



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

**Στοχαστικός Προγραμματισμός και Διαχείριση σε  
Πραγματικό Χρόνο Εικονικών Σταθμών Παραγωγής:  
Χρήση Εγκαταστάσεων Εξόρυξης Κρυπτονομισμάτων ως  
Ελεγχόμενα Φορτία**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θεόδωρος Γαβριηλίδης

**Επίβλεψη :** Παύλος Σ. Γεωργιλάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
Ιάσων-Ηρακλής Αβραμίδης, Υποψήφιος Διδάκτορας

Αθήνα, Ιούλιος 2021





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

**Στοχαστικός Προγραμματισμός και Διαχείριση σε  
Πραγματικό Χρόνο Εικονικών Σταθμών Παραγωγής:  
Χρήση Εγκαταστάσεων Εξόρυξης Κρυπτονομισμάτων ως  
Ελεγχόμενα Φορτία**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θεόδωρος Γαβριηλίδης

**Επίβλεψη :** Παύλος Σ. Γεωργιλάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
Ιάσων-Ηρακλής Αβραμίδης, Υποψήφιος Διδάκτορας

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 9<sup>η</sup> Ιουλίου 2021

.....  
Παύλος Γεωργιλάκης  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Γεώργιος Κορρές  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ιωάννης Γκόνος  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2021

.....

Θεόδωρος Γαβριηλίδης

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

Copyright (copyright emblem) Θεόδωρος Γαβριηλίδης, 2021

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 το 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 μελέτη των επιπτώσεων που έχει η εισαγωγή εγκαταστάσεων εξόρυξης κρυπτονομισμάτων (cryptocurrencies) στην λειτουργία και κερδοφορία των εικονικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (VPPs). Η μελέτη εστιάζει στην λειτουργία των εγκαταστάσεων εξόρυξης, εξετάζοντας αν αυτές μπορούν να λειτουργήσουν ως ελεγχόμενα φορτία. Επιπρόσθετα, πραγματοποιείται αξιολόγηση των επενδύσεων σε εγκαταστάσεις εξόρυξης σε VPPs υπολογίζοντας τον χρόνο αποπληρωμής αυτών.

Στην διπλωματική εργασία αναπτύχθηκαν αλγόριθμοι προσομοίωσης συνδυάζοντας τα προγραμματιστικά περιβάλλοντα GAMS και RStudio για την υλοποίηση των στόχων της εργασίας. Αρχικά, μοντελοποιήθηκε ο προγραμματισμός της λειτουργίας των VPPs με χρήση στοχαστικού και εύρωστου προγραμματισμού. Στην συνέχεια, αναλύθηκε και μοντελοποιήθηκε η μέθοδος εκκαθάρισης της αγοράς της επόμενης ημέρας με χρήση ενός προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος (OPF) με το οποίο υπολογίστηκαν οι δεσμεύσεις των VPPs. Κατά την μοντελοποίηση του δικτύου χρησιμοποιήθηκαν τρία δίκτυα μεταφοράς με 14, 30 και 500 ζυγούς. Επιπλέον, μοντελοποιήθηκε η αγορά εξισορρόπησης για τον υπολογισμό του πραγματικού κέρδους των VPPs. Καθώς τα παραπάνω προβλήματα βελτιστοποίησης είναι μη-γραμμικά, κατά την μοντελοποίησή τους έγινε γραμμικοποίηση των προβλημάτων αυτών.

Για να εξεταστεί το κατά πόσον η επιλογή του cryptocurrency επηρεάζει την κερδοφορία των εγκαταστάσεων εξόρυξης και ως επέκταση των VPPs, στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκαν τρία διαφορετικά cryptocurrencies: το Bitcoin, το Ethereum και το Dogecoin. Επιπρόσθετα, καθώς οι εγκαταστάσεις εξόρυξης επηρεάζουν και αυτές την κερδοφορία του συστήματος, εξετάστηκαν δύο διαφορετικές εγκαταστάσεις για την εξόρυξη Ethereum.

Στην μοντελοποίηση της αγοράς εξισορρόπησης χρησιμοποιήθηκαν πέντε διαφορετικές ομάδες εξισορρόπησης. Αυτό γίνεται για τον διαχωρισμό των εγκαταστάσεων εξόρυξης cryptocurrencies και των στοχαστικών μονάδων παραγωγής, όπως των Φ/Β και των Α/Γ από τις υπόλοιπες εγκαταστάσεις που διαχειρίζονται τα VPPs. Με τον παραπάνω διαχωρισμό, εξετάστηκαν οι επιπτώσεις των εγκαταστάσεων εξόρυξης στην λειτουργία των VPPs καθώς και αν μπορούν να δράσουν ως ελεγχόμενα φορτία. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η αγορά εξισορρόπησης που μοντελοποιήθηκε είναι βασισμένη στο πρότυπο δύο τιμών, ώστε να μην είναι δυνατή η εξισορροπητική κερδοσκοπία.

Για την διερεύνηση των ερωτημάτων της διπλωματικής εργασίας, εξετάστηκαν πέντε διαφορετικά σενάρια κατά τα οποία μεταβάλλονταν οι προβλέψεις των στοχαστικών μονάδων παραγωγής, καθώς και οι προβλέψεις των τιμών της αγοράς ενέργειας. Τα αποτελέσματα της μελέτης υποδεικνύουν ότι η εισαγωγή εγκαταστάσεων εξόρυξης σε VPPs αυξάνει τα έσοδά τους ανεξάρτητα του τρόπου προγραμματισμού. Επιπλέον, υποστηρίζουν την υπόθεση ότι οι εγκαταστάσεις εξόρυξης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ελεγχόμενα φορτία. Από την αξιολόγηση των επενδύσεων συμπεραίνεται ότι οι επενδύσεις σε εγκαταστάσεις εξόρυξης είναι κερδοφόρες και αποπληρώνουν το αρχικό κόστος της εγκατάστασης μέσα σε ένα με δύο χρόνια.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Εγκαταστάσεις εξόρυξης, εικονικοί σταθμοί παραγωγής, εύρωστος προγραμματισμός, οριακή τιμή απόκλισης, οριακή τιμή συστήματος, στοχαστικός προγραμματισμός



## **ABSTRACT**

The scope of this thesis is to identify the effects that cryptocurrency mining facilities have on the operations and profitability of Virtual Power Plants (VPPs). In addition, the study examines whether cryptocurrency mining facilities can be used as flexible loads to improve the performance of VPPs in the energy market. An investment appraisal is conducted to examine the timeframe, which is required to pay-back the original investment for building a cryptocurrency mining facility.

In this work, multiple simulation algorithms were developed in a combined GAMS and RStudio programming environment to achieve the objective of the thesis. A model determining the optimal operation of a VPP was constructed using both stochastic and robust programming. To validate its results, the proposed model was implemented in an Optimal Power Flow (OPF) problem for 14 bus, 30 bus and 500 bus networks, which simulate the clearing market. A simulation for the balancing market was constructed to derive the actual profit for a 24-hour period. Since both the optimal bidding and grid clearing problems are non-linear, a piecewise linear approach was adopted.

In order to test how the cryptocurrency that is being mined affects the results, three different cryptocurrencies were investigated in the thesis: Bitcoin, Ethereum and Dogecoin. In addition, because cryptocurrency mining is greatly affected by the mining equipment used, two separate scenarios for Ethereum were included in the simulations as well.

To better focus on the effects that the mining facilities have on the VPPs, five balancing groups were used for the simulation of the balancing market. Specifically, the cryptocurrency mining facility was paired with the stochastic production units, i.e., Photovoltaics and Wind Generators while leaving the remaining units managed by the VPP in separate groups. This composition yields the best results considering it highlights the effects of cryptocurrency mining in the operation of the VPPs. It is important to mention that the balancing market employed is based on the two-price system, which does not allow for arbitrage.

For the evaluation of the above simulations, the proposed models were tested for a series of five different scenarios regarding the wholesale market price forecasts and the stochastic unit production forecasts. The thesis concludes that indeed cryptocurrency mining facilities can improve the performance of a VPP. Specifically, the evidence supports that cryptocurrency mining benefits both the stochastic as well as the robust models. In addition, the results support that cryptocurrency mining facilities operate similarly to flexible loads. Investments on cryptocurrency mining facilities are deemed a good investment since they payback their investment cost within one to two years.

## **KEYWORDS**

Balancing price, mining facilities, robust programming, stochastic programming, virtual power plants (VPP), wholesale clearing price





## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2020-2021 υπό την επίβλεψη του κ. Παύλου Γεωργιάκη, αναπληρωτή καθηγητή του Ε.Μ.Π. της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, 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 και πλέον φίλο μου, Ιάσων Αβραμίδη, καθώς χωρίς την καθοδήγηση και υποστήριξη του αυτή η διπλωματική δεν θα είχε ολοκληρωθεί. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Γεράσιμο Τάκη για τις συμβουλές του που έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην διαμόρφωση αυτής της εργασίας. Επιπλέον, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου που δεν σταμάτησε να με ενθαρρύνει καθ' όλη την διάρκεια της φοίτησης μου και στους οποίους αφιερώνω την δουλειά αυτή. Μαμά, Μπαμπά επιτέλους αποφοίτησα. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Εβελίνα για την συμπαράσταση και την αγάπη της καθώς και τους κ. Αντώνη και Χρίστο χωρίς τους οποίους αυτό το ταξίδι δεν θα είχε ξεκινήσει.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1.	Εισαγωγή	17
1.2.	Αγορά Ηλεκτρικής Ενέργειας	18
1.3.	Ανάλυση Ροής Ισχύος	18
1.4.	Οικονομική Κατανομή Φορτίου	19
1.5.	Εικονικοί Σταθμοί Παραγωγής	19
1.6.	Κρυπτονομίσματα	19
1.7.	Αντικείμενο της Εργασίας	20
1.8.	Δομή της Εργασίας	20

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΟΝΑΔΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1.	Εισαγωγή	23
2.2.	Θερμοηλεκτρικοί Σταθμοί Παραγωγής	24
2.3.	Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί Παραγωγής	24
2.4.	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	24
	2.4.1. Φωτοβολταϊκοί Σταθμοί	25
	2.4.2. Αιολικά Πάρκα	25
2.5.	Μονάδες Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας	25

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΓΟΡΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.1.	Εισαγωγή	27
3.2.	Αγορά Ηλεκτρικής Ενέργειας	28
	3.2.1. Δομή Αγοράς	28
	3.2.2. Χονδρική Αγορά Προθεσμιακών Προϊόντων	28
	3.2.3. Αγορά Επόμενης Ημέρας	28
	3.2.4. Ενδοημερήσια Αγορά	29

3.2.5.Αγορά Εξισορρόπησης	30
3.3. Διαμόρφωση Οριακής Τιμής Συστήματος	31
3.3.1.Καμπύλη Προσφοράς	32
3.3.2.Καμπύλη Ζήτησης	33
3.3.2.1. Εισαγωγή στην Καμπύλη Ζήτησης	33
3.3.2.2. Παράγοντες που Επηρεάζουν την Καμπύλη Ζήτησης	35
3.4. Οριακή Τιμή Αποκλίσεων	36
3.4.1.Μια Οριακή Τιμή Αποκλίσεων	36
3.4.2.Δυο Οριακές Τιμές Αποκλίσεων	37

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΙΚΟΝΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

4.1. Εισαγωγή	39
4.2. Διαχείριση του VPP	40
4.3. Επίλυση Προβλημάτων Βελτιστοποίησης	41
4.3.1.Γραμμικός Προγραμματισμός	41
4.3.2.Τύποι Προβλημάτων	41
4.3.3.Πολύ-Επίπεδος Προγραμματισμός	42
4.3.4.Θεωρία Παιγνίων	43
4.4. Μαθηματική Μοντελοποίηση του VPP	44
4.4.1.Θερμοηλεκτρικές Μονάδες	44
4.4.2.Ελεγχόμενα Φορτία	47
4.4.3.Μονάδες Αποθήκευσης	49
4.4.4.Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	50
4.5. Διαχείριση Ενέργειας από Συμβατικά VPP	51
4.6. Στοχαστικός Προγραμματισμός	52
4.7. Εύρωστος Προγραμματισμός	54
4.8. Εισαγωγή Κρυπτονομισμάτων στα VPP	56
4.8.1.Εισαγωγή	56
4.8.2.Τεχνικά Χαρακτηριστικά	57
4.8.2.1. Bitcoin	57
4.8.2.2. Ethereum	58

4.8.2.3.	Dogecoin	59
4.8.3.	Μοντελοποίηση	59
4.8.4.	Ενσωμάτωση στα VPP	59
4.8.4.1.	Πρόβλημα Στοχαστικού Προγραμματισμού	60
4.8.4.2.	Πρόβλημα Εύρωστου Προγραμματισμού	61
4.9.	Η Λειτουργία του VPP στην Αγορά Εξισορρόπησης	62

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

5.1.	Εισαγωγή στα Δίκτυα Μεταφοράς	67
5.2.	Βέλτιστη Ροή Ισχύος	67
5.3.	Ανάλυση Ροών Ισχύος	68
5.3.1.	Παραδοχές και Χαρακτηριστικά	68
5.3.2.	Μαθηματικό Υπόβαθρο και Συνθήκες Προβλήματος	68
5.4.	Περιορισμοί Δικτύου	70
5.4.1	Θερμικοί Περιορισμοί Γραμμών Μεταφοράς	70
5.5.	Γραμμικοποίηση Μη-Γραμμικών Σχέσεων	71
5.5.1.	Εισαγωγή	71
5.5.2.	Γραμμικοποίηση θερμικών ορίων των γραμμών μεταφοράς	72
5.5.3.	Γραμμικοποίηση εξισώσεων κόστους των θερμοηλεκτρικών μονάδων	74
5.5.4.	Γραμμικοποίηση μη-γραμμικών Εξισώσεων Ροής Ισχύος	74
5.5.4.1.	Quasi-Linear OPF	74
5.5.4.2.	Fully Linear OPF	76
5.5.4.3.	Warm-Started Fully Linear OPF	77

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ**

6.1.	Εισαγωγή	79
6.2.	Περιβάλλον Προγράμματος	79
6.2.1.	Περιβάλλον GAMS	79
6.2.2.	Περιβάλλον R Studio	80

6.2.3.Περιβάλλον της Συνολικής Προσομοίωσης	81
6.3. Αλγόριθμος Προσομοίωσης	82
6.3.1.Βελτιστοποίηση της Λειτουργίας του VPP	82
6.3.2.Συλλογή και Επεξεργασία Δεδομένων	83
6.3.3.Εκκαθάριση της Αγοράς της Επόμενης Ημέρας	83
6.3.4.Εξισορρόπηση του VPP	85
6.4. Τεχνική Διαδικασία Προσομοίωσης	85
6.4.1.Δεδομένα	85
6.4.2.Προσομοίωση και Εξαγωγή Αποτελεσμάτων	85

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**

7.1. Εισαγωγή	89
7.2. Δεδομένα του VPP	90
7.3. Δεδομένα Δικτύων	93
7.3.1.Δεδομένα Δικτύου 14 Ζυγών	93
7.3.2.Δεδομένα Δικτύου 30 Ζυγών	95
7.3.3.Δεδομένα Δικτύου 500 Ζυγών	98
7.4. Δεδομένα Γραμμικοποίησης	99
7.4.1.Δεδομένα Θερμοηλεκτρικών Μονάδων	99
7.4.1.1. Για το VPP	99
7.4.1.2. Για το Δίκτυο	100
7.4.2.Δεδομένα Θερμικών Ορίων Γραμμών Μεταφοράς	100
7.5. Αποτελέσματα Γραμμικοποίησης του VPP	101
7.6. Αποτελέσματα Γραμμικοποίησης του Δικτύου	102
7.6.1.Δίκτυο 14 Ζυγών	102
7.6.2.Δίκτυο 30 Ζυγών	102
7.6.3.Δίκτυο 500 Ζυγών	103
7.6.4.Σύγκριση και Συμπεράσματα	103
7.7. Αποτελέσματα Στοχαστικού Προγραμματισμού	104
7.7.1.Συμβατικών VPP χωρίς Εγκαταστάσεις Εξόρυξης Κρυπτονομισμάτων	104
7.7.2.VPP με Εγκαταστάσεις Εξόρυξης Κρυπτονομισμάτων	106

7.7.3.Συμπεράσματα	108
7.8. Αποτελέσματα Εύρωστου Προγραμματισμού	109
7.8.1.Συμβατικά VPP χωρίς Εγκαταστάσεις Εξόρυξης Κρυπτονομισμάτων	109
7.8.2.VPP με Εγκαταστάσεις Εξόρυξης Κρυπτονομισμάτων	110
7.8.3.Σύγκριση και Συμπεράσματα	111
7.9. Αποτελέσματα Δικτύου 14 Ζυγών	113
7.9.1.Διαμόρφωση Οριακής Τιμής Συστήματος	113
7.9.2. Εκκαθάριση Προσφοράς Συμβατικών VPP χωρίς Εγκαταστάσεις Εξόρυξης Κρυπτονομισμάτων	114
7.9.3.Εκκαθάριση Προσφοράς VPP με Εγκαταστάσεις Εξόρυξης Κρυπτονομισμάτων	116
7.9.4.Συμπεράσματα	118
7.10. Αποτελέσματα Δικτύου 30 Ζυγών	119
7.10.1. Διαμόρφωση Οριακής Τιμής Συστήματος	119
7.10.2. Εκκαθάριση Προσφοράς Συμβατικών VPP χωρίς Εγκαταστάσεις Εξόρυξης Κρυπτονομισμάτων	121
7.10.3. Εκκαθάριση Προσφοράς VPP με Εγκαταστάσεις Εξόρυξης Κρυπτονομισμάτων	123
7.10.4. Συμπεράσματα	125
7.11. Αποτελέσματα Δικτύου 500 Ζυγών	126
7.11.1. Διαμόρφωση Οριακής Τιμής Συστήματος	126
7.11.2. Εκκαθάριση Προσφοράς Συμβατικών VPPs χωρίς Εγκαταστάσεις Εξόρυξης Κρυπτονομισμάτων	128
7.11.3. Εκκαθάριση Προσφοράς VPP με Εγκαταστάσεις Εξόρυξης Κρυπτονομισμάτων	130
7.11.4. Συμπεράσματα	132
7.12. Αποτελέσματα Αγοράς Εξισορρόπησης	133
7.12.1. Αποτελέσματα Στοχαστικού Προγραμματισμού	133
7.12.2. Αποτελέσματα Εύρωστου Προγραμματισμού	145
7.12.3. Σύγκριση και Συμπεράσματα	154
7.13. Αξιολόγηση Επένδυσης Εγκαταστάσεων Εξόρυξης στα VPPs	155

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ**

8.1. Αντικείμενο Εργασίας	159
8.2. Συμπεράσματα	159

8.3.	Πιθανές Μελλοντικές Επεκτάσεις	161
------	--------------------------------	-----

	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	163
--	---------------------	-----

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α**

A.1	Συντομεύσεις – Ακρωνύμια	167
A.2	Αντιστοίχιση Ελληνικών και Αγγλικών Όρων	169
A.3	Επιπλέον Δεδομένα	171



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) ονομάζεται το σύνολο των εγκαταστάσεων (σταθμοί, υποσταθμοί, ρυθμιστικές μονάδες κ.α.) και των μέσων (ζυγοί, γραμμές μεταφοράς, μετασχηματιστές) που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή, μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας στους τελικούς καταναλωτές. Η βασική λειτουργία των ΣΗΕ έγκειται στην ικανότητα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας σε όλες τις περιοχές που υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατόν κόστος καθώς και τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις. Προϋπόθεση της καλής λειτουργίας των ΣΗΕ, αποτελεί η εξασφάλιση σταθερής συχνότητας, σταθερής τάσης και υψηλής αξιοπιστίας του συστήματος. Οι παραπάνω προϋποθέσεις απαιτούνται τόσο από τους καταναλωτές όσο και από τους παραγωγούς [1].

Τα ΣΗΕ περιλαμβάνουν τρία ξεχωριστά στάδια: την παραγωγή, την μεταφορά και την διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Καθώς οι μονάδες παραγωγής βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από τους καταναλωτές, η ηλεκτρική ενέργεια καλείται να διανύσει πολύ μεγάλες αποστάσεις μεταξύ της μονάδας παραγωγής και του σημείου κατανάλωσης. Ένα από τα προβλήματα των ΣΗΕ έγκειται στην δυσκολία αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες ποσότητες. Παρά τις ραγδαίες εξελίξεις που παρατηρούνται στον τομέα ανάπτυξης των μονάδων αποθήκευσης, η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας παραμένει κοστοβόρα. Ως αποτέλεσμα, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ενδείκνυται να πραγματοποιείται την στιγμή που υπάρχει η ανάλογη ζήτηση [2].

Ιστορικά, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γινόταν σε υψηλές τάσεις σε μεγάλους σταθμούς παραγωγής που χρησιμοποιούσαν ως πηγή ενέργειας ορυκτά καύσιμα. Τα πιο διαδεδομένα καύσιμα που χρησιμοποιούνται είναι το πετρέλαιο, ο λιγνίτης και το φυσικό αέριο. Λόγω οικολογικών δεσμεύσεων, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας απομακρύνεται πλέον από την χρήση λιγνίτη καθώς επιφέρει την μεγαλύτερη οικολογική επιβάρυνση. Επιπλέον, πρόσφατες δεσμεύσεις από την Ευρωπαϊκή Ένωση προβλέπουν την επιπλέον μείωση της παραγωγής από ρυπογόνες μονάδες με στόχο το 2050 τα εργοστάσια παραγωγής που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα να παράγουν μόνο το 15% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας του Ευρωπαϊκού δικτύου. Η απομάκρυνση από την χρήση ρυπογόνων μονάδων παραγωγής δεν παρατηρείται μόνο στην Ευρώπη αλλά παγκοσμίως. Συγκεκριμένα, παρατηρείται μια έντονη προσπάθεια για την αντικατάσταση συμβατικών μονάδων παραγωγής από ΑΠΕ οι οποίες εκμεταλλεύονται τον ήλιο, τον αέρα κ.α. για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [3], [4].

Η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται μέσω γραμμών υψηλής και υπερυψηλής τάσης από τις μονάδες παραγωγής έως τους υποσταθμούς μέσης τάσης. Τα δίκτυα μέσης τάσης συνδέονται με τους υποσταθμούς διανομής και τις γραμμές χαμηλής τάσης [2].

Οι εγκαταστάσεις παραγωγής και μεταφοράς είναι οικονομικά εξαρτημένες, με αποτέλεσμα ο τεχνικός και οικονομικός σχεδιασμός τους να είναι ενιαίος. Οι παράγοντες που καθορίζουν την

διαμόρφωση των ΣΗΕ είναι το μέγεθος της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και η χωροταξική κατανομή της. Ο σχεδιασμός των ΣΗΕ γίνεται βάσει προβλέψεων της μελλοντικής ζήτησης των εξυπηρετούμενων περιοχών [2].

Τα υπάρχοντα ΣΗΕ είναι τριφασικά εναλλασσόμενου ρεύματος και συχνότητας 50Hz για τα Ευρωπαϊκά δίκτυα και 60Hz για τα δίκτυα της Αμερικής. Οι γραμμές μεταφοράς καθώς και οι γραμμές διανομής μεσαίας τάσης αποτελούνται από τρεις αγωγούς φάσης ενώ οι γραμμές χαμηλής τάσης ενδέχεται να έχουν επιπλέον έναν ουδέτερο αγωγό [5].

## 1.2 ΑΓΟΡΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι αγορές ηλεκτρικής ενέργειας ξεκίνησαν να εμφανίζονται σε όλο τον κόσμο στις αρχές της δεκαετίας του 1990 [6]. Αρχικά οι αγορές αποτελούνταν από λίγους μεγάλους σταθμούς παραγωγής. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την διαμόρφωση συνθηκών ολιγοπωλίου κατά το οποίο οι παραγωγοί είχαν πολύ μεγάλη δύναμη στην διαμόρφωση της τελικής τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος [6]. Με το πέρασμα των χρόνων, η συμμετοχή περισσότερων παραγωγών καθώς και η συνεχής διείσδυση ΑΠΕ οδήγησε στην διαμόρφωση μιας ελεύθερης αγοράς ενέργειας στην οποία οι επιχειρήσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας προσφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν στην χονδρική τιμή που θεωρητικά αντιστοιχεί στο μεταβλητό κόστος της κάθε επιχείρησης.

Μια σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ της αγοράς ενέργειας και άλλων ελεύθερων αγορών αποτελεί η ύπαρξη αυστηρών φυσικών περιορισμών που πρέπει να ικανοποιούνται σε όλη την διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος μεταφοράς. Για τον λόγο αυτό κάθε αγορά ενέργειας επιβλέπεται από έναν αυτόνομο φορέα ο οποίος είναι υπεύθυνος για την ομαλή λειτουργία της αγοράς αλλά και του ηλεκτρικού δικτύου κατά επέκταση [6].

Η αγορά ενέργειας αποτελείται από τις εξής υπό-αγορές: την χονδρική αγορά προθεσμιακών προϊόντων, την αγορά της επόμενης ημέρας, την ενδοημερήσια αγορά καθώς και την αγορά εξισορρόπησης.

## 1.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Η ανάλυση ροής ισχύος αναφέρεται στον υπολογισμό των τάσεων, των ρευμάτων και της ροής ενεργού και άεργου ισχύος σε όλα τα σημεία ενός ΣΗΕ υπό κανονικές ή προβλεπόμενες συνθήκες φόρτισης και λειτουργίας [2]. Η επίλυση του προβλήματος ροής ισχύος είναι αναγκαία για την εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας των ΣΗΕ. Επιπλέον, η ανάλυση ροής ισχύος πρέπει να συμπεριλαμβάνεται κατά τον σχεδιασμό οποιασδήποτε μελλοντικής επέκτασης του δικτύου [2]. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την ανάλυση ροής ισχύος θα δοθούν στο Κεφάλαιο 5 κατά την μοντελοποίηση των δικτύων μεταφοράς.

## 1.4 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ

Η οικονομική κατανομή φορτίου αναφέρεται στον προσδιορισμό της βέλτιστης ισχύος εξόδου των μονάδων παραγωγής για την εξυπηρέτηση του συνολικού φορτίου ενός ΣΗΕ με το ελάχιστο κόστος παραγωγής. Η επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής του φορτίου έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους λειτουργίας του ΣΗΕ. Για την επίτευξη του ελάχιστου κόστους εκκαθάρισης καθορίζεται κατάλληλα η παραγωγή της ενεργού και της αέργου ισχύος κάθε σταθμού παραγωγής λαμβάνοντας υπόψιν και τους τεχνικούς περιορισμούς του δικτύου. Οι περιορισμοί του δικτύου περιλαμβάνουν τα θερμικά όρια των γραμμών μεταφοράς, τα επιθυμητά όρια τάσεων στους κόμβους του δικτύου καθώς και τα τεχνικά όρια των μονάδων παραγωγής [2].

## 1.5 ΕΙΚΟΝΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Λόγω της δυσκολίας αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, κάθε χρονική στιγμή η προσφορά πρέπει να ισούται με την ζήτηση. Αυτός ο περιορισμός καθιστά ιδιαίτερα δύσκολη την ατομική συμμετοχή μικρών μονάδων παραγωγής και ιδιαίτερα των ΑΠΕ καθώς η παραγωγή τους μπορεί να μεταβληθεί ανεξέλεγκτα κατά την διάρκεια της ημέρας λόγω των αβέβαιων καιρικών συνθηκών. Επομένως, για την καλύτερη εκμετάλλευση των ΑΠΕ ήταν αναγκαία η εύρεση ενός νέου προτύπου που μπορεί να διαχειριστεί τόσο τις αλλαγές στην πλευρά της προσφοράς, λόγω αλλαγών της παραγωγής των ΑΠΕ, όσο και τις αλλαγές στην πλευρά της ζήτησης από μεταβολές στην κατανάλωση των φορτίων. Μια πιθανή λύση του παραπάνω προβλήματος βρέθηκε στους εικονικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Virtual Power Plant – VPP). Τα VPPs είναι οικονομικές οντότητες που διαχειρίζονται μονάδες παραγωγής και μονάδες κατανάλωσης. Ο κύριος σκοπός των VPPs είναι να συντονίζουν την παραγωγή και την κατανάλωση των στοιχείων που διαχειρίζονται με στόχο την μεγιστοποίηση του συνολικού οικονομικού κέρδους. Με αυτό τον τρόπο τα VPPs διευκολύνουν την συμμετοχή των μονάδων διανεμημένης παραγωγής στην αγορά ενέργειας επιτρέποντάς τους να συμμετάσχουν ως ένας ενιαίος παραγωγός [7], [8].

## 1.6 ΚΡΥΠΤΟΝΟΜΙΣΜΑΤΑ

Η ιδέα των κρυπτονομισμάτων (cryptocurrencies) εμφανίστηκε για πρώτη φορά την δεκαετία του 1980 στην Αμερική και στην Ολλανδία με το πρώτο διαδικτυακό νόμισμα Digicash να εκδίδεται το 1990 χωρίς όμως την επιτυχία των μεταγενέστερων cryptocurrencies. Το πρώτο ευρέως αποδεκτό cryptocurrency είναι το Bitcoin το οποίο εισηγήθηκε στην αγορά το 2009 μετά την ανώνυμη κατάθεση του άρθρου “Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System” από τον/τους Satoshi Nakamoto το 2008 [9]. Η αρχή λειτουργίας του Bitcoin και των μεταγενέστερων cryptocurrencies βασίζεται στην τεχνολογία μπλοκ αλυσίδα ή block chain, η οποία επιτρέπει την κατασκευή αποκεντρωμένων (decentralized) νομισμάτων καθώς όλες οι συναλλαγές πραγματοποιούνται απευθείας μεταξύ των χρηστών χωρίς την ανάγκη κάποιου μεσάζοντα. Όλες οι συναλλαγές καταγράφονται σε ένα δημόσια κατανεμημένο ημερολόγιο γνωστό ως block chain, το οποίο εγγυάται την ασφάλή μετακίνησης.

Τα τελευταία χρόνια, παρατηρείται μια ραγδαία αύξηση στο παγκόσμιο ενδιαφέρον για τα cryptocurrencies. Σε αντίθεση με άλλα νομίσματα, τα cryptocurrencies έχουν τραβήξει το ενδιαφέρον

των επενδυτών που αναζητούν να επωφεληθούν από την αύξηση της διακινούμενης αξίας των cryptocurrencies καθώς και των επενδυτών που αναζητούν να επωφεληθούν από την εξόρυξη και αργότερα μεταπώλησή τους στις οικονομικές αγορές. Σε αυτή την διπλωματική εργασία μελετάται κατά πόσον η εξόρυξη cryptocurrencies και η μεταπώλησή τους στις οικονομικές αγορές επηρεάζει την λειτουργία και κερδοφορία ενός VPP. Τα cryptocurrencies που εξετάζονται είναι: το Bitcoin (BTC), το Ethereum (ETH) και το Dogecoin. Η επιλογή των cryptocurrencies έγινε με βάση την δημοφιλία τους κατά την περίοδο εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

## 1.7 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία συντάχθηκε με στόχο να εξετάσει κατά πόσο η εισαγωγή εγκαταστάσεων εξόρυξης cryptocurrencies σε VPPs μπορεί να επηρεάσει την λειτουργία των VPPs και την κερδοφορία τους στην αγορά της επόμενης ημέρας και στην αγορά εξισορρόπησης ανάλογα με την μέθοδο προγραμματισμού που χρησιμοποιείται. Επιπλέον, κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας εξετάστηκε το κατά πόσον εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies μπορούν να λειτουργήσουν ως ελεγχόμενα φορτία για την καλύτερη εξισορρόπηση αστοχιών μεταξύ των δεσμεύσεων και της πραγματικής παραγωγής των VPPs στην αγορά εξισορρόπησης.

Στα πλαίσια της αναζήτησης απαντήσεων στα παραπάνω ερωτήματα, η παρούσα διπλωματική εργασία συμβάλλει ως εξής στην επέκταση της βιβλιογραφίας [7], [10]–[14]:

1. Εισάγει τις εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies στον προγραμματισμό των VPPs.
2. Επιτελεί αξιολόγηση των επενδύσεων σε εγκαταστάσεις εξόρυξης υπολογίζοντας το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την αποπληρωμή της επένδυσης ανάλογα με το cryptocurrency που εξορύσσεται.
3. Συμβάλει στην αναγνώριση πιθανής αδυναμίας στην αγορά εξισορρόπησης που μπορούν να εκμεταλλευτούν τα VPPs που διαθέτουν εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies.

## 1.8 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα εργασία οργανώνεται σε εννέα κεφάλαια:

- ✓ Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται μια εισαγωγή στις μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούνται στο πειραματικό μέρος της παρούσας διπλωματικής.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται η δομή της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και αναφέρεται η μέθοδος που ακολουθείται για την εκκαθάριση της αγοράς και τον υπολογισμό της τιμής του συστήματος.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 4** αναφέρεται η δομή των VPPs και παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο της βέλτιστης λειτουργίας τους στην αγορά της επόμενης ημέρας και την αγορά εξισορρόπησης για την μεγιστοποίηση του κέρδους τους.

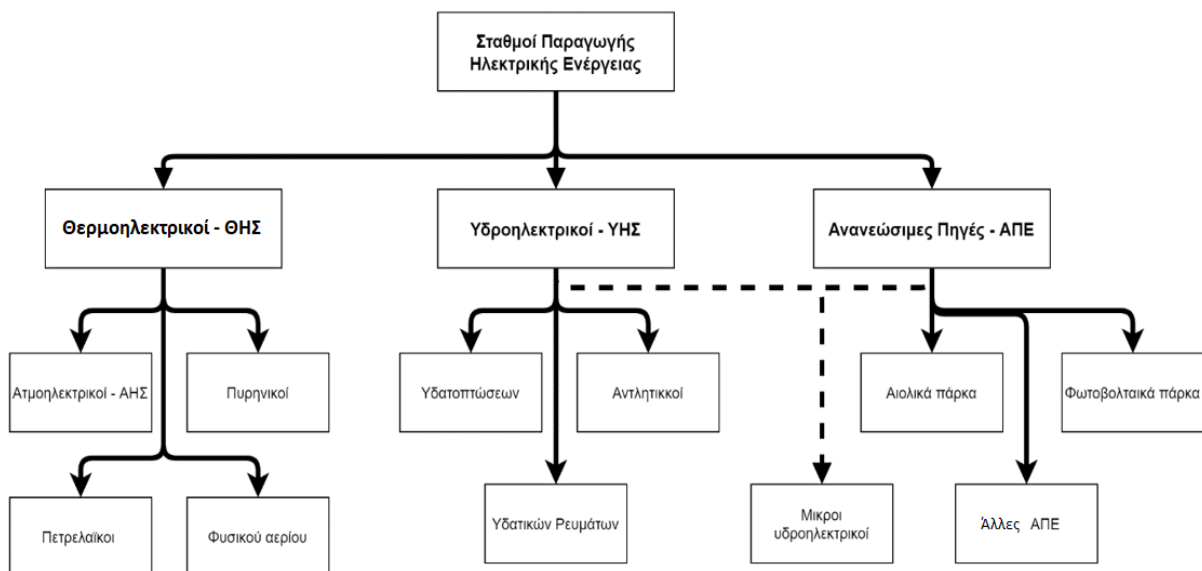
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο του δικτύου μεταφοράς και αναλύεται ο μέθοδος γραμμικοποίησης που χρησιμοποιείται για την προσέγγιση των μη γραμμικών μεγεθών του προβλήματος.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 6** αναλύεται ο αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος που αναπτύχθηκε στα Κεφάλαια 4 και 5. Επίσης, περιγράφονται τα λογισμικά GAMS και RStudio που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του περιβάλλοντος της προσομοίωσης.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 7** παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των μοντέλων της προσομοίωσης που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 6.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 8** γίνεται μια σύνοψη της διπλωματικής εργασίας και προτείνονται τρόποι βελτίωσης καθώς και πιθανές μελλοντικές επέκτασεις της.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 9** παρουσιάζεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε σε όλη την διπλωματική εργασία.



## ΜΟΝΑΔΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αναφέρεται στη διαδικασία που απαιτείται για την μετατροπή μιας πρωτογενούς μορφής ενέργειας σε ηλεκτρική. Συνήθως μεταξύ της πρωτογενούς και της ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχει ένα ενδιάμεσο στάδιο κατά το οποίο η πρωτογενής ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική η οποία με την σειρά της μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Μέχρι σήμερα, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται σε μεγάλους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς με την καύση ορυκτών καυσίμων όπως ο λιγνίτης, ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, από υδροηλεκτρικούς σταθμούς με την ροή ή/και την πτώση των υδάτων, από πυρηνικούς σταθμούς με την σχάση πυρήνων και από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) [2], [15].



Σχήμα 2.1: Τύποι σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

## 2.2 ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1, στην κατηγορία των θερμοηλεκτρικών σταθμών παραγωγής εντάσσονται οι ατμοηλεκτρικοί σταθμοί, οι πυρηνικοί σταθμοί, οι πετρελαϊκοί σταθμοί καθώς και οι σταθμοί φυσικού αερίου.

Οι ατμοηλεκτρικοί και πυρηνικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούν τον ατμό ως μέσο για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας μέσω αμοστροβίλων η οποία σε επόμενο στάδιο μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω γεννητριών. Αντίθετα, οι ντιζελοηλεκτρικοί σταθμοί και οι αεριοστροβιλικό σταθμοί χρησιμοποιούν μηχανές εσωτερικής καύσης για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας και στη συνέχεια ηλεκτρικής ενέργειας [2].

## 2.3 ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Σε αντίθεση με τους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής, οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί δεν βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αλλά στην κινητική και δυναμική ενέργεια των υδάτων. Με χρήση υδροστροβίλων και γεννητριών επιτυγχάνεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας την ενέργεια που είναι αποθηκευμένη σε υδάτινα σώματα. Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 2.1, μπορούν να διαχωριστούν με βάση το είδος των υδάτων που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή. Συγκεκριμένα, διαχωρίζονται σε υδροηλεκτρικούς σταθμούς φυσικής ροής, σε σταθμούς ρυθμιζόμενης ροής και σε αντλητικούς σταθμούς [2].

Οι σταθμοί φυσικής ροής εκμεταλλεύονται την ενέργεια των διερχόμενων υδάτων που βρίσκονται στην ροή ενός ποταμού. Αντίθετα, οι σταθμοί ρυθμιζόμενης ροής χρησιμοποιούν το νερό που είναι αποθηκευμένο σε ταμιευτήρες, όπως τεχνητές λίμνες. Με την κατασκευή φραγμάτων και την δημιουργία τεχνητών λιμνών επιτυγχάνεται η δημιουργία υψομετρικής διαφοράς μεταξύ των υδάτων και του υδροστροβίλου και επομένως παράγεται ηλεκτρική ενέργεια με ελεγχόμενη υδατόπτωση.

Οι αντλητικοί σταθμοί λειτουργούν όπως και οι ρυθμιζόμενης ροής, δηλαδή μετατρέπουν την δυναμική ενέργεια της ελεγχόμενης υδατόπτωσης σε ηλεκτρική ενέργεια, με την επιπλέον δυνατότητα να αποταμιεύουν νερό από το χαμηλότερο επίπεδο στην υψηλότερη δεξαμενή για την χρήση του σε μελλοντική χρονική στιγμή όπου η ζήτηση θα είναι μεγαλύτερη. Λόγω της δυνατότητας άντλησης οι αντλητικοί σταθμοί έχουν μικρότερο βαθμό απόδοσης από τους σταθμούς ρυθμιζόμενης ροής αλλά είναι πολύ χρήσιμοι για το δίκτυο καθώς βοηθούν στην αξιοποίηση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [16].

## 2.4 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι πιο διαδεδομένες μονάδες παραγωγής που βασίζονται σε ΑΠΕ είναι οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί και τα αιολικά πάρκα. Παρόλα αυτά, σήμερα βρίσκονται σε λειτουργία σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούν ως πηγή τους τα θαλάσσια κύματα, τη βιομάζα, τη γεωθερμική ενέργεια καθώς και την υδραυλική ενέργεια. Στην παρούσα διπλωματική θα μελετηθούν μόνο οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί και τα αιολικά πάρκα που αποτελούν τις πιο συνηθισμένες εγκαταστάσεις ΑΠΕ.



### 2.4.1 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ

Οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί (ΦΣ) μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική. Η μετατροπή της ενέργειας γίνεται με τη βοήθεια των ηλιακών κυψελίδων οι οποίες εκμεταλλεύονται το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Οι ηλιακές κυψελίδες αποτελούνται από έναν ημιαγωγό ο οποίος μπορεί να είναι είτε μονοκρυσταλλικός ή πολυκρυσταλλικός. Οι ηλιακές κυψελίδες συνδέονται σε φωτοβολταϊκά πλαίσια ή panel τα οποία στην συνέχεια συνδέονται μεταξύ τους για τη δημιουργία ενός φωτοβολταϊκού σταθμού. Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο αναφέρεται στο φαινόμενο κατά το οποίο η πρόσπτωση του φωτός πάνω σε αγώγιμη επιφάνεια απελευθερώνει ηλεκτρόνια. Σε αντίθεση με άλλους τρόπους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τα φωτοβολταϊκά προσφέρουν έναν εύκολο και οικονομικό τρόπο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που δεν απαιτεί μεγάλη έκταση γης για την υλοποίησή του, το οποίο έχει συντελέσει στη ραγδαία αύξηση της χρήσης τους. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι ΦΣ παράγουν συνεχές ρεύμα και επομένως είναι απαραίτητη η μετατροπή σε εναλλασσόμενο ρεύμα πριν την σύνδεσή τους στο δίκτυο [2], [16].

Τα βασικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι τα ακόλουθα:

- Δεν έχουν κινούμενα μέρη με αποτέλεσμα να έχουν αθόρυβη παραγωγή
- Λειτουργούν αυτόνομα και δεν απαιτούν την παρουσία κάποιου χειριστή
- Παρουσιάζουν την μεγαλύτερη αξιοπιστία από τις μονάδες ΑΠΕ
- Έχουν μικρό κόστος λειτουργίας και συντήρησης
- Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής

### 2.4.2 ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ

Τα αιολικά πάρκα αποτελούνται από συστοιχίες ανεμογεννητριών που συνδέονται στον ίδιο ζυγό του συστήματος. Οι ανεμογεννήτριες (Α/Γ) μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανικό έργο το οποίο στην συνέχεια το μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω γεννητριών. Η ισχύς που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα του ανέμου. Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να διακριθούν σε μονοπτέρυγες, σε διπτέρυγες, τριπτέρυγες, κτλ, ανάλογα με τον αριθμό των πτερυγίων που διαθέτουν. Ο πιο συνηθισμένος τύπος ανεμογεννητριών σήμερα είναι ο τριπτέρυγος οριζόντιου άξονα [2].

Για την εγκατάσταση αιολικών πάρκων είναι απαραίτητη η ύπαρξη υψηλού αιολικού δυναμικού. Επομένως, πριν την εγκατάστασή τους απαιτείται η διερεύνηση των ευνοϊκότερων σημείων για την μεγιστοποίηση της παραγωγής. Επιπλέον, οι ανεμογεννήτριες δεν εγκαθίστανται κοντά σε κατοικημένες περιοχές, καθώς κατά την λειτουργία τους παράγουν θόρυβο, ενώ παράλληλα μελέτες έχουν υποδείξει ότι υπάρχει και μείωση της απόδοσής τους λόγω της μορφολογίας των κατοικημένων περιοχών [17].

## 2.5 ΜΟΝΑΔΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η ραγδαία αύξηση των ΑΠΕ και η ταχύτατη διεξόδυσή τους στα σύγχρονα ηλεκτρικά δίκτυα έχουν δημιουργήσει την ανάγκη αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας κατά τα χρονικά διαστήματα χαμηλής ζήτησης και τροφοδοσίας στις περιόδους αυξημένης ζήτησης. Τα βασικότερα οφέλη των μονάδων αποθήκευσης αποδίδονται στην εύκολη προσαρμογή τους στις ανάγκες του δικτύου σύμφωνα με τη σχέση προσφοράς και ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, μηχανισμοί αποθήκευσης

μπορούν να αντικαταστήσουν τη λειτουργία ενός σταθμού αιχμής, ο οποίος αποτελεί υψηλό κόστος για τον διαχειριστή. Επιπλέον, οι συσκευές αποθήκευσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξισορρόπηση της παραγωγής των ΑΠΕ που δεν κατάφεραν να παράγουν τη συμφωνημένη ηλεκτρική ισχύ. Οι μονάδες αποθήκευσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την αποφυγή υπερθέρμανσης των θερμοηλεκτρικών μονάδων παραγωγής. Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνώνται δύο μονάδες αποθήκευσης: οι μπαταρίες και τα αντλιοστάσια.

## ΑΓΟΡΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι αγορές ηλεκτρικής ενέργειας ξεκίνησαν να εμφανίζονται σε διάφορες χώρες του κόσμου στις αρχές της δεκαετίας του 1990 [6]. Αρχικά οι αγορές αποτελούνταν από λίγους μεγάλους σταθμούς παραγωγής. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη διαμόρφωση συνθηκών ολιγοπωλίου κατά το οποίο οι παραγωγοί είχαν πολύ μεγάλη δύναμη στη διαμόρφωση της τελικής τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος [6]. Με το πέρασμα των χρόνων, η εισαγωγή περισσότερων παραγωγών και η διείσδυση ΑΠΕ οδήγησε στη διαμόρφωση μιας ελεύθερης αγοράς ενέργειας στην οποία οι επιχειρήσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας προσφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν στη χονδρική τιμή που θεωρητικά αντιστοιχεί στο μεταβλητό κόστος της κάθε μονάδας παραγωγής.

Μια σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ της αγοράς ενέργειας και άλλων ελεύθερων αγορών αποτελεί η ύπαρξη αυστηρών φυσικών περιορισμών που πρέπει να ικανοποιούνται κάθε χρονική στιγμή που βρίσκεται σε λειτουργία το σύστημα μεταφοράς. Για τον παραπάνω λόγο 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.

Από την χονδρική αγορά αγοράζουν ηλεκτρική ενέργεια άλλες ανεξάρτητες επιχειρήσεις γνωστές ως προμηθευτές ηλεκτρικής ενέργειας. Οι προμηθευτές με τη σειρά τους μεταπωλούν την ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές. Οι τιμές στην αγορά ενέργειας καθορίζονται κατά κύρια βάση μέσω του ανταγωνισμού. Η λειτουργία της αγοράς ενέργειας εποπτεύεται από μια ανεξάρτητη ρυθμιστική αρχή. Στην περίπτωση της Ελλάδας αυτή η αρχή είναι η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) [1]. Μερικές από τις αρμοδιότητες της ΡΑΕ αφορούν την 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 [18].

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία θα παρουσιαστεί η δομή των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας υπό το Ευρωπαϊκό μοντέλο το οποίο επιβλέπεται από τον Οργανισμό για τη Συνεργασία των Ρυθμιστικών Αρχών Ενέργειας (Agency for the Cooperation of Energy Regulators - ACER) [19].

## 3.2 ΑΓΟΡΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### 3.2.1 Δομή Αγοράς

Για την επίτευξη του ασφαλούς εφοδιασμού και της οικονομικής βελτιστοποίησης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, η αγορά ενέργειας διαχωρίζεται στις εξής υποκατηγορίες: στη χονδρική αγορά προθεσμιακών προϊόντων, στην αγορά της επόμενης ημέρας, στην ενδοημερήσια αγορά και στην αγορά εξισορρόπησης [20]. Η διαχείριση των τριών πρώτων αγορών διαφέρει από χώρα σε χώρα ενώ η αγορά εξισορρόπησης αποτελεί αποκλειστική αρμοδιότητα του διαχειριστή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Για παράδειγμα, στην Ελλάδα, η λειτουργία των τριών πρώτων αγορών έχει ανατεθεί στο Ελληνικό Χρηματιστήριο Ενέργειας, ενώ η Αγορά Εξισορρόπησης είναι αποκλειστική αρμοδιότητα του ΑΔΜΗΕ. Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται η χρονική ακολουθία των αγορών σύμφωνα με το μοντέλο-στόχο της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

### 3.2.2 Χονδρική Αγορά Προθεσμιακών Προϊόντων (Forward Market)

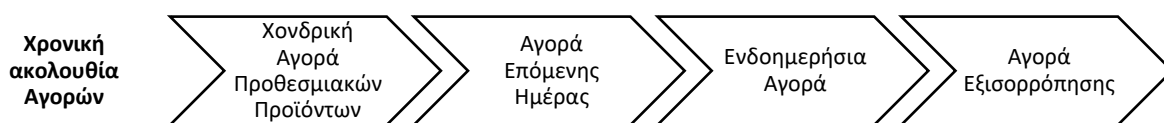
Στην χονδρική αγορά προθεσμιακών προϊόντων (forward market), η οποία μετονομάστηκε πρόσφατα σε ενεργειακή χρηματοπιστωτική αγορά, επιτρέπεται στους συμμετέχοντες να συνάπτουν συμβάσεις αγοράς και/ή πώλησης με υποχρέωση φυσικής παράδοσης σε προκαθορισμένη χρονική στιγμή [19]. Δεσμεύσεις στη χονδρική αγορά προθεσμιακών προϊόντων μπορεί να έχουν φυσική παράδοση από μια εβδομάδα έως και έναν χρόνο [7].

### 3.2.3 Αγορά της Επόμενης Ημέρας (Day-ahead Market)

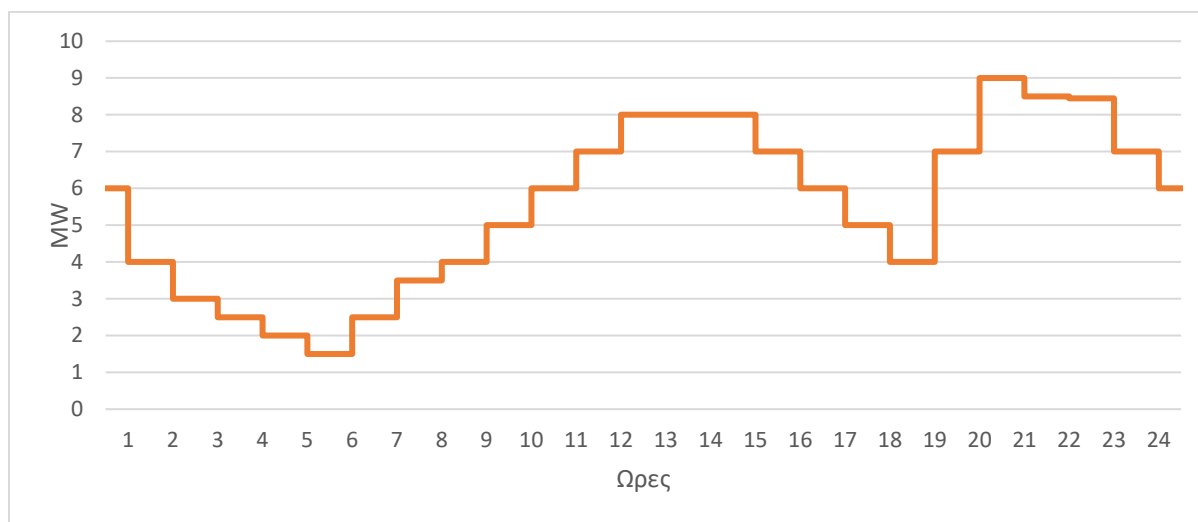
Στην αγορά της επόμενης ημέρας (day-ahead market), οι συμμετέχοντες υποβάλλουν εντολές συναλλαγών με υποχρέωση φυσικής παράδοσης την επόμενη ημέρα. Στην αγορά επόμενης ημέρας δηλώνονται επίσης και οι ποσότητες ενέργειας που έχουν δεσμευτεί μέσω της χονδρικής αγοράς προθεσμιακών προϊόντων.

Η αγορά επόμενης ημέρας λειτουργεί καθημερινά. Κατά τη διάρκεια της προηγούμενης ημερολογιακής ημέρας, παραγωγοί και καταναλωτές αγοράζουν και πωλούν ηλεκτρική ενέργεια διακριτά για κάθε αγοραία χρονική μονάδα της ημέρας με βάση προβλέψεις που έχουν στη διάθεσή τους. Οι προβλέψεις περιλαμβάνουν την πρόβλεψη παραγωγής, την πρόβλεψη ζήτησης καθώς και την πρόβλεψη της τιμής της αγοράς της επόμενης ημέρας. Σύμφωνα με τα ορισμένα από τον κανονισμό Capacity Allocation and Congestion Management (CACM), η αγορά αυτή λειτουργεί από τον ορισμένο διαχειριστή αγοράς της κάθε χώρας [21].

Το αποτέλεσμα της αγοράς της επόμενης ημέρας αποτελεί το πρόγραμμα αγοράς που αντιστοιχεί στην ενέργεια που έχει αγοραστεί από τους προμηθευτές ή που έχει πωληθεί από τους παραγωγούς ανά μονάδα παραγωγής με χρονική στιγμή παράδοσης την επόμενη ημέρα. Αθροίζοντας το αποτέλεσμα της αγοράς επόμενης ημέρας μπορεί να προσδιοριστεί το συνολικό πόσο ενέργειας που έχει δεσμευτεί για φυσική παράδοση για το χρονικό διάστημα των επόμενων 24 ωρών [21]. Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται ένα τυπικό συνολικό πρόγραμμα αγοράς της επόμενης ημέρας.



Σχήμα 3.1: Χρονική ακολουθία των αγορών σύμφωνα με το μοντέλο-στόχο.



Σχήμα 3.2: Ενδεικτικό πρόγραμμα αγοράς επόμενης ημέρας (day-ahead market schedule)

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.

### 3.2.4 Ενδοημερήσια Αγορά (Intraday Market)

Στην ενδοημερήσια αγορά οι συμμετέχοντες μπορούν να υποβάλλουν εντολές συναλλαγών για φυσική παράδοση την ίδια ημέρα, μετά τη λήξη της προθεσμίας υποβολής εντολών συναλλαγών στην αγορά επόμενης ημέρας. Όπως και στην αγορά επόμενης ημέρας, έτσι και στην ενδοημερήσια αγορά λαμβάνονται υπόψη οι ποσότητες ενέργειας που έχουν δεσμευτεί μέσω διενέργειας συναλλαγών επί προθεσμιακών προϊόντων ηλεκτρικής ενέργειας, τα αποτελέσματα της αγοράς επόμενης ημέρας, καθώς και τυχόν περιορισμοί που έχουν προκύψει από την αγορά εξισορρόπησης.

Η κύρια χρήση της ενδοημερήσιας αγοράς είναι η εκτέλεση συναλλαγών από τους συμμετέχοντες της αγοράς ενέργειας προκειμένου να ελαχιστοποιήσουν τις αποκλίσεις της καθαρής θέσης τους που έχουν προκύψει από τις συναλλαγές τους σε όλες τις αγορές ενέργειας [14].

Οι αποκλίσεις στην πλευρά των παραγωγών προκύπτουν κυρίως από σφάλματα στις προβλέψεις των ανανεώσιμων μονάδων παραγωγής. Αντίθετα, στην πλευρά των καταναλωτών και ως επέκταση των προμηθευτών, οι κυριότερες αποκλίσεις προκύπτουν από αλλαγές στη ζήτηση κατά τη διάρκεια της ημέρας [21].

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η λειτουργία της ενδοημερήσιας αγοράς αποτελεί μικρό ποσοστό της συνολικής ενέργειας που διακινείται στην χονδρική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας (wholesale market).

### 3.2.5 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 κάθε φυσική παράδοση πρέπει να επαληθεύονται όλοι οι περιορισμοί του δικτύου [7]. Το παραπάνω έργο συντελείται στην αγορά εξισορρόπησης (balancing market) με σκοπό την εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του ηλεκτρικού δικτύου.

Στο Ευρωπαϊκό πρότυπο, η αγορά εξισορρόπησης βασίζεται στην αρχή του κεντρικού προγραμματισμού και κατανομής ανά μονάδα. Ο διαχειριστής του συστήματος καλείται να επιλέξει με βάση έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης τις οικονομικότερες προσφορές που ικανοποιούν τους περιορισμούς του δικτύου.

Το πρώτο στάδιο της εξισορρόπησης του συστήματος εξασφαλίζει ότι στο σύστημα υπάρχει επαρκής διαθέσιμη ισχύς για την κάλυψη υπηρεσιών εξισορρόπησης σύμφωνα με τις εκτιμήσεις του διαχειριστή του συστήματος. Σε περίπτωση που πρέπει να ληφθεί κάποια πράξη, ο διαχειριστής εκδίδει τις απαραίτητες εντολές προς τις μονάδες που παρέχουν υπηρεσίες εξισορρόπησης. Οι μονάδες που παρέχουν υπηρεσίες εξισορρόπησης υποβάλλουν προσφορές στην αγορά ανά μονάδα, ανά ζώνη φορτίου και ανά σύνορο διασύνδεσης με το δίκτυο [19], [20].

Η αγορά εξισορρόπησης πραγματοποιείται μέσω τριών επιμέρους αγορών: την αγορά ισχύος εξισορρόπησης, την αγορά ενέργειας εξισορρόπησης και την αγορά εκκαθάρισης αποκλίσεων. Οι συμμετέχοντες στην αγορά εξισορρόπησης έχουν υποχρέωση υποβολής προσφορών με υποχρέωση φυσικής παράδοσης για το σύνολο της διαθέσιμης ισχύος τους, τόσο στην αγορά ενέργειας εξισορρόπησης όσο και στην αγορά ισχύος εξισορρόπησης.

Η αγορά ισχύος εξισορρόπησης έχει ως στόχο την εξασφάλιση των απαραίτητων πόρων εξισορρόπησης πριν τον πραγματικό χρόνο. Η επιλογή των μονάδων εξισορρόπησης γίνεται με σκοπό την εξασφάλιση της ασφαλούς λειτουργίας του συστήματος.

Η αγορά ενέργειας εξισορρόπησης δρα σε πραγματικό χρόνο σε δεκαπεντάλεπτα διαστήματα και ορίζει ποιες μονάδες εξισορρόπησης πρέπει να τεθούν σε λειτουργία για την εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του συστήματος.

