαιρία.
- Εξέταση και μελέτη διαχείρισης της λειτουργίας του VPP με χρήση εύρωστου προγραμματισμού και σύγκριση της κερδοφορίας του VPP σε σχέση με τη χρήση στοχαστικού προγραμματισμού.
- Μελέτη λειτουργίας και κερδοφορίας του VPP με χρήση επιπλέον τύπων ΜΔΠ και ειδικότερα επιπλέον μη κατανεμόμενων μονάδων ΑΠΕ προκειμένου να εξεταστεί κατά πόσο αυτή μεταφράζεται σε αύξηση της κερδοφορίας, παρά τους κινδύνους λόγω αβεβαιότητας, και αν αποτελεί επιλογή με επενδυτικό ενδιαφέρον.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] A. J. Conejo, M. Carrión, and J. M. Morales, *Decision Making Under Uncertainty in Electricity Markets*, vol. 153. Boston, MA: Springer US, 2010.

[2] "VPP explained: What is a Virtual Power Plant?" https://www.next-kraftwerke.com/vpp/virtual-power-plant (accessed Feb. 06, 2022).

[3] "Οδηγία 2009/28/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 23ης Απριλίου 2009, σχετικά με την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και την τροποποίηση και τη συνακόλουθη κατάργηση των οδηγιών 2001/77/ΕΚ και 2003/30/ΕΚ." https://wipolex-res.wipo.int/edocs/lexdocs/laws/el/eu/eu212el.html (accessed Mar. 17, 2022).

[4] "ΕΛΛΗΝΙΚΟΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΩΝ ΑΠΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ," *www.hellasres.gr*, Accessed: Nov. 14, 2021. [Online]. Available: http://www.hellasres.gr/greek/giati-ape/giati-ape.htm.

[5] "Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας - Βικιπαίδεια." https://el.wikipedia.org/wiki/Ανανεώσιμες_πηγές_ενέργειας (accessed Nov. 14, 2021).

[6] J. R. Birge and F. Louveaux, *Introduction to Stochastic Programming*. New York, NY: Springer New York, 2011.

[7] "Steam-electric power station - Wikipedia." https://en.wikipedia.org/wiki/Steam-electric_power_station (accessed Nov. 28, 2021).

[8] T. C. Elliott, K. Chen, and R. C. Swanekamp, "Standard handbook of powerplant engineering,", Book, 1998.

[9] "Gas turbine - Wikipedia." https://en.wikipedia.org/wiki/Gas_turbine#Auxiliary_power_units (accessed Nov. 28, 2021).

[10] "Plant Converts to Combined Cycle Operation with Help of Thermal Mass Air/Gas Flowmeter." https://www.powermag.com/plant-converts-to-combined-cycle-operation-with-help-of-thermal-mass-airgas-flowmeter/ (accessed Feb. 04, 2022).

[11] "Μηχανή εσωτερικής καύσης - Βικιπαίδεια." https://el.wikipedia.org/wiki/Μηχανή_εσωτερικής_καύσης (accessed Feb. 04, 2022).

[12] "Variable renewable energy - Wikipedia." https://en.wikipedia.org/wiki/Variable_renewable_energy (accessed Feb. 04, 2022).

[13] Σ. Τραγουδά, "Η Αιολική ενέργεια και οι προοπτικές της στην Ελλάδα. Συγκριτική μελέτη με Δανία και Ισπανία.," Διπλωματική Εργασία, Σχολή Οικονομικών και Περιφερειακών Σπουδών, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας, 2019 [Online]. Available: https://dspace.lib.uom.gr/bitstream/2159/23008/4/TragoudaStellaMsc2019.pdf.

[14] "aioliki energeia| e-mc2.gr." https://www.e-mc2.gr/vivliothiki/energeia/aioliki-energeia (accessed Feb. 04, 2022).

[15] "Home - IEA wind task 36." https://www.ieawindforecasting.dk/ (accessed Feb. 04, 2022).