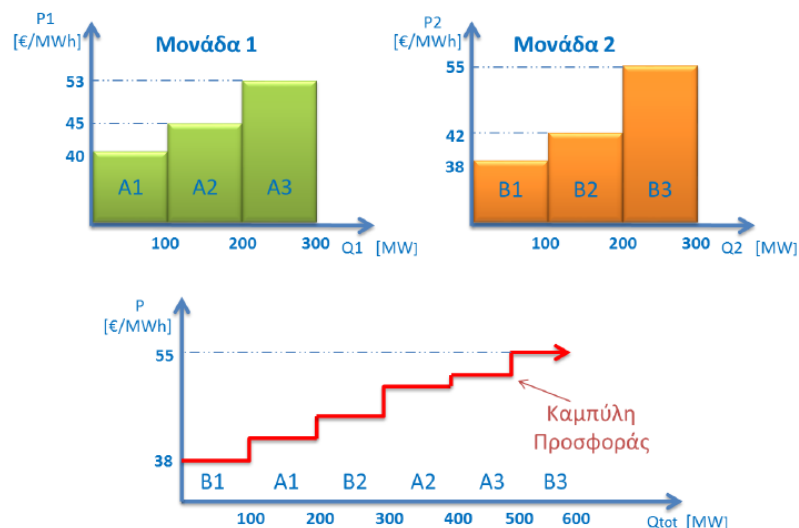
Η αγορά εκκαθάρισης αποκλίσεων αποσκοπεί στον επιμερισμό του κόστους σε όλες τις μονάδες που προκάλεσαν αποκλίσεις στον πραγματικό χρόνο σε σχέση με τις υλικές τους δεσμεύσεις στις αγορές ενέργειας. Κατά τη διαδικασία εκκαθάρισης λαμβάνεται υπόψη και η κατάσταση του συστήματος καθώς και οι τιμές των προσφορών εξισορρόπησης που ενεργοποιήθηκαν για την εξισορρόπηση του δικτύου για κάθε δεκαπεντάλεπτη περίοδο εκκαθάρισης [19], [20].

### 3.3 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΟΡΙΑΚΗΣ ΤΙΜΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ (ΟΤΣ)

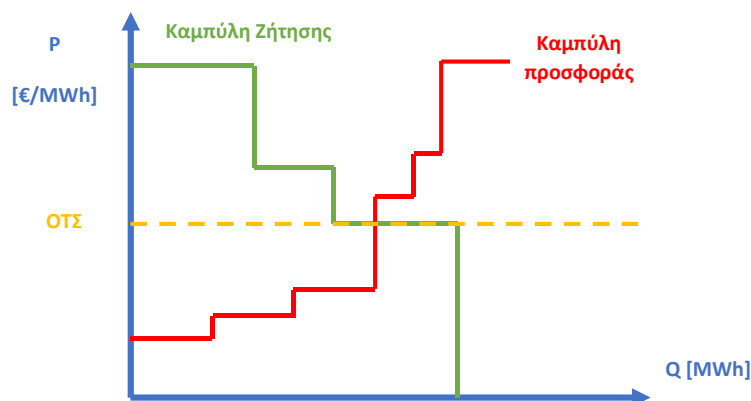
Η οριακή τιμή συστήματος (ΟΤΣ) (System Marginal Price (SMP) ή Market Clearing Price (MCP)) αποτελεί την τιμή στην οποία εκκαθαρίζεται η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Η οριακή τιμή συστήματος διαμορφώνεται με βάση την προσφορά και τη ζήτηση. Για τη διαμόρφωση της ΟΤΣ συνδυάζονται τόσο η τιμή στην οποία διατίθενται οι παραγωγοί να προσφέρουν ενέργεια αλλά και η ποσότητα που προσφέρει η κάθε μονάδα.

Ο υπολογισμός της ΟΤΣ γίνεται αρχικά με την κατάταξη των προσφορών σε αύξουσα σειρά, ξεκινώντας από την χαμηλότερη προσφερόμενη τιμή για μια συγκεκριμένη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας και καταλήγοντας στην υψηλότερη προσφερόμενη τιμή. Με αυτόν τον τρόπο κατασκευάζεται η καμπύλη προσφοράς.

Η οριακή τιμή συστήματος βρίσκεται στο σημείο τομής της καμπύλης προσφοράς με την καμπύλη ζήτησης. Επομένως, η ΟΤΣ ισούται με την τιμή προσφοράς της πιο ακριβής μονάδας που πρέπει να λειτουργήσει για την κάλυψη της ζήτησης. Οι παραγωγοί που προφέρουν ενέργεια σε τιμή χαμηλότερη της ΟΤΣ επωφελούνται καθώς ανταμείβονται υψηλότερη τιμή από αυτή που ήταν διατεθειμένοι να πουλήσουν. Αντίθετα, παραγωγοί που προσέφεραν ενέργεια σε υψηλότερη της ΟΤΣ τίθενται εκτός λειτουργίας για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα καθώς η ζήτηση έχει καλυφθεί από τις υπόλοιπες μονάδες παραγωγής.



Σχήμα 3.3: Καμπύλη προσφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [22]



Σχήμα 3.4: Εύρεση ΟΤΣ από διάγραμμα προσφοράς και ζήτησης

### 3.3.1 Καμπύλη Προσφοράς

Για την κατασκευή της καμπύλης προσφοράς είναι απαραίτητο να είναι γνωστές οι προσφορές των παραγωγών ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, από το Σχήμα 3.3 είναι φανερό πως οι προσφορές των παραγωγών διαφέρουν μεταξύ τους. Οι διαφορές αυτές οφείλονται στα χαρακτηριστικά των μονάδων παραγωγής και συγκεκριμένα στο μέγεθος και στο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της κάθε μονάδας [23].

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. Για παράδειγμα, ένα σταθερό κόστος μιας μονάδας παραγωγής μπορεί να είναι η αποπληρωμή κάποιου δανείου που χρησιμοποιήθηκε για την αναβάθμιση του σταθμού. Σε αντίθεση, τα μεταβλητά κόστη μεταβάλλονται κατά τη λειτουργία της μονάδας και εξαρτώνται από το ύψος της παραγωγής. Το πιο συνηθισμένο μεταβλητό κόστος στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι το κόστος καυσίμων (fuel cost).

Καθώς ο παραγωγός δεν μπορεί να μεταβάλει τα σταθερά κόστη της παραγωγής του, τουλάχιστον στο σύντομο μέλλον, τα κόστη αυτά δεν επηρεάζουν τη βραχυπρόθεσμη παραγωγή της μονάδας. Επομένως, ένας παραγωγός ηλεκτρικής ενέργειας προγραμματίζει την παραγωγή της μονάδας του βάσει του κόστους λειτουργίας της. Δηλαδή εξετάζει αν η παραγωγή μιας ακόμα kWh επιφέρει περισσότερα έσοδα από το κόστος παραγωγής της. Στην περίπτωση που η αύξηση της παραγωγής οδηγεί σε αύξηση των εσόδων, τότε ο παραγωγός αυξάνει την παραγωγή του. Η παραπάνω έννοια είναι γνωστή ως οριακό κέρδος (marginal revenue) ή οριακό κόστος (marginal cost) και είναι ο κυριότερος παράγοντας που επηρεάζει την παραγωγή μιας μονάδας στο βραχυπρόθεσμο μέλλον [23].

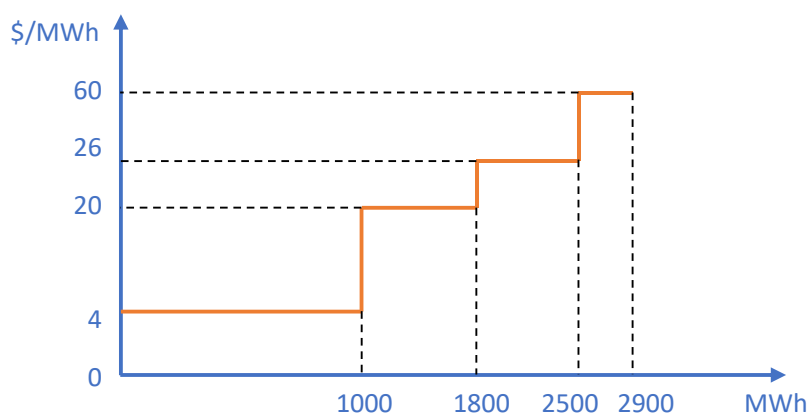
Το οριακό κέρδος ενός παραγωγού αντιστοιχεί στο κέρδος που θα του επιφέρει η παραγωγή μιας ακόμα kWh. Επομένως, στην περίπτωση της αγοράς ενέργειας το οριακό κέρδος θα ισούται με την τιμή της αγοράς, δηλαδή την ΟΤΣ. Το οριακό κόστος παραγωγής ισούται με το επιπλέον κόστος που θα επιφέρει η αύξηση της παραγωγής. Το οριακό κόστος παραγωγής διαφέρει μεταξύ των μονάδων παραγωγής και καθορίζει ποιες μονάδες θα τεθούν σε λειτουργία.

Αν το μεταβλητό κόστος εξαρτάται αποκλειστικά από το κόστος του καυσίμου που χρησιμοποιεί κάθε μονάδα παραγωγής, τότε το πρόβλημα της κοστολόγησης κάθε μονάδας παραγωγής εξαρτάται αποκλειστικά από την απόδοσή της και από το είδος του καυσίμου που χρησιμοποιεί. Με βάση τα παραπάνω όλες οι μονάδες παραγωγής μπορούν να καταταχθούν με βάση το οριακό τους κόστος. Στο Σχήμα 3.5 φαίνεται ένα παράδειγμα προσφοράς από τέσσερις μονάδες παραγωγής.

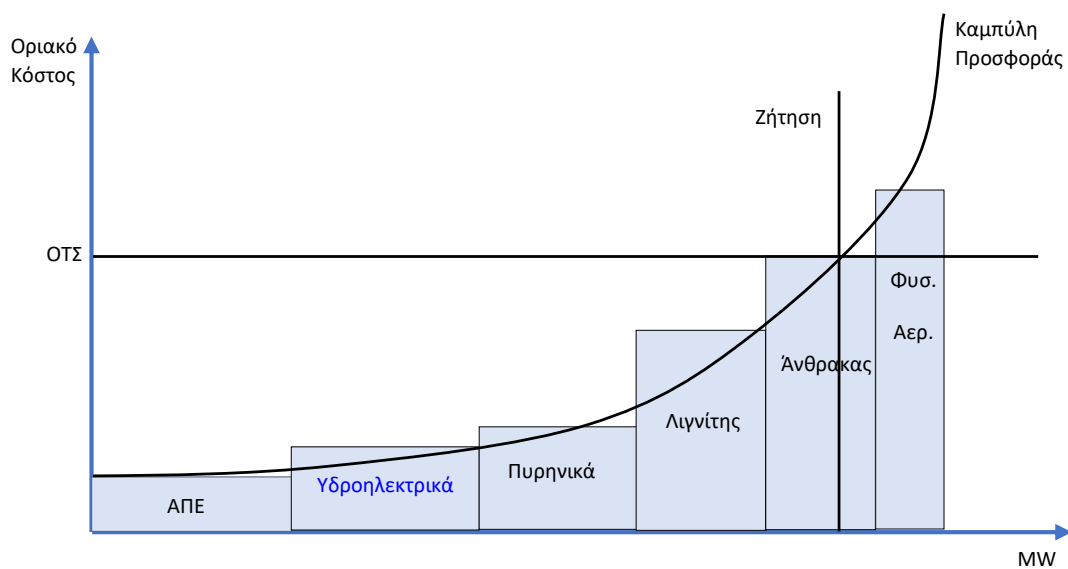
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η διακριτή φύση της καμπύλης ζήτησης. Από την καμπύλη του Σχήματος 3.5 προκύπτει ότι δεν μπορεί να υπάρξει παραγωγή σε τιμή μικρότερη των 4 \$/MWh καθώς δεν υπάρχει παραγωγός που μπορεί να παράγει σε τόσο χαμηλή τιμή. Επιπλέον, φαίνεται ότι το συγκεκριμένο σύστημα παραγωγής δεν μπορεί να παράγει ενέργεια μεγαλύτερη από 2900 MWh.

Ένα πιο αντιπροσωπευτικό παράδειγμα φαίνεται στο Σχήμα 3.6.





Σχήμα 3.5: Παράδειγμα καμπύλης προσφοράς

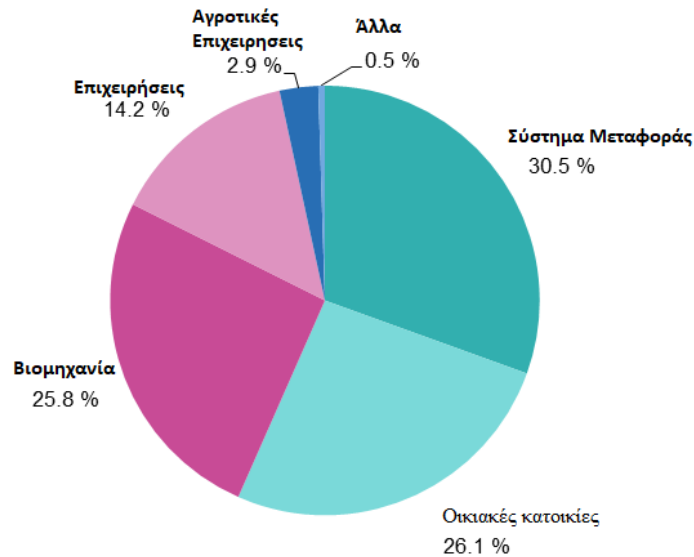


Σχήμα 3.6: Καμπύλη Προσφοράς

### 3.3.2 Καμπύλη Ζήτησης

#### 3.3.2.1 Εισαγωγή στην Καμπύλη Ζήτησης

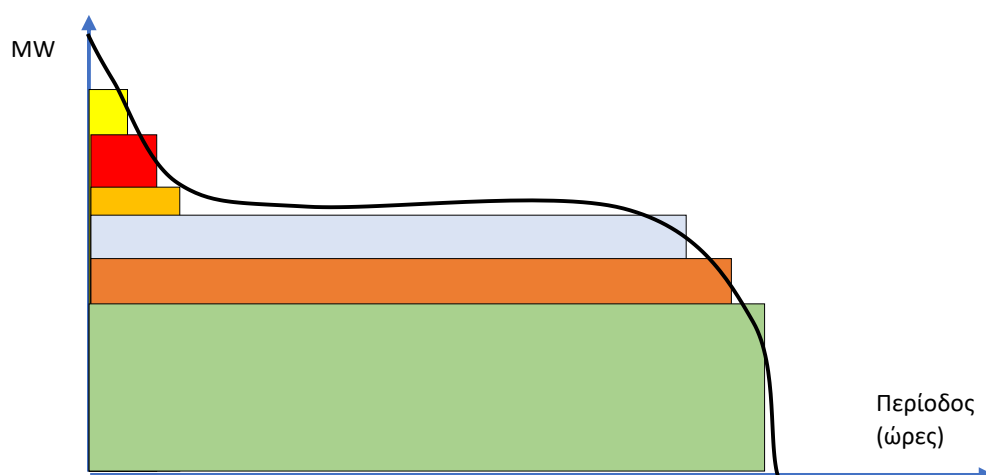
Η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια αποτελείται από το άθροισμα της ζήτησης όλων των καταναλωτών, δηλαδή των βιομηχανιών, των κατοικιών, και των επιχειρήσεων. Σύμφωνα με στοιχεία της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ο μεγαλύτερος καταναλωτής ηλεκτρικής ενέργειας είναι η βιομηχανίες που αντιστοιχούν στο 25.8% της συνολικής ζήτησης. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στο Σχήμα 3.7 αντιστοιχούν στη ζήτηση του Ευρωπαϊκού δικτύου το 2018 [24].



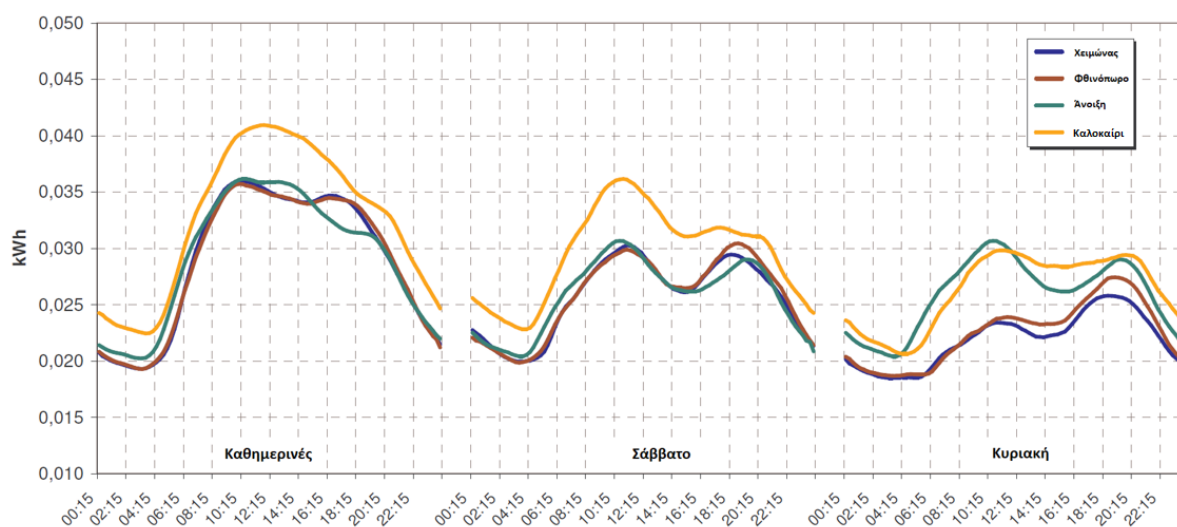
**Σχήμα 3.7:** Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας αν κλάδο στην Ευρώπη το 2018

Από τον ορισμό της, η καμπύλη ζήτησης αντιπροσωπεύει την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που είναι διατεθειμένοι να καταναλώσουν οι καταναλωτές. Η δυσκολία του προσδιορισμού της καμπύλης αυτής έγκειται στο ότι οι καταναλωτές δεν υποβάλουν σε κάποια ηλεκτρονική πλατφόρμα την ποσότητα που είναι διατεθειμένοι να αγοράσουν. Για τον σκοπό αυτό, παραδοσιακά η ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας υπολογίζεται μέσω της καμπύλης διάρκειας φορτίου (load duration curve) που μετράει τη διάρκεια των ωρών ανά χρόνο που η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ισούται ή υπερβαίνει την παραγωγή. Εφόσον η καμπύλη προσδιορίζει τα σημεία που η ζήτηση ισούται ή υπερβαίνει την παραγωγή που έχει προσαρμοστεί στην τιμή της αγοράς ΟΤΣ, κάθε σημείο της καμπύλης διάρκειας φορτίου παρουσιάζει ένα πιθανό σημείο ισορροπίας της αγοράς ενέργειας. Το μειονέκτημα της καμπύλης διάρκειας φορτίου είναι ότι δεν προσδιορίζει πότε παρατηρήθηκαν αυτές οι μετρήσεις [23].

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας είναι η εποχικότητα που εμφανίζει. Παρατηρώντας τη μεταβολή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια ενός ημερολογιακού έτους εντοπίζεται η ύπαρξη ετήσιων, εβδομαδιαίων και ημερήσιων μεταβολών. Συγκεκριμένα, συνήθως τους μήνες του χειμώνα παρατηρείται υψηλότερη κατανάλωση από τους υπόλοιπους μήνες. Επίσης, κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού εντοπίζονται μεμονωμένες αιχμές που οφείλονται στην αύξηση της θερμοκρασίας και στην εντονότερη χρήση των κλιματιστικών. Η ημέρα της εβδομάδας επηρεάζει την κατανάλωση καθώς παρατηρείται μια αύξηση της ζήτησης τις καθημερινές. Στο Σχήμα 3.9 παρουσιάζονται οι ημερήσιες και εβδομαδιαίες διακυμάνσεις κατά την διάρκεια του ημερολογιακού έτους για ένα μικρό δείγμα καταναλωτών. Μια υποθετική καμπύλη διάρκειας φορτίου θα είχε την ακόλουθη μορφή [23].



Σχήμα 3.8: Κατανάλωση Ηλεκτρικής Ενέργειας αν κλάδο στην Ευρώπη το 2018



Σχήμα 3.9: Καθημερινές, Εβδομαδιαίες και Εποχιακές Μεταβολές στην Κατανάλωση Ηλεκτρικής Ενέργειας Για Ένα Μικρό Δείγμα Καταναλωτών [23]

### 3.3.2.2 Παράγοντες που Επηρεάζουν την Καμπύλη Ζήτησης

Σε αντίθεση με άλλα προϊόντα, η ηλεκτρική ενέργεια δεν καταναλώνεται απευθείας από τους καταναλωτές. Στην πραγματικότητα, η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από την κατανάλωση οικιακών και βιομηχανικών συσκευών που χρησιμοποιούνται από τους καταναλωτές. Για τον παραπάνω λόγο, η ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζεται από παράγοντες όπως η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η τεχνολογική πρόοδος και η διαθεσιμότητα υποκατάστατων ενεργειακών πηγών, όπως το πετρέλαιο θέρμανσης.

Σε περιόδους που οι τιμές των υποκατάστατων πηγών ενέργειας είναι χαμηλές, συνηθίζεται να υπάρχει μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας καθώς ο κόσμος μπορεί να θερμάνει το σπίτι του πιο οικονομικά. Αντίθετα, σε περιόδους όπου οι τιμές των υποκατάστατων είναι υψηλές ή σε

περιόδους όπου παρατηρούνται ελλείψεις στη διαθεσιμότητά τους, τότε παρατηρείται αύξηση στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι η τεχνολογική πρόοδος. Με την τεχνολογική πρόοδο κατασκευάζονται συσκευές μεγαλύτερης απόδοσης που απαιτούν χαμηλότερη κατανάλωση για την ολοκλήρωση του ίδιου έργου. Επομένως, σε αυτές τις περιπτώσεις επιτυγχάνεται μείωση την ζήτησης.

Οι καιρικές αλλαγές αποτελούν τον κυριότερο παράγοντα μεταβολών στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας καθώς επηρεάζουν όλους τους καταναλωτές και οδηγούν σε μαζικές αλλαγές της κατανάλωσης.

Η τιμή διάθεσης της ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζει τη ζήτηση. Συγκεκριμένα, μεταβολές στην τιμή παροχής επηρεάζουν περισσότερο την οικιακή κατανάλωση.

### 3.4 ΟΡΙΑΚΗ ΤΙΜΗ ΑΠΟΚΛΙΣΕΩΝ (ΟΤΑ)

Κατά τη διάρκεια μιας ημερολογιακής ημέρας είναι συνηθισμένο να υπάρχουν αποκλίσεις μεταξύ της παραγωγής και της ζήτησης. Αυτές οι αποκλίσεις εκκαθαρίζονται στην οριακή τιμή αποκλίσεων [19].

Εδώ είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι υπάρχουν δύο διαφορετικά μοντέλα για την επιβολή ποινών σε μονάδες που παρουσιάζουν αποκλίσεις μεταξύ της πραγματικής παραγωγής ή της κατανάλωσής τους και τις αντίστοιχες δεσμεύσεις τους στην αγορά ενέργειας.

#### 3.4.1 Μια Οριακή Τιμή Αποκλίσεων (One-Price Market)

Το πρώτο μοντέλο επιβολής προστίμου σε μονάδες που δεν κατάφεραν να τηρήσουν τις δεσμεύσεις τους χρησιμοποιεί μία ενιαία οριακή τιμή απόκλισης (ΟΤΑ). Σε αυτή την περίπτωση μονάδες που παράγουν λιγότερο από την ενέργεια που είχαν δεσμευτεί να παραδώσουν θα κληθούν να πληρώσουν την ίδια τιμή με άλλες μονάδες που τελικά παρήγαγαν περισσότερο από αυτό που είχαν δεσμευτεί. Αυτό το μοντέλο εφαρμόζεται στην ενεργειακή αγορά του Ηνωμένου Βασιλείου.

Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό του μοντέλου αυτού είναι ότι οδηγεί σε εξισορροπητική κερδοσκοπία (arbitrage). Καθώς η τιμή της αγοράς ορίζεται βάσει των διαφορών μεταξύ της παραγωγής και των δεσμεύσεων των μονάδων που συμμετέχουν στην αγορά, η ΟΤΑ μπορεί να ξεπεράσει την ΟΤΣ σε περιπτώσεις που υπάρχει πλεόνασμα ζήτησης το οποίο απαιτεί αύξηση της παραγωγής. Αντίθετα, όταν υπάρχει πλεόνασμα προσφοράς απαιτείται μείωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και η ΟΤΑ είναι χαμηλότερη από την ΟΤΣ [7].

Επομένως, οργανισμοί που συμμετέχουν στην αγορά ενέργειας μπορεί εσκεμμένα να μην προσφέρουν όλη την παραγωγή τους στην αγορά της επόμενης ημέρας με σκοπό να προσφέρουν μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής τους στην αγορά εξισορρόπησης όπου περιμένουν να έχει υψηλότερη τιμή.

Για παράδειγμα, όταν οι παραγωγοί αναμένουν μια ανισορροπία στο σύστημα, όπως το πλεόνασμα ζήτησης, θα προσφέρουν λιγότερη ενέργεια στην αγορά επόμενης ημέρας με σκοπό να προσφέρουν την υπόλοιπη παραγωγή τους στην αγορά εξισορρόπησης σε υψηλότερη τιμή. Αντίθετα, οι καταναλωτές μπορούν να προσαρμόσουν την κατανάλωσή τους έτσι ώστε στην περίπτωση που υπάρχει πλεόνασμα προσφοράς να αγοράσουν ενέργεια σε χαμηλότερη τιμή από την αγορά εξισορρόπησης.

### 3.4.2 Δυο Οριακές Τιμές Αποκλίσεων (Two-Price Market)

Το δεύτερο και πιο διαδεδομένο μοντέλο επιβολής προστίμων χρησιμοποιεί διαφορετική ΟΤΑ για τα μέλη που παρήγαγαν περισσότερη ενέργεια από αυτή που είχαν δεσμευτεί και διαφορετική ΟΤΑ για τους παραγωγούς που είχαν μικρότερη παραγωγή από αυτή που είχαν δεσμευτεί να παραδώσουν.

Σε αυτό το μοντέλο διαμορφώνονται δύο διαφορετικές ΟΤΑ. Η μια ΟΤΑ είναι πάντα μικρότερη της ΟΤΣ και χρησιμοποιείται για την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στην αγορά εξισορρόπησης ενώ η δεύτερη είναι πάντα μεγαλύτερη της ΟΤΣ και χρησιμοποιείται για την αγορά ενέργειας από την αγορά εξισορρόπησης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην επιτρέπεται η εξισορροπητική κερδοσκοπία (arbitrage) [7].

Για παράδειγμα, ένας παραγωγός που δεν κατάφερε να παραδώσει την ενέργεια που είχε δεσμευτεί, θα κληθεί να αγοράσει τη διαφορά στην αγορά εξισορρόπησης σε υψηλότερη τιμή και να την πουλήσει στην προκαθορισμένη ΟΤΣ. Αντίθετα, ένας παραγωγός που παρήγαγε περισσότερη ενέργεια από ότι είχε δεσμευτεί θα κληθεί να πουλήσει τη διαφορά σε χαμηλότερη τιμή από την ΟΤΣ.

Επομένως, οι παραγωγοί δεν μπορούν να επωφεληθούν από την αγορά εξισορρόπησης με δύο ΟΤΑ καθώς η μέγιστη αμοιβή σε περίπτωση που ο παραγωγός έχει αντίθετη ανισορροπία με το δίκτυο είναι η ΟΤΣ ενώ σε περίπτωση που ο παραγωγός έχει ομόσημη ανισορροπία με το δίκτυο τότε θα του επιβληθεί το ανάλογο πρόστιμο.



### ΕΙΚΟΝΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

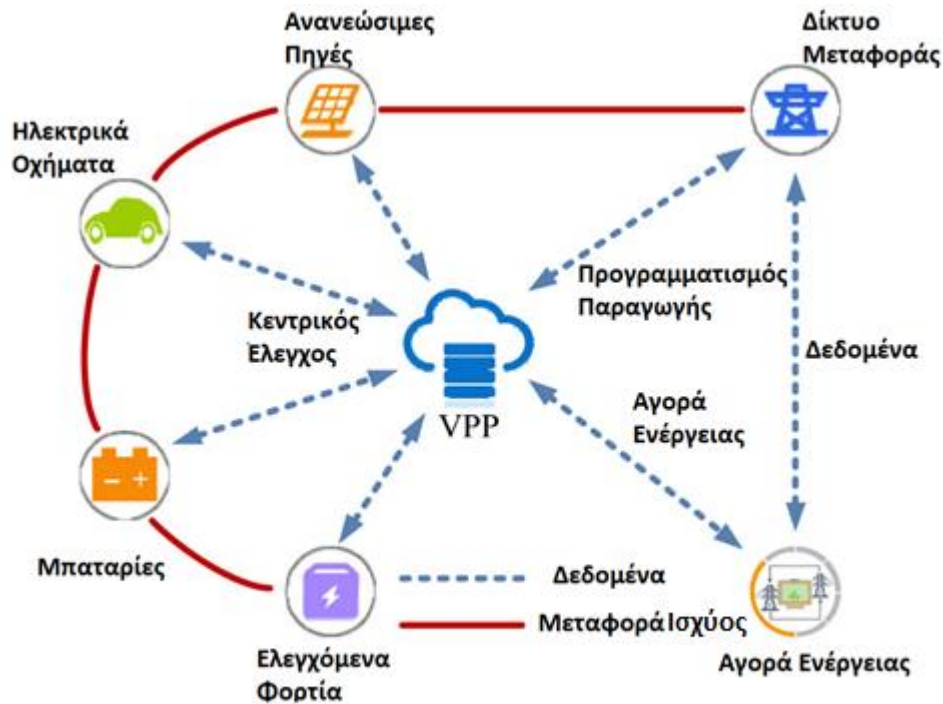
#### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αντίθεση με το παρελθόν, όπου η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας ικανοποιούνταν από μεγάλες μονάδες παραγωγής, πλέον η ευρεία διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) καθώς και η εισαγωγή όλο και περισσότερων ελεγχόμενων φορτίων στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας έχει δημιουργήσει νέες προκλήσεις για τους παραγωγούς αλλά και τους διαχειριστές του δικτύου.

Στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει κάθε χρονική στιγμή η προσφορά να είναι ίση με την ζήτηση. Αυτός ο περιορισμός καθιστά ιδιαίτερα δύσκολη την ατομική συμμετοχή μικρών μονάδων παραγωγής και ιδιαίτερα των ΑΠΕ καθώς η παραγωγή τους μπορεί να μεταβληθεί ανεξέλεγκτα λόγω των αβέβαιων καιρικών συνθηκών. Επομένως, για την καλύτερη εκμετάλλευση των ΑΠΕ πρέπει να υλοποιηθεί ένα νέο πρότυπο που θα μπορεί να διαχειριστεί τόσο τις αλλαγές στην πλευρά της προσφοράς, λόγω αλλαγών της παραγωγής των ΑΠΕ, όσο και τις αλλαγές στην πλευρά της ζήτησης από μεταβολές στην κατανάλωση των φορτίων. Μία από τις λύσεις στο παραπάνω πρόβλημα είναι οι εικονικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Virtual Power Plants – VPP). Ο κύριος σκοπός των VPPs είναι να επιτρέπουν στις μονάδες διανεμημένης παραγωγής να συμμετάσχουν στην αγορά ενέργειας ως ένας ενιαίος παραγωγός χωρίς όμως να υπάρχει η ανάγκη να βρίσκονται στην ίδια γεωγραφική τοποθεσία [7], [8].

Τα VPPs, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.1, μπορούν να αποτελούνται από ομάδες διάσπαρτων μονάδων παραγωγής, ελεγχόμενα φορτία και μονάδες αποθήκευσης. Οι διάσπαρτες μονάδες παραγωγής των VPPs αποτελούνται από εργοστάσια παραγωγής που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα αλλά και ΑΠΕ. Ο κύριος σκοπός του VPP είναι να συντονίζει την παραγωγή και την κατανάλωση των στοιχείων που διαχειρίζεται με στόχο την μεγιστοποίηση του οικονομικού κέρδους. Επιπλέον, εφόσον δεν υπάρχει κάποιος γεωγραφικός περιορισμός, οι μονάδες που διαχειρίζεται το VPP μπορούν να συνδέονται σε διαφορετικούς κόμβους του δικτύου και να απέχουν μεταξύ τους έως και εκατοντάδες χιλιόμετρα. Για τον παραπάνω λόγο τα VPPs δεν θεωρούνται αμιγώς ενεργειακοί οργανισμοί αλλά οικονομικές οντότητες. Πρακτικά, τα VPPs δρουν ως μεσάζοντες μεταξύ της αγοράς ενέργειας και των μονάδων που διαχειρίζονται. Παρόλο που δεν υπάρχει κάποιος γεωγραφικός περιορισμός, τα στοιχεία του VPP πρέπει να ικανοποιούν όλους τους τεχνικούς περιορισμούς του δικτύου. Τα VPPs διέπονται από συγκεκριμένους νόμους και χρηματιστηριακούς κανόνες που εξασφαλίζουν την αξιοπιστία και ομαλή λειτουργία όλων των εμπλεκόμενων φορέων τους [7].

Στο μέλλον αναμένεται ότι τα VPPs θα διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, οι καταναλωτές θα μπορούν να συνάπτουν συμβόλαια μακράς διάρκειας σε συνεργασία με τον διαχειριστή του VPP για την εξασφάλιση καλύτερων τιμών [5].



Σχήμα 4.1: Τυπικά στοιχεία που διαχειρίζεται ένα VPP

## 4.2 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΥ VPP

Η διαχείριση ενός VPP γίνεται από τον διαχειριστή του. Ανάλογα με τον τρόπο διαχείρισης που επιλέγει ο διαχειριστής, τα VPPs μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις κατηγορίες [25]:

- Άμεσο Έλεγχο – Η προσέγγιση του άμεσου ελέγχου γίνεται μέσω μιας κεντρικής αρχής που λαμβάνει όλες τις αποφάσεις.
- Διανεμημένο Έλεγχο – Η προσέγγιση του διανεμημένου ελέγχου λαμβάνει αποφάσεις σε τοπικό επίπεδο.
- Ιεραρχικό Έλεγχο – Η προσέγγιση του ιεραρχικού ελέγχου αποτελεί μια ενδιάμεση προσέγγιση ανάμεσα στον άμεσο έλεγχο και τον διανεμημένο έλεγχο, με κάποιες αποφάσεις να λαμβάνονται σε κεντρικό επίπεδο και άλλες να λαμβάνονται σε διάσπαρτα σημεία του δικτύου.

Ο διανεμημένος και ο ιεραρχικός τρόπος ελέγχου χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που το VPP έχει να διαχειριστεί πολλές διαφορετικές μονάδες, ενώ ο άμεσος τρόπος ελέγχου χρησιμοποιείται από VPP που έχουν να διαχειριστούν ομοίμορφα συστήματα.

Ανεξάρτητα από τον τρόπο ελέγχου που επιλέγει ο διαχειριστής, τα VPPs διαθέτουν κέντρα ελέγχου που είναι υπεύθυνα για την συλλογή και διαχείριση πληροφοριών που αφορούν την παραγωγή των διεσπαρμένων μονάδων, την τιμή της αγοράς καθώς και προβλέψεις για την ζήτηση. Με βάση αυτές τις πληροφορίες, τα VPPs είναι υπεύθυνα για την κατάσταση του βέλτιστου προγραμματισμού για όλες τις μονάδες που διαχειρίζονται.

Ο σημαντικότερος προγραμματισμός που συντελούν τα VPPs είναι η πρόβλεψη και ο προγραμματισμός της παραγωγής των ανανεώσιμων μονάδων, οι οποίες αναφέρονται και ως



στοχαστικές μονάδες (stochastic production units) στην βιβλιογραφία λόγω της υψηλής αβεβαιότητας που διέπει την παραγωγή τους [7].

### 4.3 ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται ο προγραμματισμός των εικονικών σταθμών παραγωγής και ο τρόπος συμμετοχής τους στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, αναλύεται το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην μοντελοποίηση του πειραματικού μέρους της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

#### 4.3.1 Γραμμικός Προγραμματισμός

Ο γραμμικός προγραμματισμός (ΓΠ) ξεκίνησε στην δεκαετία του 1970 με στόχο την βελτιστοποίηση ενός κριτηρίου απόφασης που έγινε γνωστό ως αντικειμενική συνάρτηση (objective function). Με την πάροδο των χρόνων έγινε φανερό ότι η επίλυση ενός προβλήματος με χρήση μόνο της αντικειμενικής συνάρτησης έκανε την προσέγγιση κάθε άλλο παρά ρεαλιστική. Αυτή η συνειδητοποίηση οδήγησε στην εξέλιξη του ΓΠ με πολλαπλά κριτήρια απόφασης [26].

#### 4.3.2 Τύποι Προβλημάτων

Τύποι προβλημάτων που μεταβάλλουν το πρόβλημα [26]:

- Μη γραμμικός προγραμματισμός (Non-Linear Programming – NLP): ως NLP ορίζονται τα προβλήματα των οποίων το διάνυσμα των μεταβλητών είναι συνεχές και η αντικειμενική συνάρτηση ή/και κάποιοι από τους περιορισμούς είναι μη γραμμικές συναρτήσεις.
- Ακέραιος προγραμματισμός (Integer Programming (IP)): ως IP ορίζονται τα προβλήματα των οποίων το διάνυσμα των μεταβλητών είναι ακέραιος και η αντικειμενική συνάρτηση ή/και κάποιοι από τους περιορισμούς είναι μη γραμμικές συναρτήσεις.
- Μικτός ακέραιος προγραμματισμός (Mixed Integer Programming (MIP)): MIP ορίζονται τα προβλήματα των οποίων η αντικειμενική συνάρτηση ή/και κάποιοι από τους περιορισμούς είναι μη γραμμικές συναρτήσεις και το διάνυσμα των μεταβλητών είναι ακέραιος και συνεχές.
- Τετραγωνικός Προγραμματισμός (Quadratic Programming (QP)): ως QP ορίζονται τα προβλήματα των οποίων η αντικειμενική συνάρτηση είναι τετραγωνική και οι περιορισμοί είναι γραμμικοί.

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις γίνεται χρήση ορισμένων μεταβλητών για την εύρεση της βέλτιστης λύσης της αντικειμενικής συνάρτησης. Οι μεταβλητές ορίζουν αποφάσεις που πρέπει να παρθούν προκειμένου να υπολογιστεί η βέλτιστη λύση.

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία επιλύονται τα ακόλουθα προβλήματα:

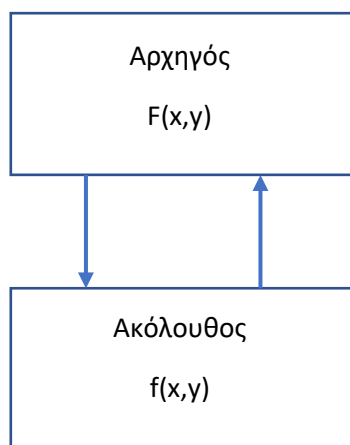
- Πρόβλημα βελτιστοποίησης στοχαστικού, μικτού ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού με τετραγωνικούς περιορισμούς (Stochastic quadratically-constrained programming problem)

- Πρόβλημα βελτιστοποίησης στοχαστικού, μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (Stochastic mixed-integer linear programming problem)
- Πρόβλημα βελτιστοποίησης εύρωστου, μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (Robust mixed-integer linear programming problem)
- Πρόβλημα βελτιστοποίησης μη γραμμικού προγραμματισμού (Nonlinear programming problem)
- Πρόβλημα βελτιστοποίησης γραμμικού προγραμματισμού (Linear programming problem)

### 4.3.3 Πολύ-επίπεδος Προγραμματισμός

Πολλά προβλήματα για την επίλυσή τους απαιτούν την επίλυση επιπλέον προβλημάτων που προηγούνται του κύριου προβλήματος. Τα προβλήματα διεπίπεδου προγραμματισμού μπορούν να παρομοιαστούν ως ιεραρχικά παιχνίδια στα οποία υπάρχουν δύο επίπεδα που πρέπει να ολοκληρωθούν για να ληφθούν αποφάσεις. Ο πρώτος φορέας, γνωστός και ως αρχηγός (leader), έχει τον πρώτο λόγο και είναι εκείνος που «παίζει» πρώτος. Ο δεύτερος φορέας, γνωστός και ως ακόλουθος (follower), αντιδρά βέλτιστα στην γνωστή πλέον επιλογή του αρχηγού. Σε αυτό το «παιχνίδι» ο αρχηγός προσπαθεί να βρει την απόφαση που θα του επιφέρει το βέλτιστο αποτέλεσμα μετά την «κίνηση» του ακόλουθου [12], [25]. Στο Σχήμα 4.2 αναπαριστάται ένα τυπικό παράδειγμα διεπίπεδου προγραμματισμού γνωστό και ως Stackelberg game.

Η ιδιομορφία των διεπίπεδων προβλημάτων έγκειται στην ύπαρξη ανταγωνισμού μεταξύ του αρχηγού και του ακόλουθου, οι οποίοι έχουν αλληλοσυγκρουόμενα συμφέροντα. Για παράδειγμα, όπως θα αναφερθεί σε επόμενη ενότητα, στην αγορά ενέργειας οι παραγωγοί αποσκοπούν στην μεγιστοποίηση του κέρδους τους ενώ ο διαχειριστής του δικτύου αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής. Επομένως, η λύση του προβλήματος παύει να είναι η βέλτιστη λύση ενός εκ των δύο φορέων αλλά αποτελεί την βέλτιστη λύση του συστήματος. Η αρχή επίλυσης τέτοιων προβλημάτων βασίζεται στην θεωρία παιγνίων και συγκεκριμένα στο σημείο ισορροπίας Nash (Nash Equilibrium) [6].



Σχήμα 4.2: Τυπικό μοντέλο διεπίπεδου προγραμματισμού (Stackelberg game)

Η γενική μορφή των διεπίπεδων προβλημάτων είναι η ακόλουθη:

$$\begin{aligned} & \min_{x \in X} F(x, y) \\ \text{s. t.} \quad & G(x, y) \leq 0 \\ & \min_{y \in Y} f(x, y) \\ \text{s. t.} \quad & g(x, y) \leq 0 \\ & x, y \geq 0 \end{aligned}$$

#### 4.3.4 Θεωρία Παιγνίων

Σε αυτή την ενότητα γίνεται μια σύντομη εισαγωγή στη θεωρία παιγνίων (ΘΠ) (game theory). Ο σκοπός της ενότητας είναι η εξοικείωση του αναγνώστη με βασικές έννοιες της ΘΠ οι οποίες ορίζουν την συμπεριφορά δύο ή περισσότερων φορέων που δρουν ανταγωνιστικά σε ένα διεπίπεδο πρόβλημα.

Αρχικά, σε αντίθεση με τα μονο-επίπεδα προβλήματα, όπου υπάρχει μόνο ένας φορέας, στα διεπίπεδα προβλήματα, οι διάφοροι φορείς πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τους τις πιθανές κινήσεις των υπόλοιπων φορέων. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στην ΘΠ όλοι οι φορείς δρουν και λαμβάνουν αποφάσεις βάσει ενός προκαθορισμένου συνόλου κοινών κανόνων. Βασική έννοια της ΘΠ είναι η ορθολογική επιλογή (rational choice) σύμφωνα με την οποία κάθε φορέας επιλέγει την καλύτερη δυνατή απόφαση. Το πρόβλημα και η δυσκολία τέτοιων παιγνίων έγκειται στην ανάγκη να παρθεί μια απόφαση πριν αποκαλυφθούν οι αποφάσεις των ανταγωνιστών. Επομένως, για να βρεθεί οποιαδήποτε λύση πρέπει οι παίκτες ή οι φορείς να βασίσουν τις ενέργειες και τις αποφάσεις τους σε εκτιμήσεις που έχουν για τις αποφάσεις των υπόλοιπων φορέων.

Λύση στο παραπάνω πρόβλημα δίνει η ισορροπία Nash (Nash equilibrium) η οποία αναφέρει ότι υπάρχει μια βέλτιστη λύση για όλους τους φορείς του παιγνίου στην οποία κανείς από τους φορείς δεν μπορεί να βελτιώσει την θέση του, με την προϋπόθεση ότι δεν θα αλλάξει την απόφασή του. Η ισορροπία Nash αποτελεί το μεγαλύτερο εργαλείο επίλυσης παιγνίων αποφάσεων.

Για την κατανόηση της ισορροπίας Nash δίνεται το ακόλουθο παράδειγμα, γνωστό και ως το δίλημμα των φυλακισμένων (the prisoners' dilemma). Το παράδειγμα αναφέρεται σε δύο δράστες οι οποίοι έχουν συλληφθεί και βρίσκονται σε διαφορετικά δωμάτια. Το δίλημμα με το οποίο είναι αντιμέτωποι και οι δύο είναι αν θα καταδώσουν ο ένας τον άλλον. Η επιλογές που τους έχουν δοθεί είναι ίδιες και για τους δύο και αναφέρουν ότι στην περίπτωση που καταδώσουν τον άλλον δεν θα μπου φυλακή οι ίδιοι αλλά ο άλλος θα μπει για διάστημα δέκα χρόνων. Στην περίπτωση που δεν μιλήσει κανείς εκ των δύο τότε θα μπου φυλακή και οι δύο για ένα χρόνο. Τέλος, στην περίπτωση που μιλήσουν και οι δύο τότε θα μπου και οι δύο φυλακή για διάστημα 5 χρόνων. Οι επιλογές και τα αποτελέσματα του παιγνίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.1 υπάρχει μια κυρίαρχη στρατηγική και για τους δύο παίκτες. Εφόσον κανείς εκ των δύο δεν γνωρίζει την απόφαση του άλλου, όταν καλείται να αποφασίσει, η κυρίαρχη στρατηγική και για τους δύο είναι να μιλήσουν. Ως αποτέλεσμα και οι δύο καταλήγουν στην φυλακή για 5 χρόνια. Αυτή η απόφαση αντιστοιχεί στην ισορροπία Nash καθώς κανένας εκ των δύο παικτών δεν μπορεί να βελτιώσει την κατάστασή του.

**Πίνακας 4.1:** Αποτελέσματα του διλήμματος των φυλακισμένων

	Μιλάει ο Α	Δεν μιλάει ο Α
Μιλάει ο Β	5 χρόνια ο Α 5 χρόνια ο Β	10 χρόνια ο Α 0 χρόνια ο Β
Δεν μιλάει ο Β	0 χρόνια ο Α 10 χρόνια ο Β	1 χρόνο ο Α 1 χρόνο ο Β

Η σημασία του παραπάνω παραδείγματος έγκειται στην κατανόηση του περιορισμού που ορίστηκε προηγούμενα, ότι δηλαδή όλοι οι φορείς δρουν ορθολογικά και με βάση τις προσδοκίες που έχουν για τους άλλους. Παρόλο που και οι δύο θα μπορούσαν να αποφύγουν 4 χρόνια φυλάκισης κανείς εκ των δύο δεν αποφασίζει να μην μιλήσει καθώς σε αυτή την περίπτωση ο άλλος θα μπορούσε να αφηθεί ελεύθερος αν ακολουθούσε την κυρίαρχη στρατηγική και ο ίδιος να φυλακιστεί για την μεγαλύτερη δυνατή διάρκεια.

Η εύρεση της ισορροπίας Nash μπορεί να προκύψει ως αποτέλεσμα μιας από τις ακόλουθες στρατηγικές [25].

- Αγνή στρατηγική (pure strategy), στην οποία ο κάθε παίκτης ορίζει αιτιοκρατικά την συμπεριφορά του για κάθε του ενέργεια.
- Μικτή στρατηγική (mixed strategy), στην οποία οι παίκτες βασίζονται τις αποφάσεις τους σε κατανομή πιθανοτήτων.

#### 4.4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ VPP

Τα VPPs μπορούν να διαχειρίζονται πολλές μονάδες παραγωγής καθώς και ελεγχόμενα φορτία. Αυτή η ιδιότητά τους καθιστά δυνατή την κατάσχεση προβλημάτων VPP που διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Για λόγους ευκολίας, από εδώ και πέρα οι αναφορές σε VPP θα αναφέρονται σε ένα τυπικό VPP που διαχειρίζεται τις ακόλουθες μονάδες:

- Μονάδες διανεμημένης παραγωγής
  - Θερμοηλεκτρικές μονάδες
    - Φυσικού αερίου
    - Πετρελαϊκές
  - Φωτοβολταϊκά (ΦΒ)
  - Ανεμογεννήτριες (Α/Γ)
- Ελεγχόμενα φορτία
- Μονάδες αποθήκευσης

##### 4.4.1 Θερμοηλεκτρικές Μονάδες

Κάθε θερμοηλεκτρική μονάδα παραγωγής  $i$  μπορεί να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση κόστους  $C_i(E_{Gi})$ , η οποία προσδιορίζει το κόστος παραγωγής  $C_i$ , σε ευρώ, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας  $E_{Gi}$  σε MW. Στην βιβλιογραφία, συνηθίζεται η χρήση κυρτών τετραγωνικών εξισώσεων κόστους (convex quadratic functions) ή, εναλλακτικά, προσεγγίσεων τους με γραμμικές συναρτήσεις (piecewise linear functions) [7].

Η μορφή της τετραγωνικής εξίσωσης κόστους των θερμοηλεκτρικών μονάδων παραγωγής είναι [7]:

$$C_i(E_{Gi}) = a_{Gi}E_{Gi}^2 + b_{Gi}E_{Gi} + c_{Gi} \quad (4.1)$$

Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται μια τυπική αναπαράσταση των δύο περιπτώσεων. Τα  $E_{Gi}^{min}$  και  $E_{Gi}^{max}$  αναφέρονται στην ελάχιστη και μέγιστη ισχύ που μπορεί να προσφέρει κάθε διανεμημένη μονάδα παραγωγής, αντίστοιχα. Για τον προσδιορισμό της μέγιστης και ελάχιστης ενέργειας αρκεί να είναι γνωστά τα όρια παραγωγής της κάθε μονάδας καθώς και το χρονικό διάστημα λειτουργίας  $\tau$  σε κάθε κατάσταση λειτουργίας. Κατά τα γνωστά  $E_{Gi}^{max} = P_{Gi}^{max} \times \tau$  και  $E_{Gi}^{min} = P_{Gi}^{min} \times \tau$ , όπου  $P_{Gi}^{min}$  και  $P_{Gi}^{max}$  αντιστοιχούν στην ελάχιστη και μέγιστη ισχύ των διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής αντίστοιχα.

Κατά προέκταση, το  $P_{Gi}(t)$  ορίζει την παραγόμενη ισχύ την χρονική στιγμή  $t$ . Επιπλέον, η ισχύς  $P_{Gi}(t)$  μπορεί να πάρει τιμές εντός του εύρους τιμών  $[P_{Gi}^{min}, P_{Gi}^{max}]$  όταν η μονάδα βρίσκεται σε λειτουργία ή να ισούται με μηδέν στην περίπτωση που η μονάδα είναι ανενεργή. Επομένως, στην πράξη το  $P_{Gi}(t)$  δεν μπορεί να πάρει τιμές εντός του διαστήματος  $(0, P_{Gi}^{min})$ . Για τον λόγο αυτό, στην μοντελοποίηση θερμοηλεκτρικών μονάδων παραγωγής οι οποίες έχουν την δυνατότητα να τεθούν εκτός λειτουργίας κάποια χρονική στιγμή, χρησιμοποιούνται δυαδικές μεταβλητές. Στην παρούσα εργασία, η δυαδική μεταβλητή συμβολίζεται με το σύμβολο  $v_i(t)$  και μπορεί να πάρει μόνο δυαδικές τιμές  $\{0,1\}$  ανάλογα με την λειτουργία της μονάδας. Όταν η θερμοηλεκτρική μονάδα βρίσκεται εκτός λειτουργίας, η δυαδική μεταβλητή ισούται με μηδέν. Αντίθετα, όταν η μονάδα βρίσκεται σε λειτουργία, η δυαδική μεταβλητή ισούται με την μονάδα [7]. Με βάση τα παραπάνω, τα όρια παραγωγής των γεννητριών μπορούν να οριστούν ως εξής:

$$v_i(t)P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi}(t) \leq v_i(t)P_{Gi}^{max} \quad (4.2)$$

Αλλαγές στην κατάσταση των μηχανών και ως επέκταση αλλαγές των δυαδικών μεταβλητών από 0 σε 1 ή από 1 σε 0 δημιουργούν το κόστος έναρξης (stat-up cost) και το κόστος τερματισμού (shutdown cost), αντίστοιχα. Η μοντελοποίηση των παραπάνω περιγράφεται στις εξισώσεις (4.3) έως (4.6).

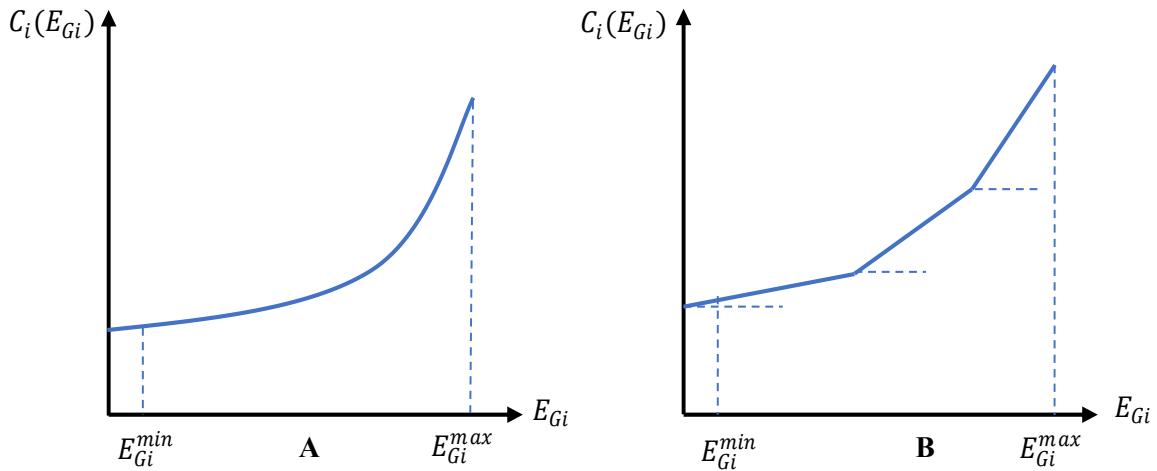
$$C_{SU_i}(t) \geq SU_{cost_i}(v_i(t) - v_i(t - 1)) \quad (4.3)$$

$$C_{SU_i}(t) \geq 0 \quad (4.4)$$

Και

$$C_{SD_i}(t) \geq SD_{cost_i}(v_i(t) - v_i(t - 1)) \quad (4.5)$$

$$C_{SD_i}(t) \geq 0 \quad (4.6)$$



**Σχήμα 4.3:** Παράδειγμα εξισώσεων κόστους διανεμημένων μονάδων παραγωγής. **A.** Quadratic, **B.** Piecewise Linear

Τα  $SU_{cost_i}$  και  $SD_{cost_i}$  αναπαριστούν τα κόστη εκκίνησης και τερματισμού της κάθε μονάδας, αντίστοιχα. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι παρόλο που οι εξισώσεις εκκίνησης και τερματισμού μοντελοποιούνται ως ανισώσεις, στην πράξη τα κόστη  $C_{SU_i}(t)$  και  $C_{SD_i}(t)$  θα ισούνται με τα αντίστοιχα κόστη εκκίνησης και τερματισμού και δεν θα τα υπερβαίνουν όπως επιτρέπουν οι εξισώσεις (4.3) και (4.5). Αυτό είναι αποτέλεσμα του τρόπου επίλυσης του προβλήματος μεγιστοποίησης κέρδους ή ελαχιστοποίησης κόστους του οποίου η βέλτιστη λύση οδηγεί στην ελαχιστοποίηση των ανισώσεων (4.3) και (4.5).

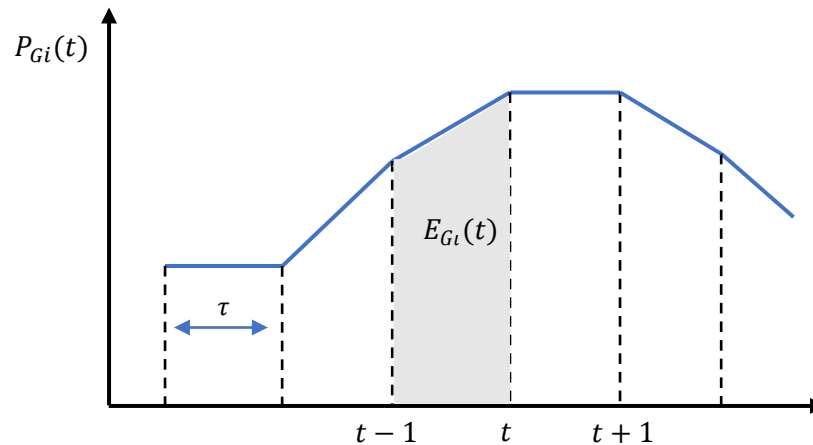
Εκτός από τα όρια παραγωγής των γεννητριών, οι θερμοηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής έχουν μηχανικούς περιορισμούς που περιορίζουν τις επιτρεπτές μεταβολές στην παραγωγή τους μεταξύ διαφορετικών χρονικών περιόδων. Τα όρια αυτά είναι γνωστά ως όρια αλλαγής κατάσταση (ramping constraints). Οι μοντελοποίηση των ορίων αλλαγής κατάσταση παρουσιάζεται στις εξισώσεις (4.7) και (4.8).

$$P_{Gi}(t) - P_{Gi}(t-1) \leq P_{Gramp} \cdot \tau \quad (4.7)$$

$$P_{Gi}(t-1) - P_{Gi}(t) \leq P_{Gramp} \cdot \tau \quad (4.8)$$

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι, παρόλο που οι περιορισμοί των μονάδων διανεμημένης παραγωγής αναφέρονται στην ισχύ  $P_{Gi}(t)$ , η συνάρτηση κόστους υπολογίζεται με βάση την ενέργεια  $E_{Gi}(t)$ . Επομένως, για την επίλυση του προβλήματος είναι αναγκαίο να οριστεί η εξίσωση ισχύος. Με την υπόθεση ότι η ισχύς μεταβάλλεται γραμμικά, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4, η ενέργεια ισούται με το εμβαδόν που διαγράφουν δύο διαδοχικές τιμές της ισχύος  $P_{Gi}(t)$  και υπολογίζεται από την εξίσωση (4.9).

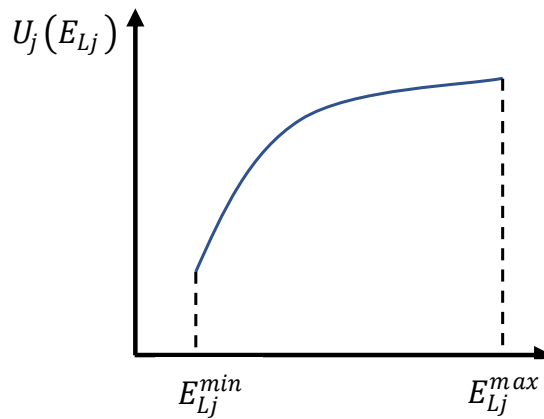
$$\frac{P_{Gi}(t-1) + P_{Gi}(t)}{2} \times \tau = E_{Gi}(t) \quad (4.9)$$



**Σχήμα 4.4:** Γραφική αναπαράσταση της γραμμικής παραγόμενης ισχύος των μονάδων διανεμημένης παραγωγής

#### 4.4.2 Ελεγχόμενα Φορτία

Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό των ελεγχόμενων φορτίων (flexible loads) είναι η δυνατότητά τους να μεταβάλλουν την κατανάλωσή τους κατά την διάρκεια της ημέρας για την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας τους. Για τον παραπάνω λόγο τα ελεγχόμενα φορτία αποτελούν ένα πολύ σημαντικό στοιχείο των VPPs. Κάθε ελεγχόμενο φορτίο μπορεί να χαρακτηριστεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση ωφέλειας (utility function)  $U_j(E_{Lj})$  η οποία προσδιορίζει το όφελος, συνήθως οικονομικό, που επιτυγχάνεται ανά επίπεδο κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας  $E_{Lj}$ . Η εξίσωση ωφέλειας χρησιμοποιείται ευρέως στον τομέα των οικονομικών καθώς προσδιορίζει πόσο πρόθυμος είναι κάποιος, σε αυτή την περίπτωση ο ιδιοκτήτης του ελεγχόμενου φορτίου, να αγοράσει ηλεκτρική ενέργεια βάσει της τιμής της. Για παράδειγμα, εσωτερικά θερμοκήπια που χρησιμοποιούν εσωτερικό φωτισμό για την ανάπτυξη των φυτών θα προτιμήσουν να φωτοβολήσουν όταν η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλή αντί όταν η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα [7]. Με αυτόν το τρόπο, διατηρείται σταθερή η παραγωγή των θερμοκηπίων ενώ παράλληλα μεγιστοποιείται το κέρδος τους. Στο Σχήμα 4.5 αναπαρίσταται μια τυπική συνάρτηση ωφέλειας για ελεγχόμενα φορτία.



**Σχήμα 4.5:** Γραφική αναπαράσταση της συνάρτησης ωφέλειας (utility function) για τα ελεγχόμενα φορτία

Παρακάτω παρουσιάζεται η μαθηματική μοντελοποίηση των ελεγχόμενων φορτίων.

Αρχικά, τα ελεγχόμενα φορτία πρέπει να καταναλώνουν ισχύ  $P_{Li}(t)$  μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης δυνατής κατανάλωσης που εξαρτάται από τα μηχανήματα των εγκαταστάσεων και τις διαστάσεις των μονάδων.

$$P_{Li}^{min} \leq P_{Li}(t) \leq P_{Lj}^{max} \quad (4.10)$$

Επιπλέον, καθώς τα ελεγχόμενα φορτία είναι επιχειρήσεις, τις περισσότερες φορές υπάρχει κάποιο ελάχιστο έργο που πρέπει να παραχθεί. Επομένως, παρόλο που οι διαχειριστές είναι διατεθειμένοι να προσαρμόσουν την κατανάλωση των μονάδων τους κατά την διάρκεια της ημέρας, υπάρχει κάποια ελάχιστη κατανάλωση που απαιτείται για την ομαλή λειτουργία των εγκαταστάσεων. Αυτό μοντελοποιείται στην εξίσωση (4.11) και αποτελεί την ελάχιστη υποχρεωτική κατανάλωση των ελεγχόμενων φορτίων κατά την διάρκεια μιας ημερολογιακής ημέρας.

$$\sum_t^{24} E_{Li}(t) \geq E_{Li}^{minCon} \quad (4.11)$$

Όπως οι θερμοηλεκτρικοί σταθμοί, έτσι και τα ελεγχόμενα φορτία έχουν μηχανικούς περιορισμούς που καθιστούν αδύνατη την ανεξέλεγκτη μεταβολή της κατανάλωσής τους. Οι περιορισμοί αυτοί ονομάζονται περιορισμοί αλλαγής κατάστασης και μοντελοποιούνται στις εξισώσεις (4.12) και (4.13) [7].

$$P_{Li}(t) - P_{Li}(t-1) \leq P_{Lramp} \times \tau \quad (4.12)$$

$$P_{Li}(t-1) - P_{Li}(t) \leq P_{Lramp} \times \tau \quad (4.13)$$



Επιπλέον, εάν η ισχύς των ελεγχόμενων φορτίων μεταβάλλεται γραμμικά, τότε η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται μεταξύ των χρονικών περιόδων  $t - 1$  και  $t$  υπολογίζεται από την εξίσωση (4.14).

$$\frac{P_{Li}(t-1) + P_{Li}(t)}{2} \times \tau = E_{Li}(t) \quad (4.14)$$

όπου το  $\tau$  αντιπροσωπεύει την χρονική περίοδο μεταξύ των  $t - 1$  και  $t$ .

Οι εξισώσεις (4.10) έως (4.14) μοντελοποιούν ελεγχόμενα φορτία που ανήκουν σε ένα VPP. Στην πραγματικότητα όμως τα ελεγχόμενα φορτία δεν είναι απαραίτητο να βρίσκονται στην κατοχή του VPP αλλά μπορούν να βρίσκονται υπό την διαχείρισή του μαζί με όλες τις άλλες εγκαταστάσεις που ο διαχειριστής του VPP καλείται να συντονίσει. Για τον παραπάνω λόγο, όταν το VPP διαχειρίζεται ελεγχόμενα φορτία που δεν βρίσκονται στην κατοχή του, κάθε φορά που απαιτείται κάποια αλλαγή στην κατανάλωση των φορτίων ο διαχειριστής του VPP καλείται να πληρώσει ένα χρηματικό ποσό στον ιδιοκτήτη των ελεγχόμενων φορτίων. Με αυτό τον τρόπο διαφυλάσσεται η σωστή διαχείριση των ελεγχόμενων φορτίων ενώ ταυτόχρονα εισάγεται ένας επιπλέον περιορισμός για δυνατές αλλαγές στην κατανάλωση των ελεγχόμενων φορτίων που μπορεί να ζητήσει το VPP. Τα παραπάνω μοντελοποιούνται στις εξισώσεις (4.15) έως (4.17). Η εξίσωση (4.15) και (4.16) αναφέρονται στα όρια προσαρμογής της κατανάλωσης των ελεγχόμενων φορτίων ενώ η εξίσωση (4.17) αναπαριστά την τελική κατανάλωση των ελεγχόμενων φορτίων μετά από πιθανή προσαρμογή της κατανάλωσής τους.

$$P_{od}(t) \leq M_{FL} P_{FLC}(t) \quad (4.15)$$

$$P_{ud}(t) \leq M_{FL} P_{FLC}(t) \quad (4.16)$$

$$P_{FLC}(t) = P_{Fi}(t) + P_{od}(t) - P_{ud}(t) \quad (4.17)$$

όπου τα  $P_{od}$  και  $P_{ud}$  υποδηλώνουν την υψηλότερη και χαμηλότερη κατανάλωση, γνωστές και ως υπερβάλλουσα ζήτηση (over-demand) και ελλιπής ζήτηση (under-demand) αντίστοιχα. Ο όρος  $M_{FL}$  ονομάζεται μέγιστη δυνατή αλλαγή (maximum flexible load alteration) και αποτελεί το ποσοστό της παρούσας κατανάλωσης που επιτρέπεται να μεταβληθεί από το VPP για την βελτιστοποίηση του συστήματος. Η παραπάνω μαθηματική μοντελοποίηση βασίστηκε στο άρθρο [5].

#### 4.4.3 Μονάδες Αποθήκευσης

Η μοντελοποίηση  $k$  μηχανισμών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται κατά κανόνα στην εξίσωση μεταβατικής κατάστασης (state-transition equation) η οποία ορίζει την ενέργεια με βάση την ισχύ που αποθηκεύεται στην μονάδα ή προσφέρεται στο δίκτυο, αντίστοιχα [7], [27]. Αν η  $E_{SB}(t)$  αντιπροσωπεύει την ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στον μηχανισμό αποθήκευσης, τότε η εξίσωση μεταβατικής κατάστασης ορίζεται ως εξής:

$$E_{SB}(t) = E_{SB}(t-1) + n_{eff}^c P_{SB}^c(t) - \frac{1}{n_{eff}^d} P_{SB}^d(t) \quad (4.18)$$

όπου τα  $P_{SB}^c$  και  $P_{SB}^d$  αναπαριστούν την φόρτιση (charging) και εκφόρτιση (discharging) της μονάδας την χρονική στιγμή  $t$ , αντίστοιχα. Οι παράμετροι  $n_{eff}^c$  και  $n_{eff}^d$  ονομάζονται παράγοντες απόδοσης (efficiency factors) και προσδιορίζουν τις απώλειες, οι οποίες είναι κυρίως θερμικές, κατά την φόρτιση και εκφόρτιση των μπαταριών ή κατά την χρήση αντλιών στα αντλιοστάσια. Επομένως, και οι δύο παράγοντες είναι μικρότεροι της μονάδας,  $n_{eff}^c < 1$  και  $n_{eff}^d < 1$ . Επιπλέον, με βάση τα μηχανικά χαρακτηριστικά του μηχανισμού αποθήκευσης προσδιορίζεται η μέγιστη και ελάχιστη ισχύς που μπορεί να αποθηκευτεί στους μηχανισμούς αποθήκευσης κατά την φόρτιση και να προσφερθεί στο δίκτυο κατά την εκφόρτισή τους. Τα όρια φόρτισης και εκφόρτισης μοντελοποιούνται στις εξισώσεις (4.19) και (4.20).

$$0 \leq P_{SB}^c(t) \leq P_{SB}^{c,max} \quad (4.19)$$

$$0 \leq P_{SB}^d(t) \leq P_{SB}^{d,max} \quad (4.20)$$

Η εξίσωση (4.21) ορίζει την ελάχιστη και μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί σε έναν μηχανισμό αποθήκευσης.

$$E_{SB}^{min} \leq E_{SB}(t) \leq E_{SB}^{max} \quad (4.21)$$

Το κατώτατο όριο  $E_{SB}^{min}$  είναι πολύ σημαντικό σε συσκευές όπως η μπαταρίες καθώς με την επιλογή κατάλληλου ορίου μειώνεται η φθορά τους και επιμηκύνεται η ζωή τους.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μοντελοποιούνται μπαταρίες και ένα αντλιοστάσιο. Το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών συμβολίζεται με  $E_{SKB}(t)$  ενώ η αποθηκευμένη ενέργεια του αντλιοστασίου συμβολίζεται με  $E_{SB}(t)$ .

#### 4.4.4 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Κυρίαρχο χαρακτηριστικό στοιχείο των ΑΠΕ ή στοχαστικών μονάδων παραγωγής (stochastic generating units) αποτελεί η υψηλή αβεβαιότητα που διέπει την παραγωγή τους και εξαρτάται από τις βραχυπρόθεσμες καιρικές συνθήκες. Για τον παραπάνω λόγο, οι στοχαστικές μονάδες παραγωγής αποτελούν την δυσκολότερη μονάδα διαχείρισης για κάθε VPP καθώς από την φύση τους παρουσιάζουν αποκλίσεις μεταξύ της προβλεπόμενης και πραγματικής παραγωγής τους [7], [28].

Η μοντελοποίηση των στοχαστικών μονάδων παραγωγής μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση μιας εκ των ακόλουθων μεθόδων [7]:

1. Σημειακές προβλέψεις (Point Forecasts)  $\{\widehat{P}_W(1), \dots, \widehat{P}_W(N)\}$  όπου η πρόβλεψη της παραγωγής  $\widehat{P}_W(t)$  αποτελεί μια σημειακή πρόβλεψη της παραγωγής των στοχαστικών μονάδων για τις χρονικές περιόδους  $t = 1, 2, \dots, N$ .
2. Σειρά διαστημάτων (Series of Intervals)  $\left\{ \left[ \widehat{P}_W^{lo}(1), \widehat{P}_W^{hi}(1) \right], \dots, \left[ \widehat{P}_W^{lo}(N), \widehat{P}_W^{hi}(N) \right] \right\}$  όπου η πρόβλεψη της παραγόμενης ισχύος  $\widehat{P}_W(t)$  θα βρίσκεται μεταξύ των δύο τιμών  $\widehat{P}_W^{lo}(t), \widehat{P}_W^{hi}(t)$  για κάθε χρονική περίοδο  $t = 1, 2, \dots, N$ .

3. Σύνολο σεναρίων (Set of Scenarios)  $\{[P_{W_w}(1), \dots, P_{W_w}(N)], w = 1, 2, W\}$  όπου η πρόβλεψη της παραγόμενης ισχύος  $\widehat{P}_W(t)$  προσδιορίζεται με βάση σεναρία διαφορετικής πιθανότητας  $\pi_w \geq 0$  έτσι ώστε  $\sum_{w=1}^W \pi_w = 1$ . Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η πιθανότητα του κάθε σεναρίου βασίζεται σε ιστορικά δεδομένα που είναι διαθέσιμα έως και την χρονική στιγμή  $t=0$ .

Καθώς οι στοχαστικές μονάδες παραγωγής παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από ελεύθερες πηγές ενέργειας, όπως ο ήλιος και ο άνεμος, το κόστος παραγωγής ανά MWh είναι πολύ χαμηλό και σε πολλές περιπτώσεις θεωρείται μηδενικό. Στην παρούσα διπλωματική εργασία η μοντελοποίηση των στοχαστικών μονάδων παραγωγής γίνεται με χρήση σεναρίων πρόβλεψης ενώ το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για τις μονάδες αυτές θεωρείται μηδενικό. Ο λόγος για αυτή την επιλογή βασίζεται στο ότι η μοντελοποίηση με σύνολα σεναρίων οδηγεί σε καλύτερη πρόβλεψη από ότι οι σημειακές προβλέψεις, ενώ παράλληλα επιτρέπει την κατασκευή ενός πιο ευέλικτου μοντέλου σε σχέση με την μοντελοποίηση σειράς διαστημάτων.

#### 4.5 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ VPP

Έστω ότι ένα VPP διαχειρίζεται  $G$  διανεμημένες μονάδες παραγωγής,  $F$  ελεγχόμενα φορτία,  $B$  μπαταρίες,  $K$  αντλιοστάσια και  $Q$  στοχαστικές μονάδες παραγωγής. Καθώς το VPP έχει ως στόχο την μεγιστοποίηση του κέρδους και την βελτιστοποίηση της λειτουργίας όλων των μονάδων που διαχειρίζεται, η μελέτη και ο προγραμματισμός του διαχειριστή πρέπει να συμπεριλαμβάνει όλες τις χρονικές περιόδους  $\{1, 2, \dots, t, \dots, T\}$  του διαστήματος  $T$  και όλα τα στοιχεία που διαχειρίζεται το VPP. Με βάση τα παραπάνω, η αντικειμενική συνάρτηση που καλείται να μεγιστοποιήσει ο διαχειριστής του VPP είναι η ακόλουθη [7], [27], [29]:

$$\begin{aligned} \max \pi = \sum_t \left[ \lambda^{D'(t)} P^D(t) \tau - \sum_{g \in G} Cost_{GT}(t) - \sum_{f \in F} Cost_{FL}(t) - \sum_{g \in G_D} Cost_{GDiesel}(t) \right. \\ \left. - \sum_{q \in Q_{PV}} Cost_{curt_{PV}}^D(t) - \sum_{q \in Q_{WG}} Cost_{curt_{WG}}^D(t) \right] \end{aligned} \quad (4.22)$$

όπου το  $P^D(t)$  αναφέρεται στην ηλεκτρική ενέργεια που ανταλλάσσεται μεταξύ του VPP και της αγοράς ενέργειας της επόμενης ημέρας την χρονική στιγμή  $t$ .  $\lambda^D(t)$  είναι η οριακή τιμή συστήματος (ΟΤΣ) της αγοράς της επόμενης ημέρας. Ως επέκταση, το γινόμενο  $\lambda^D(t) P^D(t) \tau$  αναπαριστά τα έσοδα ή έξοδα του VPP για το χρονικό διάστημα  $\tau$ . Όταν  $P^D(t) \geq 0$  τότε το VPP πουλάει ενέργεια στο δίκτυο, ενώ όταν  $P^D(t) < 0$  το VPP αγοράζει ενέργεια από την αγορά της επόμενης ημέρας. Τα  $Cost_{GT}(t)$ ,  $Cost_{FL}(t)$  και  $Cost_{GDiesel}(t)$  αναφέρονται στα κόστη παραγωγής την χρονική στιγμή  $t$  των θερμοηλεκτρικών μονάδων φυσικού αερίου, των ελεγχόμενων φορτίων και των πετρελαϊκών μονάδων παραγωγής, αντίστοιχα. Τα  $Cost_{curt_{PV}}^D(t)$  και  $Cost_{curt_{WG}}^D(t)$  αναφέρονται στα κόστη περικοπής (curtailment cost) των ΑΠΕ και συγκεκριμένα των ΦΒ και Α/Γ.

Το VPP συμμετέχει στην αγορά ενέργειας ως μια ενιαία οντότητα. Επομένως, κάθε χρονική στιγμή  $t$  πρέπει να ικανοποιείται η ακόλουθη συνθήκη που προβλέπει ότι το VPP δεν μπορεί να αγοράζει και να πουλάει ηλεκτρική ενέργεια στην αγορά της επόμενης ημέρας την ίδια χρονική στιγμή  $t$ . Ο περιορισμός αυτός είναι γνωστός ως εξίσωση ισοζυγίου ενέργειας (energy balance equation) και αναπαρίσταται από την εξίσωση (4.23).

$$\begin{aligned} \sum_{g \in G} E_G(t) + \sum_{g \in G_D} E_{Gdiesel}(t) + \sum_{q \in Q_{PV}} [E'_{PV}(t) - E_{PV}^{curt}(t)] + \sum_{q \in Q_{WG}} [E'_{WG}(t) - E_{WG}^{curt}(t)] \quad (4.23) \\ + \sum_{k \in K} P_S^d(t) + \sum_{b \in B} P_{SB}^d(t) = \sum_{f \in F} E_{FL}(t) + \sum_{k \in K} P_S^c(t) + \sum_{b \in B} P_{SB}^c(t) + P^D(t) \end{aligned}$$

όπου  $E_G(t)$  είναι η παραγόμενη ενέργεια από τις θερμοηλεκτρικές μονάδες φυσικού αερίου,  $E_{Gdiesel}(t)$  είναι η παραγόμενη ενέργεια από τις πετρελαϊκές μονάδες παραγωγής,  $E_{FL}(t)$  είναι η κατανάλωση των ελεγχόμενων φορτίων,  $E'_{PV}(t)$  και  $E'_{WG}(t)$  είναι η προβλεπόμενη παραγωγή των ΦΒ και των Α/Γ, αντίστοιχα,  $E_{PV}^{curt}(t)$  και  $E_{WG}^{curt}(t)$  είναι η περικοπή ενέργειας στα ΦΒ και στις Α/Γ, αντίστοιχα,  $P_S^d(t)$  και  $P_{SB}^d(t)$  είναι η παροχή ισχύος από το αντλιοστάσιο προς το δίκτυο και στην εκφόρτιση των μπαταριών, αντίστοιχα, και  $P_S^c(t)$  και  $P_{SB}^c(t)$  είναι η αποθήκευση ισχύος στο αντλιοστάσιο και στην φόρτιση των μπαταριών, αντίστοιχα.

Όπως φαίνεται από τις εξισώσεις (4.22) και (4.23), ο προγραμματισμός της λειτουργίας ενός VPP δεν είναι εύκολη διαδικασία και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, μερικοί από τους οποίους είναι άγνωστοι. Συγκεκριμένα, στην εξίσωση (4.23) συμπεριλαμβάνονται οι παραγωγές των ΑΠΕ του VPP. Καθώς όμως η συμμετοχή στην αγορά της επόμενης ημέρας απαιτεί την γνώση της παραγωγής σε 24 ώρες από την στιγμή που κατατίθεται η προσφορά του κάθε συμμετέχοντα, το VPP είναι αναγκασμένο να συμπεριλαμβάνει τις προβλέψεις των ΑΠΕ στον προγραμματισμό του. Επιπλέον, στην εξίσωση (4.22) συμπεριλαμβάνεται η ΟΤΣ η οποία δεν είναι γνωστή την χρονική στιγμή που ο διαχειριστής του VPP καλείται να υποβάλει τον προγραμματισμό της λειτουργίας του για τις επόμενες 24 ώρες. Συνεπώς, εκτός των προβλέψεων για τις ΑΠΕ, το VPP πρέπει να διαθέτει και προβλέψεις για την ΟΤΣ της αγοράς της επόμενης ημέρας.

#### 4.6 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

Ο στοχαστικός προγραμματισμός (stochastic programming) αποτελεί μαθηματικό εργαλείο που χρησιμοποιείται για την προσέγγιση προβλημάτων βελτιστοποίησης που περιέχουν αβεβαιότητα [28], [30]. Σε αντίθεση με τα αιτιοκρατικά προβλήματα, τα προβλήματα που περιέχουν αβεβαιότητα απαιτούν τη χρήση προσεγγίσεων και προβλέψεων για την επίλυσή τους. Συγκεκριμένα, ο στοχαστικός προγραμματισμός χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων όπου οι άγνωστες μεταβλητές κυμαίνονται εντός γνωστού εύρους τιμών και μπορούν να εκτιμηθούν με χρήση κατανομών πιθανοτήτων.

Για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος με χρήση στοχαστικού προγραμματισμού οι εξισώσεις (4.23) και (4.24) μετατρέπονται ως ακολούθως:

$$\begin{aligned} \max \pi = \sum_w p_i(w) \{ \sum_t [\lambda^{D'}(t, w) P^D(t, w) - Cost_{GT}(t, w) - Cost_{FL}(t, w) - \\ - Cost_{GDiesel}(t, w) - Cost_{curt_{PV}}^D(t, w) - Cost_{curt_{WG}}^D(t, w)] \} \end{aligned} \quad (4.24)$$

$$\begin{aligned} \sum_{g \in G} E_G(t, w) + \sum_{g \in G_D} E_{Gdiesel}(t, w) + \sum_{q \in Q_{PV}} [E'_{PV}(t, w) - E_{PV}^{curt}(t, w)] \\ + \sum_{q \in Q_{WG}} [E'_{WG}(t, w) - E_{WG}^{curt}(t, w)] + \sum_{k \in K} P_S^d(t, w) + \sum_{b \in B} P_{SB}^d(t, w) \\ = \sum_{f \in F} E_{FL}(t, w) + \sum_{k \in K} P_S^c(t, w) + \sum_{b \in B} P_{SB}^c(t, w) + P^D(t, w) \end{aligned} \quad (4.25)$$

Σε αντίθεση με τις εξισώσεις (4.22) και (4.23), οι εξισώσεις (4.24) και (4.25) περιέχουν το νέο παράγοντα  $w$  ο οποίος προσδιορίζει το σενάριο επίλυσης. Επιπλέον, το  $p_i(w)$  αναφέρεται στην πιθανότητα κάθε σεναρίου  $w$  η οποία προσδιορίζεται από την κατανομή των πιθανοτήτων κάθε σεναρίου και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του προσδοκώμενου κέρδους του VPP.

Για την επίτευξη του όσο το δυνατόν, καλύτερου προγραμματισμού επιλέγεται κατάλληλος αριθμός σεναρίων,  $w$ , ο οποίος εξαρτάται από τον αριθμό των στοχαστικών μεταβλητών [27]. Το συγκεκριμένο πρόβλημα που μελετάται σε αυτή την διπλωματική εργασία περιέχει τρεις στοχαστικές μεταβλητές: την παραγωγή των ΦΒ, την παραγωγή των Α/Γ και την ΟΤΣ. Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται χρήση εννέα σεναρίων τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2. Η επιλογή των σεναρίων  $w$  έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχουν τρεις καταστάσεις για όλες τις στοχαστικές μεταβλητές. Συγκεκριμένα, κατά την επίλυση του προβλήματος εξετάζονται όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί για διαφορές στην παραγωγή των ΑΠΕ καθώς και πως αλλαγές στις προβλέψεις των ΟΤΣ επηρεάζουν το μοντέλο [7], [14]. Για λόγους πληρότητας είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στην μοντελοποίηση του προβλήματος αυτής της διπλωματικής εργασίας θεωρείται ότι η παραγωγή των ΑΠΕ του VPP καθώς και η πρόβλεψη της ΟΤΣ είναι ανεξάρτητες μεταβλητές μεταξύ τους.

Συνοψίζοντας, τα VPPs που χρησιμοποιούν τον στοχαστικό προγραμματισμό βασίζονται τις αποφάσεις τους βάσει ενός πιθανολογικού μοντέλου που προσδιορίζει το αναμενόμενο κέρδος του VPP ανάλογα με την προβλεπόμενη παραγωγή των ΑΠΕ και την προβλεπόμενη ΟΤΣ.

**Πίνακας 4.2:** Σεναρία για την προσέγγιση των στοχαστικών μεταβλητών

A/A Σεναρίου	ΦΒ	Α/Γ	ΟΤΣ
1	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή
2	Μέση	Χαμηλή	Μέση
3	Υψηλή	Χαμηλή	Υψηλή
4	Χαμηλή	Μέση	Χαμηλή
5	Μέση	Μέση	Μέση
6	Υψηλή	Μέση	Υψηλή
7	Χαμηλή	Υψηλή	Χαμηλή
8	Μέση	Υψηλή	Μέση
9	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή

## 4.7 ΕΥΡΩΣΤΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

Όπως ο στοχαστικός προγραμματισμός, έτσι και ο εύρωστος προγραμματισμός (robust programming) αποτελεί ένα μαθηματικό εργαλείο που χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων που περιέχουν υψηλή αβεβαιότητα. Σε αντίθεση με τον στοχαστικό προγραμματισμό, ο εύρωστος προγραμματισμός επιτρέπει την εισαγωγή του μεγέθους του ρίσκου στην μοντελοποίηση του προβλήματος. Συγκεκριμένα, μέσω του εύρωστου προγραμματισμού μπορεί να εισαχθεί η χειρότερη δυνατή περίπτωση στον προγραμματισμό των στοχαστικών μονάδων [7], [13]. Με την εισαγωγή της χειρότερης δυνατής κατάστασης, δηλαδή της χειρότερης δυνατής αστοχίας των προβλέψεων των ΑΠΕ ο εύρωστος προγραμματισμός προσφέρει ένα πιο συντηρητικό προγραμματισμό της λειτουργίας του VPP. Ως συνέπεια, ο εύρωστος προγραμματισμός προσφέρει χαμηλότερα προβλεπόμενα κέρδη μειώνοντας παράλληλα την έκθεση του VPP στον κίνδυνο λόγω πιθανών αστοχιών στις προβλέψεις των ΑΠΕ.

Η γενική μορφή του εύρωστου προγραμματισμού είναι η ακόλουθη:

$$\max_{\text{scenarios}} \{ \pi \} + \max_W \{ \min Cost^B \} \quad (4.26)$$

Η εξίσωση (4.26) αποτελείται από δύο ξεχωριστά προβλήματα. Το πρώτο μέρος αποτελεί ένα κλασικό πρόβλημα στοχαστικού προγραμματισμού όπου το ζητούμενο είναι η μεγιστοποίηση του κέρδους  $\pi$  με βάση πιθανολογικά σενάρια πρόβλεψης των στοχαστικών μεταβλητών. Το δεύτερο μέρος αποτελεί ένα δεύτερο πρόβλημα το οποίο μπορεί να χωριστεί σε δύο υποπροβλήματα. Συνοπτικά, το δεύτερο μέρος αναζητά την εύρεση του κόστους της χειρότερης δυνατής κατάστασης. Αναλυτικότερα, το εξωτερικό υποπρόβλημα αναζητά να μεγιστοποιήσει το εσωτερικό υποπρόβλημα χρησιμοποιώντας ως περιορισμό τις παραγωγές των στοχαστικών μονάδων  $W$ . Αντίθετα, το εσωτερικό υποπρόβλημα αναζητά την λύση του προβλήματος που προσφέρει το χαμηλότερο κόστος. Επομένως, η περιγραφή του παραπάνω προβλήματος είναι: μεγιστοποίηση του κέρδους  $\pi$  με χρήση σεναρίων και μεγιστοποίηση του ελάχιστου δυνατού κόστους κάθε κατάστασης για όλες τις πιθανές στοχαστικές μεταβλητές  $W$ . Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι, σε αντίθεση με την επίλυση του στοχαστικού προγραμματισμού, κατά την ελαχιστοποίηση του κόστους στον εύρωστο προγραμματισμό δεν χρησιμοποιούνται προβλέψεις αλλά πιθανές πραγματικές παραγωγές με αποτέλεσμα όλες οι μεταβλητές να θεωρούνται γνωστές. Αυτό συμβαίνει καθώς ο στόχος του εύρωστου προγραμματισμού είναι να εισάγει το χειρότερο δυνατό σενάριο και όχι ένα σύνολο από πιθανά μη ευνοϊκά σενάρια.

Παρόλο που η εξίσωση (4.26) επεξηγεί την λογική ενός προβλήματος εύρωστου προγραμματισμού, δεν μπορεί να επιλυθεί στην παρούσα μορφή του, καθώς αποτελεί πρόβλημα max min [7]. Για την επίλυση του προβλήματος αρκεί να μετατραπεί σε max max ή min min. Στην παρούσα διπλωματική εργασία για λόγους ευκολίας επιλέγεται η μετατροπή του προβλήματος από max min σε max max. Αυτό είναι δυνατό λόγω της δυϊκότητας (duality) του προβλήματος καθώς η ελαχιστοποίηση του κόστους είναι ισοδύναμη με την μεγιστοποίηση του κέρδους. Επομένως, μετατρέποντας το πρόβλημα, επιτυγχάνεται η κατασκευή ενός max max max προβλήματος, όπως φαίνεται στην εξίσωση (4.27), το οποίο πλέον μπορεί να επιλυθεί ως ένα ενιαίο πρόβλημα μεγιστοποίησης [7].

$$\max_{\text{scenarios}} \{ \pi \} + \max_W \{ \max \pi^B \} \quad (4.27)$$

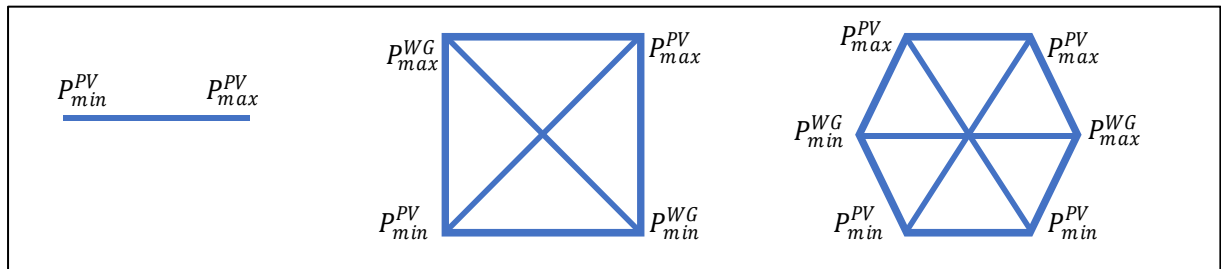
Η μοντελοποίηση του προβλήματος βελτιστοποίησης ενός τυπικού VPP χρησιμοποιώντας τον εύρωστο προγραμματισμό υλοποιείται με τις εξισώσεις (4.28) και (4.25). Η εξίσωση (4.28) αντιστοιχεί στην αντικειμενική εξίσωση, ενώ η εξίσωση (4.25) είναι η εξίσωση ισοζυγίου ενέργειας (energy balance equation). Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η εξίσωση (4.28) μοντελοποιήθηκε βάσει του προτύπου δύο τιμών στην αγορά εξισορρόπησης. Για αυτό τον λόγο συμπεριλαμβάνονται δύο πρόστιμα, ένα στην περίπτωση που η παραγωγή είναι χαμηλότερη των δεσμεύσεων του VPP και ένα στην περίπτωση όπου η παραγωγή είναι υψηλότερη από τις δεσμεύσεις του VPP.

$$\begin{aligned} \max \pi = & \sum_w p_i(w) \left\{ \sum_t [\lambda^{D'}(t, w) P^D(t, w) - Cost_{GT}(t, w) - Cost_{FL}(t, w) - \right. \\ & \left. - Cost_{GDiesel}(t, w) - Cost_{curt_{PV}}^D(t, w) - Cost_{curt_{WG}}^D(t, w)] \right\} \\ & + \sum_t [-\lambda_{up}^B(t) P_{upreg}^D(t) - \lambda_{down}^B(t) P_{dnreg}^D(t) - Cost_{curt_{PV}}^B(t) - Cost_{curt_{WG}}^B(t)] \end{aligned} \quad (4.28)$$

όπου τα  $\lambda_{up}^B(t)$  και  $\lambda_{down}^B(t)$  αναφέρονται στο πρόστιμο που καλούνται να πληρώσουν οι παραγωγοί όταν δεν καταφέρουν να εκπληρώσουν την υποχρέωσής τους την χρονική στιγμή  $t$ . Συγκεκριμένα, το  $\lambda_{up}^B(t)$  αναπαριστά το πρόστιμο στην περίπτωση που η παραγωγή είναι χαμηλότερη από τις δεσμεύσεις του παραγωγού και υπολογίζεται από την διαφορά μεταξύ της  $OTA_{hi}$  και της ΟΤΣ. Αντίστοιχα, το  $\lambda_{down}^B(t)$  αναπαριστά το πρόστιμο που καλείται να πληρώσει ένας παραγωγός όταν η παραγωγή του είναι μεγαλύτερη από αυτήν που είχε δεσμευτεί. Το πρόστιμο για μείωση της παραγωγής υπολογίζεται από την διαφορά της  $OTA_{lo}$  και της ΟΤΣ. Καθώς, οι  $OTA_{lo}$  και  $OTA_{hi}$  δεν είναι γνωστές κατά την επίλυση του παραπάνω προβλήματος, χρησιμοποιούνται προσεγγίσεις τους που υπολογίζονται ως ποσοστά των μέσων ΟΤΣ ανά ώρα.

Οι  $P_{upreg}^D(t)$  και  $P_{dnreg}^D(t)$  αναπαριστούν την αύξηση και μείωση της ισχύος (up-regulation και down-regulation) που απαιτείται για την εξισορρόπηση του συστήματος την χρονική στιγμή  $t$ .

Τα  $Cost_{curt_{PV}}^B(t)$  και  $Cost_{curt_{WG}}^B(t)$  αποτελούν τα κόστη περικοπής (curtailment costs) για την μείωση της παραγωγής των ανανεώσιμων μονάδων και συγκεκριμένα των ΦΒ και Α/Γ στην χειρότερη δυνατή κατάσταση. Στην παρούσα διπλωματική εργασία το curtailment cost τέθηκε στα 70 ευρώ/ MWh.



**Σχήμα 4.6:** Εύρεση χειρότερης δυνατής κατάστασης για Α. μια στοχαστική μονάδα, Β. δύο στοχαστικές μονάδες, Γ. τρεις στοχαστικές μονάδες

Μια διαφορά μεταξύ των εξισώσεων (4.27) και (4.28) είναι ότι στην εξίσωση (4.28) δεν επιλύεται ένα ανεξάρτητο πρόβλημα για την εύρεση της χειρότερης δυνατής κατάστασης. Όπως αναφέρεται στο [7], η χειρότερη δυνατή κατάσταση βρίσκεται πάντα σε ακραία κατάσταση παραγωγής. Δηλαδή, η χειρότερη κατάσταση ενός προβλήματος που περιέχει μια στοχαστική μονάδα θα βρίσκεται είτε στην κατάσταση όπου η παραγωγή της είναι ελάχιστη, είτε στην κατάσταση κατά την οποία η παραγωγή της είναι μέγιστη. Όμοια, αν το πρόβλημα περιέχει δύο στοχαστικές μεταβλητές, τότε η χειρότερη κατάσταση θα βρίσκεται σε μια από τις τέσσερις ακραίες καταστάσεις λειτουργίας του συστήματος, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6.B. Επεκτείνοντας την υπόθεση για τρεις στοχαστικές μεταβλητές, η ακραία περίπτωση θα βρίσκεται και πάλι σε μια από τις ακραίες καταστάσεις του συστήματος, οι οποίες θα αντιστοιχούν στις γωνίες ενός εξαπλεύρου, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6.Γ. Επομένως, ανάλογα με το πλήθος των ανεξάρτητων στοχαστικών μεταβλητών του προβλήματος, είναι γνωστό ότι η ακραία κατάσταση λειτουργίας του συστήματος θα βρίσκεται σε μία από τις ακραίες θέσεις του πολύπλευρου που σχηματίζουν οι παραγωγές των στοχαστικών μονάδων.

Με βάση τα παραπάνω, για την επίλυση του προβλήματος εύρωστου προγραμματισμού είναι δυνατόν να βρεθεί η χειρότερη δυνατή κατάσταση σε προηγούμενο στάδιο, με χρήση δοκιμών, και να χρησιμοποιηθεί κατευθείαν στην επίλυση του προβλήματος.

## 4.8 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΡΥΠΤΟΝΟΜΙΣΜΑΤΩΝ ΣΤΑ VPPS

### 4.8.1 Εισαγωγή

Η ιδέα των κρυπτονομισμάτων (cryptocurrencies) εμφανίστηκε για πρώτη φορά την δεκαετία του 1980 στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής και στην Ολλανδία, ενώ το πρώτο διαδικτυακό νόμισμα Digicash εκδόθηκε το 1990 χωρίς όμως την επιτυχία των μεταγενέστερων cryptocurrencies [31]. Το πρώτο ευρέως αποδεκτό cryptocurrency είναι το Bitcoin το οποίο κυκλοφόρησε στην αγορά το 2009 μετά την ανώνυμη κατάθεση του άρθρου “Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System” από τον ή τους Satoshi Nakamoto το 2008 [9]. Η αρχή λειτουργίας του Bitcoin και των μεταγενέστερων cryptocurrencies βασίζεται στην τεχνολογία μπλοκ αλυσίδα (block chain) η οποία επιτρέπει την κατασκευή αποκεντρωμένων (decentralized) ηλεκτρονικών νομισμάτων καθώς όλες οι συναλλαγές πραγματοποιούνται απευθείας μεταξύ των χρηστών χωρίς την ανάγκη κάποιου ενδιάμεσου. Επιπρόσθετα, όλες οι συναλλαγές καταγράφονται σε ένα δημόσια καταναμεμημένο ημερολόγιο γνωστό ως block chain το οποίο εγγυάται την ασφάλεια των συναλλαγών.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια ραγδαία αύξηση στο παγκόσμιο ενδιαφέρον για τα cryptocurrencies. Σε αντίθεση με άλλα νομίσματα, τα cryptocurrencies έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον τόσο των επενδυτών, που αναζητούν να επωφεληθούν από την αύξηση της διακινούμενης αξίας των cryptocurrencies, όσο και των ιδιωτών και επενδυτών που αναζητούν να επωφεληθούν από την εξόρυξη και αργότερα μεταπώλησή τους στην αγορά.

Σε αυτή την διπλωματική εργασία εξετάζεται κατά πόσο η εξόρυξη cryptocurrencies και η μεταπώλησή τους στις αγορές μπορεί να είναι επωφελής για ένα VPP. Συγκεκριμένα, μελετάται το οικονομικό όφελος που προσφέρει η εξόρυξη και πώληση τριών cryptocurrencies: Bitcoin (BTC), Ethereum (ETH) και Dogecoin. Η επιλογή των τριών cryptocurrencies έγινε με βάση την δημοτικότητα τους κατά την περίοδο συγγραφής της διπλωματικής εργασίας.



## 4.8.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Σε αυτή την ενότητα αναφέρονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των τριών cryptocurrencies που χρησιμοποιούνται στην διπλωματική εργασία. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται δεν αποτελούν την πλήρη εικόνα των cryptocurrencies αλλά είναι αναγκαία για την κατασκευή της μαθηματικής μοντελοποίησης που χρησιμοποιείται στα επόμενα κεφάλαια.

Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση της εξόρυξης cryptocurrencies είναι:

1. Η υπολογιστική δύναμη της εγκατάστασης εξόρυξης
2. Η κατανάλωση της εγκατάστασης εξόρυξης
3. Ο αριθμός των ανταγωνιστών που προσπαθούν να επιλύσουν το πρόβλημα την ίδια στιγμή
4. Η δυσκολία εξόρυξης (mining difficulty)

Η υπολογιστική δύναμη της εγκατάστασης εξόρυξης προσδιορίζει πόσο γρήγορα μπορεί ο υπολογιστής να εκτελεί μαθηματικές πράξεις [32]. Η μονάδα μέτρησης που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της υπολογιστικής δύναμης είναι το hashrate ανά δευτερόλεπτο. Μηχανήματα με υψηλό hashrate υλοποιούν περισσότερες πράξεις ανά δευτερόλεπτο και επομένως επιφέρουν περισσότερα κέρδη κατά μέσο όρο.

Η κατανάλωση της εγκατάστασης αναφέρεται στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας των μηχανημάτων η οποία αποτελεί το κύριο κόστος λειτουργίας των εγκαταστάσεων εξόρυξης.

Η δυσκολία εξόρυξης (mining difficulty) καθώς και ο αριθμός των ανταγωνιστών miners ορίζει την πιθανότητα επίλυσης του προβλήματος. Συγκεκριμένα, ο όρος mining difficulty χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της δυσκολία του προβλήματος εξόρυξης. Η δυσκολία εξόρυξης δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Για παράδειγμα, η δυσκολία εξόρυξης για το Bitcoin μεταβάλλεται κάθε 2016 μπλοκ ώστε ο μέσος χρόνος επίλυσης του puzzle να διατηρείται σταθερός και ίσος με 10 λεπτά [32]. Επομένως, η δυσκολία εξόρυξης αυξάνεται καθώς αυξάνεται η υπολογιστική δύναμη του δικτύου των miners και μειώνεται όταν η υπολογιστική δύναμη του συνόλου των εγκαταστάσεων εξόρυξης μειώνεται.

### 4.8.2.1 Bitcoin

Το Bitcoin (BTC) αποτελεί το πρώτο πετυχημένο cryptocurrency. Μετά την πρώτη συναλλαγή του στις αγορές, τον Ιούλιο του 2010, στην τιμή των \$0.0008 ανά κομμάτι, το bitcoin έφτασε να πωλείται στην τιμή των σχεδόν \$63,000 ανά κομμάτι μόλις 11 χρόνια αργότερα [33], [34]. Σε αντίθεση με τα άλλα cryptocurrencies, που μελετώνται στην διπλωματική εργασία, το Bitcoin διαθέτει ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό που δικαιολογεί αυτή την σημαντική αύξηση της τιμής του. Το Bitcoin διαθέτει έναν σταθερό αριθμό νομισμάτων που μπορούν να εξορυχθούν. Συγκεκριμένα, μετά την εξόρυξη 21 εκατομμυρίων bitcoin θα σταματήσει η διαδικασία εξόρυξης [35]. Επομένως, η τιμή του Bitcoin εξαρτάται αποκλειστικά από τις προσδοκίες των κατόχων του. Σε αντίθεση με άλλα νομίσματα, το Bitcoin δεν επιτρέπει την χρήση νομισματικής πολιτικής και συνεπώς δεν επιτρέπεται η χειραγώγηση της αξίας του. Δηλαδή, δεν είναι δυνατή η έκδοση ή η απόσυρση νομισμάτων από την αγορά που θα οδηγούσε στη μείωση ή στην αύξηση της τιμής του Bitcoin, αντίστοιχα.

Για την εξόρυξη ενός Bitcoin, οι miners καλούνται να λύσουν ένα δύσκολο μαθηματικό puzzle. Κατά την επίλυση του puzzle, ο ή οι συμμετέχοντες που κατάφεραν να λύσουν το πρόβλημα επιβραβεύονται με ένα Bitcoin μπλοκ. Ο τρόπος επιβράβευσης βασίζεται στο πρωτόκολλο απόδειξης

εργασίας (proof of work) το οποίο εξασφαλίζει ότι οι ανταμοιβές δίνονται στους χρήστες που κατάφεραν να λύσουν το πρόβλημα. Αυτή την στιγμή, ένα bitcoin μπλοκ αντιστοιχεί σε 6.25 bitcoin. Παρόλα αυτά η αξία του μπλοκ δεν είναι σταθερή και υποδιπλασιάζεται μετά την επιτυχημένη εξόρυξη 210,000 μπλοκ το οποίο αντιστοιχεί σε περίπου τέσσερα χρόνια καθώς ο μέσος χρόνος επίλυσης ενός μπλοκ αντιστοιχεί σε περίπου 10 λεπτά [35]. Η επόμενη υποδιαίρεση του μπλοκ αναμένεται κάποια στιγμή το 2024 μετά από την οποία οι miners θα επιβραβεύονται με 3.125 BTC ανά μπλοκ.

Ένας παράγοντας που επηρεάζει την εξόρυξη Bitcoin είναι ο μηχανισμός εξόρυξης. Σήμερα, ένας από τους καλύτερους εξοπλισμούς εξόρυξης που διατίθεται στην αγορά είναι ο Antminer S19 ο οποίος διαθέτει υπολογιστική δύναμη της τάξης των 95 TH/s (terra hash per second), με κατανάλωση 3250W και τιμή πώλησης της τάξης των 7000 δολαρίων ΗΠΑ (USD) [36]. Επισημαίνεται ότι η τιμή που αναφέρεται αποτελεί την μέση τιμή πώλησης τον τελευταίο χρόνο και επομένως ανάλογα με την περίοδο που εξετάζεται μπορεί να υπάρχουν διαφορές στην τιμή αγοράς.

#### 4.8.2.2 Ethereum

Το Ethereum (ETH) αποτελεί το δεύτερο πιο δημοφιλές cryptocurrency της αγοράς. Η πρώτη αναφορά του Ethereum έγινε το 2013 από τον δημιουργό του Vitalik Buterin ενώ το cryptocurrency κυκλοφόρησε στην αγορά το 2015 [37]. Σε αντίθεση με το Bitcoin, το Ethereum δεν αποτελεί αποκλειστικά ένα cryptocurrency αλλά υποστηρίζει πληθώρα συναλλαγών που βασίζονται στα ευφυή συμβόλαια (smart contracts), ένα εκ των οποίων προσφέρει την δυνατότητα συναλλαγών Ether που αντιστοιχούν στο cryptocurrency του Ethereum [38]. Μια από τις σημαντικότερες διαφορές μεταξύ των δύο νομισμάτων αποτελεί ο τρόπος επιβράβευσης. Παρόλο που το Ethereum ξεκίνησε την επιβράβευση των miners με βάση το πρωτόκολλο proof of work, λόγω περιορισμών στην επεκτασιμότητα αποφασίστηκε η εισαγωγή ενός νέου πρωτοκόλλου γνωστού ως proof of stake [38]. Η διαφορά του proof of work από το proof of stake έγκειται στον τρόπο επιβράβευσης. Συγκεκριμένα, το πρωτόκολλο proof of stake ορίζει έναν χρήστη του δικτύου του Ethereum γνωστό και ως κόμβο (node) ως τον υπεύθυνο για την επικύρωση του επόμενου μπλοκ. Κατά την επιλογή ενός κόμβου ο χρήστης υποχρεούται να καταβάλει ως εγγύηση 32 ETH τα οποία μπορούν να του αφαιρεθούν στην περίπτωση που επικυρωθούν παράνομα μπλοκ [39]. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας ο κόμβος επιβραβεύεται με βάση ένα ποσοστό της αξίας των ETH που έχει στην κατοχή του. Επιπλέον, μετά από ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα του επιστρέφονται και τα 32 ETH που είχαν δεσμευτεί ως εγγύηση. Σήμερα στην αγορά διαπραγματεύονται δύο Ethereum: 1) το Ethereum 1.0 που ακολουθεί το πρωτόκολλο proof of work και 2) το Ethereum 2.0 που ακολουθεί το πρωτόκολλο proof of stake. Αυτό θα εξακολουθήσει έως και το 2022 όπου αναμένεται η πλήρης εισαγωγή του Ethereum 2.0 οπότε τα δύο νομίσματα θα συγχωνευτούν και θα υιοθετηθεί πλήρως το πρωτόκολλο proof of stake [39].

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η εξόρυξη Ethereum 1.0, ενώ αναφέρεται πως θα επηρεάσει την λειτουργία της εγκατάστασης η πλήρης κυκλοφορία του Ethereum 2.0 το 2022. Επιπλέον, σε αντίθεση με το Bitcoin, για το Ethereum εξετάζονται δύο διαφορετικές εγκαταστάσεις εξόρυξης: η καλύτερη δυνατή εγκατάσταση και η μέση εγκατάσταση που χρησιμοποιείται από ιδιώτες miners. Ένας από τους καλύτερους μηχανισμούς εξόρυξης Ethereum 1.0, την χρονική στιγμή που συγγράφεται η διπλωματική εργασία, είναι ο ASIC A10 Pro με υπολογιστική δύναμη της τάξης των 500MH/s, κατανάλωση ίση με 950W και τιμή πώλησης 10,000 δολάρια ΗΠΑ [40]. Από την άλλη, μια μέση εγκατάσταση εξόρυξης διαθέτει υπολογιστική δύναμη ίση με 40MH/s, καταναλώνει 250W και κοστίζει περίπου 200 δολάρια ΗΠΑ [41].

### 4.8.2.3 Dogecoin

Το Dogecoin αποτελεί το τρίτο cryptocurrency που μελετάται στην εργασία. Η πρώτη αναφορά του έγινε το 2013 από τους Jackson Palmer και Billy Markus οι οποίοι ξεκίνησαν την διαδικασία έκδοσής του ως αστείο καθώς το σύμβολο του νομίσματος θα ήταν ένα σκίτσο ενός σκύλου, του Shiba Inu [42]. Σε αντίθεση με τα Bitcoin και Ethereum, το Dogecoin δεν εισήγαγε κάποια νέα εφαρμογή του block chain αλλά ακολούθησε την αρχιτεκτονική ενός άλλου cryptocurrency, του Litecoin [42]. Λόγω της φύσης του, το Dogecoin απέκτησε γρήγορα μεγάλο κοινό επενδυτών που συμμετείχαν στο αστείο των δημιουργών του. Όπως και το Bitcoin, το Dogecoin χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο proof of work για την επιβράβευση των επιτυχημένων mines.

Μια σημαντική διαφορά μεταξύ του Dogecoin και των Bitcoin και Ethereum έγκειται στην διαδικασία εξόρυξης. Σε αντίθεση με τους miners των δύο δημοφιλέστερων cryptocurrencies, οι miners του Dogecoin μπορούν να κάνουν mine Dogecoin και Litecoin ταυτόχρονα. Αυτό είναι αποτέλεσμα της παρόμοιας αρχιτεκτονικής των δύο νομισμάτων [42].

Η εγκατάσταση εξόρυξης Dogecoin που εξετάζεται αντιστοιχεί στη μέση εγκατάσταση εξόρυξης των ιδιωτών miners η οποία διαθέτει υπολογιστική δύναμη ίση με 40MH/s, κατανάλωση 250W και τιμή αγοράς ίση με 200 δολάρια ΗΠΑ [25].

### 4.8.3 Μοντελοποίηση

Η μαθηματική μοντελοποίηση των cryptocurrencies στα VPPs έγινε με βάση τις ακόλουθες υποθέσεις. Αρχικά, η διαδικασία εξόρυξης δεν εγγυάται την επιτυχημένη εξόρυξη cryptocurrencies. Επομένως, κατά την μοντελοποίηση του προβλήματος χρησιμοποιείται η μέση απόδοση των εγκαταστάσεων εξόρυξης. Τα δεδομένα για την μέση απόδοση κάθε εγκατάστασης βρέθηκαν από την ιστοσελίδα CryptoCompare η οποία χρησιμοποιεί δημόσια διαθέσιμα δεδομένα από όλους τους ενεργούς miners για την προσέγγιση της μέσης απόδοσης μιας εγκατάστασης συγκεκριμένης υπολογιστικής δύναμης [43]. Επιπλέον, μετά από την επιτυχημένη εξόρυξή τους, όλα τα cryptocurrencies πωλούνται κατευθείαν στην αγορά και δεν αποταμιεύονται για μελλοντική μεταπώληση. Καθώς η τιμή των cryptocurrencies περιέχει υψηλή μεταβλητότητα, για να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των τριών cryptocurrencies, επιλέγεται μία σταθερή τιμή, ίση με την τιμή των cryptocurrencies την στιγμή έναρξης της διπλωματικής εργασίας.

Με βάση τα παραπάνω ορίζεται το μέσο κέρδος εξόρυξης ως:

$$\pi_{crypt}(t) = \lambda^c \mu^c P_{Scrypt}(t) \quad (4.30)$$

όπου  $c$  αντιπροσωπεύει το cryptocurrency που εξετάζεται,  $\mu^c$  αντιστοιχεί στην μέση απόδοση των εγκαταστάσεων και μετράται σε cryptocurrency ανά MWh και  $\lambda^c$  αντιστοιχεί στην σταθερή τιμή των cryptocurrency.

### 4.8.4 Ενσωμάτωση στα VPP

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο χρησιμοποιούνται οι εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies στα VPPs που μελετώνται στην διπλωματική εργασία. Οι εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ελεγχόμενα φορτία τα οποία μπορούν να προσαρμόσουν την κατανάλωσή τους για την βελτιστοποίηση της λειτουργίας και κερδοφορίας του

VPP. Παρόλα αυτά, οι εγκαταστάσεις αυτές μπορούν να προσφέρουν τόσο υψηλά έσοδα που τελικά να μην χρειάζεται να δρουν ως ελεγχόμενα φορτία αλλά να χρησιμοποιούνται αποκλειστικά ως οικονομικά μέσα (financial instruments) του VPP.

Για τον παραπάνω λόγο, στην διπλωματική εργασία, οι εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies μοντελοποιήθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να εξεταστεί αν η χρήση τους αντιστοιχεί στην χρήση ελεγχόμενων φορτίων ή οικονομικών μέσων.

#### 4.8.4.1 Πρόβλημα Στοχαστικού Προγραμματισμού

Κατά την μοντελοποίηση του στοχαστικού προγραμματισμού οι εγκαταστάσεις μοντελοποιούνται ως εξής:

$$\begin{aligned} \max \pi = \sum_w p_i(w) \{ & \sum_t [\lambda^{D'}(t, w) P^D(t, w) - Cost_{GT}(t, w) - Cost_{FL}(t, w) - \\ & - Cost_{GDiesel}(t, w) - Cost_{curt_{PV}}^D(t, w) - Cost_{curt_{WG}}^D(t, w) + \pi_{crypt}^D(t, w)] \} \end{aligned} \quad (4.31)$$

όπου  $\pi_{crypt}^D(t, w)$  αναπαριστά το μέσο κέρδος του VPP από τις εγκαταστάσεις εξόρυξης την χρονική στιγμή  $t$  και κατά το σενάριο  $w$ .

$$\begin{aligned} & \sum_{g \in G} E_G(t, w) + \sum_{g \in G_D} E_{Gdiesel}(t, w) + \sum_{q \in Q_{PV}} [E'_{PV}(t, w) - E_{PV}^{curt}(t, w)] \\ & + \sum_{q \in Q_{WG}} [E'_{WG}(t, w) - E_{WG}^{curt}(t, w)] + \sum_{k \in K} P_S^d(t, w) + \sum_{b \in B} P_{SB}^d(t, w) \\ & = \sum_{f \in F} E_{FL}(t, w) + \sum_{k \in K} P_S^c(t, w) + \sum_{b \in B} P_{SB}^c(t, w) + P^D(t, w) \\ & + P_{scrypt}(t, w) \end{aligned} \quad (4.32)$$

Η εξίσωση (4.31) και (4.32) προκύπτουν από τις εξισώσεις (4.24) και (4.25) με την εισαγωγή του μέσου κέρδους από τις εγκαταστάσεις εξόρυξης  $\pi_{crypt}^D$  και της ισχύος που καταναλώνεται από τις εγκαταστάσεις εξόρυξης  $P_{scrypt}$ . Η εξίσωση (4.31) είναι η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος, ενώ η εξίσωση (4.32) είναι η εξίσωση ισοζυγίου ενέργειας η οποία πρέπει να ικανοποιείται για κάθε χρονική στιγμή  $t$  και σενάριο  $w$ .

Κατά την μοντελοποίησή τους στο πρόβλημα στοχαστικού προγραμματισμού, οι εγκαταστάσεις εξόρυξης λειτουργούν χωρίς μηχανικούς περιορισμούς με την λειτουργία τους να καθορίζεται αποκλειστικά από το κέρδος που προσφέρουν. Με αυτό τον τρόπο, είναι δυνατόν να εξεταστεί εάν και πότε οι εγκαταστάσεις εξόρυξης είναι προτιμότερο να ελαττώσουν την κατανάλωσή τους ή ακόμη να τεθούν εκτός λειτουργίας σε περίπτωση που το VPP έχει περίσσια ενέργεια και πρέπει να ελαττώσει την παραγωγή του.

#### 4.8.4.2 Πρόβλημα Εύρωστου Προγραμματισμού

Κατά την μοντελοποίηση του εύρωστου προγραμματισμού οι εγκαταστάσεις εξόρυξης μοντελοποιούνται ως ελεγχόμενα φορτία στην αγορά ενέργειας της επόμενης ημέρας ενώ αντιμετωπίζονται ως οικονομικά μέσα στην αγορά εξισορρόπησης.

Η αντικειμενική συνάρτηση του εύρωστου προγραμματισμού είναι η ακόλουθη:

$$\begin{aligned} \max \pi = & \sum_w p_i(w) \left\{ \sum_t [\lambda^{D'}(t, w) P^D(t, w) - Cost_{GT}(t, w) - Cost_{FL}(t, w) - \right. \\ & - Cost_{GDiesel}(t, w) - Cost_{curt_{PV}}^D(t, w) - Cost_{curt_{WG}}^D(t, w) + \pi_{crypt}^D(t, w)] \} \\ & + \sum_t [-\lambda_{up}^B(t) P_{upreg}^D(t) - \lambda_{down}^B(t) P_{dnreg}^D(t) - Cost_{curt_{PV}}^B(t) - Cost_{curt_{WG}}^B(t) \\ & + \pi_{crypt}^B(t)] \end{aligned} \quad (4.33)$$

όπου  $\pi_{crypt}^D$  είναι τα μέσα έσοδα από την εξόρυξη και μεταπώληση των cryptocurrencies από την λειτουργία των εγκαταστάσεων κατά τον προγραμματισμό της επόμενης ημέρας, και  $\pi_{crypt}^B$  είναι τα μέσα έσοδα από την εξόρυξη και μεταπώληση των cryptocurrencies από την λειτουργία των εγκαταστάσεων κατά τον προγραμματισμό της αγοράς εξισορρόπησης.

Η διαφορά μεταξύ των  $\pi_{crypt}^D$  και  $\pi_{crypt}^B$  έγκειται στον χρόνο προγραμματισμού. Τα έσοδα  $\pi_{crypt}^D$  προέρχονται από την λειτουργία των εγκαταστάσεων εξόρυξης που έχει προγραμματιστεί στην αγορά της επόμενης ημέρας, δηλαδή 24 ώρες νωρίτερα. Αντίθετα, τα έσοδα  $\pi_{crypt}^B$  ενώ προέρχονται και πάλι από την λειτουργία των εγκαταστάσεων εξόρυξης, ο προγραμματισμός της λειτουργίας τους γίνεται σε πραγματικό χρόνο στην αγορά εξισορρόπησης.