[16] "Global Wind Report 2021 - Global Wind Energy Council." https://gwec.net/global-wind-report-2021/ (accessed Mar. 16, 2022).

[17] "• Offshore wind energy capacity worldwide 2020 | Statista." https://www.statista.com/statistics/476327/global-capacity-of-offshore-wind-energy/ (accessed Feb. 24, 2022).

[18] "• Onshore wind energy capacity worldwide 2020 | Statista." https://www.statista.com/statistics/476306/global-capacity-of-onshore-wind-energy/ (accessed Feb. 24, 2022).

[19] N. Hulazan, *Offshore wind power – Advantages and disadvantages*. Renewable Energy Articles, 2011.

[20] K. Peterson, "The reliability of wind power," *Minnesota Dly.*, Nov. 2012, Accessed: Nov. 28, 2021. [Online]. Available: http://www.mndaily.com/2012/11/5/reliability-wind-power.

[21] "Wind power - Wikipedia." https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power (accessed Nov. 28, 2021).

[22] "Photovoltaic power station - Wikipedia." https://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaic_power_station#Technology (accessed Nov. 30, 2021).

[23] K. Ilse *et al.*, "Techno-Economic Assessment of Soiling Losses and Mitigation Strategies for Solar Power Generation," *Joule*, vol. 3, no. 10, pp. 2303–2321, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.joule.2019.08.019.

[24] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, and W. Warta, "Solar Cell Efficiency Tables," *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 17, no. 1, pp. 85–94, Jan. 2009, doi: 10.1002/pip.880.

[25] "Υδροηλεκτρική ενέργεια - Βικιπαίδεια." https://el.wikipedia.org/wiki/Υδροηλεκτρική_ενέργεια (accessed Feb. 01, 2022).

[26] "Hydroelectricity - Wikipedia." https://en.wikipedia.org/wiki/Hydroelectricity (accessed Feb. 01, 2022).

[27] "Types of Hydropower Plants | Department of Energy." https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-plants (accessed Feb. 01, 2022).

[28] "Norway is Europe's cheapest 'battery,'" *SINTEF.no*, Dec. 2014, Accessed: Feb. 01, 2022. [Online]. Available: https://www.sintef.no/en/latest-news/norway-is-europes-cheapest-battery/.

[29] "Biofuel - Wikipedia." https://en.wikipedia.org/wiki/Biofuel (accessed Mar. 03, 2022).

[30] T. J. Lark *et al.*, "Environmental outcomes of the US Renewable Fuel Standard," *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 119, no. 9, p. e2101084119, Mar. 2022, doi: 10.1073/pnas.2101084119.

[31] "What is biofuel? definition and meaning," *BusinessDictionary.com*, Accessed: Mar. 03, 2022. [Online]. Available: http://www.businessdictionary.com/definition/biofuel.html.

[32] Β. Βενέτος, "Σταθμοί Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας από Βιομάζα." , Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2019

[33] C. M. Drapcho, N. P. Nhuan, and T. H. Walker, “Biofuels Engineering Process Technology” Biofuels Eng. Process Technol., Book, pp. 69–104, 2008, Accessed: Mar. 17, 2022. [Online]. Available: https://books.google.com/books/about/Biofuels_Engineering_Process_Technology.html?hl=el&id=wtk6baV01osC.

[34] “Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,” *IPCC*, Accessed: Mar. 03, 2022. [Online]. Available: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SRREN_Full_Report-1.pdf.

[35] “National Renewable Energy Laboratory (NREL) Home Page | NREL.” https://www.nrel.gov/ (accessed Feb. 03, 2022).

[36] H. Ibrahim, A. Ilinca, and J. Perron, “Energy storage systems—Characteristics and comparisons,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, no. 5, pp. 1221–1250, Jun. 2008, doi: 10.1016/J.RSER.2007.01.023.

[37] Critical Review of Energy Storage Systems. Energy, 118987 | 10.1016/j.energy.2020.118987.” https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544220320946 (accessed Feb. 04, 2022).