Σε αυτό το στάδιο είναι σημαντικό να αναφερθεί ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η εκκαθάριση της αγοράς εξισορρόπησης. Στο Κεφάλαιο 3 αναφέρθηκαν 3 τρόποι υπολογισμού της ΟΤΑ: η ενιαία εξισορρόπηση κατά την οποία γίνεται εξισορρόπηση όλου του δικτύου με μια ενιαία ΟΤΑ, η εξισορρόπηση σε ομάδες (balancing groups) κατά την οποία υπολογίζονται διαφορετικές ΟΤΑ ανά ομάδα και τέλος η εξισορρόπηση ανά ζυγό (nodal balancing) κατά την οποία υπολογίζονται διαφορετικές ΟΤΑ για κάθε ζυγό του δικτύου. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται η μέθοδος εξισορρόπησης σε ομάδες. Η επιλογή βασίστηκε στο γεγονός ότι το VPP δεν περιορίζεται γεωγραφικά και επομένως διαφορετικές μονάδες που διαχειρίζεται το VPP μπορεί να μην είναι δυνατόν να εξισορροπηθούν παράλληλα λόγω της μεγάλης απόστασης που τις χωρίζει.

Για παράδειγμα, αν ένα VPP διαθέτει Α/Γ και μια μονάδα παραγωγής η οποία βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από τις Α/Γ τότε, στην περίπτωση που οι Α/Γ παράγουν λιγότερη ενέργεια από αυτή που είχαν δεσμευτεί, μπορεί να μην είναι δυνατόν να καλυφθεί το έλλειμμα ενέργειας από την μονάδα παραγωγής του VPP. Σε αυτή την περίπτωση, ο διαχειριστής του VPP θα πρέπει να αγοράσει την διαφορά της ενέργειας από την αγορά εξισορρόπησης στην υψηλότερη τιμή  $OTA_{Hi}$ . Επιπλέον, η μέθοδος εξισορρόπησης ανά ομάδα επιτρέπει την καλύτερη μελέτη των επιπτώσεων των εγκαταστάσεων εξόρυξης καθώς παρέχει την δυνατότητα του διαχωρισμού των στοιχείων του VPP σε διαφορετικές ομάδες εξισορρόπησης.

Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιούνται 5 ομάδες εξισορρόπησης οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3.

**Πίνακας 4.3:** Κατανομή των μονάδων του VPP στις ομάδες εξισορρόπησης

Ομάδα Εξισορρόπησης 1	Ομάδα Εξισορρόπησης 2	Ξεχωριστές Ομάδες Εξισορρόπησης
A/Γ	Ελεγχόμενα φορτία	Μπαταρίες
Φ.Β.	Μονάδα φυσικού αερίου	Μονάδα Πετρελαίου
Εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies		Αντλιοστάσιο

Η ομαδοποίηση των μονάδων του VPP σε ομάδες εξισορρόπησης έγινε με στόχο τον διαχωρισμό των στοχαστικών μονάδων παραγωγής και των μονάδων εξόρυξης cryptocurrencies από τις υπόλοιπες μονάδες του δικτύου ώστε να εξεταστεί καλύτερα η λειτουργία των εγκαταστάσεων εξόρυξης ως ελεγχόμενα φορτία.

#### 4.9 Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ VPP ΣΤΗΝ ΑΓΟΡΑ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφηκε η δομή της αγοράς εξισορρόπησης καθώς και οι τρόποι με τους οποίους επιβάλλονται πρόστιμα σε μονάδες που δεν κατάφεραν να τηρήσουν τις δεσμεύσεις τους. Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιείται η λειτουργία του VPP στην αγορά εξισορρόπησης.

Αρχικά, κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικό να γίνει μια ολοκληρωμένη αναφορά όλων των παραδοχών που εφαρμόζονται στην διπλωματική εργασία για την μοντελοποίηση της αγοράς εξισορρόπησης. Σε αντίθεση με τις άλλες αγορές ενέργειας που μπορούν να μοντελοποιηθούν ανεξάρτητα, η αγορά εξισορρόπησης δεν μπορεί να διαχωριστεί από τον σχεδιασμό του εύρωστου προγραμματισμού. Επομένως, παρακάτω αναφέρονται όλες οι υποθέσεις που έχουν αναφερθεί σε προηγούμενες ενότητες σχετικά με την αγορά εξισορρόπησης. Αρχικά, η εξισορρόπηση του δικτύου γίνεται σε ομάδες, δηλαδή σε balancing groups. Επιπλέον, η εξισορρόπηση γίνεται με χρήση του συστήματος δύο ΟΤΑ, τις  $OTA_{hi}$  και  $OTA_{lo}$  ώστε να μην είναι δυνατή η εξισορροπητική κερδοσκοπία (arbitrage). Τέλος, σε αντίθεση με την μοντελοποίηση της αγοράς της επόμενης ημέρας, κατά την μοντελοποίηση της αγοράς εξισορρόπησης δεν υπάρχουν στοχαστικές μεταβλητές με αποτέλεσμα να μην υπάρχει αβεβαιότητα και το μοντέλο να είναι πλήρως αιτιοκρατικό.

Με βάση τα παραπάνω, ο προγραμματισμός του VPP στην αγορά εξισορρόπησης είναι ο ακόλουθος:

$$\begin{aligned} \max \pi' = & \sum_t^{24} P^D(t) \lambda^D(t) + \sum_t^{24} [-\lambda_{up}^B(t) P_{up}^B(t) - \lambda_{dn}^B(t) P_{dn}^B(t)] \\ & - Cost_{V_{curt}}^B(t) - Cost_{W_{G_{curt}}}^B(t) - Cost_{GT}^B(t) - Cost_{FL}^B(t) \\ & - Cost_{G_{diesel}}^B(t) + \pi_{Crypto}^B(t)] \end{aligned} \quad (4.34)$$

όπου  $P^D$  είναι η προσφερόμενη ισχύς από το VPP που έχει εκκαθαριστεί από την αγορά ενέργειας,  $\lambda^D$  η ΟΤΣ του δικτύου,  $\lambda_{up}^B$  το πρόστιμο για την αγορά ενέργειας στην αγορά εξισορρόπησης,  $\lambda_{dn}^B$  το πρόστιμο για την πώληση ενέργειας στην αγορά εξισορρόπησης,  $Cost_{GT}^B$  το κόστος παραγωγής των

μονάδων φυσικού αερίου,  $Cost_{FL}^B$  το κόστος αλλαγής κατανάλωσης των ελεγχόμενων φορτίων,  $Cost_{Gdiesel}^B$  το κόστος παραγωγής των πετρελαϊκών μονάδων παραγωγής, και  $\pi_{Crypto}^B$  το μέσο κέρδος από την εξόρυξη cryptocurrency.

Παρατηρώντας την αντικειμενική εξίσωση της αγοράς εξισορρόπησης (4.33) και την αντικειμενική εξίσωση του εύρωστου προγραμματισμού (4.34) μπορεί κάποιος να εντοπίσει αρκετές ομοιότητες. Παρόλα αυτά, υπάρχουν μερικές σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο σχέσεων. Συγκεκριμένα, στην εξίσωση (4.34) τα  $\lambda_{up}^B$  και  $\lambda_{dn}^B$  είναι γνωστά και προκύπτουν με βάση την συνολική απόκλιση του δικτύου από τις δεσμεύσεις των μονάδων του και όχι σαν ένα σταθερό ποσοστό της ΟΤΣ. Επιπλέον, στην αγορά εξισορρόπησης οι δεσμεύσεις του VPP στην αγορά της επόμενης ημέρας  $P^D$  είναι γνωστές για όλο το 24ώρο και δεν αποτελούν μια μεταβλητή, όπως στην εξίσωση (4.33).

Το άθροισμα  $\sum_t^{24} P^D(t) \lambda^D(t)$  αποτελεί τα εκκαθαρισμένα κέρδη του VPP από την πώληση ενέργειας στην αγορά της επόμενης ημέρας και δεν μπορεί να μεταβληθεί από κινήσεις του διαχειριστή του VPP στην αγορά εξισορρόπησης. Το δεύτερο άθροισμα της αντικειμενικής εξίσωσης υπολογίζει τα επιπλέον κόστη που καλείται να πληρώσει ο διαχειριστής του VPP στην περίπτωση που προκύψουν αστοχίες στην παραγωγή των μονάδων οι οποίες δεν μπορούν να καλυφθούν από τις άλλες μονάδες του VPP που ανήκουν στην ίδια ομάδα εξισορρόπησης. Σε αντίθεση με τα έσοδα της αγοράς της επόμενης ημέρας που δεν μπορούν να μεταβληθούν, ο διαχειριστής του VPP μπορεί να μεταβάλει τα επιπλέον κόστη που θα κληθεί να πληρώσει στην αγορά εξισορρόπησης. Επιπλέον, μια σημαντική διαφορά μεταξύ των συμβατικών VPPs και των VPPs που διαθέτουν μονάδες εξόρυξης cryptocurrencies που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική, είναι ότι τα VPPs με μονάδες εξόρυξης μπορούν να αυξήσουν περαιτέρω τα κέρδη τους στην αγορά εξισορρόπησης από την πώληση cryptocurrencies στις οικονομικές αγορές. Ως συνέπεια, η αγορά εξισορρόπησης αντιμετωπίζεται διαφορετικά από τα συμβατικά VPPs και τα VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies. Τα συμβατικά VPPs έχουν ως στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους που καλούνται να πληρώσουν λόγω αστοχιών στις παραγωγές των ΑΠΕ ενώ τα VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης έχουν ως στόχο να μεγιστοποιήσουν τα κέρδη τους με τον βέλτιστο προγραμματισμό των εγκαταστάσεων εξόρυξης για την εξισορρόπηση των μονάδων τους.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι εξισώσεις που προσδιορίζουν την λειτουργία των μονάδων του VPP ανά ομάδα εξισορρόπησης.

### Ομάδα Εξισορρόπησης 1:

Η πρώτη ομάδα εξισορρόπησης αποτελείται από τις στοχαστικές μονάδες παραγωγής του VPP, δηλαδή από τις Α/Γ και τα ΦΒ, καθώς και τις εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies. Η μοντελοποίηση της πρώτης ομάδας γίνεται με τις εξισώσεις (4.35) έως (4.39).

$$E_{PV}^{actual} - E_{PV}^{cleared} - Curt_{PV} - E_{reg_{PV}}^{down} + E_{reg_{PV}}^{up} - E_{PV}^{crypchange} = 0 \quad (4.35)$$

$$E_{WG}^{actual} - E_{WG}^{cleared} - Curt_{WG} - E_{reg_{WG}}^{down} + E_{reg_{WG}}^{up} - E_{WG}^{crypchange} = 0 \quad (4.36)$$

$$E_{PV}^{crypchange} \cdot E_{WG}^{crypchange} \cdot 1000 \geq 0 \quad (4.37)$$

$$\pi_{crypto_{new}}^B = \lambda_{crypt} Crypt_{power} \left( E_{PV}^{crypchange} + E_{PV}^{crypchange} \right) \quad (4.38)$$

$$\pi_{crypto}^B = \pi_{crypto_{new}}^B + \pi_{crypto}^D \quad (4.39)$$

Οι (4.35) και (4.36) αποτελούν τις εξισώσεις εξισορρόπησης για τις ΑΠΕ του VPP. Όταν κάποια από τις στοχαστικές μονάδες δεν καταφέρει να προσφέρει την ενέργεια που είχε δεσμευτεί, τότε υπάρχουν οι ακόλουθες επιλογές:

- Ο διαχειριστής του VPP μπορεί να απενεργοποιήσει τις μονάδες ΑΠΕ και να πληρώσει το ανάλογο κόστος  $Cost_{PV \text{ or } WG}^B$ .
- Ο διαχειριστής του VPP μπορεί να αγοράσει ή να πουλήσει το έλλειμμα ή την περίσσεια ενέργειας, αντίστοιχα, στην αγορά εξισορρόπησης και να πληρώσει το ανάλογο πρόστιμο.
- Ο διαχειριστής του VPP μπορεί να αυξήσει την κατανάλωση στις μονάδες εξόρυξης cryptocurrencies και να επωφεληθεί το ανάλογο κέρδος.

Η εξίσωση (4.37) αποτελεί έναν περιορισμό της λειτουργίας των εγκαταστάσεων εξόρυξης. Συγκεκριμένα, η λειτουργία της εξίσωσης (4.37) είναι να μην επιτρέπει την αύξηση της  $E_{PV}^{cryptchange}$  και μείωση της  $E_{PV}^{cryptchange}$  την ίδια χρονική στιγμή καθώς μια τέτοια κίνηση δεν θα ήταν λογική. Εφόσον οι ΑΠΕ βρίσκονται στην ίδια ομάδα εξισορρόπησης, στην περίπτωση που μια εκ των δύο χρειάζεται να μειώσει την παραγωγή της ενώ η άλλη χρειάζεται να την αυξήσει, δεν θα έπρεπε να μπορούν να καλύψουν και οι δύο τις ανάγκες τους από τις εγκαταστάσεις εξόρυξης. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο διαχειριστής του VPP θα έπρεπε να ικανοποιήσει μια εκ των δύο αποκλίσεων με την χρήση της περίσσιας ενέργειας των ΑΠΕ και έπειτα στην περίπτωση που υπάρχει ακόμα απόκλιση μεταξύ της παραγωγής και των δεσμεύσεων των ΑΠΕ τότε να προσαρμόσει την κατανάλωση των μονάδων εξόρυξης, αν είναι δυνατόν.

Οι εξισώσεις (4.38) και (4.39) υπολογίζουν το νέο μέσο κέρδος από τις εγκαταστάσεις εξόρυξης. Η εξίσωση (4.38) υπολογίζει το νέο κέρδος από κινήσεις του VPP στην αγορά εξισορρόπησης και η εξίσωση (4.39) υπολογίζει το συνολικό κέρδος εφόσον οι εγκαταστάσεις εξόρυξης βρίσκονταν σε λειτουργία από τον προγραμματισμό τους στην αγορά της επόμενης ημέρας.

### Ομάδα Εξισορρόπησης 2:

Η δεύτερη ομάδα εξισορρόπησης αποτελείται από την μονάδα παραγωγής φυσικού αερίου και τα ελεγχόμενα φορτία του VPP. Η μοντελοποίηση της δεύτερης ομάδας γίνεται στις εξισώσεις (4.40) έως (4.48).

$$E_{GT}^{offered} - E_{GT}^{cleared} - E_{GT}^{reduced} + E_{GT}^{increased} - E_{regGT}^{down} + E_{regGT}^{up} - E_{FL}^{increased} + E_{FL}^{reduced} = 0 \quad (4.40)$$

$$E_{GT} = E_{GT}^{offered} - E_{GT}^{reduced} + E_{GT}^{increased} \quad (4.41)$$

$$Marginal Cost_{GT} = 2 a_{GT} E_{GT}^{offered} + b_{GT} \quad (4.42)$$

$$Cost_{GT}^B = Marginal Cost_{GT} (E_{GT}^{increased} - E_{GT}^{reduced}) \quad (4.43)$$

$$E_{FL} = E_{FL}^{offered} - E_{FL}^{reduced} + E_{FL}^{increased} \quad (4.44)$$

$$E_{FL} = (P_{FL}(t-1) - P_{FL}(t))/2 \quad (4.45)$$



$$E_{FL}^{increased} \leq M_{FL} P_{FL} \quad (4.46)$$

$$E_{FL}^{reduced} \leq M_{FL} P_{FL} \quad (4.47)$$

$$Cost_{FL}^B = c_{FL}(E_{FL}^{reduced} + E_{FL}^{increased}) \quad (4.48)$$

όπου  $E_{GT}^{offered}$  είναι η προγραμματισμένη παραγωγή της μονάδας φυσικού αερίου πριν την εκκαθάριση της αγοράς της επόμενης ημέρας,  $E_{GT}^{cleared}$  είναι η παραγωγή της μονάδας φυσικού αερίου που έχει δεσμευτεί από την εκκαθάριση της αγοράς της επόμενης ημέρας,  $E_{GT}^{reduced}$  και  $E_{GT}^{increased}$  είναι η μείωση και η αύξηση της παραγωγής της μονάδας φυσικού αερίου, αντίστοιχα,  $E_{regGT}^{down}$  και  $E_{regGT}^{up}$  είναι η πώληση και αγορά ενέργειας στην αγορά εξισορρόπησης για την εξισορρόπηση της μονάδας φυσικού αερίου, αντίστοιχα,  $E_{FL}^{increased}$  και  $E_{FL}^{reduced}$  είναι η αύξηση και μείωση της κατανάλωσης των ελεγχόμενων φορτίων, αντίστοιχα, και  $Marginal Cost_{GT}$  είναι το οριακό κόστος της γεννήτριας φυσικού αερίου.

Η εξίσωση (4.40) μοντελοποιεί την εξισορρόπηση των δύο μονάδων ενώ οι εξισώσεις (4.41) και (4.44) υπολογίζουν την τελική παραγωγή της μονάδας παραγωγής και των ελεγχόμενων φορτίων, αντίστοιχα. Κατά την εξισορρόπηση των μονάδων της δεύτερης ομάδας εξισορρόπησης ο διαχειριστής του VPP έχει τις εξής επιλογές:

- Να αυξήσει την παραγωγή της μονάδας φυσικού αερίου και να πληρώσει το ανάλογο κόστος
- Να μειώσει την παραγωγή της μονάδας με αποτέλεσμα να μειωθεί το συνολικό κόστος παραγωγής
- Να αλλάξει την κατανάλωση των ελεγχόμενων φορτίων για να εξισορροπήσει διαφορές μεταξύ της παραγόμενης ενέργειας και των δεσμεύσεων της μονάδας και να πληρώσει τον ιδιοκτήτη των ελεγχόμενων φορτίων
- Να αγοράσει και να πουλήσει ενέργεια στην αγορά εξισορρόπησης και να πληρώσει το ανάλογο πρόστιμο

Οι εξισώσεις (4.42), (4.43) και (4.48) υπολογίζουν το κόστος των αλλαγών εξισορρόπησης των δύο μονάδων. Για τον υπολογισμό του κόστους που επιφέρουν αλλαγές στην παραγωγή της μονάδας φυσικού αερίου χρησιμοποιείται το οριακό κόστος το οποίο εξορισμού υπολογίζει το επιπλέον κόστος ανά επίπεδο παραγωγής. Τέλος, οι εξισώσεις (4.45) έως (4.47) αποτελούν τους περιορισμούς αλλαγής κατάστασης των ελεγχόμενων φορτίων. Αναλυτικότερα, οι περιορισμοί (4.46) και (4.47) εξασφαλίζουν ότι οι αλλαγές της κατανάλωσης των ελεγχόμενων φορτίων δεν υπερβαίνουν τα προκαθορισμένα όρια που έχουν τεθεί από τον ιδιοκτήτη τους, όπως είχε αναφερθεί στην Ενότητα 4.4.2. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι υπάρχουν περιορισμοί αλλαγής κατάστασης και για την μονάδα παραγωγής φυσικού αερίου αλλά, καθώς είναι ίδιοι με τις εξισώσεις (4.7) και (4.8), δεν επαναλαμβάνονται.

### Ξεχωριστές Ομάδες Εξισορρόπησης:

Μέχρι στιγμής έχουν παρουσιαστεί οι δύο ομάδες εξισορρόπησης στις οποίες είναι συνδεδεμένες παραπάνω από μια μονάδες του VPP. Η εξισορρόπηση των υπόλοιπων μονάδων του

VPP, δηλαδή του αντλιοστάσιου, των μπαταριών και της πετρελαϊκής μονάδας παραγωγής γίνεται σε ξεχωριστές ομάδες εξισορρόπησης. Η μοντελοποίηση των οποίων περιγράφεται από τις εξισώσεις (4.49) έως (4.54).

$$E_{SKB}^{d,offered} - E_{SKB}^{d,cleared} + P_{SKB}^d - E_{reg_{SKB}}^{d,down} + E_{reg_{SKB}}^{d,up} = 0 \quad (4.49)$$

$$E_{SKB}^{c,offered} - E_{SKB}^{c,cleared} + P_{SKB}^c - E_{reg_{SKB}}^{c,down} + E_{reg_{SKB}}^{c,up} = 0 \quad (4.50)$$

$$E_{SB}^{d,offered} - E_{SB}^{d,cleared} + P_{SB}^d - E_{reg_{SB}}^{d,down} + E_{reg_{SB}}^{d,up} = 0 \quad (4.51)$$

$$E_{SB}^{c,offered} - E_{SB}^{c,cleared} + P_{SB}^c - E_{reg_{SB}}^{c,down} + E_{reg_{SB}}^{c,up} = 0 \quad (4.52)$$

$$E_{Gdiesel}^{offered} - E_{Gdiesel}^{cleared} - E_{Gdiesel}^{reduced} + E_{Gdiesel}^{increased} - E_{reg_{Gdiesel}}^{down} + E_{reg_{Gdiesel}}^{up} = 0 \quad (4.53)$$

$$E_{Gdiesel} = E_{Gdiesel}^{offered} - E_{Gdiesel}^{reduced} + E_{Gdiesel}^{increased} \quad (4.54)$$

όπου  $E_{SKB}^{d,offered}$  και  $E_{SKB}^{d,cleared}$  είναι η προγραμματισμένη από το VPP εκφόρτιση και εκκαθαρισμένη από το δίκτυο εκφόρτιση των μπαταριών, αντίστοιχα,  $E_{SKB}^{c,offered}$  και  $E_{SKB}^{c,cleared}$  είναι η προγραμματισμένη από το VPP φόρτιση και εκκαθαρισμένη από το δίκτυο φόρτιση των μπαταριών, αντίστοιχα, και  $E_{Gdiesel}^{offered}$  και  $E_{Gdiesel}^{cleared}$  είναι η προγραμματισμένη από το VPP παραγωγή και εκκαθαρισμένη από το δίκτυο παραγωγή της πετρελαϊκής μονάδας του VPP, αντίστοιχα.

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να αναφερθεί ότι ο λόγος για τον οποίο είναι δυνατή η χρήση της ισχύος εκφόρτισης και φόρτισης στις εξισώσεις (4.49) έως (4.52) είναι επειδή οι εξισώσεις λύνονται για χρονικές περιόδους μίας ώρας. Κατά την επίλυση των παραπάνω εξισώσεων γίνεται χρήση και της εξίσωσης μεταβατικής κατάστασης (4.18) με την οποία εξετάζεται αν είναι δυνατή η εκφόρτιση και φόρτιση των μπαταριών την χρονική στιγμή  $t$ .

Σε αντίθεση με τις μονάδες που εξισορροπούνται σε κοινές ομάδες εξισορρόπησης, κατά την εξισορρόπηση των παραπάνω μονάδων ο διαχειριστής του VPP δεν διαθέτει πολλές επιλογές. Συγκεκριμένα, για την εξισορρόπηση του αντλιοστάσιου, των μπαταριών και της πετρελαϊκής μονάδας, ο διαχειριστής του VPP έχει δύο επιλογές: είτε να προσαρμόσει την προσφορά και κατανάλωσή τους, αν το επιτρέπουν οι μηχανικοί περιορισμοί τους, είτε, να καλύψει τις διαφορές μεταξύ των προσφορών και των δεσμεύσεών τους μέσω της αγοράς εξισορρόπησης πληρώνοντας το ανάλογο πρόστιμο.

Μετά την επίλυση των παραπάνω εξισώσεων, ο διαχειριστής του VPP γνωρίζει το πραγματικό κέρδος και την ακριβή παραγωγή όλων των μονάδων που διαχειρίζεται σε πραγματικό χρόνο.

## **Μοντελοποίηση Δικτύου Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας**

### **5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ**

Τα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνουν τα δίκτυα των γραμμών υψηλής τάσης, τους υποσταθμούς που συνδέονται με τις γραμμές αυτές καθώς και τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των επιπέδων τάσεων που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο μεταφοράς [2]. Ο σκοπός του συστήματος μεταφοράς είναι η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας από τους παραγωγούς στις διάφορες περιοχές κατανάλωσης. Κατά τον σχεδιασμό των συστημάτων μεταφοράς λαμβάνονται υπόψιν οι εξής περιορισμοί: Αρχικά κατά την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να διατηρούνται εντός των αποδεκτών ορίων η τάση και η συχνότητα του δικτύου. Επίσης πρέπει να διατηρούνται συμμετρικές οι τάσεις των τριών φάσεων [2], [16].

### **5.2 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ (OPTIMAL POWER FLOW – OPF)**

Το πρόβλημα της εύρεσης της βέλτιστης ροής ισχύος (optimal power flow – OPF) αποτελεί ένα από σημαντικότερα προβλήματα όσον αφορά την διαχείριση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) με αποτελεσματικό και αποδοτικό τρόπο [44]. Τα προβλήματα βελτιστοποίησης OPF χρησιμοποιούνται για την λήψη αποφάσεων σχετικά με τον βέλτιστο προγραμματισμό όλων των μονάδων του συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, με την επίλυση ενός OPF ο διαχειριστής του δικτύου γνωρίζει την παραγωγή κάθε μονάδας παραγωγής, την απορρόφηση ή προσφορά ενέργειας από μονάδες αποθήκευσης και την κατανάλωση των ελεγχόμενων φορτίων για κάθε χρονική στιγμή λειτουργίας του συστήματος. Ο σκοπός ενός OPF είναι η κάλυψη όλων των ενεργειακών αναγκών του δικτύου, δηλαδή η κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης και η ελαχιστοποίηση του κόστους τηρουμένων όλων των λειτουργικών και φυσικών περιορισμών του συστήματος. Τα προβλήματα βελτιστοποίησης OPF εντάσσονται στην κατηγορία του μη-γραμμικού προγραμματισμού, ο οποίος μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα όταν χρησιμοποιείται για τον προγραμματισμό πολύ μεγάλων δικτύων τα οποία αποτελούνται από χιλιάδες κόμβους [45]. Καθώς η δυσκολία επίλυσης μη-γραμμικών προβλημάτων αυξάνει εκθετικά, ο χρόνος επίλυσης μπορεί να αυξηθεί σε μη αποδεκτά επίπεδα. Για τον παραπάνω λόγο, η ανάπτυξη προσεγγιστικών προβλημάτων αποτελεί πολύ χρήσιμο εργαλείο καθώς επιτρέπει την επίλυση μη-γραμμικών προβλημάτων σε εύλογο χρονικό διάστημα ενώ παράλληλα προσφέρει προσεγγιστικά αποτελέσματα μικρού σφάλματος.

Παρακάτω παρουσιάζεται η μαθηματική μοντελοποίηση για το αρχικό μη-γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης ροής ισχύος καθώς και τις ακόλουθες προσεγγίσεις του.

### 5.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

#### 5.3.1 Παραδοχές και Χαρακτηριστικά

Η ανάλυση ροών ισχύος χρησιμοποιείται παγκόσμιος για την ανάλυση των ΣΗΕ. Για την εφαρμογή της ανάλυσης ροών ισχύος απαιτούνται οι εξής παραδοχές:

- Αρχικά τα συστήματα παρουσιάζουν τριφασική συμμετρία και μπορούν να αναπαρασταθούν από ισοδύναμα μονογραμμικά κυκλώματα στο ανά μονάδα - α.μ. σύστημα.
- Η ανάλυση ροών ισχύος γίνεται σε κατάσταση κανονική λειτουργίας κατά την οποία δεν παρατηρούνται μεταβατικά φαινόμενα.
- Το πρόβλημα επιλύεται με χρήση μη γραμμικού συστήματος εξισώσεων ή κάποιας γραμμικής προσέγγισης του.
- Η επίλυση του προβλήματος γίνεται με την βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστών και χρήση κατάλληλων προγραμμάτων.

#### 5.3.2 Μαθηματικό Υπόβαθρο και Συνθήκες του Προβλήματος

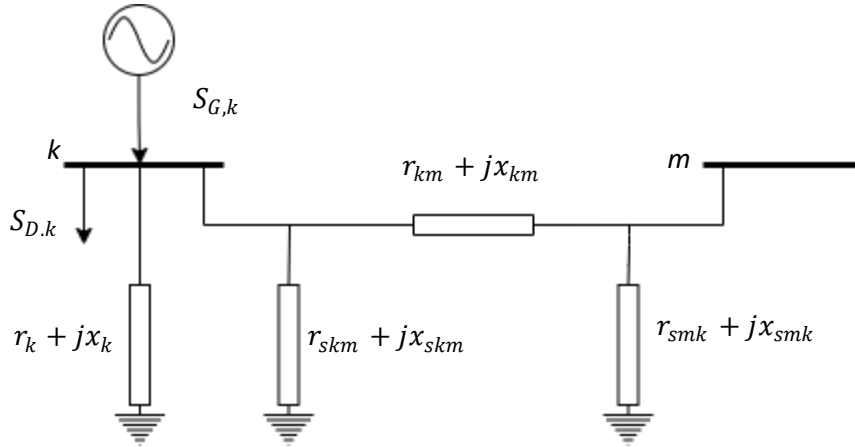
Η λειτουργία ενός ΣΗΕ θεωρείται πλήρως γνωστή όταν τα μέτρο της τάσης και της γωνίας κάθε ζυγού είναι γνωστά. Επομένως, η επίλυση των ροών ισχύος ολοκληρώνεται με την εύρεση των μιγαδικών τάσεων όλου του δικτύου [46]. Για την επίλυση του προβλήματος είναι απαραίτητο να οριστούν τρία είδη ζυγών:

- Ζυγός Ταλάντωσης ή Slack Bus – Ορίζεται ένας ζυγός αναφοράς ή ελέγχου του οποίου είναι γνωστό το μέτρο και η γωνία της τάσης του. Ο ζυγός ταλάντωσης χρησιμοποιείται για την εξισορρόπηση τις ισχύος, ενεργού και άεργου στις μελέτες ροών ισχύος παράγοντας ή απορροφώντας ισχύ.
- Ζυγός Παραγωγής ή PV Bus – Ορίζονται οι ζυγοί στους οποίους είναι γνωστή η ενεργός ισχύς και το μέτρο της τάσης. Παρόλο που λέγεται ζυγός παραγωγής είναι δυνατόν να καταναλώνει και φορτίο. Σε αντίθεση με τον ζυγό ταλάντωσης, δύναται να υπάρχουν περισσότεροι από ένας ζυγοί παραγωγής.
- Ζυγός Φορτίου ή PQ Bus – Ορίζονται οι ζυγοί στους οποίους είναι γνωστά η ενεργός και η άεργος ισχύς τους. Ο ρόλος των ζυγών φορτίου, που δύναται να είναι παραπάνω από ένας, είναι η προσφορά και κατανάλωση μιγαδικής ισχύος.

Τα παραπάνω συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα. Μετά την επίλυση του προβλήματος ροής ισχύος όλα τα μεγέθη του πίνακα είναι γνωστά.

**Πίνακας 5.1:** Στοιχεία ΣΗΕ κατά την ανάλυση ροής ισχύος

Είδος	Τάση, $ V $	Γωνία Τάσης, $\delta$	Ενεργός Ισχύς $P$	Άεργος Ισχύς, $Q$
Ταλάντωσης	Γνωστή	Γνωστή		
Παραγωγής	Γνωστή		Γνωστή	
Φορτίου			Γνωστή	Γνωστή



Σχήμα 5.1: Αναπαράσταση γενικής διάταξης σύνδεσης δύο ζυγών

Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται μία τυπική διάταξη σύνδεσης δύο ζυγών  $k, m$  ενός τυχαίου ΣΗΕ. Η παραγόμενη και καταναλισκόμενη στο ζυγό  $k$  φαινόμενη ισχύς συμβολίζονται ως  $S_{G,k}, S_{D,k}$  αντίστοιχα. Με  $r_k + jx_k$  συμβολίζεται η εγκάρσια μιγαδική αντίσταση του ζυγού  $k$  ενώ με  $r_{skm} + jx_{skm}$  και  $r_{smk} + jx_{smk}$  συμβολίζονται οι εγκάρσιες αντιδράσεις της γραμμής  $k-m$ . Τέλος, με  $r_{km} + jx_{km}$  συμβολίζεται η μεταξύ των ζυγών  $k, m$  σύνθετη αντίσταση. Η παρακάτω μεθοδολογία ακολουθείται αρχικά για το απλοϊκό σύστημα των δύο ζυγών του Σχήματος 5.2 και επεκτείνεται αναλόγως για το υπόλοιπα ΣΗΕ [26].

Βήμα 1: Η αγωγιμότητα  $y$  ορίζεται ως  $y = \frac{1}{r+jx} = g + jb$  και χρησιμοποιείται για την κατασκευή της μήτρας αγωγιμοτήτων  $Y$ .

$$Y_Z = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1m} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2m} & \dots & Y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{k1} & Y_{k2} & \dots & Y_{km} & \dots & Y_{kn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nm} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix}$$

Όπου:

$$Y_{km} = -y_{km} - jb_{km} \quad (2.1)$$

$$Y_{kk} = y_k + \sum_{m \neq k} (y_{skm} + y_{km}) \quad (2.2)$$

Βήμα 2: Εξισώσεις Ροής Ισχύος στον ζυγό  $k$ .

$$P_k = P_{G,k} - P_{D,k} = V_k^2 \left[ g_k + \sum_{m \neq k} (g_{skm} + g_{km}) \right] - V_k \sum_{m \neq k} V_m [g_{km} \cos(\delta_k - \delta_m) + b_{km} \sin(\delta_k - \delta_m)] \quad (2.3)$$

$$Q_k = Q_{G,k} - Q_{D,k} = -V_k^2 \left[ b_k + \sum_{m \neq k} (b_{skm} + b_{km}) \right] - V_k \sum_{m \neq k} V_m [g_{km} \sin(\delta_k - \delta_m) - b_{km} \cos(\delta_k - \delta_m)] \quad (2.4)$$

Βήμα 3: Ροή ισχύος μεταξύ ζυγών k, m

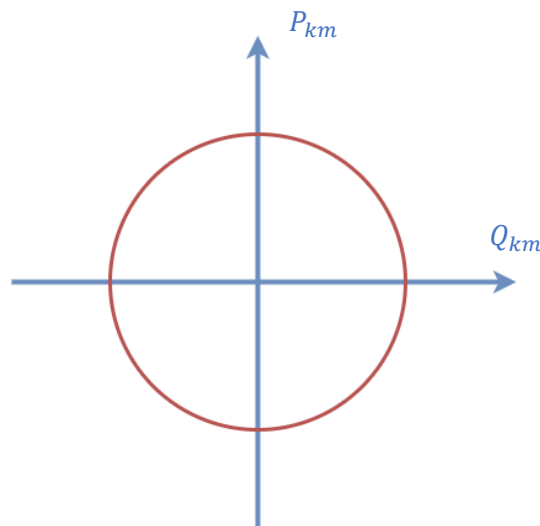
$$P_{km}(t) = V_k^2 [g_{skm} + g_{km}] - V_k V_m [g_{km} \cos(\delta_k - \delta_m) + b_{km} \sin(\delta_k - \delta_m)] \quad (2.5)$$

$$Q_{km}(t) = -V_k^2 [b_{skm} + b_{km}] - V_k V_m [g_{km} \sin(\delta_k - \delta_m) - b_{km} \cos(\delta_k - \delta_m)] \quad (2.6)$$

## 5.4 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΔΙΚΤΥΟΥ

### 5.4.1 Θερμικοί Περιορισμοί Γραμμών Μεταφοράς

Κατά την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας μέσω γραμμών μεταφοράς παρατηρούνται θερμικές απώλειες. Όταν οι γραμμές διαρρέονται από ρεύμα που υπερβαίνει τις θερμικές αντοχές τους τότε προκαλείται υπερθέρμανση των γραμμών και καταστροφή της μόνωσής του [22]. Αυτό οδηγεί στην μείωση του χρόνου ζωής των γραμμών και στην αύξηση των βλαβών και σφαλμάτων που παρατηρούνται στο δίκτυο. Οι θερμικοί περιορισμοί των γραμμών του συστήματος μεταφοράς καθορίζουν το ανώτατο επιτρεπτό όριο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [47]. Οι θερμικοί περιορισμοί εξαρτώνται από τις περιβαλλοντολογικές συνθήκες οι οποίες μεταβάλλονται κατά την διάρκεια του έτους. Επομένως, είναι σημαντικό να γίνεται κατάλληλη μελέτη για την εύρεση του κατάλληλου θερμικού ορίου κάθε γραμμής μεταφοράς [22].



Σχήμα 5.2: Γραφική αναπαράσταση των θερμικών ορίων γραμμών μεταφοράς

Η εξίσωση (2.7) περιγράφει τον θερμικό περιορισμό των γραμμών μεταφοράς ο οποίος γραφικά αναπαριστάτε από ένα κυκλικό επίπεδο ακτίνας ίσης με το μέτρο του θερμικού περιορισμού των γραμμών μεταφοράς σε ένα σύστημα αξόνων με την ενεργό ισχύ στο κατακόρυφο άξονα και την άεργο ισχύ στον οριζόντιο όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2.

$$P_{km}^2 + Q_{km}^2 \leq Limit^2 \quad (2.7)$$

Τα σημεία εντός του κυκλικού επιπέδου αποτελούν τα εφικτά σημεία λειτουργίας του συστήματος ενώ τα σημεία εκτός του κυκλικού επιπέδου αποτελούν τα μη-εφικτά σημεία λειτουργίας καθώς υπερβαίνουν τα θερμικά όρια και οδηγούν στην καταστροφή της μόνωσης των γραμμών.

## 5.5 ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ

### 5.5.1 Εισαγωγή

Ο γραμμικός προγραμματισμός αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την επίλυση σύγχρονων μη-γραμμικών προβλημάτων. Λόγο της φύσης τους, τα μη-γραμμικά προβλήματα κατά την επέκτασή τους απαιτούν πολύ μεγάλη υπολογιστική δύναμη για την επίλυση τους. Κατά συνέπεια, μοντέλα που διαχειρίζονται τεράστιους όγκους δεδομένων δεν μπορούν να επιλυθούν σε εύλογο χρονικό διάστημα. Σε αυτές τις περιπτώσεις εξετάζεται η δυνατότητα γραμμικοποίησης κάποιων μεγεθών του προβλήματος για την απλοποίηση του και ως επέκταση μείωση του χρόνου επίλυσης.

Είναι γνωστό ότι ο γραμμικός προγραμματισμός δεν επιφέρει την ίδια ακρίβεια με το μη-γραμμικό προγραμματισμό. Παρόλα αυτά, εξαιτίας της σημαντικά γρηγορότερης σύγκλισης σε βέλτιστη λύση καθώς και της ικανοποιητικής ακρίβειας που προσφέρει, αποτελεί πολύ αποδοτική μέθοδο επίλυσης μεγάλων προβλημάτων [16].

Σε προβλήματα βελτιστοποίησης στα ΣΗΕ, δηλαδή σε μοντέλα OPF, τα οποία πρέπει να επιλύονται σε καθημερινή βάση η μείωση του χρόνου επίλυσης μπορεί να οδηγήσει στην εξοικονόμηση εκατομμυρίων δολαρίων σε ετήσια βάση [48]. Για τον παραπάνω λόγο η γραμμικοποίηση αποτελεί βασικό εργαλείο στον κλάδο της ενέργειας.

Σήμερα, η πιο διαδεδομένη μέθοδος γραμμικοποίησης στην αγορά ενέργειας είναι η Βελτιστοποίηση Ροής Ισχύος Συνεχής Τάσης ή DC OPF [44]. Κατά την υλοποίηση ενός DC OPF, η γραμμικοποίηση του δικτύου επιτυγχάνεται με την θεώρηση ότι η άεργος ισχύς είναι μηδενική και ότι η τάση σε όλους τους ζυγούς παραμένει σταθερή και ίση με την ονομαστική τους τάση. Παρόλο που η συγκεκριμένη μέθοδος προσφέρει έναν εύκολο τρόπο γραμμικοποίησης έχει παρατηρηθεί ότι υπερ-απλουστεύει το δίκτυο με αποτέλεσμα να δημιουργούνται αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων και της πραγματικότητας [47]. Συγκεκριμένα, με την μέθοδο DC OPF δεν λαμβάνονται υπόψιν αλλαγές στις τάσεις των ζυγών καθώς και οι επιπτώσεις της αέργου ισχύος στις γραμμές μεταφοράς με αποτέλεσμα να παραβλέπονται τυχόν παραβιάσεις των θερμικών ορίων των γραμμών. Για τους παραπάνω λόγους, η χρήση της μεθόδου DC OPF κρίνεται ακατάλληλη για την επίλυση προβλημάτων που περιέχουν υψηλά επίπεδα αέργου ισχύος [3]. Σε αυτές τις περιπτώσεις, κρίνεται προτιμότερη η χρήση του AC OPF ή κάποιας γραμμικής προσέγγισης του που μπορεί να εξετάσει όλους τους περιορισμούς του δικτύου.

Εναλλακτική μέθοδο γραμμικοποίησης αποτελεί η Βελτιστοποίηση Ροής Φορτίου με χρήση σειρών Taylor. Αυτή η μέθοδος, χρησιμοποιώντας αναπτύγματα σειρών Taylor επιτυγχάνει μια χαλάρωση των υποθέσεων της DC OPF και ως συνέπεια προσφέρει καλύτερη προσέγγιση των μη γραμμικών μεγεθών του συστήματος [47]. Σε αντίθεση με τα DC OPF, η μέθοδος αυτή λαμβάνει

υπόψιν αλλαγές στις τάσεις των ζυγών του συστήματος καθώς και τις επιδράσεις της αέργου ισχύος στις γραμμές μεταφοράς με αποτέλεσμα να προσφέρει αποτελέσματα μεγαλύτερης ακρίβειας.

Στην παρούσα διπλωματική υιοθετείται η μεθοδολογία του [47], δηλαδή υλοποιείται γραμμικοποίηση των μη γραμμικών σχέσεων κάνοντας χρήση των σειρών Taylor, καθώς προσφέρει μια πιο ακριβή εικόνα του συστήματος μεταφοράς. Συγκεκριμένα, στην υπο-ενότητα 5.5.4 παρουσιάζονται τα μαθηματικά μοντέλα για τα Quasi-Linear OPF, Fully Linear OPF και Warm-Start Fully Linear OPF. Επιπλέον, στην υπο-ενότητα 5.5.2 παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την γραμμικοποίηση των θερμικών ορίων των γραμμών μεταφοράς και τέλος στην υπο-ενότητα 5.5.3 παρουσιάζεται η γραμμικοποίηση των εξισώσεων κόστους των θερμοηλεκτρικών μονάδων παραγωγής.

### 5.5.2 Γραμμικοποίηση θερμικών ορίων των Γ.Μ.

Για την γραμμικοποίηση του μοντέλου απαιτείται αρχικά η γραμμικοποίηση των θερμικών ορίων των γραμμών μεταφοράς καθώς και η γραμμικοποίηση των συναρτήσεων κόστους των θερμοηλεκτρικών μονάδων παραγωγής. Οι γραμμικοποιήσεις αυτών των μεγεθών χρησιμοποιούνται έπειτα σε όλα τα προσεγγιστικά προβλήματα που εξετάζονται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Η γραμμικοποίηση των θερμικών ορίων των γραμμών μεταφοράς υλοποιείται με την επιλογή γραμμικών τμημάτων στην περιφέρεια του κυκλικού επιπέδου που ορίζουν οι περιορισμοί των γραμμών. Η παρακάτω μέθοδος είναι γνωστή ως Προσέγγιση με Χρήση Γραμμικών Τμημάτων (Piecewise Linearization). Η μαθηματική διεργασία που ακολουθείται παρακάτω βασίζεται στο [47].

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3, η προσέγγιση των θερμικών ορίων των γραμμών μεταφοράς γίνεται με την επιφάνεια ενός πολυγώνου. Καθώς στην πλειοψηφία των γραμμών μεταφοράς η ενεργός ισχύς είναι μεγαλύτερη κατά μέτρο από την άεργο ισχύ. Στην προσέγγιση των θερμικών ορίων δεν περιλαμβάνεται η περιοχή που ορίζουν οι γωνίες  $a_1^d, a_2^d, a_1^u, a_2^u$  και βρίσκεται μεταξύ των διακεκομμένων γραμμών. Με αυτό τον τρόπο μειώνονται οι επιπλέον περιορισμοί που εισάγονται στο μοντέλο χωρίς να ελαττώνεται η ακρίβεια του [47]. Επομένως, η προσέγγιση των θερμικών ορίων μοντελοποιείται με την επιφάνεια που ορίζει το σύνολο των ακόλουθων γραμμικών περιορισμών. Στην προσέγγιση που χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκαν για όλες τις γραμμές μεταφοράς οι γωνίες  $a_1^d = a_2^d = a_1^u = a_2^u = \frac{\pi}{6}$  [44].

Επομένως τα θερμικά όρια υπολογίζονται ως:

$$\Lambda(P_{km}^A, Q_{km}^A): \begin{cases} L_{km}^{u,n} \geq 0, & n \in [1, N] \\ L_{km}^{d,m} \geq 0, & m \in [1, M] \end{cases} \quad (2.8)$$

Όπου: N και M εκφράζουν το πλήθος των γραμμικών τμημάτων του άνω και κάτω ημικύκλιου αντίστοιχα.

$$l_{km}^{u,n}: L_{km}^{u,n} = a_{km}^{u,n} P_{km}^A + b_{km}^{u,n} Q_{km}^A + c_{km}^{u,n} = 0 \quad (2.9)$$

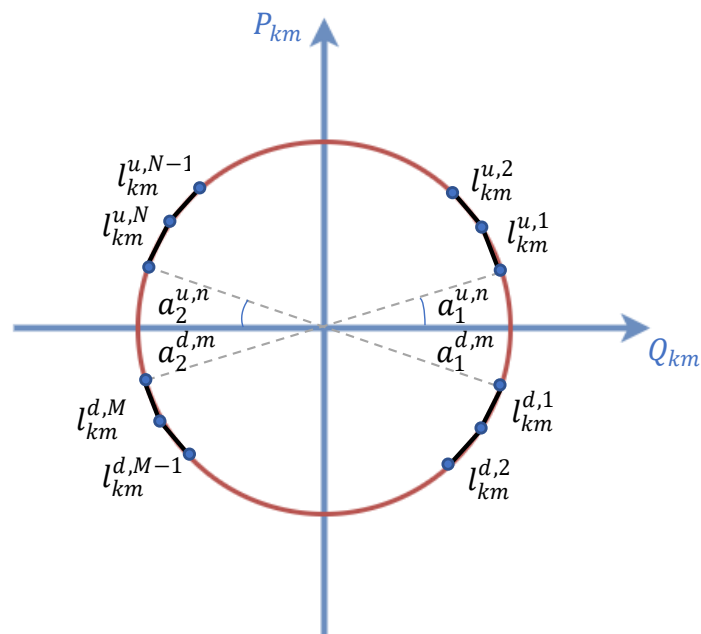
$$l_{km}^{d,m}: L_{km}^{d,m} = a_{km}^{d,m} P_{km}^A + b_{km}^{d,m} Q_{km}^A + c_{km}^{d,m} = 0 \quad (2.10)$$

$$c_{km}^{u,n}, c_{km}^{d,m} \geq 0$$

Οι εξισώσεις (2.8) χωρίζουν το κυκλικό επίπεδο στο άνω και κάτω ημικύκλιο ενώ οι εξισώσεις (2.9) και (2.10) ορίζουν τις εφαπτομένες, στον κύκλο ευθείες, που χρησιμοποιούνται για το ορισμό του

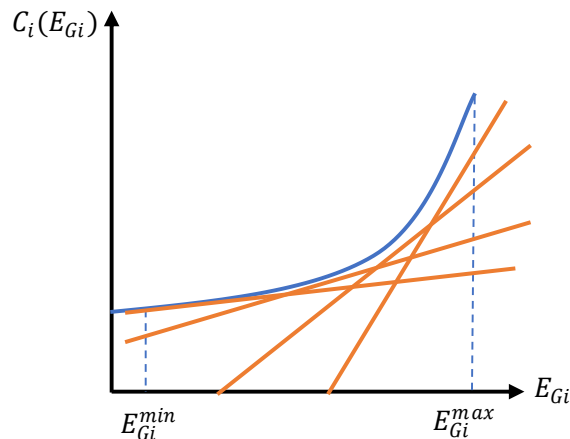


πολυγώνου. Ο διαχωρισμός του κυκλικού επιπέδου για  $P_{km} > 0$  και  $P_{km} < 0$  επιτρέπει τον προσδιορισμό τις επιφάνειες που διαγράφουν τα δύο ημικύκλια με χρήση ανισώσεων. Συγκεκριμένα, για τον προσδιορισμό των θερμικών ορίων του άνω ημικύκλιου αρκεί να προσδιοριστούν τα σημεία που βρίσκονται κάτω από όλες τις εφαπτομένες του. Αντίστοιχα, για τον προσδιορισμό των ορίων του κάτω ημικύκλιου αρκεί να προσδιοριστούν τα σημεία που βρίσκονται πάνω από όλες τις εφαπτομένες του. Με αυτό τον τρόπο, ορίζονται όλα τα σημεία εντός του πολυγώνου που χρησιμοποιείται για την προσέγγιση των θερμικών ορίων των γραμμών μεταφοράς.



**Σχήμα 5.3:** Γραφική αναπαράσταση γραμμικοποίησης των θερμικών ορίων γραμμών μεταφοράς

### 5.5.3 Γραμμικοποίηση εξισώσεων κόστους των θερμοηλεκτρικών μονάδων



**Σχήμα 5.4:** Παράδειγμα Piecewise Linear Approximation της συνάρτησης κόστους για θερμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής

Ακολουθώντας την ίδια λογική, για την γραμμικοποίηση των μη γραμμικών εξισώσεων κόστους των θερμοηλεκτρικών μονάδων παραγωγής αρκεί να βρεθεί μια προσέγγιση της εκθετικής συνάρτησης κόστους με την βοήθεια γραμμικών τμημάτων. Καθώς το πρόβλημα που επιλύεται αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής, οι εξισώσεις δεν χρειάζεται να περιορίζονται αποκλειστικά στα σημεία της συνάρτησης, αλλά μπορούν να προσδιορίζουν όλα τα εφικτά σημεία παραγωγής. Για τον παραπάνω λόγο, οι συναρτήσεις κόστους προσδιορίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{aligned} \Pi(Cost_{EG}(g, t)): Cost_{EG}(g, t) \geq a_{EG}(g, i) + b_{EG}(g, i) EG(g, t) \\ i \in [0, N] \end{aligned} \quad (2.11)$$

Τα  $a_{EG}(g, i)$  αναπαριστούν τις τομές του κατακόρυφου άξονα ενώ τα  $b_{EG}(g, i)$  την κλίση των γραμμικών τμημάτων. Τέλος, το  $g$  αναπαριστά την θερμική μονάδα ενώ το  $N$  ισούται με τον αριθμό των γραμμικών τμημάτων.

### 5.5.4 Γραμμικοποίηση μη-γραμμικών εξισώσεων ροής ισχύος

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται το μαθηματικό υπόβαθρο που ακολουθήθηκε για την γραμμικοποίηση του μοντέλου Βέλτιστης Ροής Ισχύος που χρησιμοποιήθηκε για την εκκαθάριση της αγοράς ενέργειας στο πειραματικό μέρος της διπλωματικής εργασίας.

#### 5.5.4.1 Quasi-Linear OPF

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, για την γραμμικοποίηση των μη γραμμικών εξισώσεων του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος χρησιμοποιούνται τα αναπτύγματα σειρών Taylor. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται τα αναπτύγματα του ημιτόνου και του συνημιτόνου με σκοπό την απαλοιφή των τριγωνομετρικών στοιχείων από τις εξισώσεις του AC OPF και την αντικατάστασή τους από αθροίσματα.

$$\sin(\delta_{km}) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)!} \delta_{km}^{2n+1} = \delta_{km} - \frac{\delta_{km}^3}{3!} + \frac{\delta_{km}^5}{5!} - \dots, \forall \delta_{km} \quad (2.12)$$

$$\cos(\delta_{km}) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n)!} \delta_{km}^{2n} = 1 - \frac{\delta_{km}^2}{2!} + \frac{\delta_{km}^4}{4!} - \dots, \forall \delta_{km} \quad (2.13)$$

Επιπλέον, εφόσον η γωνία  $\delta_{km}$  συνήθως είναι μικρή σε τιμή είναι δυνατόν να αποκτηθούν ακριβείς προσεγγίσεις από τις εξισώσεις (2.14).

$$\sin(\delta_{km}) \approx \delta_{km}, \quad \cos(\delta_{km}) \approx 1 - \frac{\delta_{km}^2}{2} \quad (2.14)$$

Στην συνέχεια, εφόσον το μέτρο της τάσης κυμαίνεται κοντά στην μονάδα και εντός γνωστών ορίων συγκεκριμένα των τιμών 0.9 και 1.1 α.μ. οι εξισώσεις (2.14) απλοποιούνται περαιτέρω ως εξής:

$$V_k V_m \delta_{km} \approx \delta_{km}, \quad V_k V_m \delta_{km}^2 \approx \delta_{km}^2 \quad (2.15)$$

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω προσεγγίσεις και αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (2.15) στις εξισώσεις (2.5) και (2.6) μοντελοποιούνται οι νέες εξισώσεις ροής ισχύος μεταξύ δύο ζυγών k,m:

$$P_{km} = g_{km}(V_k^2 - V_k V_m) - b_{km} \delta_{km} + \frac{1}{2} g_{km} \delta_{km}^2 \quad (2.16)$$

$$Q_{km} = -b_{km}(V_k^2 - V_k V_m) - g_{km} \delta_{km} + \frac{1}{2} (-b_{km}) \delta_{km}^2 \quad (2.17)$$

Όπως φαίνεται από τις εξισώσεις (2.16) και (2.17), οι νέες εξισώσεις ροής ισχύος δεν περιέχουν τριγωνομετρικές εξισώσεις αλλά περιέχουν ακόμα γινόμενα τάσεων. Επομένως, για την ολοκλήρωση της γραμμικοποίησης απαιτούνται περαιτέρω προσεγγίσεις.

$$V_{km} = V_k - V_m \quad (2.18)$$

$$V_k^2 - V_k V_m = V_k^2 - \left( \frac{V_k^2 + V_m^2}{2} - \frac{V_{km}^2}{2} \right) = \frac{V_k^2 - V_m^2}{2} + \frac{V_{km}^2}{2} \quad (2.19)$$

Με την αντικατάσταση των εξισώσεων (2.18) και (2.19) στις (2.16) και (2.17) ορίζονται πλέον οι εξισώσεις του Quasi Linear OPF. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στις εξισώσεις (2.20) και (2.21) η τάση στο τετράγωνο αντιμετωπίζεται ως ανεξάρτητη μεταβλητή με όρια τις τιμές 0.89 και 1.21. Με αυτό τον τρόπο οι τάσεις δεν αποτελούν μη γραμμικό στοιχείο του προβλήματος.

$$P_{km}^A = g_{km} \frac{(V_k^2 - V_m^2)}{2} - b_{km} \delta_{km} + P_{km}^L \quad (2.20)$$

$$Q_{km}^A = -b_{km} \frac{V_k^2 - V_m^2}{2} - g_{km} \delta_{km} + Q_{km}^L \quad (2.21)$$

Όπου:

$$P_{km}^L = \frac{1}{2} g_{km} (\delta_{km}^2 + V_{km}^2) \quad (3.22)$$

$$Q_{km}^L = \frac{1}{2} (-b_{km}) (\delta_{km}^2 + V_{km}^2) \quad (2.23)$$

Τα  $P_{km}^A$  και  $Q_{km}^A$  αποτελούν τις προσεγγίσεις της ενεργού και άεργου ισχύς μεταξύ δύο ζυγών  $k, m$  ενώ οι  $P_{km}^L$  και  $Q_{km}^L$  προσεγγίζουν τις απώλειες των γραμμών μεταφοράς.

#### 5.5.4.2 Fully Linear OPF

Οι εξισώσεις (2.20) έως (2.23) αποτελούν μια προσέγγιση η οποία δεν είναι πλήρως γραμμική γνωστή και ως Quasi Linear Approximation. Για την πλήρη γραμμικοποίηση του OPF πρέπει να γίνουν περεταίρω προσεγγίσεις. Συγκεκριμένα, πρέπει να βρεθούν γραμμικές προσεγγίσεις για τις εξισώσεις (2.22) και (2.23) οι οποίες δεν είναι πλήρως γραμμικές.

Ακολουθώντας την μεθοδολογία του [47] η μέθοδος που εφαρμόζεται για την γραμμικοποίηση των μη γραμμικών στοιχείων των δύο εξισώσεων ονομάζεται Loss Factor-Based Linearization η οποία χρησιμοποιείται ευρέως στην αγορά ενέργειας της Αμερικής.

Καθώς η τάση στο τετράγωνο αντιμετωπίζεται ως ανεξάρτητη μεταβλητή από εδώ και πέρα θα αναπαριστάτε ως  $V^s$ . Οι εξισώσεις (2.22) και (2.23) ξαναγράφονται ως εξής:

$$P_{km}^L = \mathbf{LF}_{P,\delta} * \boldsymbol{\delta} + \mathbf{LF}_{P,V^s} * V^s + \text{Offset}_{P_{km}} \quad (2.24)$$

$$Q_{km}^L = \mathbf{LF}_{Q,\delta} * \boldsymbol{\delta} + \mathbf{LF}_{Q,V^s} * V^s + \text{Offset}_{Q_{km}} \quad (2.25)$$

Οι συντελεστές  $\mathbf{LF}_{P,\delta}$ ,  $\mathbf{LF}_{P,V^s}$ ,  $\mathbf{LF}_{Q,\delta}$  και  $\mathbf{LF}_{Q,V^s}$  αναπαριστούν τους παράγοντες απωλειών για το δίκτυο προς επίλυση. Ο υπολογισμός των παραπάνω συντελεστών παρουσιάζεται αναλυτικά στα ακόλουθα βήματα.

Αρχικά, επιλύοντας το μη γραμμικό AC-OPF επιλέγονται οι βασικές συνθήκες του δικτύου γνωστές ως base case conditions. Καθώς οι βασικές συνθήκες εξαρτώνται από τα φορτία που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο επιλέγεται ένα βασικού σενάριο (base case) του AC-OPF στο οποίο συνδέονται τυχαία φορτία. Επειδή όμως, τα αποτελέσματα πρέπει να μπορούν να αναπαραχθούν δεν επιλέγονται εντελώς τυχαία φορτία αλλά προσεγγίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$P'_{k,d} = P_{k,d} \left( 1 + \frac{a_P(2i - N)}{N} \right) \quad (4.26)$$

$$Q'_{k,d} = Q_{k,d} \left( 1 + \frac{a_Q(2i - N)}{N} \right) \quad (2.27)$$

Όπου:  $N$  είναι το μέγεθος του δικτύου, τα  $a_P$  και  $a_Q$  ορίζονται ως 30% ενώ οι  $P_{k,d}$  και  $Q_{k,d}$  αναπαριστούν τα ήδη υπάρχοντα φορτία που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο.

Με βάση τα αποτελέσματα του βασικού σεναρίου (base case) και πλέον γνωρίζοντας τα  $V_o$  και  $\delta_o$  για κάθε ζυγό οι απώλειες του δικτύου προσεγγίζονται ως εξής:

$$P_{km}^L = \frac{1}{2} g_{km} (\delta_{km}^2 + V_{km}^2) = P_{km,\delta}^L + P_{km,V}^L \quad (5.28)$$

$$Q_{km}^L = \frac{1}{2} (-b_{km}) (\delta_{km}^2 + V_{km}^2) = Q_{km,\delta}^L + Q_{km,V}^L \quad (2.29)$$

Οι  $P_{km,\delta}^L$  και  $Q_{km,\delta}^L$  μπορούν να προσεγγιστούν γραμμικά με την βοήθεια της πρώτης σειράς Taylor:

$$P_{km,\delta}^L = \frac{1}{2} g_{km} \delta_{km}^2 \approx g_{km} \delta_{km,0} \delta_{km} - \frac{1}{2} g_{km} \delta_{km,0}^2 \quad (2.30)$$

$$Q_{km,\delta}^L = -\frac{1}{2} b_{km} \delta_{km}^2 \approx -b_{km} \delta_{km,0} \delta_{km} + \frac{1}{2} b_{km} \delta_{km,0}^2 \quad (2.31)$$

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το  $V^2$  ή  $V^s$  αντιμετωπίζεται ως ανεξάρτητη μεταβλητή. Επομένως, για την γραμμικοποίηση του  $P_{km,V}^L$  πρέπει να μετατραπεί κατάλληλα η εξίσωση (2.28) ώστε να εξαρτάται αποκλειστικά από το  $V^s$ . Αυτό υλοποιείται με χρήση της πρώτης σειράς Taylor η οποία μας δίνει:

$$\begin{aligned} P_{km,V}^L &= \frac{g_{km}}{2} V_{km}^2 \approx \frac{g_{km}}{2} \frac{(V_k + V_m)^2}{(V_{k,0} + V_{m,0})^2} V_{km}^2 = \frac{g_{km}}{2} \frac{(V_k - V_m)^2}{(V_{k,0} + V_{m,0})^2} \\ &= \frac{g_{km}}{2} \frac{2(V_{k,0}^2 - V_{m,0}^2)}{(V_{k,0} + V_{m,0})^2} (V_k^2 - V_m^2) - \frac{g_{km}}{2} \frac{(V_{k,0}^2 - V_{m,0}^2)^2}{(V_{k,0} + V_{m,0})^2} \\ &= g_{km} \frac{V_{k,0} - V_{m,0}}{V_{k,0} + V_{m,0}} (V_k^2 - V_m^2) - \frac{g_{km}}{2} (V_{k,0}^2 - V_{m,0}^2)^2 \end{aligned} \quad (2.32)$$

$$Q_{km,\delta}^L = -b_{km} \frac{V_{k,0} - V_{m,0}}{V_{k,0} + V_{m,0}} (V_k^2 - V_m^2) + \frac{b_{km}}{2} (V_{k,0}^2 - V_{m,0}^2)^2 \quad (2.33)$$

Με βάση τις εξισώσεις (2.32) και (2.33) προσδιορίζονται τα  $\mathbf{LF}_{P,\delta}$ ,  $\mathbf{LF}_{P,V^s}$ ,  $\mathbf{LF}_{Q,\delta}$  και  $\mathbf{LF}_{Q,V^s}$ .

$$\mathbf{LF}_{P,\delta} = g_{km} \delta_{km,0} M_{km} \quad (2.34)$$

$$\mathbf{LF}_{P,V^s} = \frac{g_{km}(V_{k,0} - V_{m,0})}{V_{i,0} + V_{j,0}} M_{km} \quad (2.35)$$

$$\text{Offset}_{P_{km}} = -\frac{1}{2} g_{km} (\delta_{km,0}^2 + (V_{i,0} - V_{j,0})^2) \quad (2.36)$$

$$\mathbf{LF}_{Q,\delta} = -b_{km} \delta_{km,0} M_{km} \quad (2.37)$$

$$\mathbf{LF}_{Q,V^s} = \frac{-b_{km}(V_{k,0} - V_{m,0})}{V_{i,0} + V_{j,0}} M_{km} \quad (2.38)$$

$$\text{Offset}_{Q_{km}} = \frac{1}{2} b_{km} (\delta_{km,0}^2 + (V_{i,0} - V_{j,0})^2) \quad (2.39)$$

### 5.5.4.3 Warm-Start Fully Linear OPF

Για την περεταίρω βελτίωση της προσέγγισης του Fully Linear OPF εξετάζεται η χρήση θερμής εκκίνησης (warm start). Παρόλο που η τεχνική warm start δεν αποδίδει πάντα καλύτερα αποτελέσματα στην παρούσα εφαρμογή επέφερε αύξηση της ακρίβειας των προσεγγίσεων και μείωση του χρόνου επίλυσης του προβλήματος [44].

Από τις εξισώσεις (2.20) και (2.21) φαίνεται ότι η μη γραμμικότητα των εξισώσεων ροής φορτίου βρίσκεται στις απώλειες και συγκεκριμένα στις απώλειες που οφείλονται στην άεργο ισχύ. Επειδή οι απώλειες είναι μη γραμμικές, μέθοδοι γραμμικοποίησης όπως η παραπάνω, που βασίζονται σε ένα base case σενάριο παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές στην ακρίβεια τους ανάλογα με τις διαφορές μεταξύ των φορτίων του base case σεναρίου και των φορτίων του προβλήματος [44]. Είναι

σημαντικό να αναφερθεί ότι η μέθοδος warm start δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί από όλους τους solver και επομένως πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν κατά την επιλογή τους.

Κατά την υλοποίηση του warm start OPF χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα  $(V_1, \delta_1)$  του Fully Linear OPF. Ο σκοπός της θερμής εκκίνησης είναι η καλύτερη προσέγγιση των τριγωνομετρικών στοιχείων του αρχικού προβλήματος:

$$\sin\delta_{km} \approx s_{km}^1\delta_{km} + s_{km}^0 \quad (2.40)$$

$$\cos\delta_{km} \approx c_{km}^1\delta_{km} + c_{km}^0 \quad (2.41)$$

Με βάση τις εξισώσεις (2.40) και (2.41) επιτυγχάνεται καλύτερη προσέγγιση του όρου  $V_k V_m \delta_{km}$ .

$$V_k V_m \delta_{km} \approx V_{k,1} V_{m,1} \delta_{km} + (V_k V_m - V_{k,1} V_{m,1}) \delta_{km,1} \quad (2.42)$$

Με αντικατάσταση της εξίσωσης (2.42) στις εξισώσεις (2.20) και (2.21) ολοκληρώνεται το νέο Warm Start Fully Linear μοντέλο.

$$P_{km}^A = g_{km} V^s - g_{km}^P \frac{(V_k^S + V_m^S)}{2} - b_{km}^P (\delta_{km} - \delta_{km,1}) + P_{km}^L \quad (2.43)$$

$$Q_{km}^A = -b_{km} V^s + b_{km}^Q \frac{V_k^S + V_m^S}{2} - g_{km}^Q (\delta_{km} - \delta_{km,1}) + Q_{km}^L \quad (2.44)$$

Όπου οι  $P_{km}^L$ ,  $Q_{km}^L$  υπολογίζονται από τις εξισώσεις (2.24) και (2.25) ενώ οι παράγοντες  $g_{km}^P$ ,  $b_{km}^P$ ,  $b_{km}^Q$  και  $g_{km}^Q$  υπολογίζονται πριν την επίλυση του προβλήματος από τις εξισώσεις (2.45) έως (2.50).

$$g_{km}^P = (g_{km} c_{km}^0 + b_{km} s_{km}^0) + (g_{km} c_{km}^1 + b_{km} s_{km}^1) \theta_{km,1} \quad (2.45)$$

$$b_{km}^P = (g_{km} c_{km}^1 + b_{km} s_{km}^1) V_{k,1} V_{m,1} \quad (2.46)$$

$$g_{km}^Q = (g_{km} s_{km}^1 - b_{km} c_{km}^1) V_{k,1} V_{m,1} \quad (2.47)$$

$$b_{km}^Q = (-g_{km} s_{km}^0 + b_{km} c_{km}^0) - (g_{km} s_{km}^1 - b_{km} c_{km}^1) \theta_{km,1} \quad (2.48)$$

$$s_{km}^1 = \cos\theta_{km,1}, \quad s_{km}^0 = \sin\theta_{(km,1)} - \theta_{km,1} \cos\theta_{km,1} \quad (2.49)$$

$$c_{km}^1 = -\sin\theta_{km,1}, \quad c_{km}^0 = \cos\theta_{km,1} + \theta_{km,1} \sin\theta_{km,1} \quad (2.50)$$

## ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

### 6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια συνοπτική περιγραφή των λογισμικών που αναπτύχθηκαν (α) για τον προγραμματισμό της λειτουργίας ενός VPP στην αγορά ενέργειας, (β) για την εκκαθάριση της αγοράς της επόμενης ημέρας και (γ) για την προσομοίωση της αγοράς εξισορρόπησης. Συγκεκριμένα, στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφεται το περιβάλλον του προγράμματος GAMS και του προγράμματος RStudio που χρησιμοποιήθηκαν για τον προγραμματισμό. Επιπρόσθετα, γίνεται αναφορά στις βασικές λειτουργίες των δύο προγραμμάτων. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η πλήρης διαδικασία που ακολουθήθηκε στο πειραματικό μέρος της διπλωματικής εργασίας, δηλαδή η επεξεργασία των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν, η εισαγωγή τους στην προσομοίωση καθώς και η καταγραφή των αποτελεσμάτων.

### 6.2 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

#### 6.2.1 Περιβάλλον GAMS

Ένα από τα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν στην διπλωματική εργασία είναι το λογισμικό GAMS (General Algebraic Modeling System). Το GAMS αποτελεί ένα υπολογιστικό περιβάλλον που επιτρέπει την μοντελοποίηση, την ανάλυση καθώς και την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Το GAMS είναι το πρώτο λογισμικό που συνδύασε τον προγραμματισμό με την άλγεβρα [49]. Σήμερα, το GAMS αποτελεί ένα πολύ ισχυρό εργαλείο για την επίλυση γραμμικών, μη-γραμμικών και διακριτών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα του GAMS είναι η δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων μεγάλης κλίμακας (large-scale problems). Επιπλέον, το GAMS παρέχει την δυνατότητα επιλογής επιλυτών (solvers) για την επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης. Αυτό, είναι ιδιαίτερα χρήσιμο καθώς μερικοί solvers αποδίδουν καλύτερα από άλλους ανάλογα με την διατύπωση του προβλήματος. Έτσι, ο χρήστης του προγράμματος GAMS είναι ελεύθερος να διατυπώσει το πρόβλημα χωρίς να ασχολείται με λεπτομέρειες που επηρεάζουν την απόδοση κάθε solver.

Οι κυριότερες εντολές του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκαν για την σύνθεση της προσομοίωσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι:

#### Εντολές

- Scalars: Παρέχει την δυνατότητα εισαγωγής σταθερών
- Parameters: Ορίζει μονοδιάστατες παραμέτρους
- Tables: Ορίζει παραμέτρους τουλάχιστον δύο διαστάσεων

- Set: Εισάγει σύνολα δεικτών
- Variables: Ορίζει μεταβλητές ελέγχου. Είναι δυνατόν να οριστούν επιπλέον χαρακτηριστικά των μεταβλητών ελέγχου, όπως το εύρος τιμών τους ή το είδος των μεταβλητών πχ. Positive, Binary, κ.α.
- Equations: Εισαγωγή εξισώσεων και περιορισμών
- Model: Προσδιορίζει τις εξισώσεις που συμπεριλαμβάνονται στην βελτιστοποίηση. Δίνεται η δυνατότητα εισαγωγής όλων των εξισώσεων με την εντολή Solve /all/
- Options: Παρέχει την δυνατότητα αλλαγής των προκαθορισμένων μεταβλητών του περιβάλλοντος (default setting), όπως η επιλογή συγκεκριμένου solver, η θέσπιση ορίου επαναλήψεων, ο ορισμός μέγιστου χρόνου εκτέλεσης, κ.α.
- Solve: Ορίζει τον στόχο της βελτιστοποίησης, δηλαδή αν είναι μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση καθώς και το είδος του προβλήματος, δηλαδή αν επιλύεται γραμμικό, μη-γραμμικό ή άλλης μορφής πρόβλημα.
- Execute\_unload: Παρέχει την δυνατότητα φόρτωσης των αποτελεσμάτων σε αρχείο GDX για την μεταφορά τους σε άλλες πλατφόρμες, όπως αρχεία Microsoft Excel, αρχεία του MATLAB, κ.α.

Πρέπει να σημειωθεί ότι το GAMS παρέχει την δυνατότητα μετατροπής αρχείων Microsoft Excel της μορφής xlsx ή xls στην μορφή Gams Data eXchange files γνωστή και ως GDX (.gdx) την οποία μπορεί να διαβάσει απευθείας κατά την επίλυση του προβλήματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να είναι δυνατή η φόρτωση δεδομένων απευθείας από αρχεία Microsoft Excel στο GAMS. Παρόλα αυτά, η διαδικασία μετατροπής αρχείων Microsoft Excel σε αρχεία gdx απαιτεί κάποιο υπολογίσιμο χρονικό διάστημα κάτι που σε περιπτώσεις επίλυσης πολλαπλών προβλημάτων μπορεί να μην είναι αποδεκτό.

## 6.2.2 Περιβάλλον RStudio

Το RStudio αποτελεί λογισμικό που δρα ως το περιβάλλον της γλώσσας προγραμματισμού R. Η R αποτελεί μια γλώσσα προγραμματισμού ανοικτού κώδικα, που επιτρέπει στους χρήστες να επεμβαίνουν στον κώδικά της. Αυτό έχει οδηγήσει στην δημιουργία πληθώρας δημόσιων βιβλιοθηκών (libraries) με πακέτα εντολών που μπορούν να κατεβάσουν και να εκμεταλλευτούν όλοι οι χρήστες της R. Ο αρχικός σκοπός της R ήταν να παρέχει την δυνατότητα υλοποίησης στατιστικών μελετών καθώς και την κατασκευή γραφικών αναπαραστάσεων. Με το πέρασ των χρόνων οι χρήσεις της R έχουν διευρυνθεί σημαντικά. Συγκεκριμένα, έχει βρεθεί ότι η R μπορεί να διαχειρίζεται με μεγάλη ευκολία μεγάλους όγκους δεδομένων κάτι που την έχει καθιερώσει ως μια από τις πιο δημοφιλείς γλώσσες προγραμματισμού στον κλάδο της επιστήμης των δεδομένων (data science).

Το RStudio αποτελεί ένα περιβάλλον λειτουργίας για την R. Το RStudio διαθέτει συντάκτη (editor), εργαλεία εκσφαλμάτωσης (debugging) καθώς και εργαλεία για την κατασκευή και αναπαράσταση διαγραμμάτων. Ως αποτέλεσμα, το RStudio αποτελεί ένα σύγχρονο και εύχρηστο λογισμικό και επιτρέπει την γρήγορη εξοικείωση των χρηστών του.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε χρήση της προγραμματιστικής γλώσσας R μέσω της εφαρμογής RStudio για την επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων. Συγκεκριμένα, η R χρησιμοποιήθηκε για την κατάλληλη τροποποίηση των αποτελεσμάτων του προγράμματος GAMS για την ανατροφοδότησή τους σε επόμενες προσομοιώσεις.

Οι κυριότερες βιβλιοθήκες και εντολές που χρησιμοποιήθηκαν στην υλοποίηση της διπλωματικής εργασίας είναι οι ακόλουθες:



**Βιβλιοθήκες – Εντολές**

- readxl: Επιτρέπει την ανάγνωση αρχείων της μορφής xlsx
  - read\_excel
- openxlsx: Επιτρέπει την αποθήκευση σε αρχεία xlsx
  - write.xlsx
- ggplot2: Μια από τις πιο διαδεδομένες βιβλιοθήκες για διαγράμματα και γραφικές αναπαραστάσεις αποτελεσμάτων
- gdata: Επιτρέπει την μορφοποίηση δεδομένων που βρίσκονται σε μορφή πίνακα και έχουν διαφορετικές διαστάσεις
  - cbindX
  - rbindX

**6.2.3 Περιβάλλον της Συνολικής Προσομοίωσης**

Στο Σχήμα 6.1 παρουσιάζεται η ροή πληροφοριών μεταξύ των διαφορετικών προβλημάτων που επιλύονται στο πειραματικό μέρος της διπλωματικής εργασίας. Καθώς το πρόβλημα που επιλύεται χωρίζεται σε υπό-προβλήματα που επικοινωνούν μεταξύ τους, τα αποτελέσματα κάθε σταδίου λειτουργούν ως δεδομένα εισόδου του επόμενου σταδίου. Αυτό καθιστά απαραίτητη την επικοινωνία μεταξύ των διαφορετικών προσομοιώσεων.



**Σχήμα 6.1:** Απεικόνιση του περιβάλλοντος του προγράμματος

Το GAMS αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης, αλλά δεν είναι εξίσου αποτελεσματικό ως εργαλείο διαχείρισης δεδομένων επειδή δεν επιτρέπει την εύκολη επεξεργασία και μεταφορά δεδομένων μεταξύ διαφορετικών προβλημάτων. Επιπλέον, λειτουργίες ανάγνωσης και αποθήκευσης δεδομένων μέσω του GAMS, όπως η εισαγωγή δεδομένων από αρχεία Microsoft Excel, παρόλο που υποστηρίζονται, απαιτούν σημαντικό χρόνο για την υλοποίησή τους, κάτι που καθιστά πρακτικά αδύνατη την μεταφόρτωση δεδομένων από πολλά αρχεία Microsoft Excel. Αντίθετα, η R προσφέρει όλα τα απαραίτητα εργαλεία που απαιτούνται για την διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων, κάτι που την καθιστά ιδανική για τον προγραμματισμό συνδυαστικών προγραμμάτων που διασυνδέουν τις διαφορετικές προσομοιώσεις του GAMS.

Για λόγους πληρότητας πρέπει να αναφερθεί ότι ο ρόλος της R σε αυτή την διπλωματική εργασία θα μπορούσε να καλυφθεί από οποιοδήποτε άλλη γλώσσα προγραμματισμού, όπως η Python, MATLAB, C, κ.α.. Ο λόγος που επιλέχθηκε η R έναντι άλλων προγραμματιστικών γλωσσών είναι ότι το λογισμικό RStudio επιτρέπει τον άμεσο έλεγχο των υπό επεξεργασία δεδομένων με αποτέλεσμα να είναι πολύ εύκολη η εκσφαλμάτωση (debugging) του προγράμματος.

### 6.3 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Καθώς η συνολική προσομοίωση αποτελείται από αρκετά βήματα, κρίνεται απαραίτητο να παρουσιαστεί αναλυτικά κάθε βήμα. Σε αυτή την ενότητα επεξηγείται αναλυτικά κάθε πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε στην συνολική προσομοίωση της διπλωματικής εργασίας.

#### 6.3.1 Βελτιστοποίησή της Λειτουργίας του VPP

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται χρήση στοχαστικού και εύρωστου προγραμματισμού για την εύρεση της βέλτιστης λειτουργίας ενός VPP.

##### Στοχαστικός Προγραμματισμός

Ο στοχαστικός προγραμματισμός του VPP βασίζεται στην ύπαρξη προβλέψεων υψηλής ακρίβειας (πολύ μικρών σφαλμάτων) για τις στοχαστικές μονάδες παραγωγής καθώς και την τιμή της αγοράς της επόμενης ημέρας. Τα βήματα που ακολουθούνται για την επίλυση του στοχαστικού προβλήματος βελτιστοποίησης είναι τα ακόλουθα:

1. *Καθορισμός των παραμέτρων του VPP*
2. *Ορισμός των περιορισμών του VPP*
3. *Ορισμός της αντικειμενικής συνάρτησης*
4. *Φόρτωση των δεδομένων, όπως οι προβλέψεις για την παραγωγή των στοχαστικών μονάδων παραγωγής και οι τιμές της αγοράς της επόμενης ημέρας.*
5. *Επιλογή κατάλληλου solver*
6. *Αποθήκευση των αποτελεσμάτων σε μορφή gdx και μετατροπή του αρχείου σε μορφή xlsx*

Ένα από τα βήματα που παρουσιάζουν ιδιαίτερη σημασία είναι η επιλογή του κατάλληλου solver καθώς, ανάλογα με την επιλογή του solver, μπορεί να διαφέρει ο χρόνος επίλυσης. Επιπλέον, καθώς χρησιμοποιούνται γραμμικές προσεγγίσεις για την γραμμικοποίηση του προβλήματος, μετά την εφαρμογή της γραμμικοποίησης, είναι απαραίτητο να γίνει αλλαγή του solver. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα χρησιμοποιήθηκε ο solver CPLEX για την επίλυση και του γραμμικού αλλά και του μη-γραμμικού προβλήματος. Παρόλο που το αρχικό πρόβλημα είναι μη-γραμμικό εντάσσεται σε μια

ειδική κατηγορία μη-γραμμικών προβλημάτων, γνωστή ως non-linear quadratic constraint programming, που μπορούν να επιλυθούν από τον CPLEX.

### **Εύρωστος Προγραμματισμός**

Ο εύρωστος προγραμματισμός του VPP εργάζεται παρόμοια με τον στοχαστικό προγραμματισμό με την διαφορά ότι εισάγεται και το χειρότερο δυνατό σενάριο στον προγραμματισμό. Επομένως, τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα ίδια με την διαφορά του πρώτου βήματος που αποσκοπεί στην εύρεση του χειρότερου δυνατού σεναρίου. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η χειρότερη δυνατή κατάσταση δεν χρειάζεται να αντιστοιχεί σε κάποιο από τα σενάρια που χρησιμοποιούνται στον στοχαστικό προγραμματισμό.

1. *Εύρεση χειρότερης δυνατής κατάστασης*
2. *Καθορισμός των παραμέτρων του VPP*
3. *Ορισμός των περιορισμών του VPP*
4. *Ορισμός της αντικειμενικής συνάρτησης*
5. *Φόρτωση των δεδομένων του δικτύου, όπως οι προβλέψεις για την παραγωγή των στοχαστικών μονάδων παραγωγής και οι τιμές της αγοράς της επόμενης ημέρας.*
6. *Επιλογή κατάλληλου solver*
7. *Αποθήκευση των αποτελεσμάτων σε μορφή gdx και μετατροπή του αρχείου σε μορφή xlsx*

Όπως και στον στοχαστικό προγραμματισμό, έτσι και στον εύρωστο προγραμματισμό έχει ιδιαίτερη σημασία η επιλογή του solver. Σε αντίθεση με τον στοχαστικό προγραμματισμό, κατά την επίλυση του εύρωστου προγραμματισμού χρησιμοποιούνται διαφορετικοί solver. Συγκεκριμένα, για την επίλυση του αρχικού προβλήματος χρησιμοποιείται ο solver IPOPT, ο οποίος επιτρέπει την επίλυση non-linear mixed integer programming, ενώ για την επίλυση του γραμμικοποιημένου προβλήματος γίνεται χρήση του CPLEX καθώς το πρόβλημα εντάσσεται στην κατηγορία mixed integer programming.

### **6.3.2 Συλλογή και Επεξεργασία Δεδομένων**

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1, στην συνολική προσομοίωση χρησιμοποιούνται δύο αλγόριθμοι εξαγωγής και επεξεργασίας δεδομένων για την σύνδεση των δύο προσομοιώσεων στο GAMS. Παρόλο που τα δύο προγράμματα είναι διαφορετικά μεταξύ τους, κρίνεται προτιμότερο να παρουσιαστούν στην ίδια ενότητα καθώς η δομή τους είναι ίδια. Τα βήματα που ακολουθούνται για την κατασκευή των αλγορίθμων είναι:

1. *Φόρτωση των αποτελεσμάτων του προγράμματος GAMS από το αντίστοιχο αρχείο Microsoft Excel*
2. *Ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων με βάση το είδος τους (φορτία ή μονάδες παραγωγής)*
3. *Επεξεργασία της δομής τους ώστε να είναι συμβατά με το GAMS*
4. *Αποθήκευση των δεδομένων σε νέα αρχεία Microsoft Excel*

### **6.3.3 Εκκαθάριση της Αγοράς της Επόμενης Ημέρας**

Ο αλγόριθμος εκκαθάρισης της αγοράς ενέργειας αποτελεί τον εκτενέστερο σε έκταση κώδικα καθώς καλείται να λύσει ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης για ένα μικρό δίκτυο μεταφοράς. Στην

παρούσα διπλωματική προσομοιάζονται τρία δίκτυα μεταφοράς: ένα 14 ζυγών, ένα 30 ζυγών και ένα 500 ζυγών. Το δίκτυο 14 ζυγών λειτούργησε ως η απόδειξη της ορθότητας της ιδέας (proof of concept) ενώ τα δίκτυα 30 και 500 ζυγών χρησιμοποιούνται για την καλύτερη προσομοίωση μιας πλήρως ανταγωνιστικής αγοράς ενέργειας. Αν και υπάρχουν διαφορές μεταξύ των τριών προσομοιώσεων, η δομή τους είναι κοινή. Επομένως, κρίνεται προτιμότερο να παρουσιαστούν τα βήματα και των τριών δικτύων ομαδοποιημένα.

Τα βήματα που ακολουθούνται για την προσομοίωση της εκκαθάρισης της αγοράς της επόμενης ημέρας είναι:

1. *Καθορισμός των παραμέτρων του δικτύου*
2. *Ορισμός των περιορισμών του δικτύου και των μονάδων παραγωγής*
3. *Ορισμός της αντικειμενικής συνάρτησης*
4. *Φόρτωση των δεδομένων, όπως τα θερμοκά όρια των γραμμών μεταφοράς ή τα φορτία του δικτύου*
5. *Φόρτωση των δεδομένων της προσφοράς του VPP*
6. *Επιλογή του κατάλληλου solver*
7. *Αποθήκευση των αποτελεσμάτων σε μορφή gdx και μετατροπή του αρχείου σε μορφή xlsx*

Όπως και στα προηγούμενα προβλήματα βελτιστοποίησης, έτσι και εδώ, η επιλογή του solver είναι πολύ σημαντική. Σε αντίθεση με τα προβλήματα βελτιστοποίησης για τον προγραμματισμό του VPP, στο πρόβλημα εκκαθάρισης του δικτύου η σημασία της επιλογής είναι φανερή και οδηγεί σε σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ του χρόνου επίλυσης των προβλημάτων. Συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη διαφορά παρατηρήθηκε κατά την επίλυση του δικτύου 500 ζυγών, όπου η χρήση του solver CONOPT δεν οδηγούσε σε λύση του προβλήματος, ενώ η χρήση του IPOPT οδηγούσε σε λύση. Στον Πίνακα 6.1 αναπαρίστανται οι solver που χρησιμοποιήθηκαν για την επιτυχημένη επίλυση των προβλημάτων.

**Πίνακας 6.1:** Αναπαράσταση των solver που χρησιμοποιήθηκαν για την εκκαθάριση του δικτύου

Δίκτυο	AC-OPF	Quasi-Linear OPF	Fully Linear OPF	Warm-Start Fully Linear OPF
14 ζυγών	CONOPT/IPOPT	CONOPT/IPOPT	CPLEX	CPLEX
30 ζυγών	CONOPT/IPOPT	CONOPT/IPOPT	CPLEX	CPLEX
500 ζυγών	IPOPT	IPOPT	CPLEX	CPLEX

### 6.3.4 Εξισορρόπηση του VPP

Για την εξισορρόπηση του VPP, σε αντίθεση με τα άλλα προβλήματα, δεν υπάρχουν άγνωστες μεταβλητές, αλλά όλα τα μεγέθη είναι γνωστά. Επομένως, τα βήματα που ακολουθούνται στην προσομοίωση της εξισορρόπησης του VPP είναι:

1. *Ορισμός των περιορισμών του VPP*
2. *Ορισμός της αντικειμενικής συνάρτησης*
3. *Φόρτωση των δεδομένων εκκαθάρισης, δηλαδή της προσφοράς και κατανάλωσης του VPP που έγινε αποδεκτή από την αγορά ενέργειας και η οποία αποτελεί πλέον τις δεσμεύσεις του VPP*
4. *Επιλογή του κατάλληλου solver*
5. *Αποθήκευση των αποτελεσμάτων σε μορφή gdx και μετατροπή του αρχείου σε μορφή xlsx*

Για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος γίνεται χρήση του solver IPOPT, καθώς το πρόβλημα εντάσσεται στην κατηγορία του non-linear programming.

## 6.4 ΤΕΧΝΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται επιγραμματικά η συνολική τεχνική διαδικασία της προσομοίωσης που ακολουθήθηκε από την εισαγωγή των αρχικών δεδομένων έως την συλλογή και επεξεργασία των τελικών αποτελεσμάτων.

### 6.4.1 Δεδομένα

Η εισαγωγή δεδομένων είναι αναγκαία για την επίλυση των ακόλουθων προβλημάτων:

- Βελτιστοποίηση του προγραμματισμού λειτουργίας του VPP στην αγορά της επόμενης ημέρας
- Εκκαθάριση της αγοράς της επόμενης ημέρας
- Προσομοίωση της αγοράς εξισορρόπησης

Η εισαγωγή των δεδομένων και στα τρία προβλήματα γίνεται μέσω αρχείων Microsoft Excel (xlsx ή xls), αρχείων text (txt) καθώς και hardcoded δεδομένων. Καθώς το GAMS δεν μπορεί να τραβήξει δεδομένα απευθείας από άλλα αρχεία, τα αρχεία μετατρέπονται πρώτα σε μορφή gdx, η οποία υποστηρίζεται από το GAMS. Καθώς η διαδικασία μετατροπής αρχείων Microsoft Excel σε gdx απαιτεί μετρήσιμο χρονικό διάστημα, η μετατροπή των δεδομένων γίνεται πριν την εκτέλεση του προγράμματος όπου επιτρέπεται, δηλαδή όταν τα δεδομένα παραμένουν σταθερά για το σύνολο των προσομοιώσεων.

### 6.4.2 Προσομοίωση και Εξαγωγή Δεδομένων

Υστερα από την εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων και του καθορισμού των συνθηκών της κάθε προσομοίωσης εκτελούνται όλες οι προσομοιώσεις με την σειρά που παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.1. Αρχικά, εκτελείται η προσομοίωση βελτιστοποίησης του VPP με χρήση στοχαστικού ή

εύρωστου προγραμματισμού. Καθώς ένα από τα ερωτήματα που εξετάζεται στην διπλωματική είναι το πώς επηρεάζεται η κερδοφορία του VPP ανάλογα με το είδος του προγραμματισμού που χρησιμοποιείται, όλες οι προσομοιώσεις επιλύονται και για τους δύο τρόπους προγραμματισμού. Επιπλέον, πριν την εκτέλεση της προσομοίωσης, επιλέγεται μια από τις ακόλουθες καταστάσεις, που προσδιορίζουν αν το VPP διαθέτει εγκαταστάσεις εξόρυξης και ποια cryptocurrencies εξετάζονται. Οι καταστάσεις που εξετάζονται είναι:

- Συμβατικό VPP χωρίς εγκατάσταση εξόρυξης cryptocurrencies
- VPP με εγκαταστάσεις εξόρυξης Bitcoin
- VPP με εγκαταστάσεις έκδοσης (mint) Ethereum
- VPP με εγκαταστάσεις εξόρυξης Dogecoin

Κατά την επίλυση της προσομοίωσης προγραμματισμού του VPP προσδιορίζεται το προσδοκώμενο κέρδος του VPP καθώς και η προσφορά της παραγωγής και της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας που κατατίθεται στην αγορά της επόμενης ημέρας για χρονικό διάστημα 24 ωρών. Έπειτα, με την βοήθεια του αλγορίθμου εξαγωγής και επεξεργασίας δεδομένων, συλλέγονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης βελτιστοποίησης του VPP και αποθηκεύονται σε κατάλληλη μορφή σε ένα αρχείο Microsoft Excel για την τροφοδότησή τους στην επόμενη προσομοίωση. Στην συνέχεια, μετά την φόρτωση των δεδομένων, εκτελείται η προσομοίωση της εκκαθάρισης της αγοράς της επόμενης ημέρας και για τα τρία δίκτυα που εξετάζονται (14 ζυγών, 30 ζυγών, 500 ζυγών). Μετά την εύρεση της βέλτιστης εκκαθάρισης του δικτύου, γίνεται εξαγωγή των αποτελεσμάτων, και συγκεκριμένα των δεσμεύσεων του VPP, από τον αλγόριθμο εξαγωγής, τα οποία αποθηκεύονται σε ένα νέο αρχείο Microsoft Excel για την εισαγωγή τους στην επόμενη προσομοίωση. Η τελευταία προσομοίωση που επιλύεται υπολογίζει το συνολικό κέρδος του VPP μετά την εφαρμογή προστίμων σε περίπτωση που η παραγωγή του δεν ήταν ίση με τις δεσμεύσεις του. Τέλος, συλλέγονται όλα τα δεδομένα από όλες τις προσομοιώσεις και αποθηκεύονται σε ένα αρχείο Microsoft Excel για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Μετά την ολοκλήρωση της συνολικής προσομοίωσης, γίνεται αλλαγή των δεδομένων εισόδου και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Στην παρούσα διπλωματική εξετάζονται τα ακόλουθα σενάρια:

- Καλή πρόβλεψη των τιμών της αγοράς της επόμενης ημέρας
- Κακή πρόβλεψη με τις προβλεπόμενες τιμές να είναι μικρότερες από ότι είναι στην πράξη
- Πολύ καλή πρόβλεψη με τις προβλεπόμενες τιμές να είναι σχεδόν ίσες με την πραγματική τιμή

Κατά την εξέταση των παραπάνω σεναρίων οι προβλέψεις των στοχαστικών μονάδων κρατούνται σταθερές.

Επιπλέον εξετάζονται τα σενάρια:

- Κακή πρόβλεψη της στοχαστικής παραγωγής του VPP με την πρόβλεψη να είναι υψηλότερη από την πραγματική παραγωγή
- Κακή πρόβλεψη της στοχαστικής παραγωγής του VPP με την πρόβλεψη να είναι χαμηλότερη από την πραγματική παραγωγή

---

Κατά την εξέταση των δύο σεναρίων κακής στοχαστικής πρόβλεψης χρησιμοποιείται η ίδια πρόβλεψη για τις τιμές της αγοράς της επόμενης ημέρας και συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται τα δεδομένα που αντιστοιχούν στο σενάριο καλής πρόβλεψης των τιμών της αγοράς της επόμενης ημέρας.





## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων της διπλωματικής εργασίας. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται για να εξεταστεί κατά πόσο η χρήση εγκαταστάσεων εξόρυξης cryptocurrencies, στα VPPs, επηρεάζει την λειτουργία και την κερδοφορία των VPPs. Παρακάτω γίνεται μια σύντομη αναφορά στις προσομοιώσεις που υλοποιήθηκαν καθώς και τα σενάρια που εξετάστηκαν:

#### Προσομοιώσεις:

- Βελτιστοποίηση του προγραμματισμού του VPP
  - Στοχαστικός Προγραμματισμός
    - Συμβατικό VPP (χωρίς εγκαταστάσεις εξόρυξης)
    - VPP με εγκαταστάσεις εξόρυξης Bitcoin
    - VPP με εγκαταστάσεις έκδοσης (mint) Ethereum
    - VPP με εγκαταστάσεις εξόρυξης Dogecoin
  - Εύρωστος Προγραμματισμός
    - Συμβατικό VPP (χωρίς εγκαταστάσεις εξόρυξης)
    - VPP με εγκαταστάσεις εξόρυξης Bitcoin
    - VPP με εγκαταστάσεις έκδοσης (mint) Ethereum
    - VPP με εγκαταστάσεις εξόρυξης Dogecoin
- Εκκαθάριση Αγοράς της Επόμενης Ημέρας
  - Δίκτυο 14 ζυγών
  - Δίκτυο 30 ζυγών
  - Δίκτυο 500 ζυγών
- Αγορά εξισορρόπησης

#### Σενάρια:

- Καλή πρόβλεψη των τιμών της αγοράς της επόμενης ημέρας (Average Price Forecast)
- Κακή πρόβλεψη των τιμών της αγοράς της επόμενης ημέρας με τις προβλεπόμενες τιμές να είναι μικρότερες από τις πραγματικές τιμές (Pessimistic Price Forecast)
- Πολύ καλή πρόβλεψη των τιμών της αγοράς της επόμενης ημέρας με τις προβλεπόμενες τιμές να είναι σχεδόν ίσες με τις πραγματικές τιμές (Optimistic Price Forecast)
- Κακή πρόβλεψη της στοχαστικής παραγωγής των VPPs με την πρόβλεψη να είναι υψηλότερη από την πραγματική παραγωγή τους (Optimistic Stochastic Forecast)

- Κακή πρόβλεψη της στοχαστικής παραγωγής των VPPs με την πρόβλεψη να είναι χαμηλότερη από την πραγματική παραγωγή τους (Pessimistic Stochastic Forecast)

Πριν παρουσιαστούν αναλυτικά τα αποτελέσματα, πρέπει να επισημανθεί ότι στην παρούσα διπλωματική δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στις ακόλουθες παραμέτρους:

1. Προβλεπόμενο κέρδος (expected profit) του VPP
2. Πραγματικό κέρδος (real profit) του VPP
3. Κέρδος από την πώληση cryptocurrencies στις αγορές
4. Πρόστιμο (Penalty) που καλείται να πληρώσει το VPP στην αγορά εξισορρόπησης
5. Τιμή εκκαθάρισης της αγοράς της επόμενης ημέρας (ΟΤΣ)

Ο λόγος για τον οποίο δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα στις παραπάνω παραμέτρους θα γίνει εμφανής σε επόμενες ενότητες.

Για λόγους πληρότητας, πρέπει να αναφερθεί ότι όλες οι εφαρμογές που παρουσιάζονται υλοποιήθηκαν σε Η/Υ με τεχνικά χαρακτηριστικά:

- Επεξεργαστής Intel Core i7 – 8700k @ 4.7GHz
- Μνήμη RAM 16 GB
- Λειτουργικό Σύστημα Windows 10

## 7.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ VPP

Στην παρούσα διπλωματική εξετάζονται τέσσερα διαφορετικά VPPs. Αρχικά, παρουσιάζονται τα κοινά στοιχεία των VPPs, δηλαδή τα στοιχεία που αντιστοιχούν στο συμβατικό VPP χωρίς εγκαταστάσεις εξόρυξης. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα επιπλέον δεδομένα των VPPs που διαθέτουν εγκαταστάσεις εξόρυξης. Τα δεδομένα παρουσιάζονται ξεχωριστά για κάθε μονάδα που διαχειρίζονται τα VPPs.

### Μονάδες Συμβατικού VPP:

- Φωτοβολταϊκά πάρκα
- Αιολικά πάρκα
- Μονάδα παραγωγής φυσικού αερίου
- Μονάδα παραγωγής πετρελαίου
- Ελεγχόμενα φορτία
- Μπαταρίες
- Αντλιοστάσιο

Οι στοχαστικές μονάδες παραγωγής που συμπεριλαμβάνονται στις προσομοιώσεις του συμβατικού VPP αποτελούνται από φωτοβολταϊκά πάρκα μέγιστης ισχύος 6MW καθώς και αιολικά πάρκα με δυνατότητα παραγωγής έως 12MW. Οι θερμοηλεκτρικές μονάδες παραγωγής αποτελούνται από μια μονάδα φυσικού αερίου και μία μονάδα πετρελαίου. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των δύο μονάδων παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1. Τα ελεγχόμενα φορτία της εγκατάστασης αποτελούνται από ένα εργοστάσιο υφαντουργίας, τα χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.2.

**Πίνακας 7.1:** Τεχνικά χαρακτηριστικά των θερμοηλεκτρικών μονάδων παραγωγής

Μονάδα Φυσικού Αερίου		Μονάδα Πετρελαίου	
Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
$P_{Gmax}$ (MW)	10	$P_{Dmax}$ (MW)	0.5
$P_{Gmin}$ (MW)	1	$P_{Dmin}$ (MW)	0
$P_{Gramp}$ (MW)	4	$P_{Dramp}$ (MW)	0.5
$P_G(0)$ ή $P_{G0}$ (MW)	2	$P_D(0)$ ή $P_{D0}$	0
$v_G(0)$	1 (“on”)	$v_D(0)$	0 (“off”)
$a_G$ (€/MW <sup>2</sup> hr)	3.105	$a_D$ (€/MW <sup>2</sup> hr)	0
$b_G$ (€/MW hr)	19.45	$b_D$ (€/MW hr)	50
$c_G$ (€/hr)	2	$c_D$ (€/hr)	0
$SU_G$ (€)	10	$SU_D$ (€)	0

**Πίνακας 7.2:** Τεχνικά χαρακτηριστικά των ελεγχόμενων φορτίων

Εργοστάσιο υφαντουργίας	
Παράμετρος	Τιμή
$P_{Lmax}$ (MW)	2
$P_{Lmin}$ (MW)	0.5
$P_{Lramp}$ (MW)	1.0
$P_L(0)$ ή $P_{L0}$ (MW)	1.5
$MinCon$ (MW)	2.5
$c_{FL}$ (€/hr)	150
$M_{FL}$	0.3

**Πίνακας 7.3:** Τεχνικά χαρακτηριστικά των εγκαταστάσεων αποθήκευσης

Μπαταρίες		Αντλιοστάσιο	
Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
$E_{SKB}^{max}$ (MW)	30	$E_{SB}^{max}$ (MW)	1
$E_{SKB}^{min}$ (MW)	10	$E_{SB}^{min}$ (MW)	0.2
$E_{SKB}(0)$ (MW)	15	$E_{SB}(0)$ (MW)	0.4
$P_{SKB}^{c,max}$ (MWh)	10	$P_{SB}^{c,max}$ (MWh)	0.3
$P_{SKB}^{d,max}$ (MWh)	10	$P_{SB}^{d,max}$ (MWh)	0.5
$n_{eff}^c$	0.80	$n_{eff}$	0.80
$n_{eff}^d$	0.80		

Τέλος, οι συσκευές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας του VPP αποτελούνται από ένα αντλιοστάσιο καθώς και μία φάρμα μπαταριών, τα δεδομένα των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.3.

### **VPP με Εγκαταστάσεις Εξόρυξης Cryptocurrencies:**

Επιπρόσθετα των στοιχείων που αναφέρθηκαν παραπάνω, για την επίλυση των προσομοιώσεων των VPPs που διαθέτουν εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies είναι απαραίτητη η εισαγωγή των επιπλέον δεδομένων. Στον Πίνακα 7.4 παρουσιάζονται τα δεδομένα των εγκαταστάσεων εξόρυξης για καθένα από τα τρία cryptocurrencies που εξετάζονται, δηλαδή Bitcoin, Ethereum και Dogecoin. Όπως έχει παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 4, το σύμβολο (\*) προσδιορίζει την εγκατάσταση εξόρυξης που διαθέτει τον καλύτερο διαθέσιμο εξοπλισμό ενώ χωρίς (\*) αναπαρίσταται

η εγκατάσταση που διαθέτει εξοπλισμό που αντιστοιχεί στα μέσα μηχανήματα εξόρυξης που χρησιμοποιούνται από ιδιώτες.

Τα υπόλοιπα στοιχεία, όπως οι πιθανότητες κάθε σεναρίου του στοχαστικού προγραμματισμού ή οι προβλέψεις των στοχαστικών μονάδων καθώς και των τιμών της αγοράς της επόμενης ημέρας παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.3 στους Πίνακες Α.3.1 έως Α.3.6.

**Πίνακας 7.4:** Τεχνικά χαρακτηριστικά των εγκαταστάσεων εξόρυξης cryptocurrencies

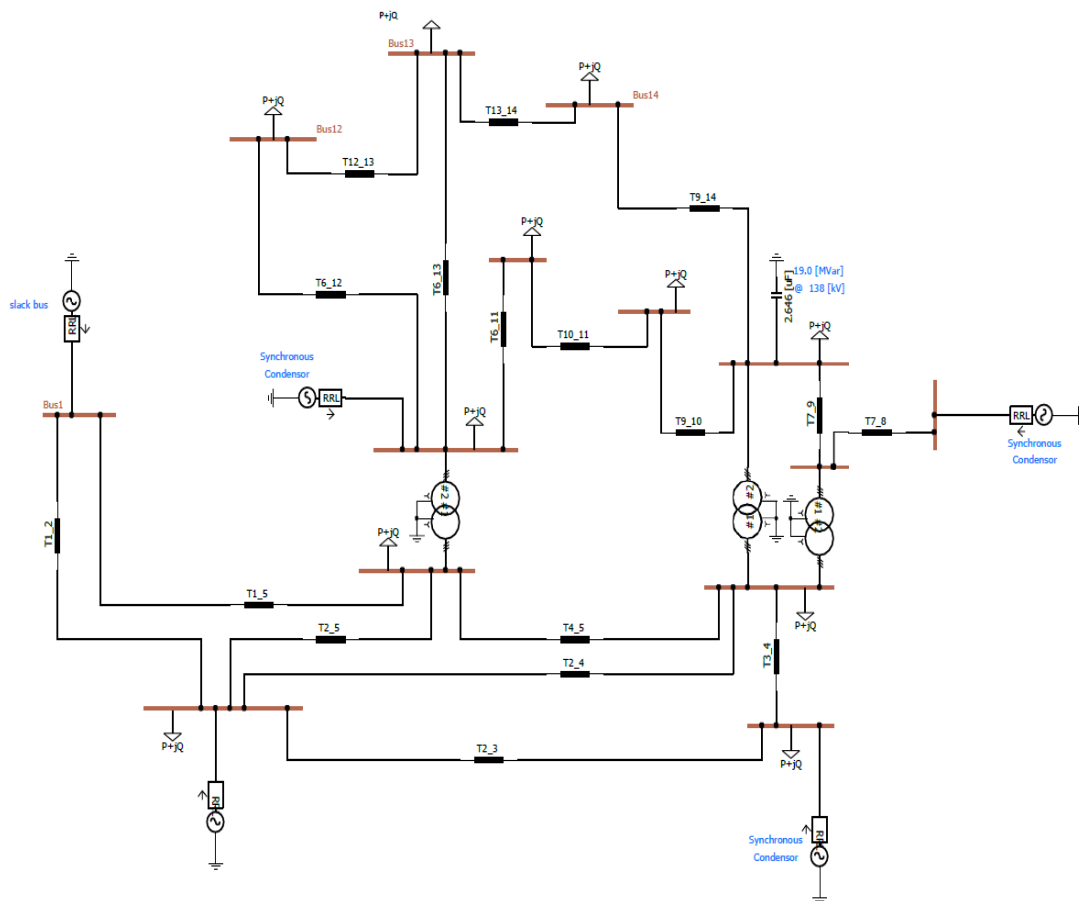
Παράμετρος	Bitcoin (BTC)	Ethereum* (ETH*)	Ethereum (ETH)	Dogecoin
$E_{crypt}^{max}$ (MW)	0.65	0.65	0.65	0.65
$E_{crypt}^{min}$	0	0	0	0
$P_{Scrypt}(0)$ (MW)	0.3	0.3	0.3	0.3
$\lambda^c$ (€)	43500	2300	2300	0.44
$\mu^c$	$0.004174853 \frac{BTC}{MWh}$	$0.699598 \frac{ETH}{MWh}$	$0.2208 \frac{ETH}{MWh}$	$282.738 \frac{DOGE}{MWh}$

### 7.3 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΚΤΥΩΝ

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα δεδομένα των δικτύων που χρησιμοποιήθηκαν στην διπλωματική εργασία. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα δεδομένα για τα δίκτυα 14 ζυγών, 30 ζυγών και 500 ζυγών.

#### 7.3.1 Δεδομένα Δικτύου 14 Ζυγών

Το δίκτυο των 14 ζυγών που χρησιμοποιήθηκε αντιστοιχεί στο δοκιμαστικό δίκτυο (test case) προτύπου IEEE το οποίο αναπαριστά ένα κομμάτι του Αμερικανικού δικτύου ενέργειας το 1962. Τα δεδομένα του δικτύου βρέθηκαν από την ιστοσελίδα [50]. Το δίκτυο 14 ζυγών φαίνεται στο Σχήμα 7.1. Όπως φαίνεται από το σχήμα, το δίκτυο αποτελείται από 20 γραμμές μεταφοράς, τα στοιχεία των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.5. Επιπλέον, στο δίκτυο είναι συνδεδεμένες 5 γεννήτριες, τα χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.6. Τέλος, τα φορτία του δικτύου παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.3 στους Πίνακες Α.3.7 και Α.3.8. Οι αντιστάσεις και αντιδράσεις του Πίνακα 7.5 είναι ανηγμένες στο ανά μονάδα (α.μ.) σύστημα με κοινή βάση τα 100MVA. Επιπλέον, τα όρια της τάσης στους ζυγούς είναι 0.9 α.μ. και 1.1 α.μ. ενώ τα όρια των γωνιών είναι οι  $-45$  και οι  $+45$  μοίρες.



Σχήμα 7.1: Δίκτυο 14 ζυγών IEEE [51]

**Πίνακας 7.5:** Τεχνικά χαρακτηριστικά των Γ.Μ. του δικτύου των 14 ζυγών

A.A.	Εκκίνηση	Τέλος	Αντίσταση (α.μ.)	Αντίδραση (α.μ.)	Εγκάρσιες Αντιστάσεις (α.μ.)	Θερμικά Όρια (MVA)
1	1	2	0.01938	0.05917	0.0264	100
2	1	5	0.05403	0.22304	0.0219	100
3	2	3	0.04699	0.19797	0.0187	100
4	2	4	0.05811	0.17632	0.0246	100
5	2	5	0.05695	0.17388	0.017	100
6	3	4	0.06701	0.17103	0.0173	100
7	4	5	0.01335	0.04211	0.0064	100
8	4	7	0	0.20912	0	100
9	4	9	0	0.55618	0	100
10	5	6	0	0.25202	0	100
11	6	11	0.09498	0.1989	0	100
12	6	12	0.12291	0.25581	0	100
13	6	13	0.06615	0.13027	0	100
14	7	8	0	0.17615	0	100
15	7	9	0	0.11001	0	100
16	9	10	0.03181	0.0845	0	100
17	9	14	0.12711	0.27038	0	100
18	10	11	0.08205	0.19207	0	100
19	12	13	0.22092	0.19988	0	100
20	13	14	0.17093	0.34802	0	100

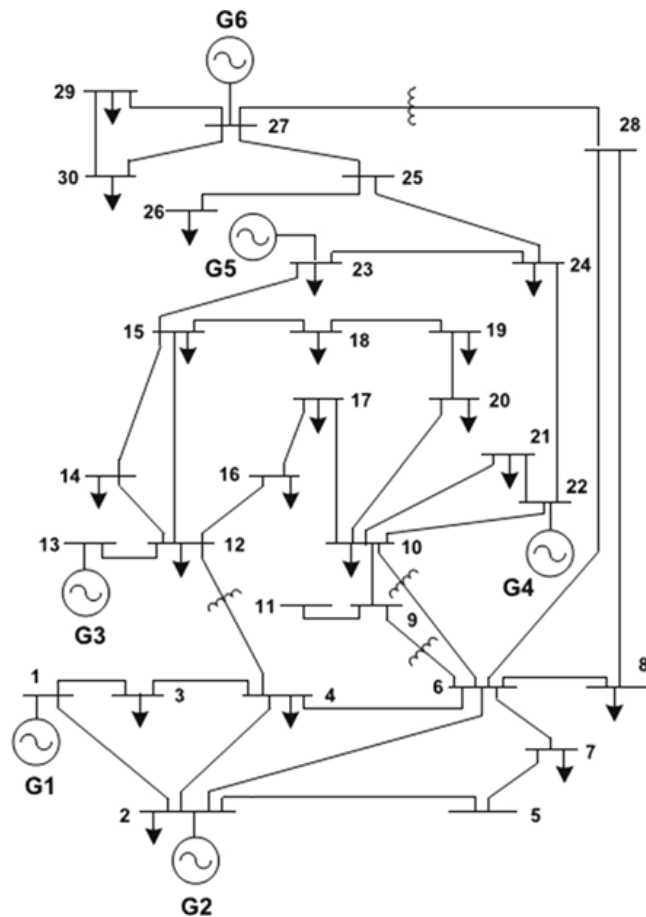
**Πίνακας 7.6:** Τεχνικά χαρακτηριστικά των γεννητριών του δικτύου 14 ζυγών

A/A	$P_i^{max}$ (MW)	$P_i^{min}$ (MW)	$Q_i^{max}$ (MVar)	$Q_i^{min}$ (MVar)	$a_i$ € $\left(\frac{\text{€}}{\text{MW}^2 \text{ hr}}\right)$	$b$ € $\left(\frac{\text{€}}{\text{MW hr}}\right)$	$c_i$ € $\left(\frac{\text{€}}{\text{hr}}\right)$
1	160	0	10	0	3.105	20.45	1.5
2	80	0	50	-40	3.105	20.45	1.5
3	50	0	40	23.4	3.105	20.45	1.5
4	100	0	50	-40	3.105	20.45	1.5
5	80	0	10	0	3.105	20.45	1.5

Για το δίκτυο 14 ζυγών τα φορτία είναι σταθερά σε όλη την διάρκεια των 24 ωρών.

### 7.3.2 Δεδομένα Δικτύου 30 Ζυγών

Το δίκτυο των 30 ζυγών που χρησιμοποιήθηκε στην διπλωματική εργασία αποτελεί άλλο ένα δοκιμαστικό δίκτυο (test case) προτύπου IEEE. Όπως και το δίκτυο των 14 ζυγών, το δίκτυο των 30 ζυγών αποτελεί ένα κομμάτι του Αμερικανικού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας που βρισκόταν σε λειτουργία το 1961 [52]. Τα δεδομένα του δικτύου βρέθηκαν από την ιστοσελίδα [52]. Το δίκτυο των 30 ζυγών φαίνεται στο Σχήμα 7.2. Όπως φαίνεται από το σχήμα, το δίκτυο αποτελείται από 41 γραμμές μεταφοράς, τα στοιχεία των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.7. Επιπλέον, στο δίκτυο είναι συνδεδεμένες 10 γεννήτριες, τα χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.8. Τέλος, στο δίκτυο είναι συνδεδεμένα των 30 φορτία τα δεδομένα των οποίων παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.3 στους Πίνακες Α.3.9 και Α.3.10. Οι αντιστάσεις και αντιδράσεις του Πίνακα 7.7 είναι ανηγμένες στο ανά μονάδα (α.μ.) σύστημα με κοινή βάση τα 100MVA. Επιπλέον, τα όρια της τάσης στους ζυγούς είναι 0.9 α.μ. και 1.1 α.μ. ενώ για όρια των γωνιών ορίζονται οι  $-45$  και οι  $+45$  μοίρες.



Σχήμα 7.2: Δίκτυο 30 ζυγών IEEE [53]

Σε αντίθεση με το δίκτυο των 14 ζυγών, τα φορτία του δικτύου των 30 ζυγών δεν είναι σταθερά σε όλη την διάρκεια της ημέρας, αλλά μεταβάλλονται. Συγκεκριμένα, τα φορτία μεταβάλλονται επτά φορές για την προσομοίωση αλλαγών της κατανάλωσης που οφείλεται σε αλλαγές στην ζήτηση ενέργειας των καταναλωτών. Αναλυτικότερα, οι αυξήσεις στην κατανάλωση παρατηρούνται στις 06:00, στις 08:00 και στις 11:00. Στις 15:00 η κατανάλωση φτάνει στο υψηλότερο επίπεδο ενώ, από τις 19:00 αρχίζει να μειώνεται. Τέλος, στις 23:00 η κατανάλωση επιστέφει στα επίπεδα που είχε στις πρωινές ώρες της ημέρας.

**Πίνακας 7.7:** Τεχνικά χαρακτηριστικά των Γ.Μ. του δικτύου των 30 ζυγών

A.A.	Εκκίνηση	Τέλος	Αντίσταση (α.μ.)	Αντίδραση (α.μ.)	Εγκάρσιες Αντιστάσεις (α.μ.)	Θερμικά Όρια (MVA)
1	1	2	0.002	0.06	0.03	1300
2	1	3	0.005	0.2	0.02	1300
3	2	4	0.006	0.18	0.02	6500
4	2	5	0.005	0.02	0.01	1300
5	2	6	0.006	0.18	0.02	650
6	3	4	0.001	0.04	0.1	130
7	4	6	0.001	0.04	0.001	900
8	4	12	0	0.23	0	650
9	5	7	0.005	0.12	0.01	700
10	6	7	0.003	0.08	0.02	130
11	6	8	0.001	0.09	0.03	320
12	6	9	0	0.21	0.001	650
13	6	10	0	0.56	0.001	320
14	6	28	0.007	0.06	0.01	320
15	8	28	0.006	0.2	0.02	320
16	9	11	0	0.21	0	650
17	9	10	0	0.11	0	650
18	10	20	0.009	0.21	0	320
19	10	17	0.003	0.09	0	320
20	10	21	0.003	0.08	0	320
21	10	22	0.007	0.15	0	320
22	12	13	0	0.14	0	650
23	12	14	0.012	0.26	0	320
24	12	15	0.007	0.13	0	320
25	12	16	0.001	0.12	0	320
26	14	15	0.022	0.12	0	160
27	15	18	0.011	0.22	0	160
28	15	23	0.01	0.21	0	160
29	16	17	0.008	0.19	0	106
30	18	19	0.006	0.13	0	160
31	19	20	0.003	0.07	0	320
32	21	22	0.001	0.22	0	320
33	22	24	0.011	0.18	0	160
34	23	24	0.013	0.27	0	160
35	24	25	0.019	0.33	0	160
36	25	26	0.025	0.38	0	160
37	25	27	0.011	0.21	0	160
38	27	29	0.022	0.4	0	160
39	27	30	0.302	0.6	0	160
40	28	27	0	0.4	0	650
41	29	30	0.024	0.45	0	160



Πίνακας 7.8: Τεχνικά χαρακτηριστικά των γεννητριών του δικτύου των 30 ζυγών

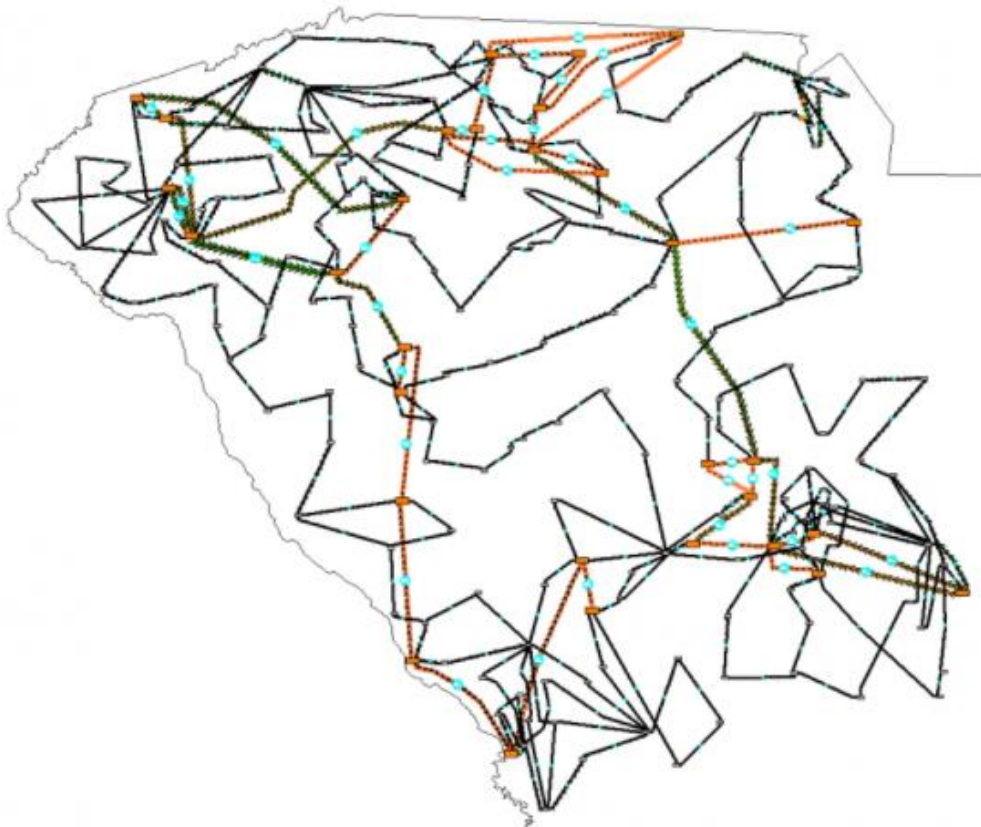
A.A	$P_i^{max}$ (MW)	$P_i^{min}$ (MW)	$Q_i^{max}$ (MVar)	$Q_i^{min}$ (MVar)	$a_i$ $\left(\frac{\text{€}}{\text{MW}^2 \text{ hr}}\right)$	$b$ $\left(\frac{\text{€}}{\text{MW hr}}\right)$	$c_i$ $\left(\frac{\text{€}}{\text{hr}}\right)$
1	160	0	50	0	3.105	20.45	1.5
2	80	0	50	-40	3.105	21.51	2
3	50	0	40	23.4	3.105	19.89	1.7
4	100	0	50	-40	3.105	20.54	2
5	80	0	10	0	3.105	20.21	1.8
6	160	0	0	0	3.105	19.45	1.8
7	80	0	50	-40	3.105	19.89	1.9
8	50	0	40	23.4	3.105	20.54	1.6
9	100	0	50	-40	3.105	20.21	1.7
10	80	0	10	0	3.105	19.45	2

### 7.3.3 Δεδομένα Δικτύου 500 Ζυγών

Το δίκτυο των 500 ζυγών που χρησιμοποιήθηκε στην διπλωματική εργασία αποτελεί ένα δοκιμαστικό δίκτυο (test case) το οποίο δεν αντιστοιχεί σε κανένα πραγματικό δίκτυο αλλά μοντελοποιήθηκε με στόχο να μοιάζει με πραγματικά δίκτυα του ίδιου μεγέθους. Τα δεδομένα του δικτύου συλλέχθηκαν από την ιστοσελίδα [54]. Το δίκτυο των 500 ζυγών φαίνεται στο Σχήμα 7.3. Με κόκκινο χρώμα αναπαρίστανται οι γραμμές μεταφοράς 345 kV ενώ με μαύρο χρώμα παρουσιάζονται οι γραμμές μεταφοράς από 138 kV και κάτω.