[38] Μ. Μπίτος, “Έλεγχος Συστήματοσς Αποθήκευσης Ενέργειας Με Στρεφόμενη Μάζα.”, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2013

[39] B. Hayes," *Distribution Generation Optimization and Energy Management*." Elsevier Inc., 2017.

[40] “Virtual Power Plant Market PESTEL Analysis, SWOT Analysis, CAGR 21.3% and Value Chain Study to 2027 - MarketWatch.” https://www.marketwatch.com/press-release/virtual-power-plant-market-pestel-analysis-swot-analysis-cagr-213-and-value-chain-study-to-2027-2021-11-16?tesla=y (accessed Feb. 06, 2022).

[41] “The evolving electricity markets schemes | JRC Smart Electricity Systems and Interoperability.” https://ses.jrc.ec.europa.eu/evolving-electricity-markets-schemes (accessed Oct. 09, 2021).

[42] “Eté 2013 - Numéro 19 - La lettre de l’I-tésé Historical approach of European electricity market par Bianka SHOAI TEHRANI, I-tésé.”

[43] Θ. Γαβριηλίδης, “Στοχαστικός Προγραμματισμός και Διαχείριση σε Πραγματικό Χρόνο Εικονικών Σταθμών Παραγωγής: Χρήση Εγκαταστάσεων Εξόρυξης Κρυπτονομισμάτων ως Ελεγχόμενα Φορτία.”, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2021

[44] C. Weber, “Adequate intraday market design to enable the integration of wind energy into the European power systems,” *Energy Policy*, vol. 38, no. 7, pp. 3155–3163, Jul. 2010, doi: 10.1016/J.ENPOL.2009.07.040.

[45] J. M. Morales, A. J. Conejo, H. Madsen, P. Pinson, and M. Zugno, *Integrating renewables in electricity markets - Operational problems*, vol. 205. 2014.

[46] “The Fundamentals of Electricity Markets | E B F 200: Introduction to Energy and Earth Sciences Economics.” https://www.e-education.psu.edu/ebf200/node/151 (accessed Dec. 03, 2021).

[47] "What is stochastic programming? | Stochastic Programming Society." https://www.stoprog.org/what-stochastic-programming (accessed Dec. 04, 2021).

[48] C. Li and I. E. Grossmann, "A Review of Stochastic Programming Methods for Optimization of Process Systems Under Uncertainty," *Front. Chem. Eng.*, vol. 0, p. 34, Jan. 2021, doi: 10.3389/FCENG.2020.622241.

[49] D. Bertsimas and J. Tsitsiklis, "Introduction to Linear Optimization (Athena Scientific Series in Optimization and Neural Computation, 6)," *Book*, p. 608, 1997.

[50] "CPLEX Optimizer | IBM." https://www.ibm.com/analytics/cplex-optimizer (accessed Oct. 16, 2021).

[51] M. Zivic Djurovic, A. Milacic, and M. Krsulja, "A simplified model of quadratic cost function for thermal generators," *23rd DAAAM Int. Symp. Intell. Manuf. Autom. 2012*, vol. 1, no. 1, pp. 25–28, 2012, doi: 10.2507/23rd.daaam.proceedings.006.

[52] D. Chattopadhyay, "Application of general algebraic modeling system to power system optimization," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, no. 1, pp. 15–22, 1999, doi: 10.1109/59.744462.

[53] "https://www.gams.com/about/company/." https://www.gams.com/about/company/ (accessed Oct. 09, 2021).

[54] A. Soroudi, "Power system optimization modeling in GAMS,"*Book*, pp. 1–295, Sep. 2017, doi: 10.1007/978-3-319-62350-4.

[55] Α. Μητούλας, "Πολυπεριοδική Βέλτιστη Ροή Ισχύος Σε Ακτινικά Δίκτυα Διανομής με Διανεμημένους Ενεργειακούς Πόρους," Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2022, Available: http://artemis.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/handle/123456789/17680.