Το δίκτυο των 500 ζυγών αποτελείται από 584 γραμμές μεταφοράς, 90 γεννήτριες και 200 φορτία. Καθώς το δίκτυο αποτελείται από πολλά στοιχεία όλα τα δεδομένα του δικτύου των 500 ζυγών παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.3. Συγκεκριμένα, τα τεχνικά χαρακτηριστικά των γραμμών μεταφοράς παρουσιάζονται στον Πίνακα Α.3.11, τα χαρακτηριστικά των γεννητριών παρουσιάζονται στον Πίνακα Α.3.12, ενώ τα φορτία που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο παρουσιάζονται στους Πίνακες Α.3.13 και Α.3.14.

Όπως και στα άλλα δίκτυα, οι αντιστάσεις και οι αντιδράσεις του δικτύου είναι ανηγμένες στο ανά μονάδα (α.μ.) σύστημα με κοινή βάση τα 100MVA. Επιπλέον, τα όρια της τάσης στους ζυγούς είναι 0.9 α.μ. και 1.1 α.μ. ενώ για όρια των γωνιών ορίζονται οι  $-90$  και οι  $+90$  μοίρες.



Σχήμα 7.3: Δίκτυο 500 ζυγών [54]

## 7.4 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της γραμμικοποίησης των μη-γραμμικών εξισώσεων τα οποία αποτελούν τα δεδομένα των νέων γραμμικών προβλημάτων. Η γραμμικοποίηση των μη-γραμμικών εξισώσεων υλοποιήθηκε μέσω του RStudio με χρήση της βιβλιοθήκης `dpseg`. Η βιβλιοθήκη `dpseg` επιτρέπει την υλοποίηση γραμμικών παλινδρομήσεων για την εύρεση διακριτών γραμμικών τμημάτων.

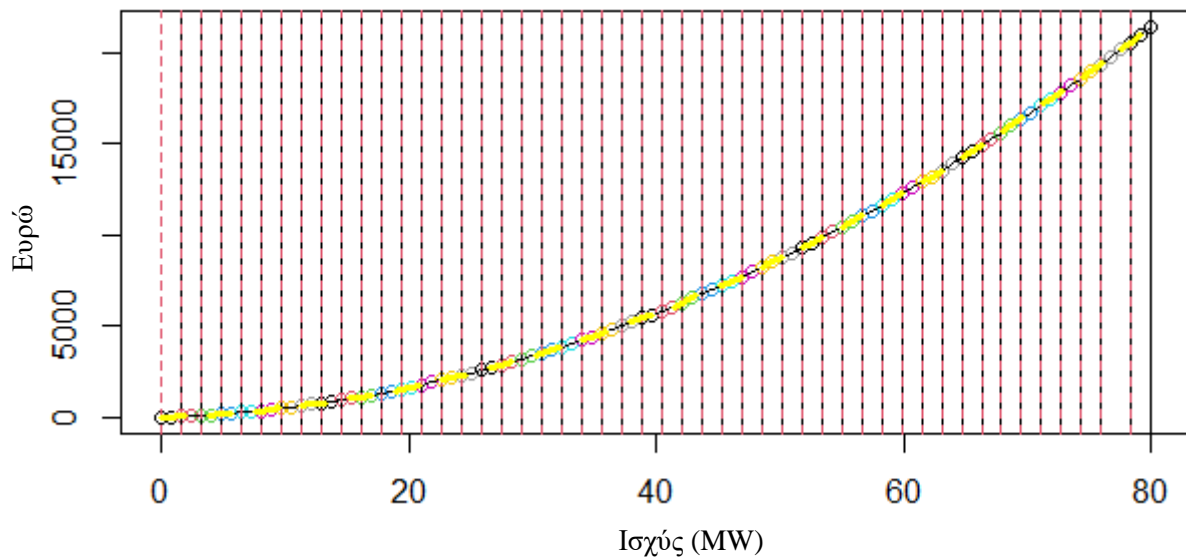
### 7.4.1 Δεδομένα Θερμοηλεκτρικών Μονάδων

#### 7.4.1.1 Για το VPP

Στον Πίνακα 7.9 παρουσιάζονται τα δεδομένα των ευθειών που χρησιμοποιήθηκαν για την προσέγγιση της συνάρτησης κόστους της θερμοηλεκτρικής μονάδας παραγωγής του VPP. Για την επίτευξη της όσο το δυνατόν καλύτερης προσέγγισης χρησιμοποιήθηκαν 49 γραμμικά τμήματα για την προσέγγιση της συναρτήσεως κόστους της θερμικής μονάδας. Στο Σχήμα 7.4 αναπαριστάται γραφικά η γραμμικοποίηση της συνάρτησης κόστους της θερμοηλεκτρικής μονάδας παραγωγής του VPP.

**Πίνακας 7.9:** Δεδομένα γραμμικοποίησης της θερμοηλεκτρικής μονάδας του VPP

i	Intercepts	Slopes	i	Intercepts	Slopes
1	1.3242	24.4682	26	-5270.3012	275.3773
2	-14.8963	34.5046	27	-5692.0313	285.4137
3	-47.3371	44.541	28	-6129.9817	295.45
4	-95.9982	54.5773	29	-6584.1525	305.4864
5	-160.8798	64.6137	30	-7054.5437	315.5228
6	-241.9817	74.65	31	-7541.1552	325.5591
7	-339.304	84.6864	32	-8043.9872	335.5955
8	-452.8467	94.7228	33	-8563.0395	345.6319
9	-582.6098	104.7591	34	-9098.3123	355.6682
10	-728.5933	114.7955	35	-9649.8054	365.7046
11	-890.7971	124.8319	36	-10217.5189	375.741
12	-1069.2214	134.8682	37	-10801.4528	385.7773
13	-1263.866	144.9046	38	-11401.607	395.8137
14	-1474.731	154.941	39	-12017.9817	405.8501
15	-1701.8164	164.9773	40	-12650.5767	415.8864
16	-1945.1222	175.0137	41	-13299.3922	425.9228
17	-2204.6484	185.05	42	-13964.428	435.9591
18	-2480.3949	195.0864	43	-14645.6842	445.9955
19	-2772.3618	205.1228	44	-15343.1607	456.0319
20	-3080.5492	215.1591	45	-16056.8577	466.0682
21	-3404.9569	225.1955	46	-16786.7751	476.1046
22	-3745.585	235.2319	47	-17532.9128	486.141
23	-4102.4335	245.2682	48	-18487.2122	498.6864
24	-4475.5023	255.3046	49	-19469.2214	511.2319
25	-4864.7916	265.341			



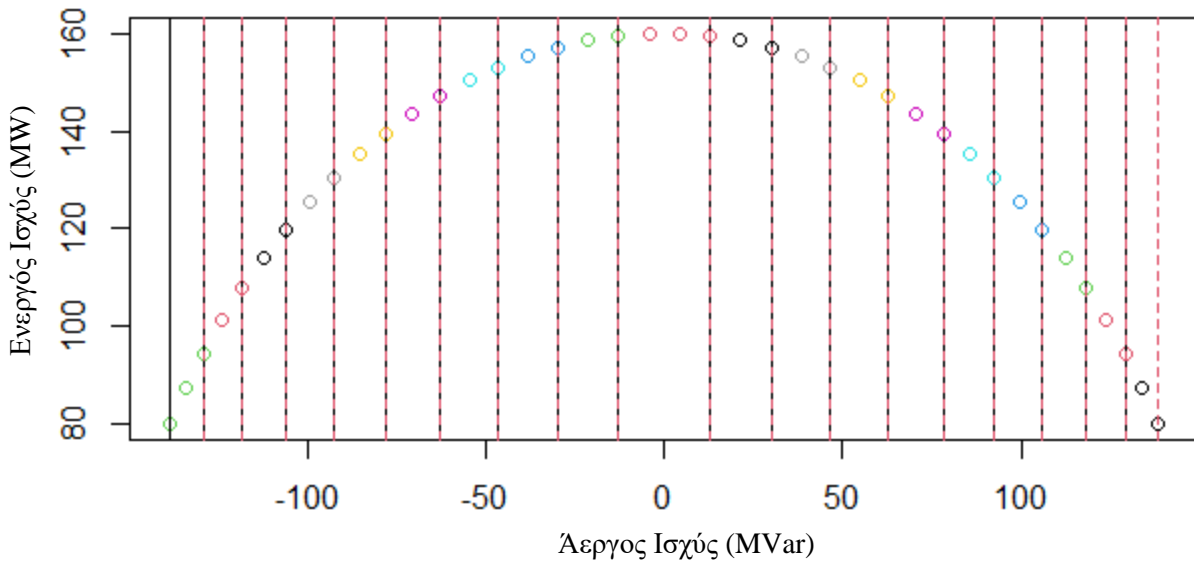
Σχήμα 7.4: Γραμμικοποίηση της συναρτήσεως κόστους μιας θερμοηλεκτρικής μονάδας παραγωγής

#### 7.4.1.2 Για το δίκτυο

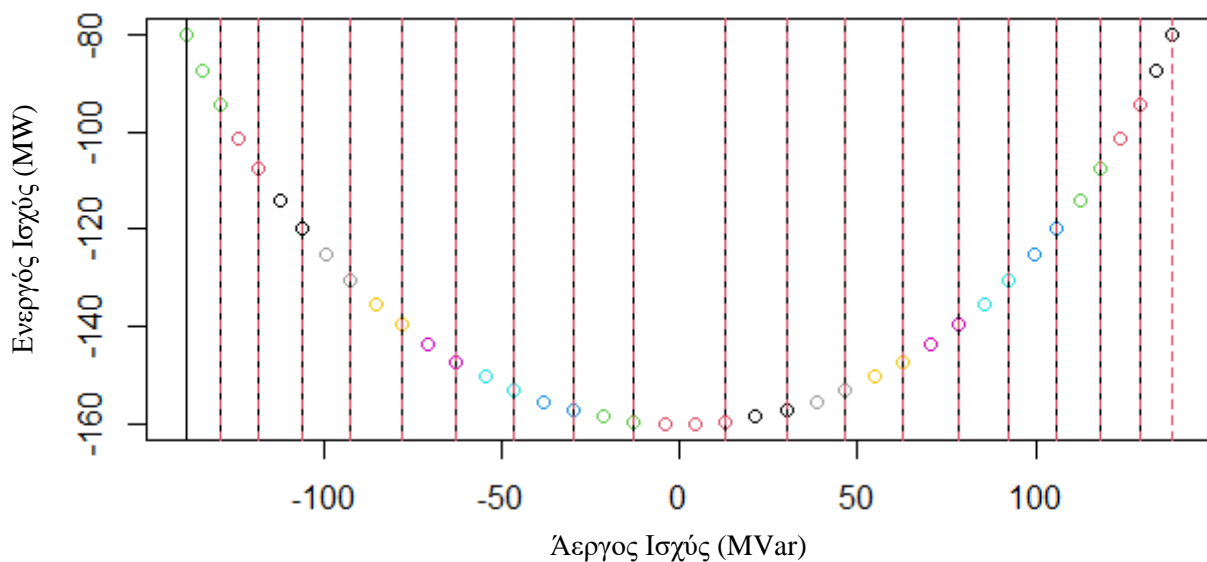
Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία που εφαρμόστηκε στην γραμμικοποίηση της συνάρτησης κόστους της γεννήτριας του VPP, υπολογίζονται οι ευθείες για την γραμμικοποίηση των συναρτήσεων κόστους των θερμοηλεκτρικών μονάδων των δικτύων. Λόγω της μεγάλης έκτασης που καταλαμβάνουν τα δεδομένα των ευθειών που χρησιμοποιήθηκαν για την προσέγγιση των συναρτήσεων κόστους των θερμοηλεκτρικών μονάδων παραγωγής, τα δεδομένα παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.3 στους Πίνακες Α.3.14, Α.3.15 για το δίκτυο των 14 ζυγών και των 30 ζυγών, αντίστοιχα. Τα δεδομένα του δικτύου των 500 ζυγών δεν απεικονίζονται ξεχωριστά, καθώς οι γεννήτριες του δικτύου των 500 ζυγών έχουν ίδια χαρακτηριστικά με του δικτύου των 30 ζυγών.

#### 7.4.2 Δεδομένα Θερμικών Ορίων Γραμμών Μεταφοράς

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι γραμμικές προσεγγίσεις των θερμικών ορίων των γραμμών μεταφοράς των υπό εξέταση δικτύων, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5. Όπως και για την γραμμικοποίηση των συναρτήσεων κόστους των θερμικών μονάδων παραγωγής, η γραμμικοποίηση των θερμικών ορίων των γραμμών μεταφοράς υλοποιήθηκε μέσω του RStudio με χρήση της βιβλιοθήκης `drpseg`. Στα Σχήματα 7.5 και 7.6 αναπαρίστανται γραφικά τα θερμικά όρια της πρώτης γραμμής μεταφοράς του δικτύου των 30 ζυγών με θερμικό όριο 1300MVA.



Σχήμα 7.5: Γραμμικοποίηση των θερμικών ορίων των γραμμών μεταφοράς



Σχήμα 7.6: Γραμμικοποίηση των θερμικών ορίων των γραμμών μεταφοράς

## 7.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ VPP

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της γραμμικοποίησης στην προσομοίωση του βέλτιστου προγραμματισμού του VPP. Αρχικά, μετά την εφαρμογή της γραμμικοποίησης, ο χρόνος επίλυσης της προσομοίωσης μειώθηκε κατά 3ms στον στοχαστικό προγραμματισμό και 0.23 κλάσματα του δευτερολέπτου στον εύρωστο προγραμματισμό. Παρόλο που η μείωση αυτή μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, όταν συγκριθεί με το χρονικό διάστημα του μισού δευτερολέπτου που απαιτείται για την επίλυση του μη-γραμμικοποιημένου μοντέλου τότε η μείωση μπορεί να θεωρηθεί σημαντική. Επιπλέον, η εφαρμογή της γραμμικοποίησης επιφέρει ένα σφάλμα της τάξης του  $9.72485 \cdot 10^{-5}$  στον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης του

στοχαστικού προγραμματισμού και  $9.63571 \cdot 10^{-5}$  στον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης του εύρωστου προγραμματισμού, δηλαδή του προσδοκώμενου κέρδους. Τα παραπάνω αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι η εφαρμογή της γραμμικοποίησης οδήγησε στην μείωση του χρόνου επίλυσης της προσομοίωσης ενώ παράλληλα δεν επηρέασε σημαντικά την ακρίβεια του μοντέλου.

## 7.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των γραμμικοποιήσεων που εφαρμόστηκαν στην προσομοίωση των δικτύων 14 ζυγών, 30 ζυγών και 500 ζυγών. Τα αποτελέσματα των τριών δικτύων παρουσιάζονται στις υπο-ενότητες 7.6.1, 7.6.2 και 7.6.3 αντίστοιχα. Τέλος, στην υπο-ενότητα 7.6.4 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των γραμμικοποιήσεων των τριών δικτύων και εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητά τους.

### 7.6.1 Δίκτυο 14 Ζυγών

Τα αποτελέσματα της γραμμικοποίησης του δικτύου των 14 ζυγών παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.10. Στον Πίνακα 7.10 παρουσιάζεται ο χρόνος επίλυσης, τα αποτελέσματα των αντικειμενικών συναρτήσεων, τα σφάλματα των αντικειμενικών συναρτήσεων μετά την εφαρμογή της γραμμικοποίησης καθώς και τα σφάλματα των ροών ισχύος των τριών προσομοιώσεων που υλοποιήθηκαν, δηλαδή του μη-γραμμικοποιημένου AC-OPF, του Quasi-Linear OPF και του Fully-Linear OPF.

### 7.6.2 Δίκτυο 30 Ζυγών

Τα αποτελέσματα της γραμμικοποίησης του δικτύου των 30 ζυγών παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.11. Στον Πίνακα 7.11 παρουσιάζεται ο χρόνος επίλυσης, τα αποτελέσματα των αντικειμενικών συναρτήσεων, τα σφάλματα των αντικειμενικών συναρτήσεων μετά την εφαρμογή της γραμμικοποίησης καθώς και τα σφάλματα των ροών ισχύος των τριών προσομοιώσεων που υλοποιήθηκαν, δηλαδή του μη-γραμμικοποιημένου AC-OPF, του Quasi-Linear OPF και του Fully-Linear OPF.

**Πίνακας 7.10:** Αποτελέσματα γραμμικοποίησης του δικτύου των 14 ζυγών

Μέθοδος	Χρόνος Επίλυσης (sec)	Αντικειμενική (Objective)	Σφάλμα Αντικειμενικής (Obj Err)	Μέση Απόκλιση (Average Error)	
				Pij Err	Qij Err
AC-OPF	0.460	8126.03			
Quasi-Linear OPF	8.048	8086.56	-0.486%	0.026834808	0.078333655
Fully-Linear OPF	0.612	8137.81	0.145%	0.067166997	0.053400214

**Πίνακας 7.11:** Αποτελέσματα γραμμικοποίησης του δικτύου των 30 ζυγών

Μέθοδος	Χρόνος Επίλυσης (sec)	Αντικειμενική (Objective)	Σφάλμα Αντικειμενικής (Obj Err)	Μέση Απόκλιση (Average Error)	
				Pij Err	Qij Err
AC-OPF	0.860	20662.02		Pij Err	Qij Err
Quasi-Linear OPF	15.436	20650.03	-0.058%	0.027884038	-0.083583635
Fully-Linear OPF	0.612	20585.46	-0.371%	0.068767167	0.055048334

**Πίνακας 7.12:** Αποτελέσματα γραμμικοποίησης του δικτύου των 500 ζυγών

Μέθοδος	Χρόνος Επίλυσης (sec)	Αντικειμενική (Objective)	Σφάλμα Αντικειμενικής (Obj Err)	Μέση Απόκλιση (Average Error)	
				Pij Err	Qij Err
AC-OPF	276.25	461939		Pij Err	Qij Err
Quasi-Linear OPF	730.66	454448.4	-1.622%	-0.006326293	0.054220666
Fully-Linear OPF	523.12	440309.7	-4.682%	-0.092612173	-0.916765415
Warm-Start Fully-Linear OPF	483.11	448545.1	-2.899%	-0.015133825	-0.643180811

### 7.6.3 Δίκτυο 500 Ζυγών

Τα αποτελέσματα της γραμμικοποίησης του δικτύου των 500 ζυγών παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.12. Στον Πίνακα 7.12 παρουσιάζεται ο χρόνος επίλυσης, τα αποτελέσματα των αντικειμενικών συναρτήσεων, τα σφάλματα των αντικειμενικών συναρτήσεων μετά την εφαρμογή της γραμμικοποίησης καθώς και τα σφάλματα των ροών ισχύος των τριών προσομοιώσεων που υλοποιήθηκαν, δηλαδή του μη-γραμμικοποιημένου AC-OPF, του Quasi-Linear OPF, του Fully-Linear OPF και του Warm-Start Fully-Linear OPF.

### 7.6.4 Σύγκριση και Συμπεράσματα

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα των Πινάκων 7.10, 7.11 και 7.12 εξάγονται τα εξής συμπεράσματα: Αρχικά, σε αντίθεση με την γραμμικοποίηση των προσομοιώσεων του VPP, κατά την γραμμικοποίηση των προσομοιώσεων των δικτύων 14, 30 και 500 ζυγών δεν μειώνεται ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος. Αντίθετα, όπως φαίνεται, ο χρόνος επίλυσης αυξάνεται στις περισσότερες περιπτώσεις. Συγκεκριμένα, κατά την εφαρμογή του Quasi-Linear OPF παρατηρείται ο μεγαλύτερος χρόνος επίλυσης των προσομοιώσεων και για τα τρία δίκτυα. Με την εφαρμογή του Fully-Linear OPF ο χρόνος επίλυσης μειώνεται ως προς το Quasi-Linear OPF αλλά ακόμα είναι μεγαλύτερος από τον χρόνο επίλυσης του μη-γραμμικοποιημένου μοντέλου AC-OPF. Κατά την εφαρμογή του Warm-Start Fully-Linear OPF στο δίκτυο των 500 ζυγών παρατηρείται μια επιπλέον μείωση στον χρόνο επίλυσης του προβλήματος. Αυτά τα αποτελέσματα μπορούν να αποδοθούν στην χρήση μη πραγματικών δεδομένων καθώς και στην εισαγωγή πολλών επιπλέον μεταβλητών στο γραμμικοποιημένο μοντέλο

της προσομοίωσης. Η χρήση μη πραγματικών δεδομένων είναι δυνατόν να οδηγήσει σε οριακές συνθήκες κατά την επίλυση του προβλήματος με αποτέλεσμα να συντάσσεται ένα πιο στρεσαρισμένο πρόβλημα που επιλύεται με μεγαλύτερη δυσκολία από τους επιλυτές (solvers). Επιπρόσθετα, η εισαγωγή πολλών επιπλέον μεταβλητών, κατά την εφαρμογή της γραμμικοποίησης, μπορεί να επιβαρύνει την λειτουργία των επιλυτών και να οδηγήσει στην αύξηση του χρόνου επίλυσης του προβλήματος. Τέλος, η επιλογή του ίδιου του επιλυτή μπορεί να συνέβαλε στον μεγαλύτερο χρόνο επίλυσης των προβλημάτων.

Από τους Πίνακες 7.10, 7.11 και 7.12 εξάγονται συμπεράσματα και για την ακρίβεια των προσεγγίσεων. Από τις μεθόδους γραμμικοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν στην διπλωματική, τα μικρότερα σφάλματα εντοπίζονται στην μέθοδο γραμμικοποίησης Quasi-Linear OPF και για τρία δίκτυα. Με την εφαρμογή της μεθόδου Fully-Linear OPF παρατηρείται μια αύξηση των σφαλμάτων της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή του κόστους εκκαθάρισης του δικτύου καθώς και των σφαλμάτων του υπολογισμού των ροών ισχύος. Με την εφαρμογή θερμής εκκίνησης, δηλαδή της μεθόδου Warm-Start Fully-Linear OPF στο δίκτυο των 500 ζυγών παρατηρείται μια μείωση των σφαλμάτων.

Τα παραπάνω αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η εφαρμογή γραμμικών προσεγγίσεων για την επίλυση των δικτύων 14, 30 και 500 ζυγών προσεφέρει ακριβή αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν είναι τα ακόλουθα:

Αρχικά, η μέθοδος γραμμικοποίησης Quasi-Linear OPF παρόλο που προσφέρει ακριβείς προσεγγίσεις, αυξάνει πολύ τον χρόνο επίλυσης των προβλημάτων. Η μέθοδος γραμμικοποίησης Fully-Linear OPF μειώνει τον χρόνο επίλυσης του προβλήματος, αυξάνοντας όμως τα σφάλματα των προσεγγίσεων. Με βάση τα αποτελέσματα, η μέθοδος Fully-Linear OPF επιλέγεται για την γραμμικοποίηση των δικτύων των 14 και των 30 ζυγών, ενώ για το δίκτυο των 500 ζυγών δεν προτιμάται καθώς το σφάλμα της προσέγγισης της αντικειμενικής συνάρτησης ξεπερνά το 4%. Για το δίκτυο των 500 ζυγών επιλέγεται η μέθοδος γραμμικοποίησης Warm-Start Fully-Linear OPF καθώς μειώνει περαιτέρω τον χρόνο επίλυσης του προβλήματος ενώ παράλληλα προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια στις προσεγγίσεις της αντικειμενικής συνάρτησης καθώς και των ροών ισχύος.

## 7.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ

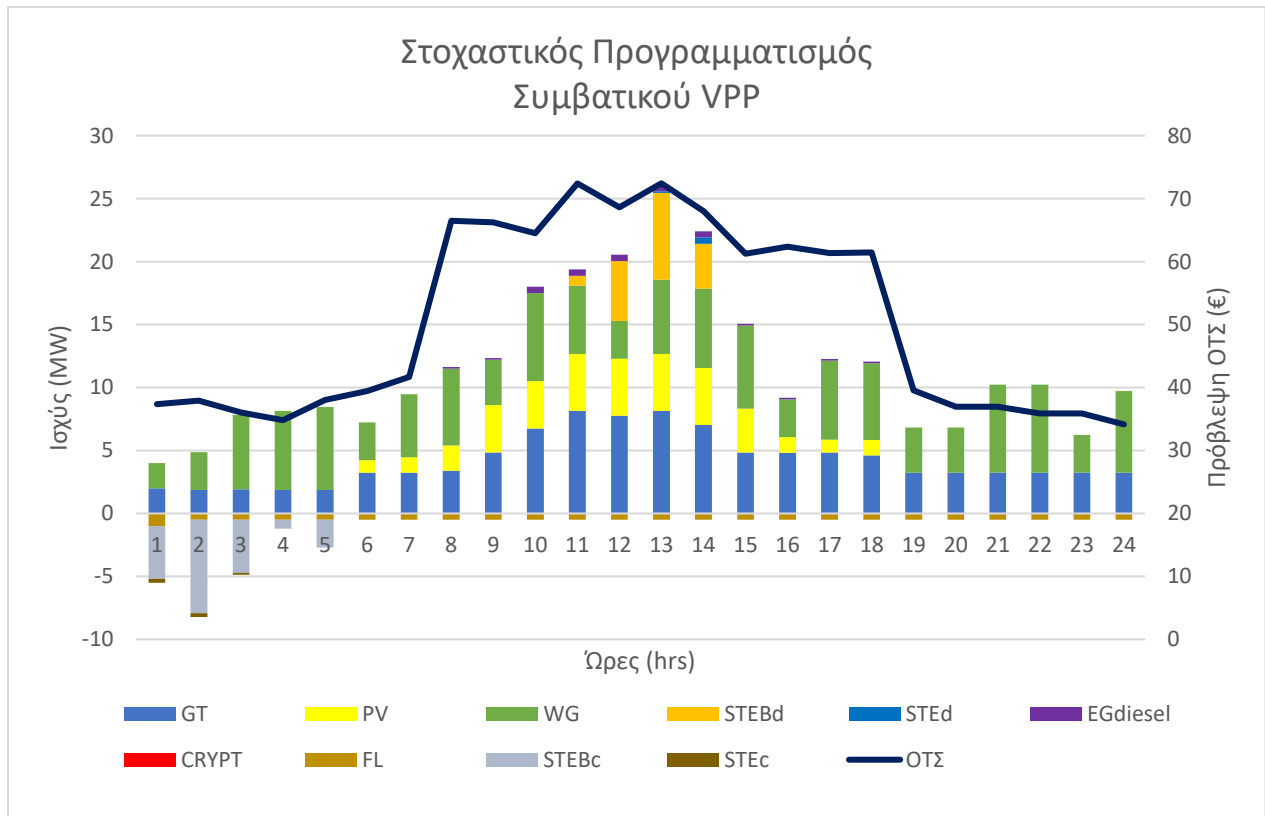
Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του στοχαστικού προγραμματισμού της λειτουργίας ενός συμβατικού VPP και VPPs που διαθέτουν εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies. Τα αποτελέσματα του στοχαστικού προγραμματισμού του συμβατικού VPP παρουσιάζονται στην υποενότητα 7.7.1 ενώ τα αποτελέσματα των VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης παρουσιάζονται στην υποενότητα 7.7.2. Τέλος, στην υποενότητα 7.7.3 αναφέρονται και σχολιάζονται οι κυριότερες διαφορές μεταξύ των δύο VPP.

### 7.7.1 Συμβατικά VPP χωρίς Εγκαταστάσεις Εξόρυξης Κρυπτονομισμάτων

Στο Σχήμα 7.7 φαίνεται η προγραμματισμένη λειτουργία του συμβατικού VPP μετά την επίλυση του προβλήματος στοχαστικού προγραμματισμού κατά το σενάριο «καλής πρόβλεψης των τιμών της αγοράς της επόμενης ημέρας (ΟΤΣ)». Στο σχήμα παρουσιάζεται η παραγωγή (με θετικό πρόσημο) και η κατανάλωση (με αρνητικό πρόσημο) όλων των στοιχείων του VPP καθώς και η πρόβλεψη της ΟΤΣ. Όπως φαίνεται, η λειτουργία του VPP επηρεάζεται σημαντικά από την



προβλεπόμενη ΟΤΣ. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι η φόρτιση των μηχανισμών αποθήκευσης, δηλαδή των μπαταριών και του αντλιοστάσιου γίνεται τις πρωινές ώρες της ημέρας κατά τις οποίες η πρόβλεψη της ΟΤΣ βρίσκεται στο χαμηλότερο επίπεδο. Αντίθετα, τις μεσημεριανές ώρες, δηλαδή μεταξύ τις 10:00 και 14:00, κατά τις οποίες η πρόβλεψη της ΟΤΣ είναι στο υψηλότερο επίπεδο προγραμματίζεται η εκφόρτιση των μπαταριών και η προσφορά ενέργειας από το αντλιοστάσιο. Επιπλέον, το ίδιο χρονικό διάστημα παρατηρείται η μεγαλύτερη παραγωγή των θερμοηλεκτρικών μονάδων παραγωγής του VPP.



**Σχήμα 7.7:** Στοχαστικός προγραμματισμός συμβατικού VPP (ο αριστερός άξονας αντιστοιχεί στο ραβδόγραμμα ενώ ο δεξιός άξονας αντιστοιχεί στην προβλεπόμενη ΟΤΣ)

**Πίνακας 7.13:** Αποτελέσματα στοχαστικού προγραμματισμού ενός συμβατικού VPP

Εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrency	Σενάριο				
	Average Price Forecast (€)	Optimistic Price Forecast (€)	Pessimistic Price Forecast (€)	Actual > Forecasted (€)	Actual < Forecasted (€)
Προβλεπόμενο Κέρδος κατά την επίλυση του προβλήματος στοχαστικού προγραμματισμού	9184.669	10943.646	6665.145	8894.92	8894.92

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλύονται τα εξής διαφορετικά σενάρια:

- Καλή πρόβλεψη των τιμών της αγοράς της επόμενης ημέρας (Average Price Forecast)
- Κακή πρόβλεψη των τιμών της αγοράς της επόμενης ημέρας με τις προβλεπόμενες τιμές να είναι μικρότερες από ότι είναι στην πράξη (Pessimistic Price Forecast)
- Πολύ καλή πρόβλεψη των τιμών της αγοράς της επόμενης ημέρας με τις προβλεπόμενες τιμές να είναι σχεδόν ίσες με την πραγματική τιμή (Optimistic Price Forecast)
- Κακή πρόβλεψη της στοχαστικής παραγωγής του VPP με την πρόβλεψη να είναι υψηλότερη από την πραγματική παραγωγή (Actual < Forecasted)
- Κακή πρόβλεψη της στοχαστικής παραγωγής του VPP με την πρόβλεψη να είναι χαμηλότερη από την πραγματική παραγωγή (Actual > Forecasted)

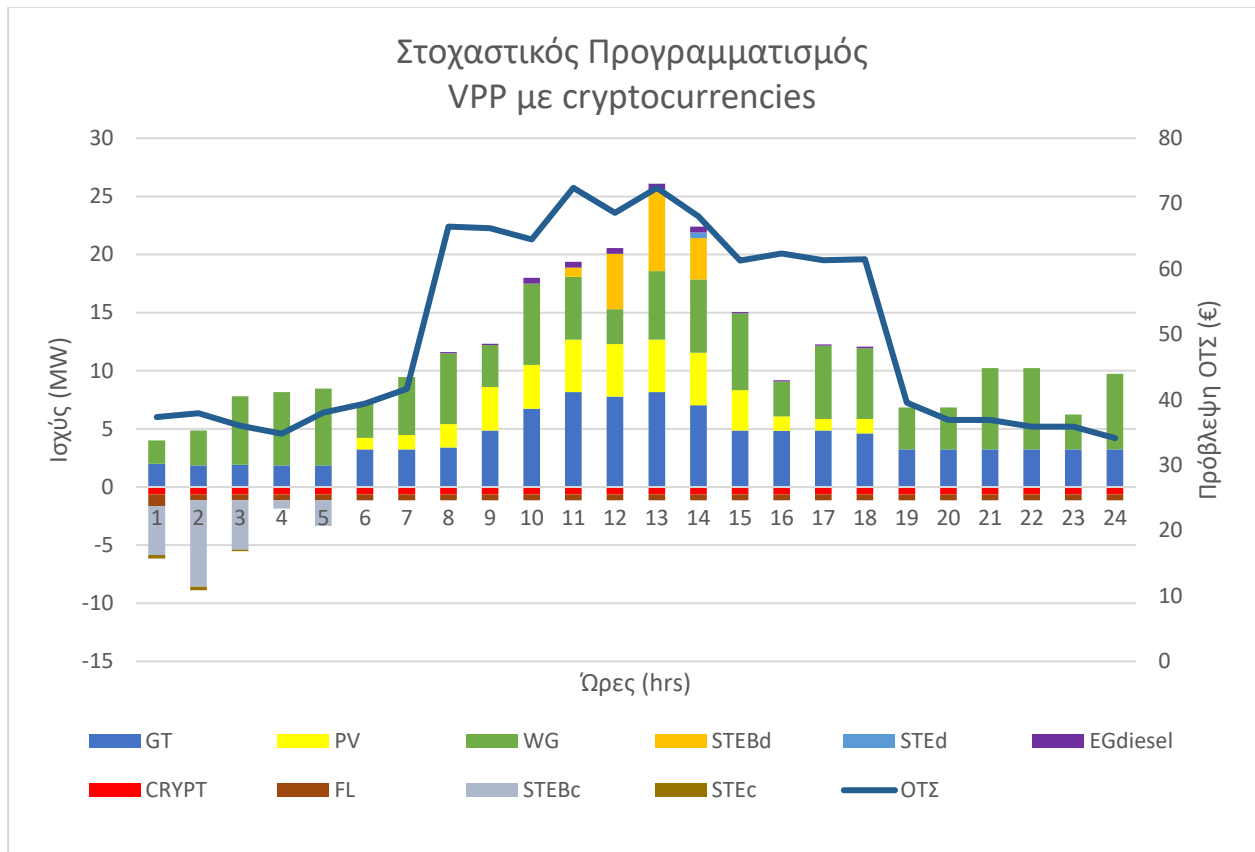
Στον Πίνακα 7.13 παρουσιάζονται τα προβλεπόμενα κέρδη του στοχαστικού προγραμματισμού για τα συμβατικά VPPs στα διαφορετικά σενάρια που εξετάστηκαν στην διπλωματική εργασία.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα παραπάνω αποτελέσματα αναφέρονται στο προβλεπόμενο κέρδος του συμβατικού VPP και όχι στο πραγματικό του κέρδος. Για τον παραπάνω λόγο, δεν μπορούν να εξαχθούν ακόμη συμπεράσματα σχετικά με την κερδοφορία του συμβατικού VPP. Τα συμπεράσματα αυτά θα εξαχθούν μετά την σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών με τα πραγματικά κέρδη του συμβατικού VPP κατά την εκκαθάριση της αγοράς εξισορρόπησης.

### 7.7.2 VPP με Εγκαταστάσεις Εξόρυξης Κρυπτονομισμάτων

Στο Σχήμα 7.8 παρουσιάζεται η προγραμματισμένη λειτουργία του VPP με εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies μετά την επίλυση του προβλήματος στοχαστικού προγραμματισμού κατά το σενάριο «καλής πρόβλεψης των τιμών της αγοράς της επόμενης ημέρας (ΟΤΣ)». Από το σχήμα φαίνεται ότι η λειτουργία του VPP με εγκαταστάσεις εξόρυξης δεν διαφέρει σημαντικά από τον προγραμματισμό του συμβατικού VPP. Η μοναδική διαφορά μεταξύ των δύο έγκειται στην λειτουργία των εγκαταστάσεων εξόρυξης οι οποίες βρίσκονται σε λειτουργία σε όλη την διάρκεια της ημερολογιακής ημέρας. Εδώ είναι ιδιαίτερα σημαντικό να αναφερθεί ότι αυτός ο προγραμματισμός παρατηρείται σε όλα τα VPPs που εξετάζονται για όλες τις εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies. Με βάση τα παραπάνω προκύπτει ότι τα κέρδη των εγκαταστάσεων εξόρυξης είναι μεγαλύτερα από το κόστος λειτουργίας τους ανεξαρτήτως της προβλεπόμενης ΟΤΣ.

Στον Πίνακα 7.14 παρουσιάζονται τα προβλεπόμενα κέρδη του στοχαστικού προγραμματισμού για VPP που διαθέτουν εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies στα διαφορετικά σενάρια που εξετάστηκαν στην διπλωματική εργασία.



**Σχήμα 7.8:** Στοχαστικός προγραμματισμός VPP με εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies (ο αριστερός άξονας αντιστοιχεί στο ραβδόγραμμα ενώ ο δεξιός άξονας αντιστοιχεί στην προβλεπόμενη ΟΤΣ)

**Πίνακας 7.14:** Αποτελέσματα στοχαστικού προγραμματισμού των VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης

Εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrency	Σενάριο				
	Average Price Forecast (€)	Optimistic Price Forecast (€)	Pessimistic Price Forecast (€)	Actual > Forecasted (€)	Actual < Forecasted (€)
BTC	11983.123	12979.152	8981.45	11055.225	11055.225
ETH*	33605.695	35247.673	31249.971	33605.695	33605.695
ETH	16426.423	18068.4	14070.699	15426.423	16426.423
DOGE	10444.833	12086.81	8089.108	10444.833	10444.833

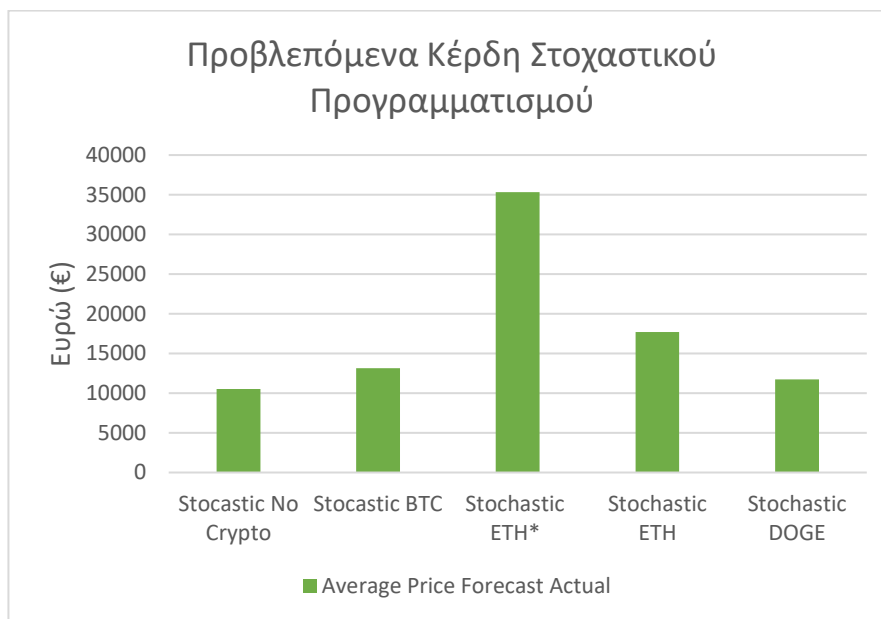
Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.14 φαίνεται ότι τα προβλεπόμενα κέρδη των VPPs διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους ανάλογα με το cryptocurrency που εξορύσσεται. Επομένως, παρόλο που η κατανάλωση των εγκαταστάσεων είναι ίδια τα κέρδη της εγκατάστασης εξαρτώνται σημαντικά από τα τεχνικά χαρακτηριστικά των εγκαταστάσεων καθώς και το cryptocurrency που εξορύσσετε.

### 7.7.3 Συμπεράσματα

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα είναι φανερό ότι τα VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης απολαμβάνουν πολύ μεγαλύτερα κέρδη από ότι τα συμβατικά VPPs. Στο Σχήμα 7.9 παρουσιάζονται γραφικά τα προβλεπόμενα κέρδη του συμβατικού VPP καθώς και των VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης.

Με βάση τα αποτελέσματα τα κυριότερα συμπεράσματα που εξάγονται είναι τα εξής:

- Ο προγραμματισμός των συμβατικών VPPs δεν διαφέρει από τον προγραμματισμό των VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης
- Οι εγκαταστάσεις εξόρυξης αυξάνουν σημαντικά τα κέρδη των VPPs
- Ο προγραμματισμός των εγκαταστάσεων εξόρυξης ανεξάρτητα του cryptocurrency που εξορύσσετε δεν επηρεάζεται από την προβλεπόμενη ΟΤΣ
- Τα κέρδη επηρεάζονται σημαντικά από το cryptocurrency που εξορύσσεται καθώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των εγκαταστάσεων εξόρυξης



**Σχήμα 7.9:** Προβλεπόμενα κέρδη του στοχαστικού προγραμματισμού για κάθε εγκατάσταση VPP που μελετάται

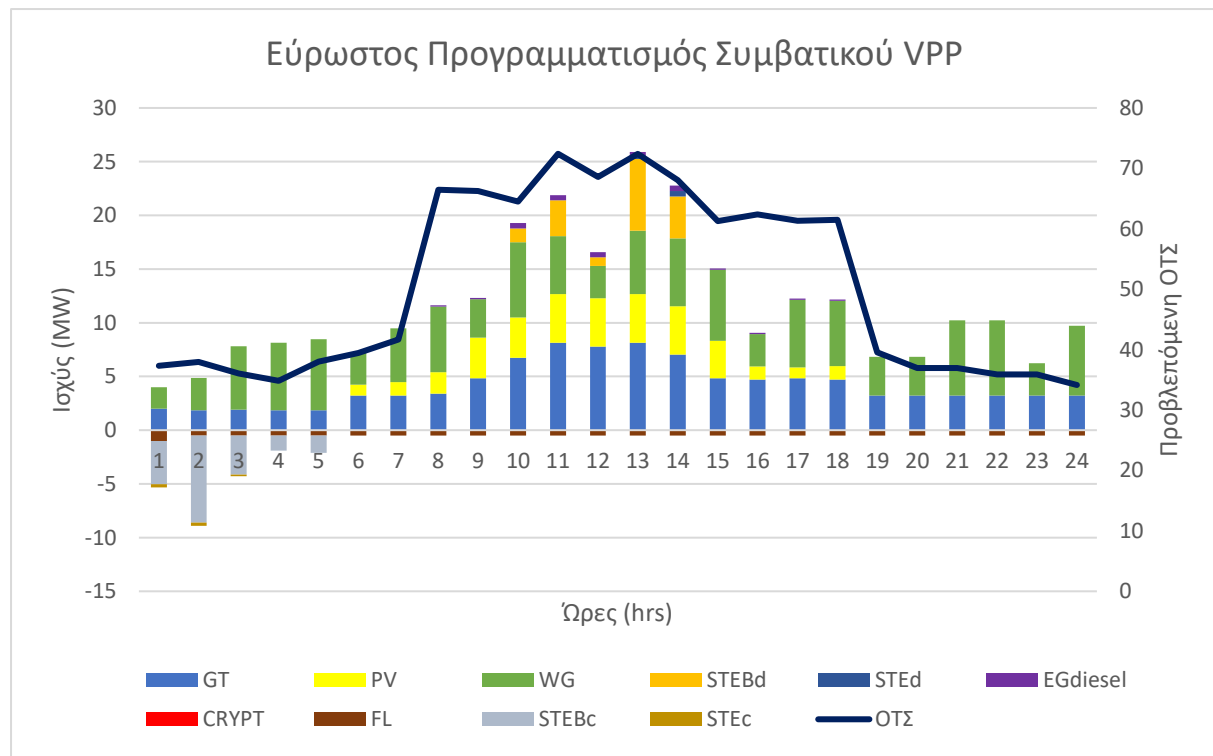
## 7.8 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΥΡΩΣΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του εύρωστου προγραμματισμού της λειτουργίας ενός συμβατικού VPP και VPPs που διαθέτουν εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies. Τα αποτελέσματα του εύρωστου προγραμματισμού του συμβατικού VPP παρουσιάζονται στην υποενότητα 7.8.1 ενώ τα αποτελέσματα για τα VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης παρουσιάζονται στην υποενότητα 7.8.2. Τέλος, στην υποενότητα 7.8.3 αναφέρονται και σχολιάζονται οι κυριότερες διαφορές μεταξύ των δύο VPP καθώς και οι διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων του στοχαστικού και εύρωστου προγραμματισμού.

### 7.8.1 Συμβατικά VPP χωρίς Εγκαταστάσεις Εξόρυξης Κρυπτονομισμάτων

Στο Σχήμα 7.10 φαίνεται η προγραμματισμένη λειτουργία του συμβατικού VPP μετά την επίλυση του προβλήματος εύρωστου προγραμματισμού κατά το σενάριο «καλής πρόβλεψης των τιμών της αγοράς της επόμενης ημέρας (ΟΤΣ)». Όπως και στον στοχαστικό προγραμματισμό, κατά τον εύρωστο προγραμματισμό του συμβατικού VPP η προσφορά και η κατανάλωση του εξαρτώνται από την πρόβλεψη της ΟΤΣ. Η φόρτιση των μπαταριών και η αποθήκευση ενέργειας στο αντλιοστάσιο προγραμματίζονται τις πρωινές όπου η ΟΤΣ προβλέπεται να βρίσκεται στο χαμηλότερο επίπεδο. Τις ίδιες ώρες η παραγωγή των θερμοηλεκτρικών μονάδων είναι στο χαμηλότερο επίπεδο της. Σε αντίθεση, τις ώρες που η ΟΤΣ προβλέπεται να βρίσκεται στο υψηλότερο επίπεδο η παραγωγή των γεννητριών αυξάνεται ενώ παράλληλα προγραμματίζεται η εκφόρτιση των μπαταριών και του αντλιοστασίου. Τέλος, τις βραδινές ώρες όπου η προβλεπόμενη ΟΤΣ είναι χαμηλότερη μειώνεται και πάλι η παραγωγή των θερμοηλεκτρικών μονάδων του VPP.

Στον Πίνακα 7.15 παρουσιάζονται τα προβλεπόμενα κέρδη του εύρωστου προγραμματισμού για το συμβατικό VPP στα διαφορετικά σενάρια που εξετάστηκαν στην διπλωματική εργασία.



**Σχήμα 7.10:** Εύρωστος προγραμματισμός συμβατικού VPP (ο αριστερός άξονας αντιστοιχεί στο ραβδόγραμμα ενώ ο δεξιός άξονας αντιστοιχεί στην προβλεπόμενη ΟΤΣ)

**Πίνακας 7.15:** Αποτελέσματα εύρωστου προγραμματισμού ενός συμβατικού VPP

Εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrency	Σενάριο				
	Average Price Forecast (€)	Optimistic Price Forecast (€)	Pessimistic Price Forecast (€)	Actual > Forecasted (€)	Actual < Forecasted (€)
Προβλεπόμενο Κέρδος κατά την επίλυση του προβλήματος στοχαστικού προγραμματισμού	6705.576	7728.066	4782.075	6705.576	6705.576

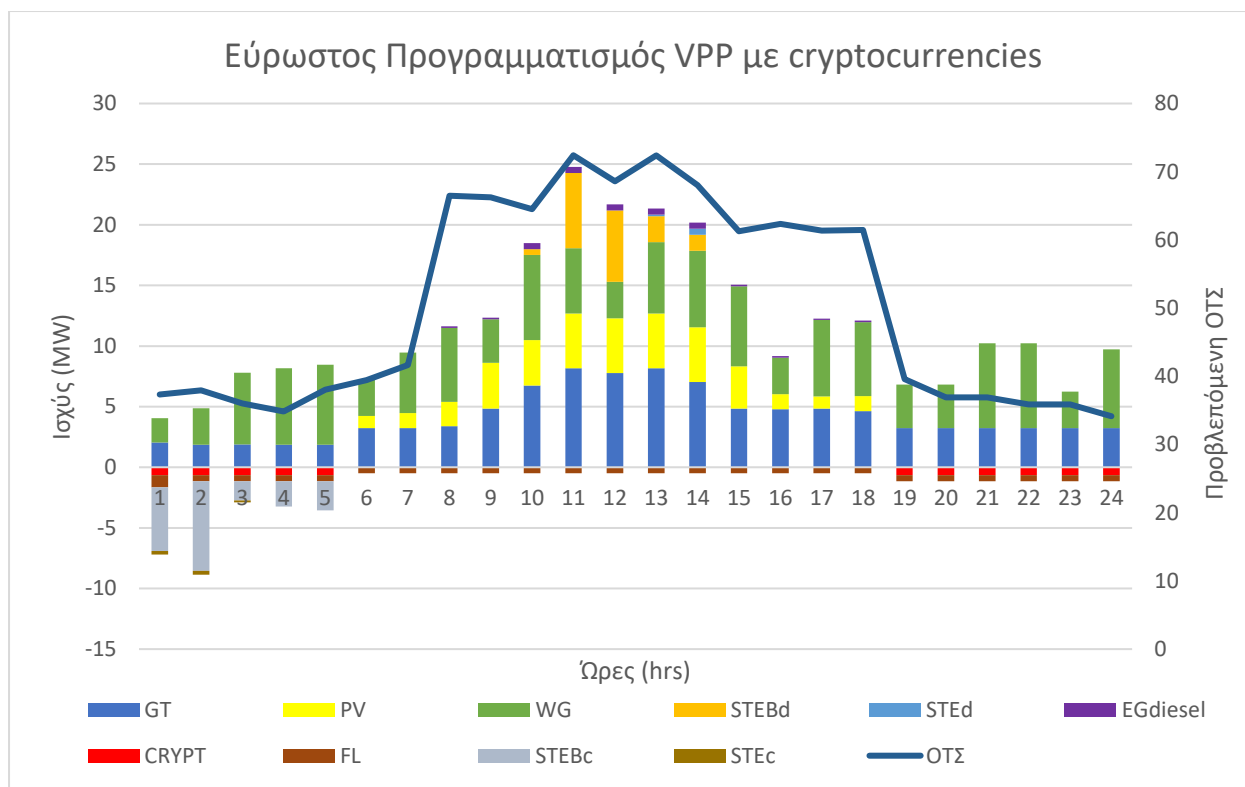
Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα παραπάνω αποτελέσματα αποτελούν τις προβλέψεις του κέρδους του VPP και όχι το πραγματικό του κέρδος. Επομένως, δεν μπορούν να εξαχθούν ακόμη συμπεράσματα σχετικά με την κερδοφορία του VPP κατά την εφαρμογή του εύρωστου προγραμματισμού. Τα συμπεράσματα αυτά θα εξαχθούν μετά την σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών με τα πραγματικά κέρδη των VPPs κατά την εκκαθάριση της αγοράς εξισορρόπησης.

### 7.8.2 VPP με Εγκαταστάσεις Εξόρυξης Κρυπτονομισμάτων

Στο Σχήμα 7.11 παρουσιάζεται η προγραμματισμένη λειτουργία του VPP με εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies μετά την επίλυση του προβλήματος εύρωστου προγραμματισμού κατά το σενάριο «καλής πρόβλεψης των τιμών της αγοράς της επόμενης ημέρας (ΟΤΣ)». Από το σχήμα φαίνεται ότι η λειτουργία των VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης δεν διαφέρει σημαντικά από τον προγραμματισμό του συμβατικού VPP. Η μοναδική διαφορά μεταξύ του συμβατικού VPP και των VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης εντοπίζεται στην κατανάλωση των μονάδων εξόρυξης κατά τις ώρες που δεν παράγουν τα Φ.Β.. Αυτό είναι αναμενόμενο αποτέλεσμα καθώς κατά τον προγραμματισμό των εγκαταστάσεων εξόρυξης στο πρόβλημα του εύρωστου προγραμματισμού εισηγήθηκε ο περιορισμός που ορίζει ότι για να επιτραπεί η χρήση των εγκαταστάσεων εξόρυξης θα πρέπει πρώτα να έχει χρησιμοποιηθεί η περίσσια ενέργεια από τις δύο στοχαστικές μονάδες, δηλαδή τα Φ.Β. και τις Α/Γ. Για τον παραπάνω λόγο η λειτουργία των εγκαταστάσεων εξόρυξης προγραμματίζεται τις πρωινές ώρες μεταξύ τις 00:00 και τις 05:00 καθώς και τις βραδινές ώρες από τις 19:00 έως τις 00:00.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι ο προγραμματισμός της λειτουργίας των εγκαταστάσεων εξόρυξης είναι ίδιος για όλα τα cryptocurrency, δηλαδή των Bitcoin, Ethereum και Dogecoin. Επομένως, όπως και στον στοχαστικό προγραμματισμό έτσι και κατά την εφαρμογή του εύρωστου προγραμματισμού προκύπτει ότι τα κέρδη των εγκαταστάσεων εξόρυξης είναι σημαντικά μεγαλύτερα από το κόστος λειτουργίας τους ανεξαρτήτως της προβλεπόμενης ΟΤΣ.

Στον Πίνακα 7.16 παρουσιάζονται τα προβλεπόμενα κέρδη του εύρωστου προγραμματισμού για τα VPPs που διαθέτουν εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies στα διαφορετικά σενάρια που εξετάστηκαν στην διπλωματική εργασία.



**Σχήμα 7.11:** Εύρωστος προγραμματισμός VPP με εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies (ο αριστερός άξονας αντιστοιχεί στο ραβδόγραμμα ενώ ο δεξιός άξονας αντιστοιχεί στην προβλεπόμενη ΟΤΣ)

**Πίνακας 7.16:** Αποτελέσματα εύρωστου προγραμματισμού των VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης

Εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrency	Σενάριο				
	Average Price Forecast (€)	Optimistic Price Forecast (€)	Pessimistic Price Forecast (€)	Actual > Forecasted (€)	Actual < Forecasted (€)
BTC	8205.765	10573.732	7452.63	8505.875	8505.875
ETH*	31573.152	32842.253	29721.151	31573.152	31573.152
ETH	14393.88	15662.98	12541.879	14393.88	14393.88
DOGE	8412.29	9681.39	6560.288	8412.29	8412.29

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.16 φαίνεται ότι τα προβλεπόμενα κέρδη των VPPs διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους ανάλογα με το cryptocurrency που εξορύσσετε. Επομένως, παρόλο που η κατανάλωση των εγκαταστάσεων είναι ίδια τα κέρδη των VPPs εξαρτώνται σημαντικά από τα τεχνικά χαρακτηριστικά των εγκαταστάσεων εξόρυξης καθώς και το cryptocurrency που εξορύσσετε.

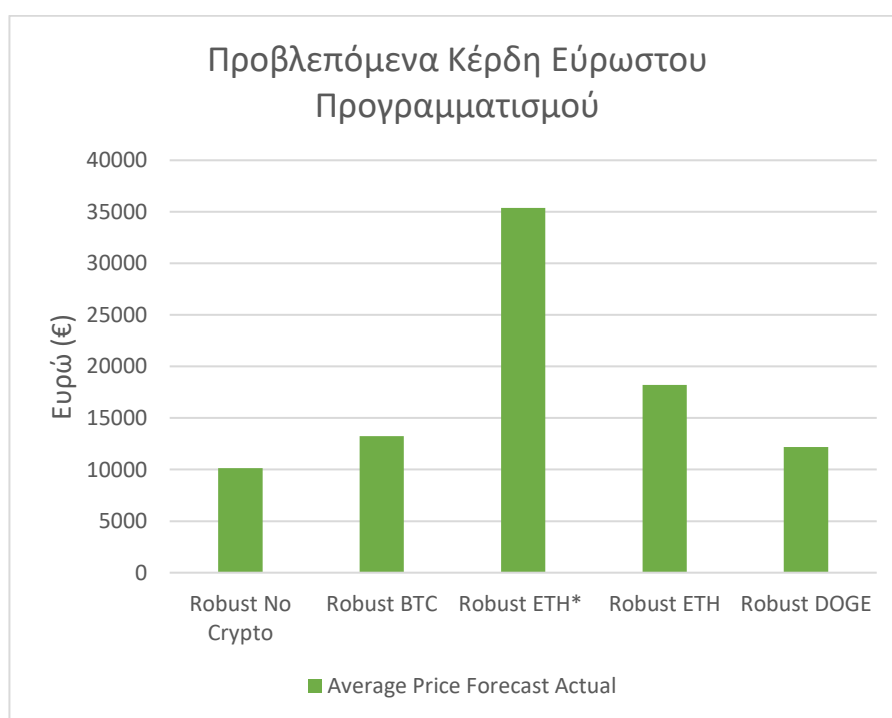
### 7.8.3 Σύγκριση και Συμπεράσματα

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι τα VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης απολαμβάνουν πολύ μεγαλύτερα κέρδη από ότι τα συμβατικά VPPs. Στο Σχήμα 7.12 παρουσιάζονται γραφικά τα προβλεπόμενα κέρδη του συμβατικού VPP καθώς και των VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης.

Με βάση τα αποτελέσματα τα κυριότερα συμπεράσματα είναι τα εξής:

- Ο εύρωστος προγραμματισμός των συμβατικών VPPs δεν διαφέρει από τον εύρωστο προγραμματισμό των VPPs που διαθέτουν εγκαταστάσεις εξόρυξης
- Οι εγκαταστάσεις εξόρυξης αυξάνουν σημαντικά τα κέρδη των VPPs
- Ο προγραμματισμός των εγκαταστάσεων εξόρυξης ανεξαρτήτως του cryptocurrency που εξορύσσετε δεν επηρεάζεται από την προβλεπόμενη ΟΤΣ
- Τα κέρδη επηρεάζονται σημαντικά από το cryptocurrency που εξορύσσετε καθώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των εγκαταστάσεων εξόρυξης

Για λόγους πληρότητας στον Πίνακα 7.17 παρουσιάζεται το μέγιστο προσδοκώμενο κέρδος ανά ώρα που μπορεί να παραχθεί από τις εγκαταστάσεις εξόρυξης που εξετάζονται. Τα κέρδη που παρουσιάζονται αντιστοιχούν στην μέγιστη κατανάλωση των εγκαταστάσεων, δηλαδή τα 650 KW.



**Σχήμα 7.12:** Προβλεπόμενα κέρδη του εύρωστου προγραμματισμού για κάθε εγκατάσταση VPP που μελετάται

**Πίνακας 7.17:** Μέγιστο προσδοκώμενο κέρδος ανά ώρα από τις εγκαταστάσεις εξόρυξης των VPPs

	BTC	ETH*	ETH	Dogecoin	Clearing Price
Προσδοκώμενο μέγιστο κέρδος (€/hrs)	118.044	1045.899	330.096	80.8631	37.3483



## 7.9 Αποτελέσματα Δικτύου 14 Ζυγών

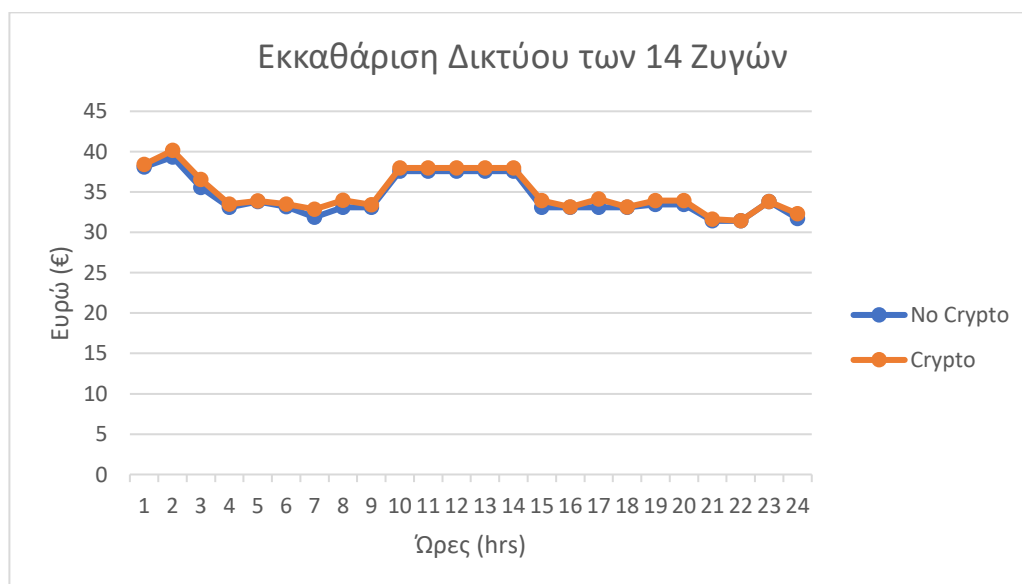
Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της προσομοίωσης εκκαθάρισης της αγοράς της επόμενης ημέρας για το δίκτυο των 14 ζυγών. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην ενότητα αφορούν την εκκαθάριση της προσφοράς και της κατανάλωσης των VPPs που μελετώνται καθώς και την διαμόρφωση της ΟΤΣ.

### 7.9.1 Διαμόρφωση Οριακής Τιμής Συστήματος

Στο Σχήμα 7.13 παρουσιάζεται η ΟΤΣ του δικτύου των 14 ζυγών. Από το σχήμα φαίνεται ότι η ΟΤΣ που διαμορφώθηκε στο δίκτυο των 14 ζυγών δεν αποτελεί μια τυπική ΟΤΣ όπως είχε παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 3. Αρχικά, παρόλο που στο δίκτυο των 14 ζυγών τα φορτία είναι σταθερά καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας η ΟΤΣ μεταβάλλεται. Παρατηρώντας τις διακυμάνσεις της ΟΤΣ φαίνεται ότι η πλειοψηφία των διακυμάνσεων μπορούν να τοποθετηθούν τις ώρες κατά τις οποίες το VPP καταναλώνει μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Συγκεκριμένα, οι μεγαλύτερες διακυμάνσεις παρατηρούνται τις πρωινές ώρες κατά τις οποίες το VPP έχει προγραμματίσει την φόρτιση των μπαταριών του. Επομένως, συμπεραίνεται ότι το δίκτυο των 14 ζυγών δεν αποτελεί μια πλήρως ανταγωνιστική αγορά εφόσον το VPP επηρεάζει σημαντικά την τιμή της αγοράς της επόμενης ημέρας, δηλαδή την ΟΤΣ.

Επιπλέον, παρατηρείται ότι τα VPPs που διαθέτουν εγκαταστάσεις εξόρυξης και ως αποτέλεσμα έχουν αυξημένη κατανάλωση κατά την διάρκεια της ημέρας οδηγούν στην δημιουργία μιας υψηλότερης ΟΤΣ από ότι τα συμβατικά VPPs.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το δίκτυο των 14 ζυγών χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της ιδέας της προσομοίωσης. Επομένως, η προσομοίωση κρίνεται ως προς την ικανότητα της να διαχειριστεί τις προσφορές των VPPs και να τις συνυπολογίσει στον υπολογισμό της ΟΤΣ του δικτύου των 14 ζυγών.



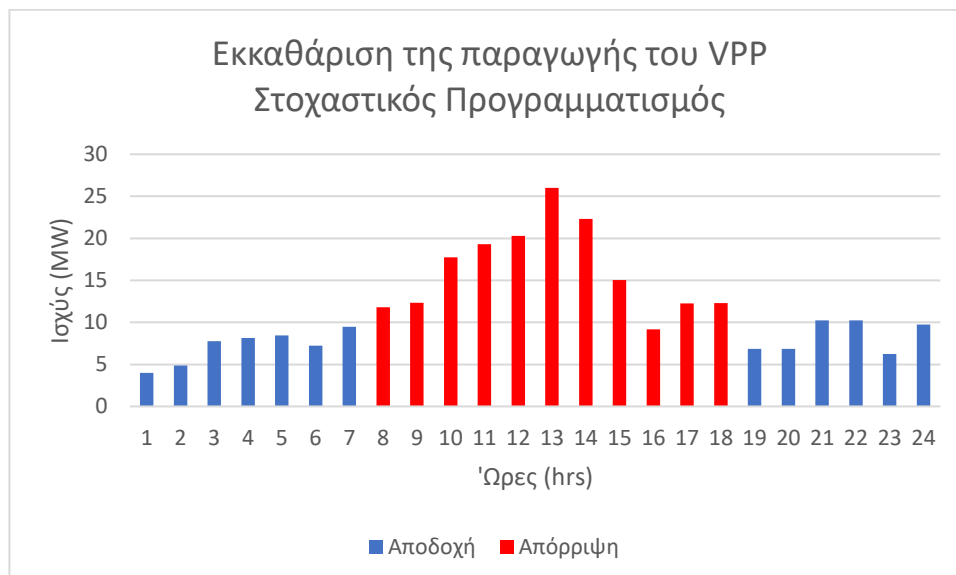
**Σχήμα 7.13:** Αναπαράσταση της ΟΤΣ του δικτύου των 14 ζυγών με VPPs που διαθέτουν εγκαταστάσεις εξόρυξης (Crypto) καθώς και συμβατικά VPPs χωρίς εγκαταστάσεις εξόρυξης (No Crypto)

### 7.9.2 Εκκαθάριση Προσφοράς Συμβατικών VPP χωρίς Εγκαταστάσεις Εξόρυξης Κρυπτονομισμάτων

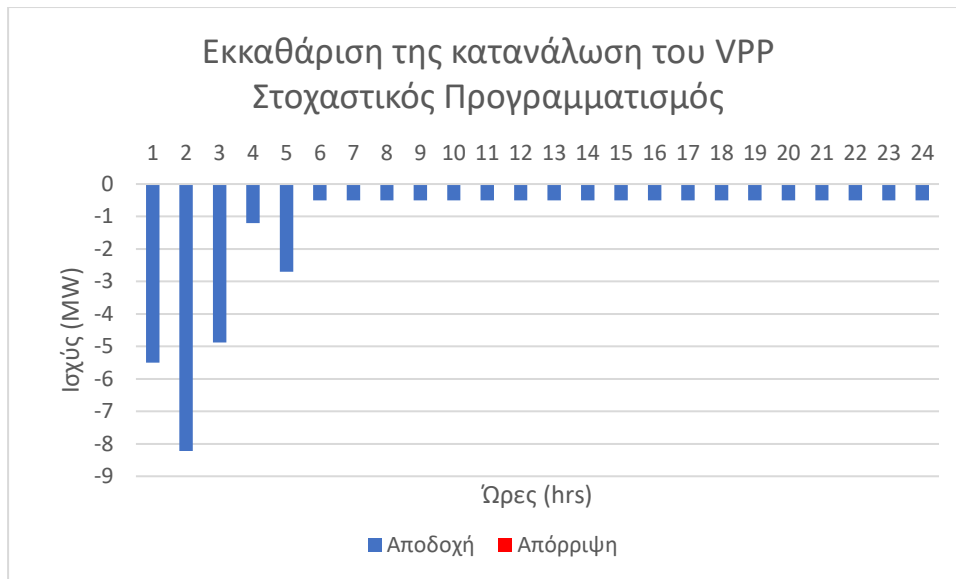
Στα Σχήματα 7.14 και 7.15 παρουσιάζεται η εκκαθάριση της προσφοράς και της κατανάλωσης ενός συμβατικού VPP που προγραμματίζει την λειτουργία του χρησιμοποιώντας στοχαστικό προγραμματισμό στην αγορά της επόμενης ημέρας για το δίκτυο των 14 ζυγών. Στα Σχήματα 7.16 και 7.17 παρουσιάζεται η εκκαθάριση της προσφοράς και της κατανάλωσης ενός VPP που προγραμματίζει την λειτουργία του με εύρωστο προγραμματισμό. Με μπλε χρώμα αναπαριστάται η προσφορά και η κατανάλωση του VPP που εκκαθαρίστηκε από το δίκτυο ενώ με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η προσφορά και η κατανάλωση του VPP που απορρίφθηκε από το δίκτυο. Επομένως, με μπλε χρώμα παρουσιάζονται οι δεσμεύσεις του VPP απέναντι στην αγορά ενέργειας ενώ με κόκκινο χρώμα αναπαρίστανται η παραγωγή και η κατανάλωση που καλείται να κόψει το VPP για να αποφύγει την επιβολή προστίμου στην αγορά εξισορρόπησης.

Όπως φαίνεται από τα Σχήματα 7.14 και 7.16 μεταξύ τις 08:00 και τις 18:00 η προσφορά του VPP απορρίφθηκε. Αυτά τα αποτελέσματα είναι αναμενόμενα καθώς η προβλεπόμενη ΟΤΣ που χρησιμοποιήθηκε και στον στοχαστικό αλλά και στον εύρωστο προγραμματισμό της λειτουργίας του VPP είχε σημαντική απόκλιση από την ΟΤΣ που διαμορφώθηκε κατά την εκκαθάριση της αγοράς της επόμενης ημέρας για το δίκτυο των 14 ζυγών εκείνες τις ώρες. Από τα Σχήματα 7.15 και 7.17 φαίνεται η κατανάλωση του VPP εκκαθαρίζεται εξολοκλήρου και για τον στοχαστικό αλλά και για τον εύρωστο προγραμματισμό καθ' όλη την διάρκεια της ημερολογιακής ημέρας.

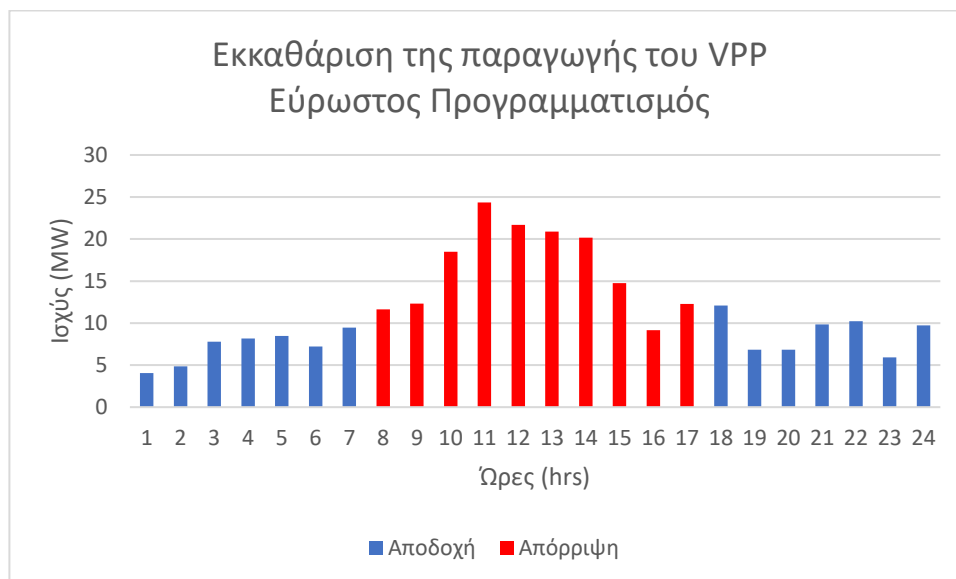
Για λόγους πληρότητας είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η μοντελοποίηση του δικτύου των 14 ζυγών δεν αποσκοπεί στην κατάσταση της βέλτιστης αγοράς ενέργειας της επόμενης ημέρας ή στην μοντελοποίηση της βέλτιστης λειτουργίας του VPP στην αγορά αυτή. Ο σκοπός της παρούσας μοντελοποίησης είναι ο έλεγχός της ιδέας του προτύπου που θα χρησιμοποιηθεί για την μοντελοποίηση του δικτύου των 30 ζυγών και των 500 ζυγών.



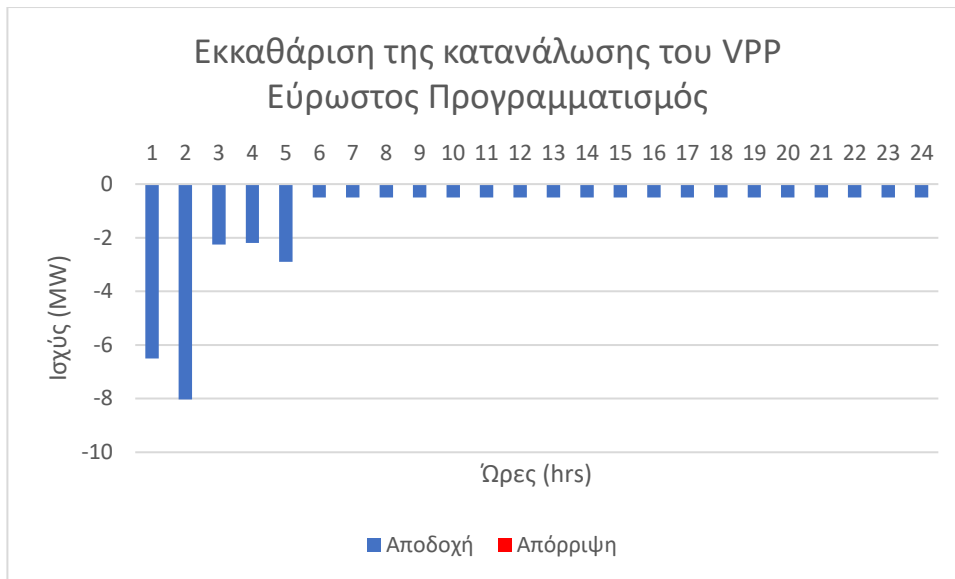
**Σχήμα 7.14:** Εκκαθάριση της παραγωγής του συμβατικού VPP που δεν διαθέτει εγκαταστάσεις εξόρυξης στο δίκτυο των 14 ζυγών – Στοχαστικός Προγραμματισμός



**Σχήμα 7.15:** Εκκαθάριση της κατανάλωσης του συμβατικού VPP που δεν διαθέτει εγκαταστάσεις εξόρυξης στο δίκτυο των 14 ζυγών – Στοχαστικός Προγραμματισμός



**Σχήμα 7.16:** Εκκαθάριση της παραγωγής του συμβατικού VPP που δεν διαθέτει εγκαταστάσεις εξόρυξης στο δίκτυο των 14 ζυγών – Εύρωστος Προγραμματισμός



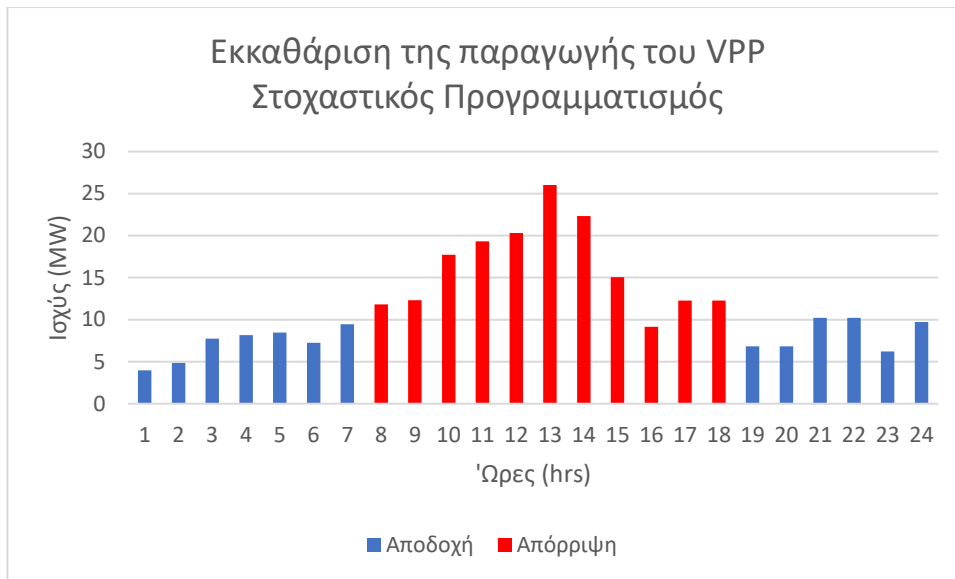
**Σχήμα 7.17:** Εκκαθάριση της κατανάλωσης του συμβατικού VPP που δεν διαθέτει εγκαταστάσεις εξόρυξης στο δίκτυο των 14 ζυγών – Εύρωστος Προγραμματισμός

### 7.9.3 Εκκαθάριση Προσφοράς VPP με Εγκαταστάσεις Εξόρυξης Κρυπτονομισμάτων

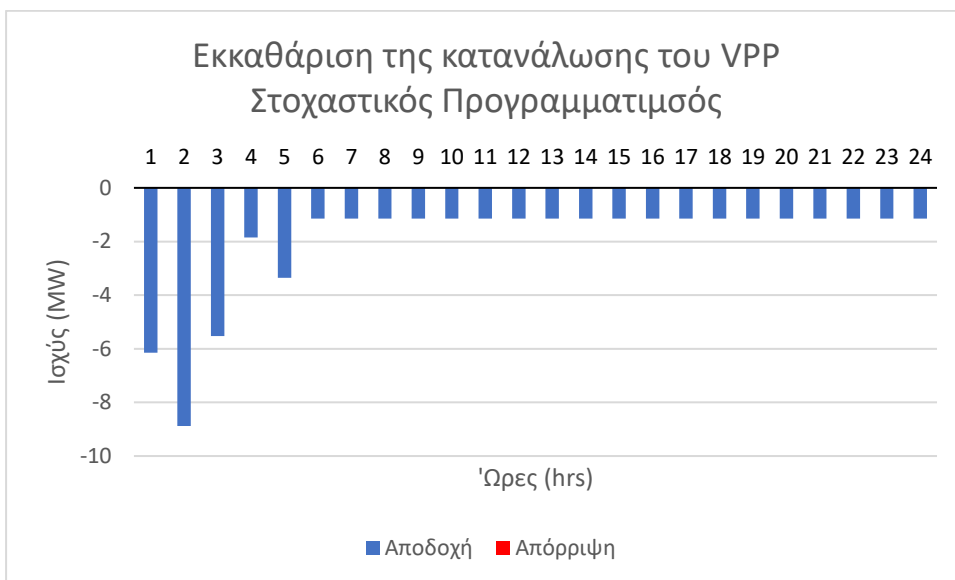
Στα Σχήματα 7.18 και 7.19 παρουσιάζεται η εκκαθάριση της προσφοράς και της κατανάλωσης των VPPs που διαθέτουν εγκαταστάσεις εξόρυξης και χρησιμοποιούν στοχαστικό προγραμματισμό για τον προγραμματισμό της λειτουργίας τους στην αγορά της επόμενης ημέρας για το δίκτυο των 14 ζυγών. Στα Σχήματα 7.20 και 7.21 παρουσιάζεται η εκκαθάριση της προσφοράς και της κατανάλωσης των VPPs που προγραμματίσαν την λειτουργία τους στην αγορά της επόμενης ημέρας για το δίκτυο των 14 ζυγών με χρήση εύρωστου προγραμματισμού. Με μπλε χρώμα αναπαριστάτε η προσφορά και η κατανάλωση του VPP που εκκαθαρίστηκε από το δίκτυο ενώ με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η προσφορά και η κατανάλωση του VPP που απορρίφθηκε από το δίκτυο. Επομένως, με μπλε χρώμα παρουσιάζονται οι δεσμεύσεις του VPP απέναντι στην αγορά ενέργειας ενώ με κόκκινο χρώμα αναπαριστώνται η παραγωγή και η κατανάλωση που καλείται να κόψει το VPP για να αποφύγει την επιβολή προστίμου στην αγορά εξισορρόπησης.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα παραπάνω αποτελέσματα είναι ίδια για όλες τις εγκαταστάσεις εξόρυξης, και επομένως δεν χρειάζεται να γίνει διαχωρισμός των αποτελεσμάτων για τις εγκαταστάσεις εξόρυξης Bitcoin, Ethereum και Dogecoin. Επιπλέον, ανεξάρτητα με την πρόβλεψη που χρησιμοποιούταν στον προγραμματισμό της λειτουργίας του VPP δεν υπήρχαν διαφορές στην εκκαθάριση της αγοράς.

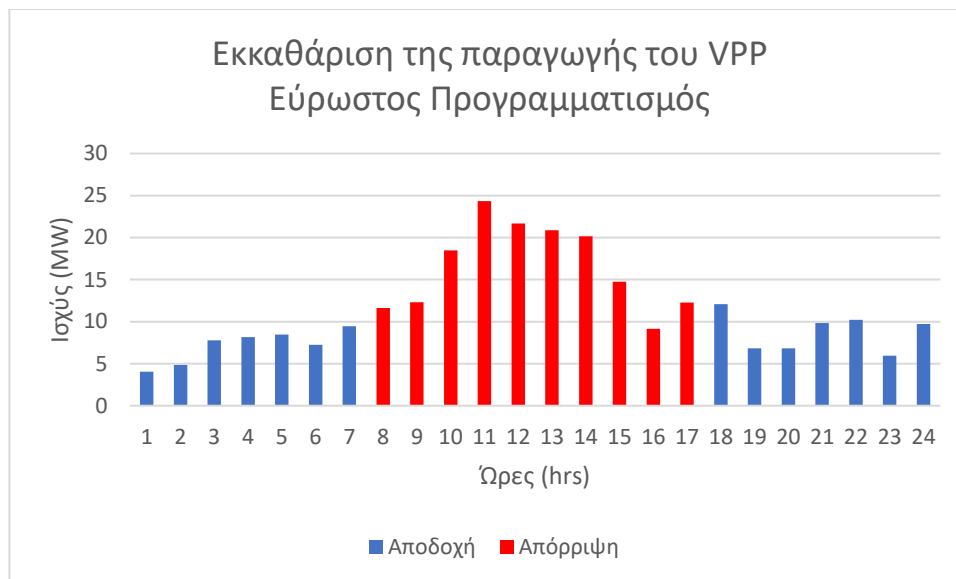
Παρατηρώντας τα σχήματα συμπεραίνεται ότι η μοναδική διαφορά μεταξύ των Σχημάτων 7.14 έως 7.21 είναι η αυξημένη κατανάλωση που εκκαθαρίζεται από την αγορά της επόμενης ημέρας η οποία οφείλεται στις εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies που διαθέτει το VPP.



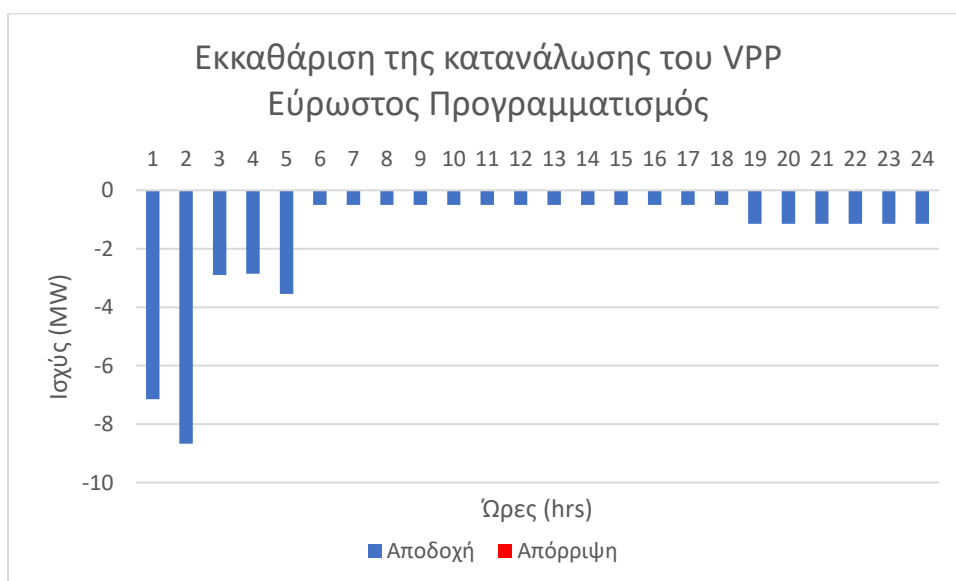
**Σχήμα 7.18:** Εκκαθάριση της παραγωγής του VPP που διαθέτει εγκαταστάσεις εξόρυξης στο δίκτυο των 14 ζυγών – Στοχαστικός Προγραμματισμός



**Σχήμα 7.19:** Εκκαθάριση της κατανάλωσης του VPP που διαθέτει εγκαταστάσεις εξόρυξης στο δίκτυο των 14 ζυγών – Στοχαστικός Προγραμματισμός



**Σχήμα 7.20:** Εκκαθάριση της παραγωγής VPP που δεν διαθέτει εγκαταστάσεις εξόρυξης στο δίκτυο των 14 ζυγών – Εύρωστος Προγραμματισμός



**Σχήμα 7.21:** Εκκαθάριση της κατανάλωσης VPP που δεν διαθέτει εγκαταστάσεις εξόρυξης στο δίκτυο των 14 ζυγών – Εύρωστος Προγραμματισμός

#### 7.9.4 Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης του δικτύου των 14 ζυγών εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

Αρχικά, η αγορά της επόμενης ημέρας για το δίκτυο των 14 ζυγών δεν είναι πλήρως ανταγωνιστική καθώς τα VPPs επηρεάζουν σημαντικά την ΟΤΣ. Αυτό οφείλεται στο μικρό μέγεθος του δικτύου στο οποίο είναι συνδεδεμένα φορτία τα οποία είναι συγκρίσιμα με τα φορτία που διαχειρίζεται το VPP. Επιπλέον, παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο μέρος της προσφερόμενης παραγωγής του VPP ανεξαρτήτως της μεθόδου προγραμματισμού που χρησιμοποιείται απορρίπτεται.

Αυτό οφείλεται στις κακές προβλέψεις της ΟΤΣ που χρησιμοποιήθηκαν και στον στοχαστικό αλλά και στον εύρωστο προγραμματισμό της λειτουργίας των VPPs. Αντίθετα, η προσφερόμενη κατανάλωση των VPPs γίνεται αποδεκτή καθώς η τιμή που διατίθεται να πληρώσει ο διαχειριστής των VPPs για την αγορά ενέργειας είναι υψηλότερη από την ΟΤΣ. Συνοψίζοντας, παρόλο που τα αποτελέσματα δεν αντιστοιχούν σε μια τυπική αγορά ενέργειας είναι αναμενόμενα και επιβεβαιώνουν το πρότυπο του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε.

## 7.10 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΟΥ 30 ΖΥΓΩΝ

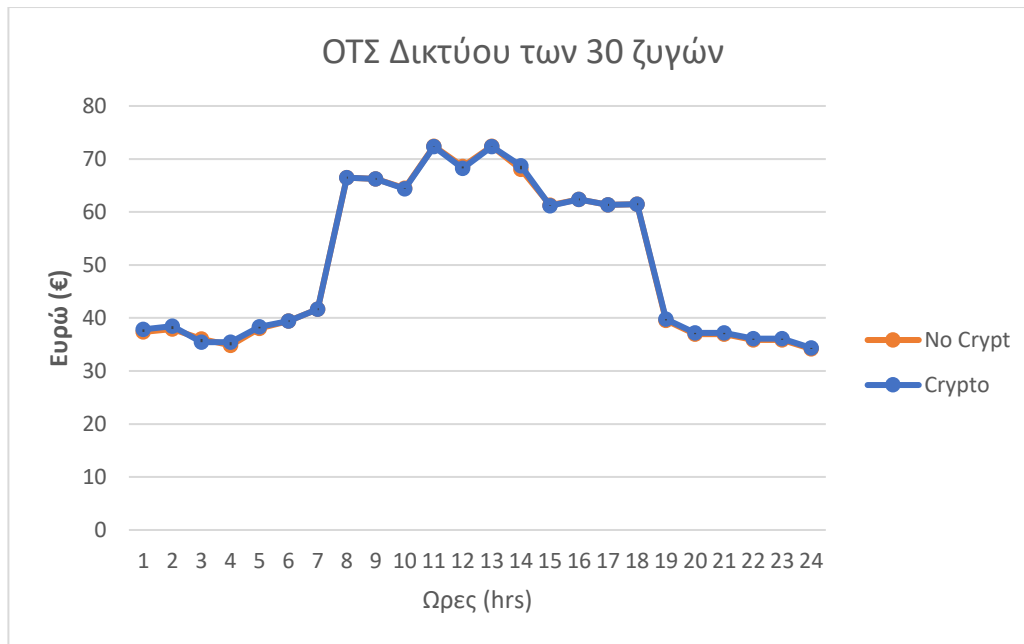
Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της προσομοίωσης εκκαθάρισης της αγοράς της επόμενης ημέρας για το δίκτυο των 30 ζυγών. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην ενότητα αφορούν την εκκαθάριση της προσφοράς και κατανάλωσης των VPPs που μελετώνται καθώς και την διαμόρφωση της ΟΤΣ για το δίκτυο υπό εξέταση.

### 7.10.1 Διαμόρφωση Οριακής Τιμής Συστήματος

Στο Σχήμα 7.22 παρουσιάζεται η ΟΤΣ του δικτύου των 30 ζυγών. Από το σχήμα φαίνεται ότι η ΟΤΣ που διαμορφώθηκε στο δίκτυο των 30 ζυγών πλησιάζει μια τυπική ΟΤΣ όπως είχε παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 3. Σε αντίθεση με την ΟΤΣ του δικτύου 14 ζυγών κατά την εκκαθάριση του δικτύου των 30 ζυγών παρατηρούνται αυξομειώσεις στην ΟΤΣ η οποίες οφείλονται σε εναλλαγές της ζήτησης. Παρατηρώντας το Σχήμα 7.22 εξάγεται επίσης ότι το VPP δεν επηρεάζει σημαντικά την ΟΤΣ. Επομένως, το δίκτυο των 30 ζυγών προσομοιάζει καλύτερα μια ανταγωνιστική αγορά ενέργειας. Παρόλα αυτά, η αγορά δεν μπορεί να θεωρηθεί απολυτός ανταγωνιστική καθώς η εισαγωγή εγκαταστάσεων εξόρυξης επηρεάζει σε μικρό βαθμό την ΟΤΣ. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι η ΟΤΣ του δικτύου είναι υψηλότερη κατά την εκκαθάριση των VPP με εγκαταστάσεις εξόρυξης.

Στον Πίνακα 7.18 παρουσιάζονται οι τυπικές αποκλίσεις των ΟΤΣ για κάθε σενάριο που εξετάστηκε. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι τα σενάρια που επηρεάζουν περισσότερο την ΟΤΣ είναι τα σενάρια που μεταβάλλουν τις προβλέψεις των VPPs για την ΟΤΣ. Αντίθετα, στα σενάρια που μεταβάλλεται η πρόβλεψη της παραγωγής των στοχαστικών μονάδων η ΟΤΣ δεν επηρεάζεται.

Οι τυπικές αποκλίσεις υπολογίστηκαν για κάθε χρονική περίοδο κάθε σεναρίου συγκρίνοντας τις ΟΤΣ που διαμορφώθηκαν για κάθε VPP που εξετάζεται.



**Σχήμα 7.22:** Αναπαράσταση της OTS του δικτύου των 30 ζυγών με VPPs που διαθέτουν εγκαταστάσεις εξόρυξης (Crypto) καθώς και συμβατικά VPPs χωρίς εγκαταστάσεις εξόρυξης (No Crypto)

**Πίνακας 7.18:** Τυπικές αποκλίσεις των OTS για κάθε σενάριο

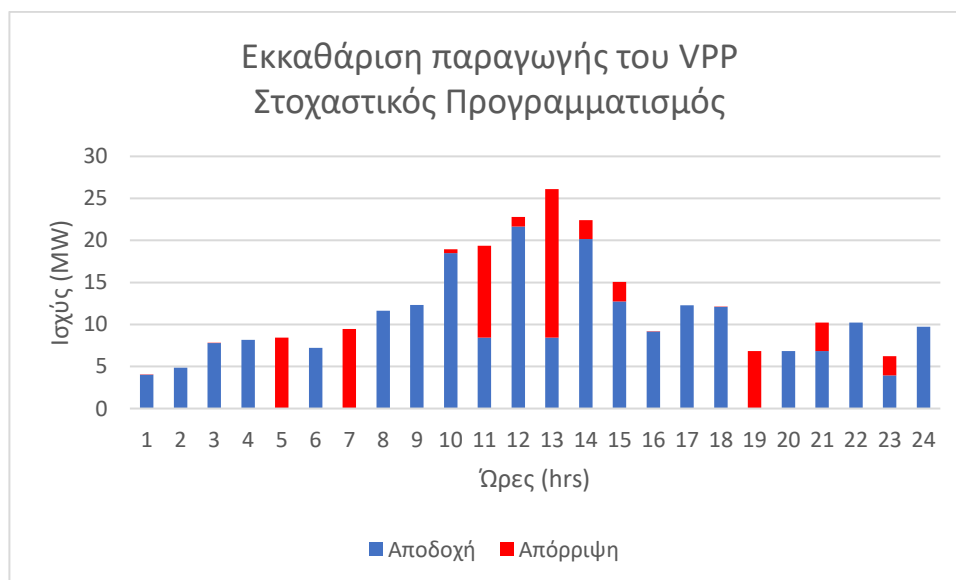
A/A	Average Price Forecast	Optimistic Price Forecast	Pessimistic Price Forecast	Optimistic Stochastic Forecast	Pessimistic Stochastic Forecast
1	0.1624	0.0786	0.0787	0.1624	0.1624
2	0.1613	0.0786	0.0789	0.1613	0.1613
3	0.3036	0.0780	0.0783	0.3036	0.3036
4	0.2030	0.0775	0.0778	0.2030	0.2030
5	0.1100	0.0986	0.0983	0.1100	0.1100
6	0.1055	0.0864	0.0822	0.1055	0.1055
7	0.0920	0.0745	0.0764	0.0920	0.0920
8	0.1006	0.0829	0.0835	0.1006	0.1006
9	0.0965	0.0779	0.0773	0.0965	0.0965
10	0.1449	0.0829	0.0835	0.1449	0.1449
11	0.0921	0.0576	0.0573	0.0921	0.0921
12	0.2160	0.0830	0.0835	0.2160	0.2160
13	0.0918	0.0580	0.0573	0.0918	0.0918
14	0.2357	0.0829	0.0836	0.2357	0.2357
15	0.0915	0.0576	0.0571	0.0915	0.0915
16	0.0957	0.0829	0.0835	0.0957	0.0957
17	0.1001	0.0576	0.0571	0.1001	0.1001
18	0.0990	0.0828	0.0834	0.0990	0.0990
19	0.0989	0.0989	0.0988	0.0989	0.0989
20	0.0956	0.0935	0.0983	0.0956	0.0956
21	0.0956	0.0935	0.0983	0.0956	0.0956
22	0.0782	0.0781	0.0783	0.0782	0.0782
23	0.0782	0.0781	0.0783	0.0782	0.0782
24	0.0773	0.0773	0.0776	0.0773	0.0773



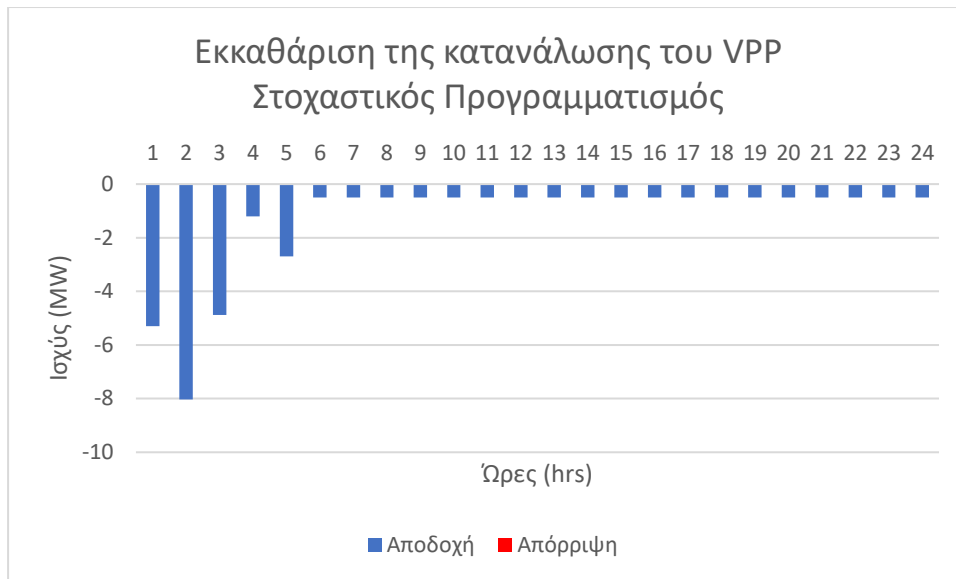
### 7.10.2 Εκκαθάριση Προσφοράς Συμβατικών VPP χωρίς Εγκαταστάσεις Εξόρυξης Κρυπτονομισμάτων

Στα Σχήματα 7.23 και 7.24 παρουσιάζεται η εκκαθάριση της προσφοράς και της κατανάλωσης ενός συμβατικού VPP που προγραμματίζει την λειτουργία του χρησιμοποιώντας στοχαστικό προγραμματισμό στην αγορά της επόμενης ημέρας για το δίκτυο των 30 ζυγών. Στα Σχήματα 7.25 και 7.26 παρουσιάζεται η εκκαθάριση της προσφοράς και της κατανάλωσης ενός VPP που προγραμματίζει την λειτουργία του με εύρωστο προγραμματισμό. Με μπλε χρώμα αναπαριστάται η προσφορά και η κατανάλωση του VPP που εκκαθαρίστηκε από το δίκτυο ενώ με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η προσφορά και κατανάλωση του VPP που απορρίφθηκε από το δίκτυο. Το μπλε χρώμα συμβολίζει τις δεσμεύσεις του VPP απέναντι στην αγορά ενέργειας ενώ το κόκκινο χρώμα υποδεικνύει την παραγωγή και την κατανάλωση που καλείται να κόψει το VPP για να αποφύγει την επιβολή προστίμων στην αγορά εξισορρόπησης.

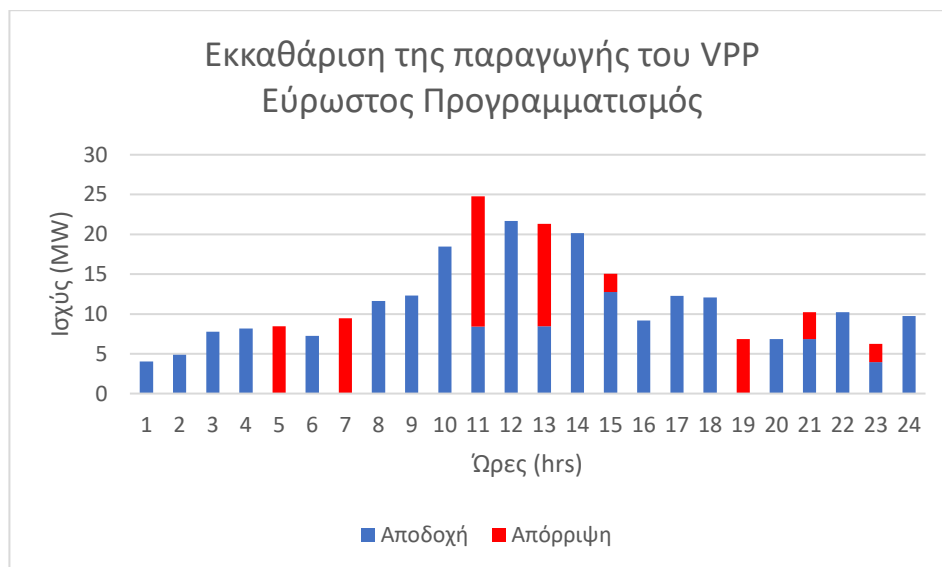
Παρατηρώντας τα αποτελέσματα, είναι φανερό ότι ανεξάρτητα από την μέθοδο προγραμματισμού που χρησιμοποιείται ποσοστό της προσφοράς των VPPs απορρίπτεται. Παρόλα αυτά, η πλειοψηφία της προσφερόμενης ενέργειας των VPPs γίνεται αποδεκτή από το δίκτυο. Επιπλέον, η προσφερόμενη κατανάλωση των VPPs εκκαθαρίζεται εξ' ολοκλήρου κατά τον στοχαστικό προγραμματισμό. Αντίθετα, κατά τον εύρωστο προγραμματισμό παρατηρείται ότι μέρος την προσφερόμενης κατανάλωσης των VPPs απορρίπτεται. Οι παράγοντες που εξηγούν την απόρριψη της προσφοράς και της κατανάλωσης των VPPs είναι οικονομικοί, που οφείλονται σε αστοχίες στην πρόβλεψη της ΟΤΣ, καθώς και τεχνικοί όπως η υπέρβαση κάποιου θερμοκινητή ορίου των γραμμών μεταφοράς.



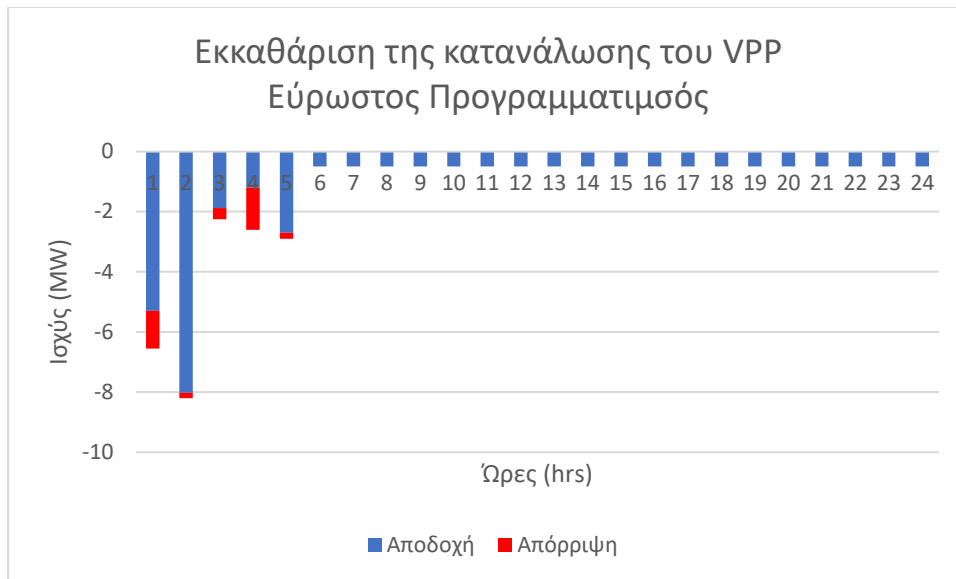
**Σχήμα 7.23:** Εκκαθάριση της προσφοράς συμβατικού VPP που δεν διαθέτει εγκαταστάσεις εξόρυξης στο δίκτυο των 30 ζυγών – Στοχαστικός Προγραμματισμός



**Σχήμα 7.24:** Εκκαθάριση της κατανάλωσης συμβατικού VPP που δεν διαθέτει εγκαταστάσεις εξόρυξης στο δίκτυο των 30 ζυγών – Στοχαστικός Προγραμματισμός



**Σχήμα 7.25:** Εκκαθάριση της παραγωγής του VPP που δεν διαθέτει εγκαταστάσεις εξόρυξης στο δίκτυο των 30 ζυγών – Εύρωστος Προγραμματισμός

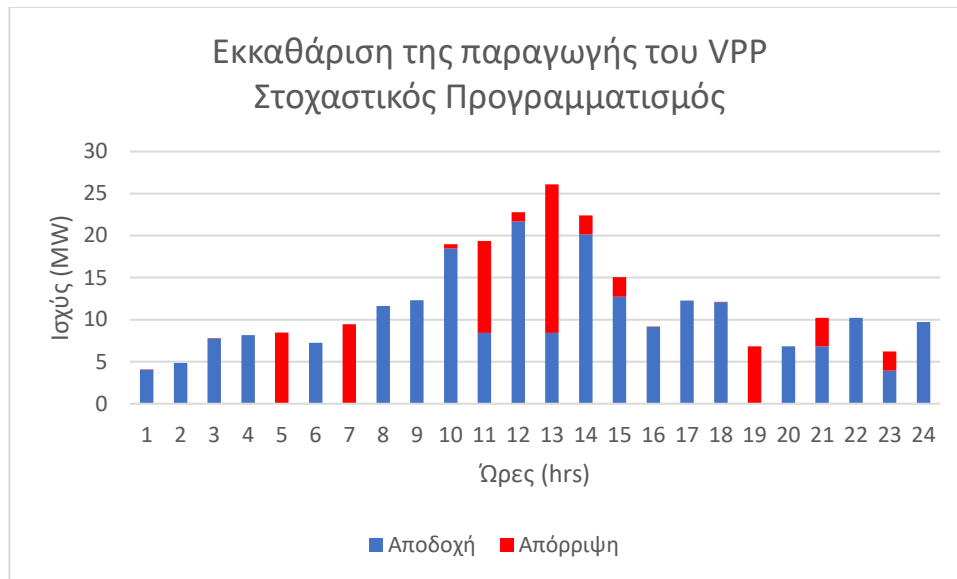


**Σχήμα 7.26:** Εκκαθάριση της κατανάλωσης VPP που δεν διαθέτει εγκαταστάσεις εξόρυξης στο δίκτυο των 30 ζυγών – Εύρωστος Προγραμματισμός

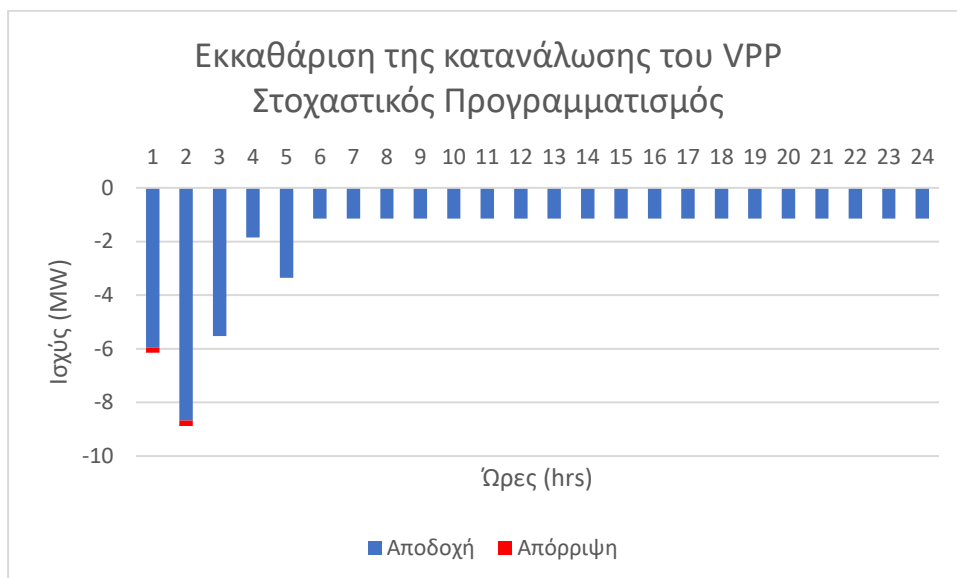
### 7.10.3 Εκκαθάριση Προσφοράς VPP με Εγκαταστάσεις Εξόρυξης Κρυπτονομισμάτων

Στα Σχήματα 7.27 και 7.28 παρουσιάζεται η εκκαθάριση της προσφοράς και της κατανάλωσης των VPPs που διαθέτουν εγκαταστάσεις εξόρυξης και χρησιμοποιούν στοχαστικό προγραμματισμό για τον προγραμματισμό της λειτουργίας τους στην αγορά της επόμενης ημέρας για το δίκτυο των 30 ζυγών. Στα Σχήματα 7.29 και 7.30 παρουσιάζεται η εκκαθάριση της προσφοράς και της κατανάλωσης των VPPs που προγραμματίσαν την λειτουργία τους στην αγορά της επόμενης ημέρας για το δίκτυο των 30 ζυγών με χρήση εύρωστου προγραμματισμού. Με μπλε χρώμα αναπαριστάται η προσφορά και η κατανάλωση του VPP που εκκαθαρίστηκε από το δίκτυο ενώ με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η προσφορά και κατανάλωση του VPP που απορρίφθηκε από το δίκτυο. Το μπλε χρώμα συμβολίζει τις δεσμεύσεις του VPP απέναντι στην αγορά ενέργειας ενώ το κόκκινο χρώμα υποδεικνύει την παραγωγή και την κατανάλωση που καλείται να κόψει το VPP για να αποφύγει την επιβολή προστίμων στην αγορά εξισορρόπησης.

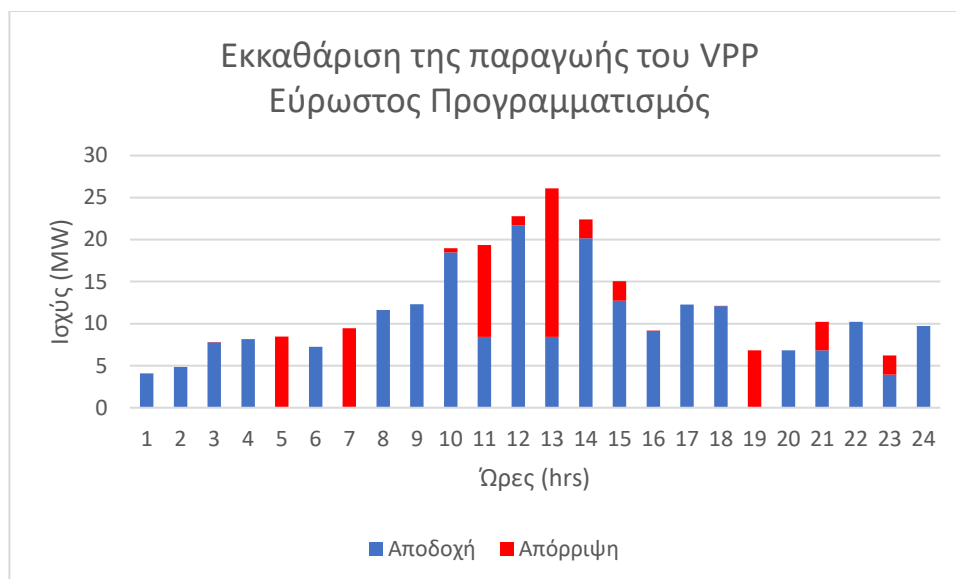
Σε αντίθεση με την εκκαθάριση ενός συμβατικού VPP κατά την εκκαθάριση των προσφορών των VPPs που διαθέτουν εγκαταστάσεις εξόρυξης παρατηρείται ότι ένα μέρος της προσφερόμενης κατανάλωσης απορρίπτεται και στον στοχαστικό αλλά και στον εύρωστο προγραμματισμό. Όσον αφορά την προσφορά των VPPs δεν παρατηρούνται διαφορές μεταξύ την εκκαθάριση της προσφοράς των συμβατικών VPPs και των VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies.



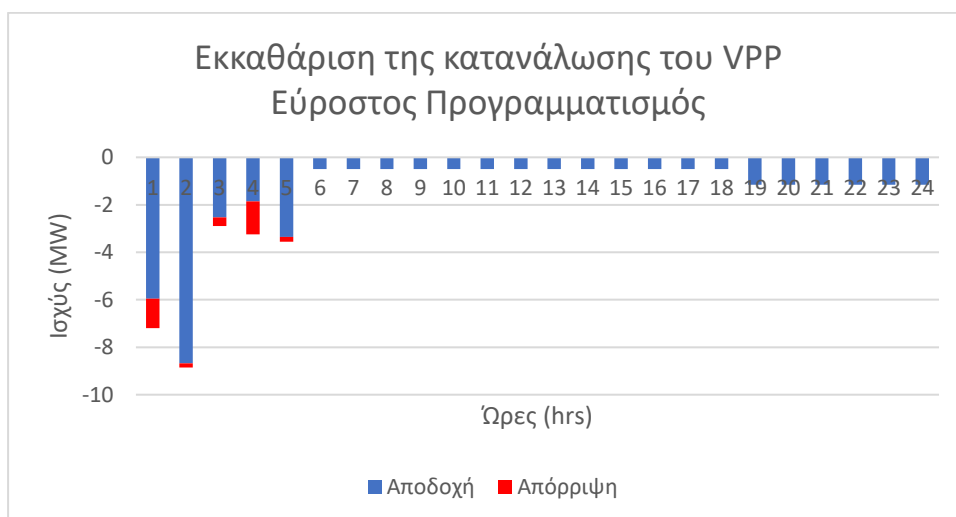
**Σχήμα 7.24:** Εκκαθάριση της παραγωγής του VPP που διαθέτει εγκαταστάσεις εξόρυξης στο δίκτυο των 30 ζυγών – Στοχαστικός Προγραμματισμός



**Σχήμα 7.25:** Εκκαθάριση της κατανάλωσης του VPP που διαθέτει εγκαταστάσεις εξόρυξης στο δίκτυο των 30 ζυγών – Στοχαστικός Προγραμματισμός



**Σχήμα 7.26:** Εκκαθάριση της παραγωγής του VPP που δεν διαθέτει εγκαταστάσεις εξόρυξης στο δίκτυο των 30 ζυγών – Εύρωστος Προγραμματισμός



**Σχήμα 7.27:** Εκκαθάριση της κατανάλωσης VPP που δεν διαθέτει εγκαταστάσεις εξόρυξης στο δίκτυο των 30 ζυγών – Εύρωστος Προγραμματισμός

#### 7.10.4 Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης του δικτύου των 30 ζυγών εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

Αρχικά, η αγορά της επόμενης ημέρας για το δίκτυο των 30 ζυγών προσεγγίζει μια πλήρως ανταγωνιστική αγορά καθώς η συμμετοχή του VPP στην αγορά δεν επηρεάζει σημαντικά την ΟΤΣ. Σε αντίθεση με το δίκτυο των 14 ζυγών το δίκτυο των 30 ζυγών διαθέτει περισσότερα φορτία και μονάδες παραγωγής. Ως αποτέλεσμα η προσφορά και κατανάλωση του VPP αποτελούν ένα μικρό ποσοστό της ενέργειας που εκκαθαρίζεται στην αγορά της επόμενης ημέρας. Επιπλέον, παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο μέρος της προσφερόμενης παραγωγής του VPP γίνεται αποδεκτό από το δίκτυο των 30 ζυγών.

Τα αποτελέσματα του δικτύου των 30 ζυγών προσομοιάζουν με μεγαλύτερη ακρίβεια το πρότυπο μιας τυπικής αγοράς της επόμενης ημέρας. Παρόλα αυτά, δεν επιτυγχάνεται η προσομοίωση

μια πλήρως ανταγωνιστικής αγοράς ενέργειας κατά την οποία η ατομική συμμετοχή των παικτών δεν επηρεάζει την διαμόρφωση της ΟΤΣ.

## 7.11 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΟΥ 500 ΖΥΓΩΝ

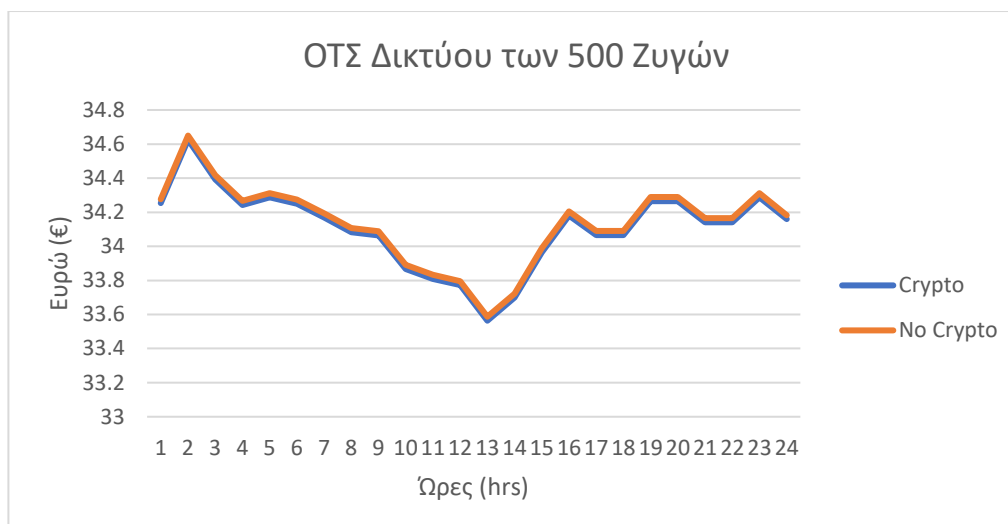
Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της προσομοίωσης εκκαθάρισης της αγοράς της επόμενης ημέρας για το δίκτυο των 500 ζυγών. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην ενότητα αφορούν την εκκαθάριση της προσφοράς και κατανάλωσης των VPPs που μελετώνται καθώς και την διαμόρφωση της ΟΤΣ για το δίκτυο υπό εξέταση.

### 7.11.1 Διαμόρφωση Οριακής Τιμής Συστήματος

Στο Σχήμα 7.30 παρουσιάζεται η ΟΤΣ του δικτύου των 500 ζυγών. Από το σχήμα φαίνεται ότι η ΟΤΣ που διαμορφώθηκε στο δίκτυο των 500 ζυγών δεν αποτελεί μια τυπική ΟΤΣ όπως είχε παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 3. Κατά την εκκαθάριση του δικτύου των 500 ζυγών η ΟΤΣ επηρεάζεται από την συμμετοχή του VPP στην αγορά ενέργειας. Παρόλο που το δίκτυο των 500 ζυγών διαθέτει περισσότερα φορτία και περισσότερες μονάδες παραγωγής από το δίκτυο των 30 ζυγών επειδή τα φορτία του είναι διάσπαρτα σε περισσότερους ζυγούς, η ΟΤΣ επηρεάζεται από μικρές αλλαγές της κατανάλωσης του δικτύου. Αυτό είναι εμφανές από το Σχήμα 7.30, καθώς κατά την συμμετοχή των VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης, η ΟΤΣ είναι υψηλότερη από την ΟΤΣ του δικτύου με συμβατικά VPPs καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας. Επιπλέον, τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η προγραμματισμένη φόρτιση των μονάδων αποθήκευσης των VPPs τις πρωινές ώρες έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ΟΤΣ του δικτύου.

Στον Πίνακα 7.19 παρουσιάζονται οι τυπικές αποκλίσεις των ΟΤΣ για κάθε σενάριο που εξεταστικέ στο δίκτυο των 500 ζυγών. Παρατηρώντας τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η ΟΤΣ του δικτύου των 500 ζυγών επηρεάζεται περισσότερο από την ΟΤΣ του δικτύου των 30 ζυγών.

Οι τυπικές αποκλίσεις υπολογίστηκαν για κάθε χρονική περίοδο κάθε σεναρίου συγκρίνοντας τις ΟΤΣ που διαμορφώθηκαν για κάθε VPP που εξετάζεται.



**Σχήμα 7.30:** Αναπαράσταση της OTΣ του δικτύου των 500 ζυγών με VPPs που διαθέτουν εγκαταστάσεις εξόρυξης (Crypto) καθώς και συμβατικά VPPs χωρίς εγκαταστάσεις εξόρυξης (No Crypto)

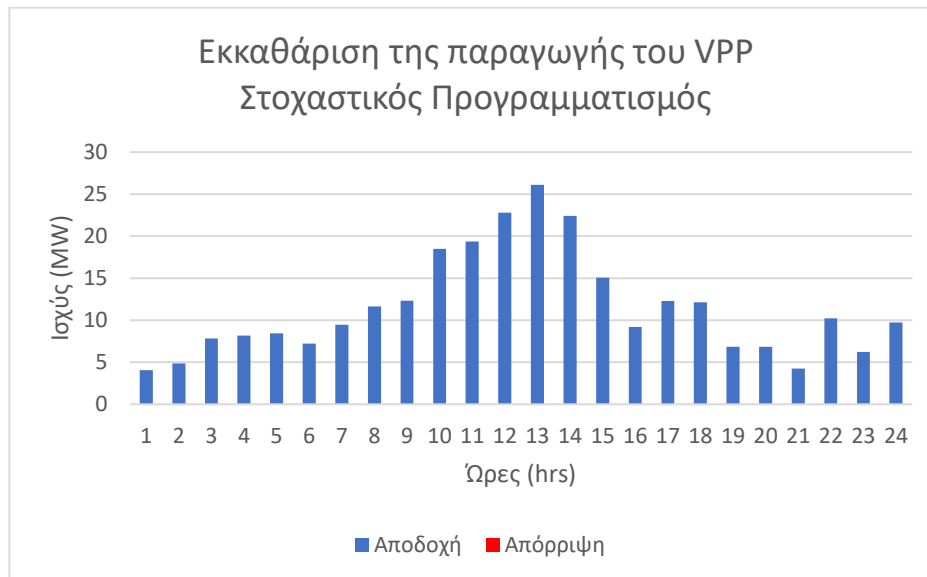
**Πίνακας 7.19:** Τυπικές αποκλίσεις των OTΣ για κάθε σενάριο

A/A	Average Price Forecast	Optimistic Price Forecast	Pessimistic Price Forecast	Optimistic Stochastic Forecast	Pessimistic Stochastic Forecast
1	0.00892	0.00964	0.00888	0.00892	0.00892
2	0.00972	0.00964	0.0096	0.00972	0.00972
3	0.0096	0.00956	0.0096	0.0096	0.0096
4	0.00956	0.00948	0.00952	0.00956	0.00956
5	0.0096	0.00952	0.00952	0.0096	0.0096
6	0.0096	0.00952	0.00952	0.0096	0.0096
7	0.0096	0.00952	0.00952	0.0096	0.0096
8	0.00956	0.00952	0.00948	0.00956	0.00956
9	0.00956	0.00952	0.00952	0.00956	0.00956
10	0.00956	0.00948	0.00952	0.00956	0.00956
11	0.00956	0.00948	0.00944	0.00956	0.00956
12	0.00948	0.00944	0.00936	0.00948	0.00948
13	0.0094	0.00932	0.00944	0.0094	0.0094
14	0.00948	0.00944	0.00952	0.00948	0.00948
15	0.00956	0.00952	0.00952	0.00956	0.00956
16	0.00964	0.00952	0.00952	0.00964	0.00964
17	0.00956	0.00948	0.00952	0.00956	0.00956
18	0.00956	0.00952	0.00952	0.00956	0.00956
19	0.00956	0.00952	0.00952	0.00956	0.00956
20	0.00956	0.00952	0.00952	0.00956	0.00956
21	0.0096	0.00952	0.00952	0.0096	0.0096
22	0.0096	0.00952	0.00952	0.0096	0.0096
23	0.00956	0.00948	0.00948	0.00956	0.00956
24	0.00952	0.00952	0.00952	0.00952	0.00952

### 7.11.2 Εκκαθάριση Προσφοράς Συμβατικών VPP χωρίς Εγκαταστάσεις Εξόρυξης Κρυπτονομισμάτων

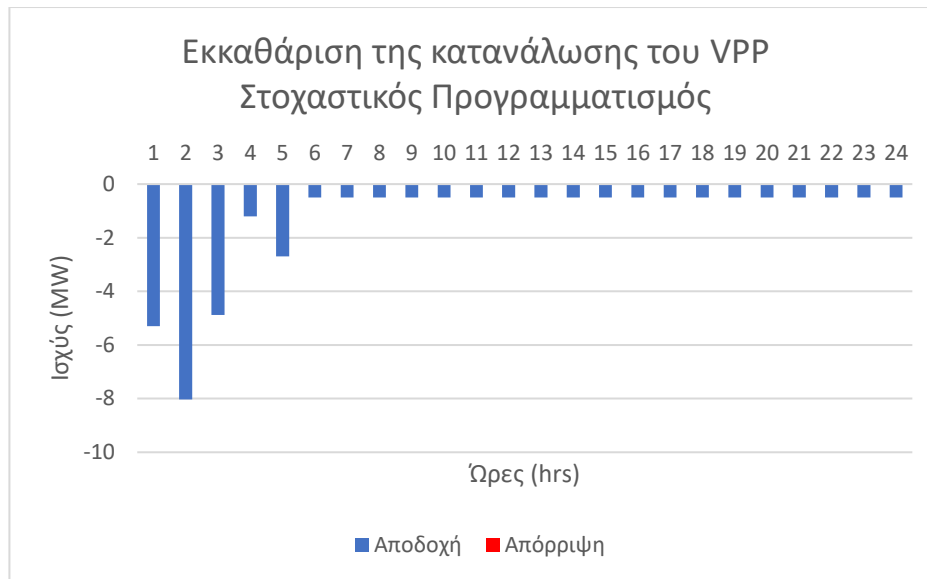
Στα Σχήματα 7.31 και 7.32 παρουσιάζεται η εκκαθάριση της προσφοράς και της κατανάλωσης ενός συμβατικού VPP που προγραμματίσει την λειτουργία του χρησιμοποιώντας στοχαστικό προγραμματισμό στην αγορά της επόμενης ημέρας για το δίκτυο των 500 ζυγών. Στα Σχήματα 7.33 και 7.34 παρουσιάζεται η εκκαθάριση της προσφοράς και της κατανάλωσης ενός VPP που προγραμματίσει την λειτουργία του με εύρωστο προγραμματισμό. Με μπλε χρώμα αναπαριστάται η προσφορά και η κατανάλωση του VPP που εκκαθαρίστηκε από το δίκτυο ενώ με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η προσφορά και κατανάλωση του VPP που απορρίφθηκε από το δίκτυο. Το μπλε χρώμα συμβολίζει τις δεσμεύσεις του VPP απέναντι στην αγορά ενέργειας ενώ το κόκκινο χρώμα υποδεικνύει την παραγωγή και την κατανάλωση που καλείται να κόψει το VPP για να αποφύγει την επιβολή προστίμων στην αγορά εξισορρόπησης.

Σε αντίθεση με την εκκαθάριση του δικτύου των 30 ζυγών κατά την εκκαθάριση της αγοράς της επόμενης ημέρας για το δίκτυο των 500 ζυγών όλη η προσφερόμενη παραγωγή των VPPs εκκαθαρίζεται από το δίκτυο. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η ΟΤΣ του δικτύου των 500 ζυγών είναι μικρότερη από την πρόβλεψη της που χρησιμοποιήθηκε στον προγραμματισμό της λειτουργίας των VPPs. Επιπλέον, σε αντίθεση με την εκκαθάριση των δικτύων των 14 και των 30 ζυγών κατά την εκκαθάριση του δικτύου των 500 ζυγών γίνεται αποδεκτή όλη η προσφορά του VPP και για τον στοχαστικό αλλά και για τον εύρωστο προγραμματισμό.

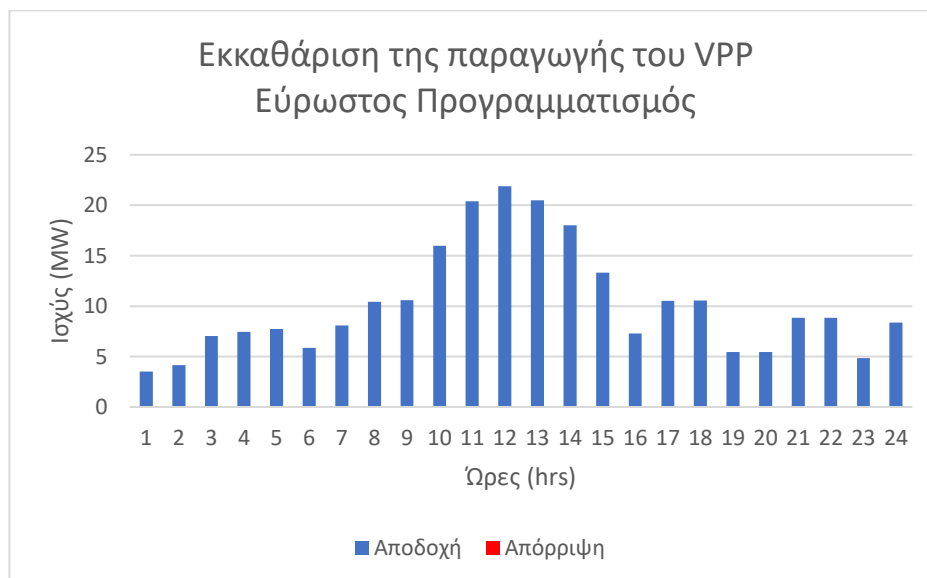


**Σχήμα 7.31:** Εκκαθάριση της παραγωγής συμβατικού VPP που δεν διαθέτει εγκαταστάσεις εξόρυξης στο δίκτυο των 500 ζυγών – Στοχαστικός Προγραμματισμός

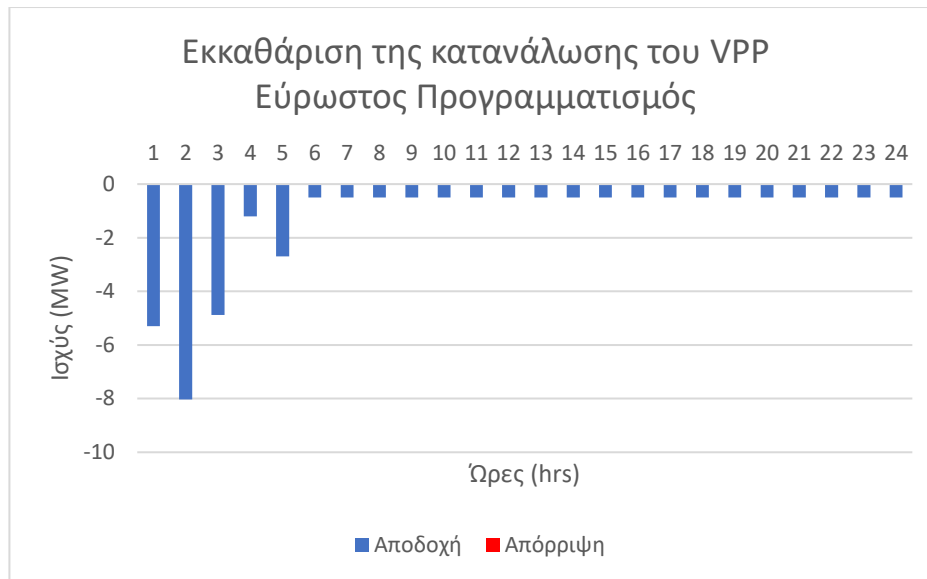




**Σχήμα 7.32:** Εκκαθάριση της κατανάλωσης συμβατικού VPP που δεν διαθέτει εγκαταστάσεις εξόρυξης στο δίκτυο των 500 ζυγών – Στοχαστικός Προγραμματισμός



**Σχήμα 7.33:** Εκκαθάριση της παραγωγής συμβατικού VPP που δεν διαθέτει εγκαταστάσεις εξόρυξης στο δίκτυο των 500 ζυγών – Εύρωστος Προγραμματισμός

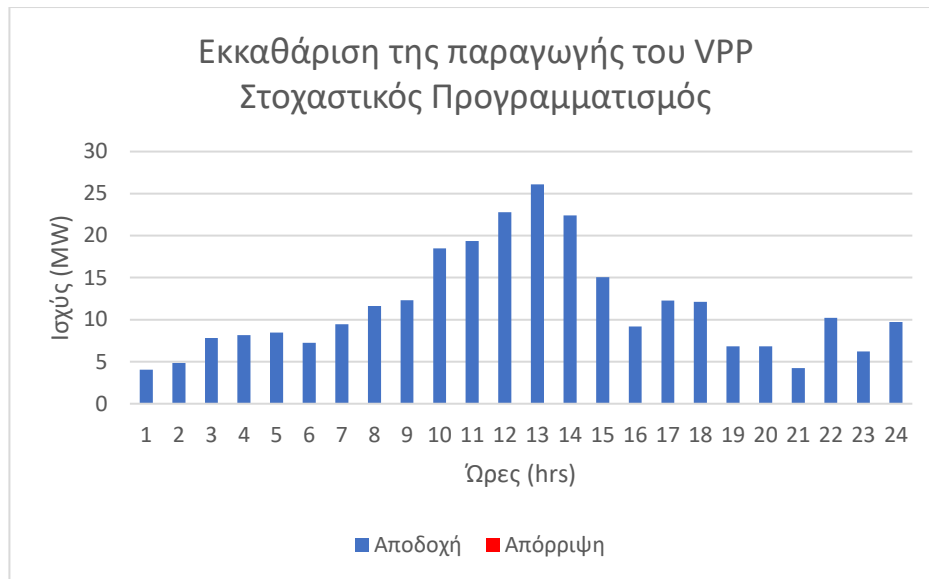


**Σχήμα 7.34:** Εκκαθάριση της κατανάλωσης συμβατικού VPP που δεν διαθέτει εγκαταστάσεις εξόρυξης στο δίκτυο των 500 ζυγών – Εύρωστος Προγραμματισμός

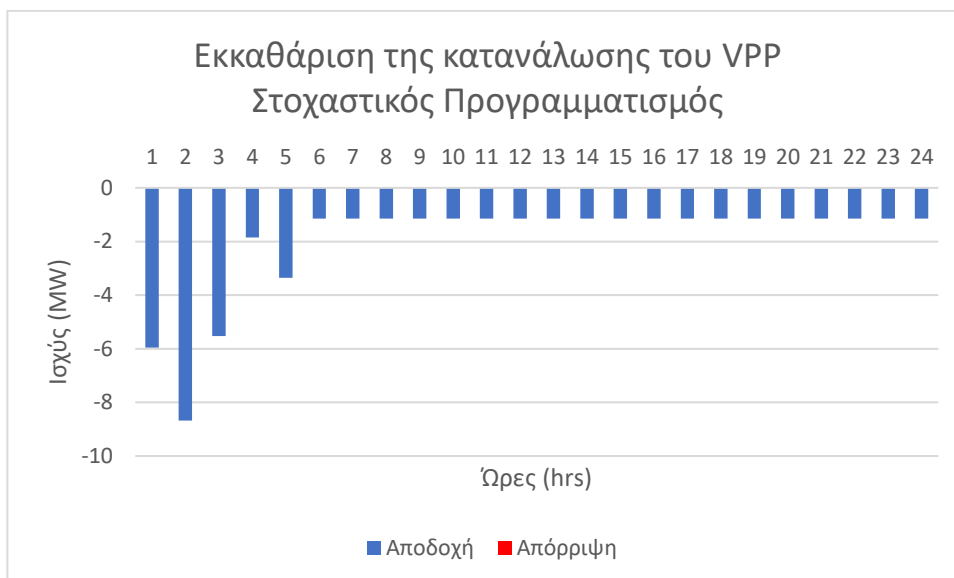
### 7.11.3 Εκκαθάριση Προσφοράς VPP με Εγκαταστάσεις Εξόρυξης Κρυπτονομισμάτων

Στα Σχήματα 7.35 και 7.36 παρουσιάζεται η εκκαθάριση της προσφοράς και της κατανάλωσης των VPPs που διαθέτουν εγκαταστάσεις εξόρυξης και χρησιμοποιούν στοχαστικό προγραμματισμό για τον προγραμματισμό της λειτουργίας τους στην αγορά της επόμενης ημέρας για το δίκτυο των 500 ζυγών. Στα Σχήματα 7.37 και 7.38 παρουσιάζεται η εκκαθάριση της προσφοράς και της κατανάλωσης των VPPs που προγραμματίσαν την λειτουργία τους στην αγορά της επόμενης ημέρας για το δίκτυο των 500 ζυγών με χρήση εύρωστου προγραμματισμού. Με μπλε χρώμα αναπαριστάται η προσφορά και η κατανάλωση του VPP που εκκαθαρίστηκε από το δίκτυο ενώ με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η προσφορά και κατανάλωση του VPP που απορρίφθηκε από το δίκτυο. Το μπλε χρώμα συμβολίζει τις δεσμεύσεις του VPP απέναντι στην αγορά ενέργειας ενώ το κόκκινο χρώμα υποδεικνύει την παραγωγή και την κατανάλωση που καλείται να κόψει το VPP για να αποφύγει την επιβολή προστίμων στην αγορά εξισορρόπησης.

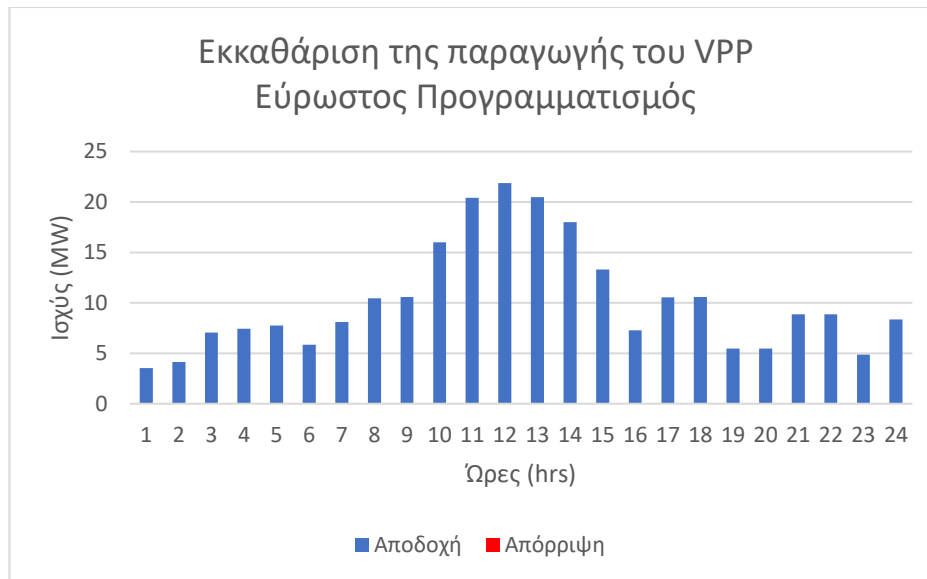
Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η συμπεριφορά των συμβατικών VPPs είναι παρόμοια με αυτή των VPPs που έχουν εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies καθώς κατά την εκκαθάριση του δικτύου των 500 ζυγών γίνεται αποδεκτή όλη τους η προσφερόμενη παραγωγή και κατανάλωση.



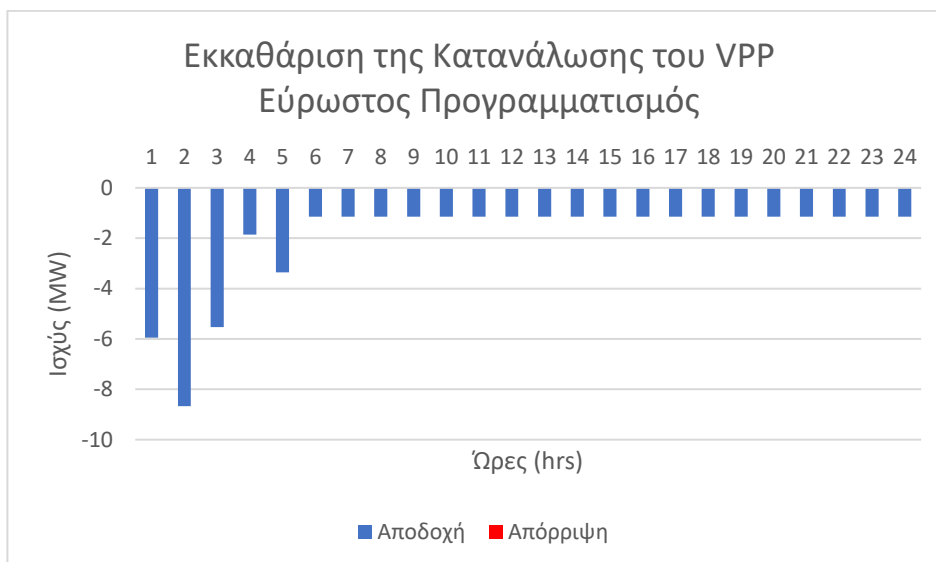
**Σχήμα 7.35:** Εκκαθάριση της παραγωγής του VPP που δεν διαθέτει εγκαταστάσεις εξόρυξης στο δίκτυο των 500 ζυγών – Στοχαστικός Προγραμματισμός



**Σχήμα 7.36:** Εκκαθάριση της κατανάλωσης VPP που δεν διαθέτει εγκαταστάσεις εξόρυξης στο δίκτυο των 500 ζυγών – Στοχαστικός Προγραμματισμός



**Σχήμα 7.37:** Εκκαθάριση της παραγωγής του VPP που δεν διαθέτει εγκαταστάσεις εξόρυξης στο δίκτυο των 500 ζυγών – Εύρωστος Προγραμματισμός



**Σχήμα 7.38:** Εκκαθάριση της κατανάλωσης VPP που δεν διαθέτει εγκαταστάσεις εξόρυξης στο δίκτυο των 500 ζυγών – Εύρωστος Προγραμματισμός

#### 7.11.4 Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης του δικτύου των 500 ζυγών εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

Αρχικά, η αγορά της επόμενης ημέρας στο δίκτυο των 500 ζυγών δεν προσεγγίζει μια πλήρως ανταγωνιστική αγορά καθώς η συμμετοχή των VPPs στην αγορά ενέργειας επηρεάζει την ΟΤΣ. Σε αντίθεση με το δίκτυο των 30 ζυγών το δίκτυο των 500 ζυγών όπως και το δίκτυο των 14 ζυγών δεν προσομοιάζουν πραγματικές ΟΤΣ καθώς τα φορτία του δικτύου παραμένουν σταθερά και δεν μεταβάλλονται κατά την διάρκεια της ημέρας. Επιπλέον, σε αντίθεση με τα δίκτυα των 14 και των 30 ζυγών, κατά την εκκαθάριση του δικτύου των 500 ζυγών δεν απορρίπτεται μέρος της προσφερόμενης παραγωγής και της κατανάλωσης των VPPs.

## 7.12 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΓΟΡΑΣ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της προσομοίωσης της αγοράς εξισορρόπησης για όλα τα σενάρια που εξετάζονται. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην ενότητα αφορούν την συμπεριφορά των VPPs στην αγορά εξισορρόπησης. Συγκεκριμένα, στην ενότητα παρουσιάζονται τα πραγματικά κέρδη των VPPs καθώς και οι προσαρμογές που γίνονται για την μεγιστοποίηση του κέρδους τους και αποφυγή των προστίμων της αγοράς εξισορρόπησης. Ο στόχος της ενότητας είναι η μελέτη των επιπτώσεων που έχει η εισαγωγή και η χρήση των εγκαταστάσεων εξόρυξης cryptocurrencies στα VPPs. Για τον παραπάνω λόγο, τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αφορούν την παραγωγή και κατανάλωση των VPPs που εκκαθαριστικά στο δίκτυο των 30 ζυγών. Η επιλογή του δικτύου των 30 ζυγών έναντι των δικτύων των 14 και των 500 ζυγών έγκειται στην καλύτερη προσομοίωση μιας πραγματικής αγοράς της επόμενης ημέρας που αυτό προσφέρει. Επιπλέον, καθώς κατά την εκκαθάριση του δικτύου των 500 ζυγών γίνεται αποδεκτή όλη η παραγωγή των VPPs κρίνεται προτιμότερη η χρήση των αποτελεσμάτων ενός διαφορετικού δικτύου που θα οδηγήσει σε περισσότερες ρυθμιστικές κινήσεις στην αγορά εξισορρόπησης.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι παρόλο που η χρήση των αποτελεσμάτων του δικτύου των 30 ζυγών επιφέρει αποτελέσματα που προσεγγίζουν καλύτερα την πραγματικότητα, στην πράξη μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα από οποιοδήποτε από τα τρία δίκτυα. Η επιλογή των αποτελεσμάτων του δικτύου των 14 και των 500 ζυγών είναι δυνατή καθώς κατά την επίλυση της αγοράς εξισορρόπησης εισάγονται αποκλίσεις μεταξύ των προβλέψεων των στοχαστικών μονάδων και της πραγματικής τους παραγωγής. Επομένως, ακόμα και στην περίπτωση όπου όλη η προσφερόμενη παραγωγή των VPPs γίνεται αποδεκτή, όπως συμβαίνει κατά την εκκαθάριση του δικτύου των 500 ζυγών, υπάρχουν ρυθμιστικές κινήσεις που πρέπει να υλοποιηθούν στην αγορά εξισορρόπησης.

Τέλος, καθώς ο στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι να εξετάσει το κατά πόσο η εισαγωγή εγκαταστάσεων εξόρυξης cryptocurrencies επηρεάζει την λειτουργία των VPPs. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται μόνο τα αποτελέσματα της πρώτης ομάδας εξισορρόπησης στην οποία και βρίσκονται οι στοχαστικές μονάδες και οι εγκαταστάσεις εξόρυξης.

### 7.12.1 Αποτελέσματα Στοχαστικού Προγραμματισμού

Στο Σχήματα 7.39 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αγοράς εξισορρόπησης για ένα συμβατικό VPP κατά την εφαρμογή του **σεναρίου καλής πρόβλεψης των τιμών της αγοράς της επόμενης ημέρας (ΟΤΣ)**. Στο Σχήμα 7.40 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αγοράς εξισορρόπησης των VPPs που διαθέτουν εγκαταστάσεις εξόρυξης κατά την εφαρμογή του ίδιου σεναρίου. Η αρνητική ισχύς συμβολίζει κινήσεις που μειώνουν την παραγωγή των VPPs ενώ με θετική πρόσημο αναπαρίστανται οι ρυθμιστικές κινήσεις που αποσκοπούν στην αύξηση της παραγωγής των VPPs. Επομένως, όταν η ισχύς είναι θετική οι διαχειριστές των VPPs πρέπει να αγοράσουν ενέργεια από την αγορά εξισορρόπησης ενώ, όταν η ισχύς είναι αρνητική πρέπει να πουλήσουν. Και στις δύο περιπτώσεις μαζί με την αγορά η πώληση ενέργειας από την αγορά εξισορρόπησης οι διαχειριστές των VPPs πληρώνουν και το ανάλογο πρόστιμο.

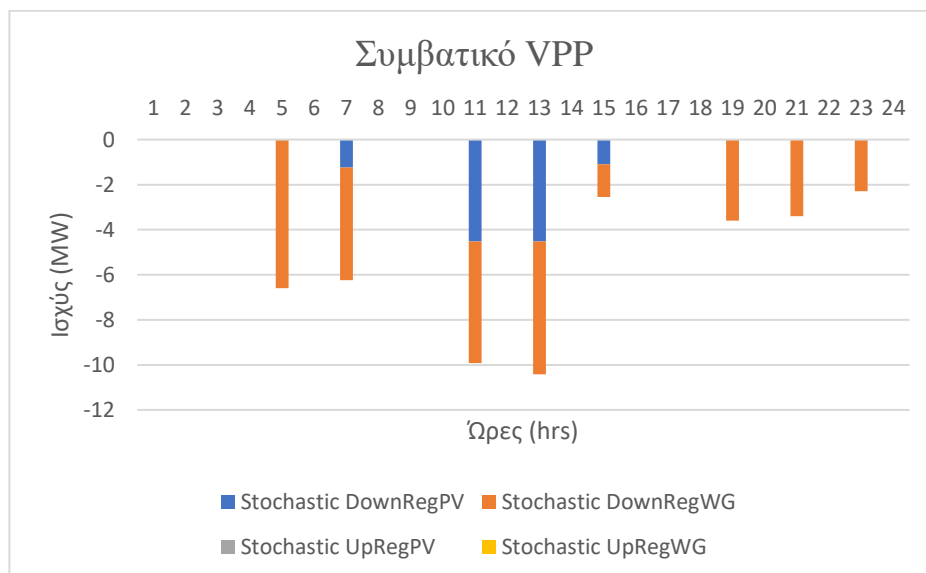
Στο παρόν σενάριο, τα VPPs καλούνται να μειώσουν την παραγωγή τους. Όπως φαίνεται, οι μεγαλύτερες αστοχίες και ως αποτέλεσμα οι μεγαλύτερες ρυθμιστικές κινήσεις γίνονται για την εξισορρόπηση των ανεμογεννητριών των VPPs.

**Πίνακας 7.20:** Κέρδη των VPPs για το σενάριο Average Price Forecast – Στοχαστικός Προγραμματισμός

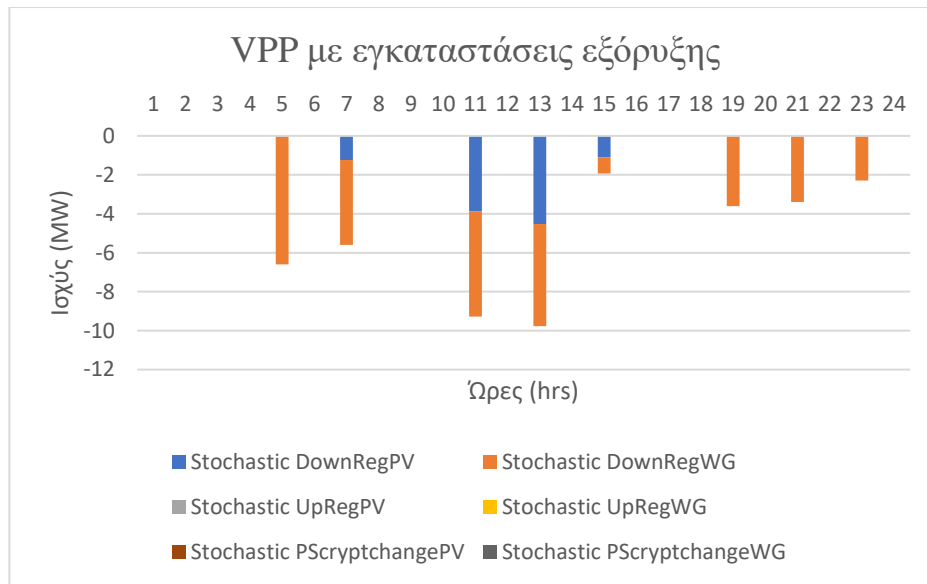
Εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrency	Έσοδα (€)
No Crypto	10538.843
BTC	13130.475
ETH*	35342.589
ETH	17721.100
DOGE	11739.509

Στον Πίνακα 7.20 παρουσιάζονται τα πραγματικά κέρδη των VPPs κατά την υλοποίηση της αγοράς εξισορρόπησης για το σενάριο καλής πρόβλεψης των τιμών της αγοράς της επόμενης ημέρας. Όπως φαίνεται, τα κέρδη των VPPs διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους ανάλογα με τις εγκαταστάσεις εξόρυξης καθώς και τα cryptocurrencies που εξορύσσονται. Τα υψηλότερα κέρδη παρατηρούνται στα VPPs που διαθέτουν τις καλύτερες εγκαταστάσεις εξόρυξης Ethereum, ενώ τα χαμηλότερα κέρδη εντοπίζονται στα συμβατικά VPPs.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει επίσης ότι τα συμβατικά VPPs πρέπει να κάνουν μεγαλύτερες κινήσεις για εξισορρόπηση της παραγωγής τους από ότι τα VPPs που διαθέτουν εγκαταστάσεις εξόρυξης. Αυτό το αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο καθώς τα VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies έχουν προγραμματίσει την κατανάλωση επιπλέον 650KW από τις εγκαταστάσεις αυτές καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας. Τέλος, όπως φαίνεται, ανεξάρτητα από τα VPPs που μελετώνται η λειτουργία τους κατά την εξισορρόπηση της παραγωγής τους είναι παρόμοια.



**Σχήμα 7.39:** Ρυθμιστικές κινήσεις ενός συμβατικού VPP για την εξισορρόπηση των δεσμεύσεων του – Average Price Forecast



**Σχήμα 7.40:** Ρυθμιστικές κινήσεις των VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης για την εξισορρόπηση των δεσμεύσεων τους – Average Price Forecast

Στον Πίνακα 7.21 παρουσιάζονται οι διαφορές μεταξύ των κινήσεων που καλούνται να υλοποιήσουν τα VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης σε σχέση με τα συμβατικά VPPs.

Τα  $\Delta_{DownRegPV}$ ,  $\Delta_{DownRegWG}$ ,  $\Delta_{UpRegPV}$  και  $\Delta_{UpRegWG}$  υπολογίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned}\Delta_{DownRegPV} &= |DownRegPV_{Crypto}| - |DownRegPV_{NoCrypto}| \\ \Delta_{DownRegWG} &= |DownRegWG_{Crypto}| - |DownRegWG_{NoCrypto}| \\ \Delta_{UpRegPV} &= |UpRegPV_{Crypto}| - |UpRegPV_{NoCrypto}| \\ \Delta_{UpRegWG} &= |UpRegWG_{Crypto}| - |UpRegWG_{NoCrypto}|\end{aligned}$$

Όταν  $\Delta_{DownRegPV} > 0$  τότε τα VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης χρειάζεται να μειώσουν περισσότερο την παραγωγή τους σε σχέση με τα συμβατικά VPPs. Αντίθετα, όταν  $\Delta_{DownRegPV} < 0$  τότε τα VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης χρειάζεται να κάνουν μικρότερες κινήσεις από τα συμβατικά VPPs. Επομένως, οι αρνητικές τιμές στον παρακάτω πίνακα υποδηλώνουν ότι τα VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης έχουν καλύτερο προγραμματισμό από τα συμβατικά VPPs, ενώ οι θετικές τιμές υποδηλώνουν το αντίθετο.

**Πίνακας 7.21:** Σύγκριση των αποτελεσμάτων των συμβατικών VPPs και των VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies – Average Price Forecast

Χρονική Περίοδος	$\Delta_{DownRegPV}$ (MW)	$\Delta_{DownRegWG}$ (MW)	$\Delta_{UpRegPV}$ (MW)	$\Delta_{UpRegWG}$ (MW)
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0	-0.65	0	0
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	-0.65	0	0	0
12	0	0	0	0
13	0	-0.65	0	0
14	0	0	0	0
15	0.0117	-0.6274	0	0
16	0	0	0	0
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
20	0	0	0	0
21	0	0	0	0
22	0	0	0	0
23	0	-0.0002	0	0
24	0	0	0	0

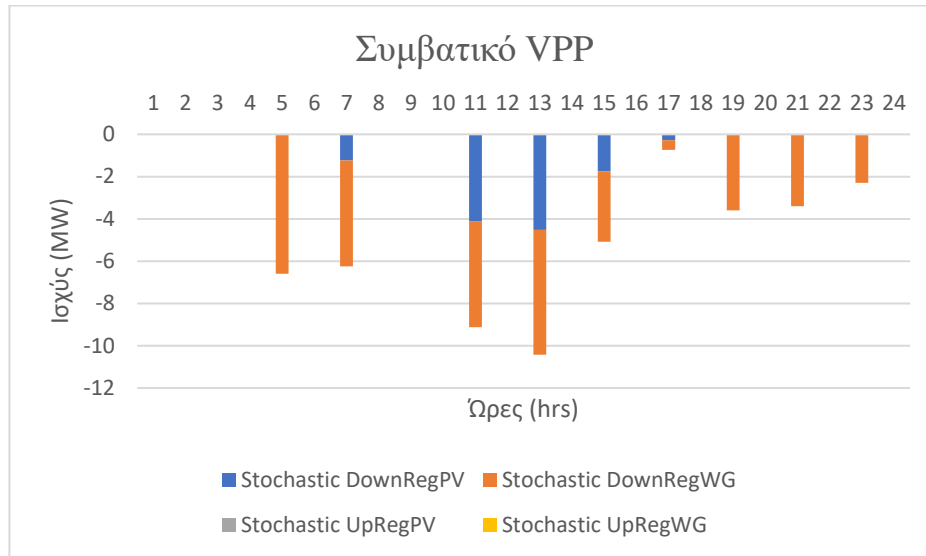
Στο Σχήματα 7.41 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αγοράς εξισορρόπησης για ένα συμβατικό VPP κατά την εφαρμογή του **σεναρίου πολύ καλής πρόβλεψης των τιμών της αγοράς της επόμενης ημέρας με τις προβλεπόμενες τιμές να είναι σχεδόν ίσες με την πραγματική ΟΤΣ**. Στο Σχήμα 7.42 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αγοράς εξισορρόπησης των VPPs που διαθέτουν εγκαταστάσεις εξόρυξης κατά την εφαρμογή του ίδιου σεναρίου. Ομοίως με το προηγούμενο σενάριο οι μεγαλύτερες αστοχίες και ως αποτέλεσμα οι μεγαλύτερες ρυθμιστικές κινήσεις γίνονται για την εξισορρόπηση των ανεμογεννητριών των VPPs.

Στον Πίνακα 7.22 παρουσιάζονται τα πραγματικά κέρδη των VPPs κατά την υλοποίηση της αγοράς εξισορρόπησης για το σενάριο πολύ καλής πρόβλεψης των τιμών της αγοράς της επόμενης ημέρας. Όπως φαίνεται, τα κέρδη των VPPs διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους ανάλογα με τις εγκαταστάσεις εξόρυξης καθώς και τα cryptocurrencies που εξορύσσονται. Τα υψηλότερα κέρδη παρατηρούνται και πάλι στα VPPs που διαθέτουν τις καλύτερες εγκαταστάσεις εξόρυξης Ethereum, ενώ, τα χαμηλότερα κέρδη εντοπίζονται στα συμβατικά VPPs.

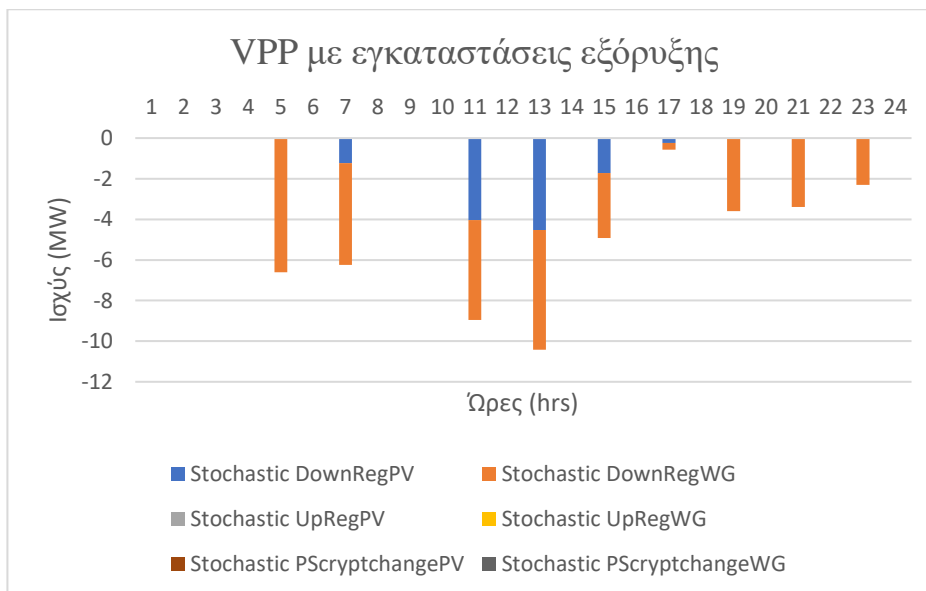


**Πίνακας 7.22:** Κέρδη των VPPs για το σενάριο Optimistic Price Forecast – Στοχαστικός Προγραμματισμός

Εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrency	Έσοδα (€)
No Crypto	11618.264
BTC	13709.891
ETH*	35978.412
ETH	18799.14
DOGE	12817.55



**Σχήμα 7.41:** Ρυθμιστικές κινήσεις ενός συμβατικού VPP για την εξισορρόπηση των δεσμεύσεων του – Optimistic Price Forecast



**Σχήμα 7.42:** Ρυθμιστικές κινήσεις των VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης για την εξισορρόπηση των δεσμεύσεων τους – Optimistic Price Forecast

Συγκρίνοντας τα Σχήματα 7.41 και 7.42 με τα Σχήματα 7.39 και 7.40 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα: Αρχικά, ενώ χρησιμοποιούνται πολύ καλές προβλέψεις της ΟΤΣ στον προγραμματισμό των VPPs παρατηρείται μια αύξηση της ισχύος που πρέπει να κόψουν τα VPPs για την εξισορρόπηση της παραγωγής τους. Αυτό το αποτέλεσμα, παρόλο που είναι αντιδιασθητικό, μπορεί αν επεξηγηθεί από την αυξημένη παραγωγή των υπόλοιπων μονάδων παραγωγής των VPPs, όπως τις θερμοηλεκτρικές μονάδες, που είχαν υψηλότερη παραγωγή λόγω της υψηλότερης προβλεπόμενης ΟΤΣ. Παρόλα αυτά, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 7.20, τα κέρδη των VPPs είναι υψηλότερα σε αυτό το σενάριο.

Στον Πίνακα 7.23 παρουσιάζονται οι διαφορές μεταξύ των κινήσεων που καλούνται να υλοποιήσουν τα VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης σε σχέση με τα συμβατικά VPPs. Όπως φαίνεται, τα VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης καλούνται να κάνουν μικρότερες κινήσεις εξισορρόπησης από τα συμβατικά VPPs κάτι που υποδηλώνει ότι τα VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης είχαν καλύτερο προγραμματισμό από τα συμβατικά VPPs.

**Πίνακας 7.23:** Σύγκριση των αποτελεσμάτων των συμβατικών VPPs και των VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies – Optimistic Price Forecast

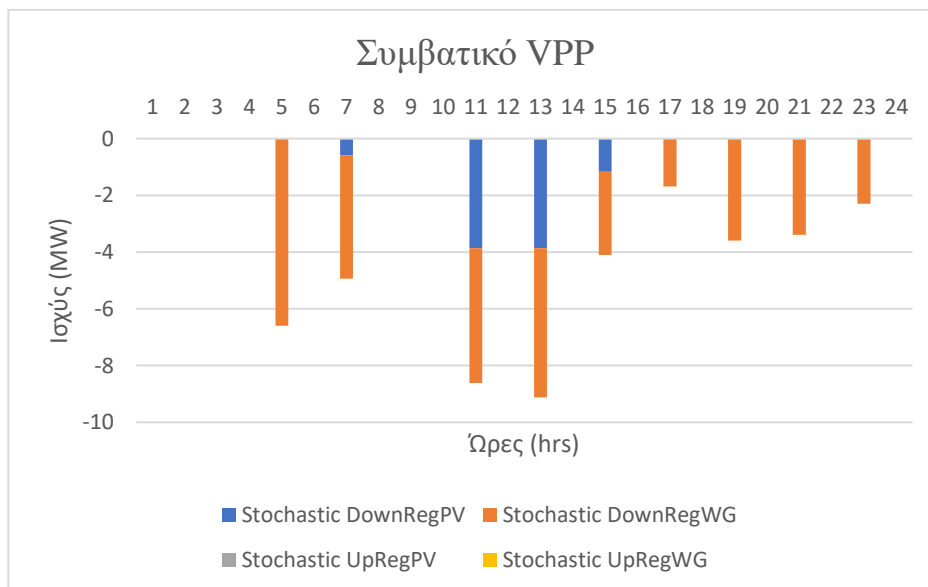
Χρονική Περίοδος	$\Delta_{DownRegPV}$ (MW)	$\Delta_{DownRegWG}$ (MW)	$\Delta_{UpRegPV}$ (MW)	$\Delta_{UpRegWG}$ (MW)
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	-0.0802	-0.0836	0	0
12	0	0	0	0
13	0	0	0	0
14	0	0	0	0
15	-0.0355	-0.1279	0	0
16	0	0	0	0
17	-0.0484	-0.1151	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
20	0	0	0	0
21	0	0	0	0
22	0	0	0	0
23	0	-0.0002	0	0
24	0	0	0	0

Στο Σχήματα 7.43 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αγοράς εξισορρόπησης για ένα συμβατικό VPP κατά την εφαρμογή του **σεναρίου κακής πρόβλεψης των τιμών της αγοράς της επόμενης ημέρας με τις προβλεπόμενες τιμές να είναι μικρότερες από τις πραγματικές τιμές**. Στο Σχήμα 7.44 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αγοράς εξισορρόπησης των VPPs που διαθέτουν εγκαταστάσεις εξόρυξης κατά την εφαρμογή του ίδιου σεναρίου.

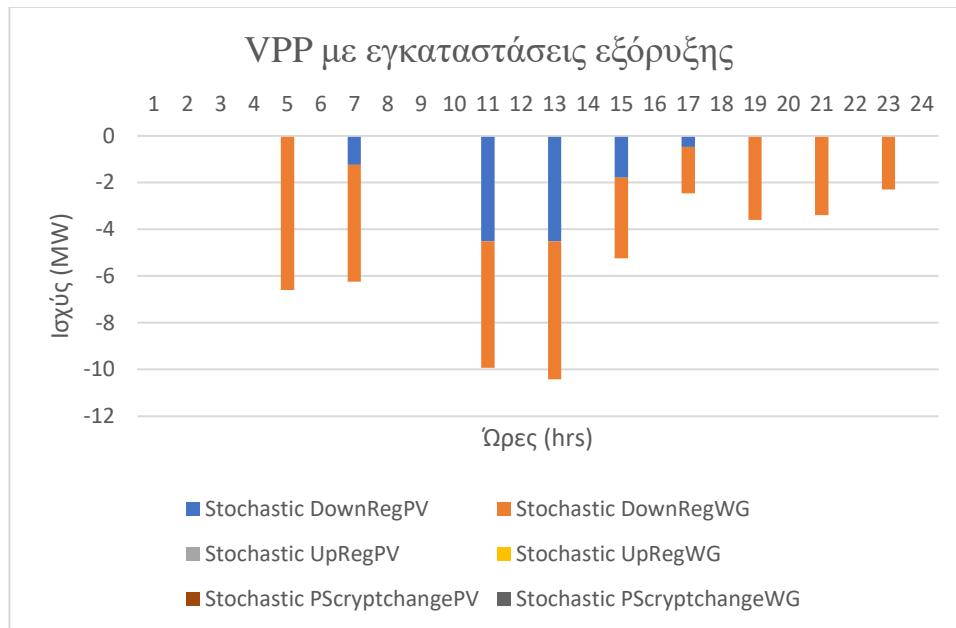
Στον Πίνακα 7.24 παρουσιάζονται τα πραγματικά κέρδη των VPPs κατά την υλοποίηση της αγοράς εξισορρόπησης για το σενάριο κακής πρόβλεψης των τιμών της αγοράς της επόμενης ημέρας. Όπως φαίνεται, τα κέρδη των VPPs διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους ανάλογα με τις εγκαταστάσεις εξόρυξης καθώς και τα cryptocurrencies που εξορύσσονται. Τα υψηλότερα κέρδη παρατηρούνται και πάλι στα VPPs που διαθέτουν τις καλύτερες εγκαταστάσεις εξόρυξης Ethereum, ενώ, τα χαμηλότερα κέρδη εντοπίζονται και πάλι στα συμβατικά VPPs.

**Πίνακας 7.24:** Κέρδη των VPPs για το σενάριο – Pessimistic Price Forecast – Στοχαστικός Προγραμματισμός

Εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrency	Έσοδα (€)
No Crypto	8736.957
BTC	10828.506
ETH*	33097.027
ETH	15917.754
DOGE	9936.164



**Σχήμα 7.43:** Ρυθμιστικές κινήσεις ενός συμβατικού VPP για την εξισορρόπηση των δεσμεύσεων του – Pessimistic Price Forecast



**Σχήμα 7.44:** Ρυθμιστικές κινήσεις των VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης για την εξισορρόπηση των δεσμεύσεων τους – Pessimistic Price Forecast

Συγκρίνοντας τα Σχήματα 7.43 και 7.44 με τα Σήματα 7.39 έως 7.42 προκύπτει ότι σε αντίθεση με τα προηγούμενα σενάρια στο σενάριο κακής πρόβλεψης ΟΤΣ τα συμβατικά VPPs απαιτούν μικρότερες προσαρμογές στην αγορά εξισορρόπησης για την τήρηση των δεσμεύσεων τους.

Στον Πίνακα 7.25 παρουσιάζονται οι διαφορές μεταξύ των κινήσεων που καλούνται να υλοποιήσουν τα VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης σε σχέση με τα συμβατικά VPPs. Όπως φαίνεται, τα VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης καλούνται να κάνουν μεγαλύτερες κινήσεις εξισορρόπησης από τα συμβατικά VPPs. Παρόλα αυτά, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 7.24 τα κέρδη των VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης εξακολουθούν να είναι σημαντικά υψηλότερα από αυτά των συμβατικών VPPs.

**Πίνακας 7.25:** Σύγκριση των αποτελεσμάτων των συμβατικών VPPs και των VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies – Pessimistic Price Forecast

Χρονική Περίοδος	$\Delta_{DownRegPV}$ (MW)	$\Delta_{DownRegWG}$ (MW)	$\Delta_{UpRegPV}$ (MW)	$\Delta_{UpRegWG}$ (MW)
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0.65	0.65	0	0
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	0.65	0.65	0	0
12	0	0	0	0
13	0.65	0.65	0	0
14	0	0	0	0
15	0.6142	0.5228	0	0
16	0	0	0	0
17	0.4667	0.3144	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
20	0	0	0	0
21	0	0	0	0
22	0	0	0	0
23	0	-0.0002	0	0
24	0	0	0	0

Στο Σχήματα 7.45 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αγοράς εξισορρόπησης για ένα συμβατικό VPP κατά την εφαρμογή του **σεναρίου κακής πρόβλεψης της στοχαστικής παραγωγής των VPPs με την πρόβλεψη να είναι υψηλότερη από την πραγματική παραγωγή τους**. Στο Σχήμα 7.46 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αγοράς εξισορρόπησης των VPPs που διαθέτουν εγκαταστάσεις εξόρυξης κατά την εφαρμογή του ίδιου σεναρίου.

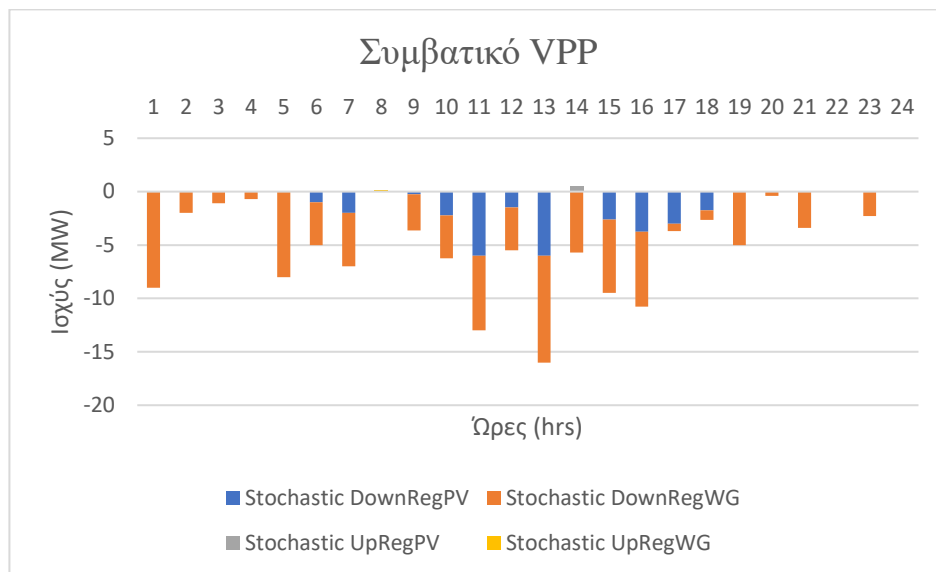
Στον Πίνακα 7.26 παρουσιάζονται τα πραγματικά κέρδη των VPPs κατά την υλοποίηση της αγοράς εξισορρόπησης για το σενάριο υπό εξέταση. Τα υψηλότερα κέρδη παρατηρούνται και πάλι στα VPPs που διαθέτουν τις καλύτερες εγκαταστάσεις εξόρυξης Ethereum, ενώ, τα χαμηλότερα κέρδη εντοπίζονται στα συμβατικά VPPs.

**Πίνακας 7.26:** Κέρδη των VPPs για το σενάριο Optimistic Stochastic Forecast – Στοχαστικός Προγραμματισμός

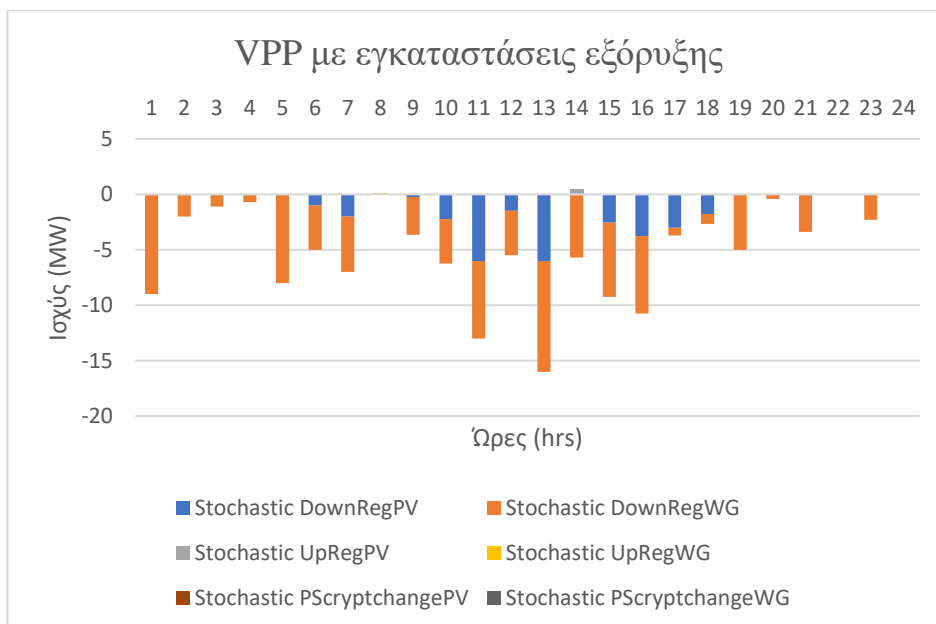
Εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrency	Έσοδα (€)
No Crypto	9851.334
BTC	11953.102
ETH*	33663.475
ETH	17042.351
DOGE	11060.76

Σε αντίθεση με τα αποτελέσματα των προηγούμενων σεναρίων, κατά την εξισορρόπηση των VPPs με κακές στοχαστικές προβλέψεις παρατηρούνται περισσότερες καθώς και μεγαλύτερες κινήσεις στην αγορά εξισορρόπησης. Παρόλα αυτά, τα κέρδη των VPPs με κακές προβλέψεις για τις στοχαστικές μονάδες είναι μεγαλύτερα από τα κέρδη των VPPs με κακές προβλέψεις της ΟΤΣ κάτι που υποδηλώνει ότι οι αστοχίες στις προβλέψεις των ΟΤΣ επηρεάζουν περισσότερο την κερδοφορία των VPPs.

Στον Πίνακα 7.27 παρουσιάζονται οι διαφορές μεταξύ των κινήσεων που καλούνται να υλοποιήσουν τα VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης σε σχέση με τα συμβατικά VPPs. Όπως φαίνεται, τα VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης έχουν καλύτερο προγραμματισμό καθώς καλούνται να κάνουν μικρότερες κινήσεις εξισορρόπησης από τα συμβατικά VPPs.



**Σχήμα 7.45:** Ρυθμιστικές κινήσεις ενός συμβατικού VPP για την εξισορρόπηση των δεσμεύσεων του – Optimistic Stochastic Forecast



**Σχήμα 7.46:** Ρυθμιστικές κινήσεις των VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης για την εξισορρόπηση των δεσμεύσεων τους – Optimistic Stochastic Forecast

**Πίνακας 7.27:** Σύγκριση των αποτελεσμάτων των συμβατικών VPPs και των VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies – Optimistic Stochastic Forecast

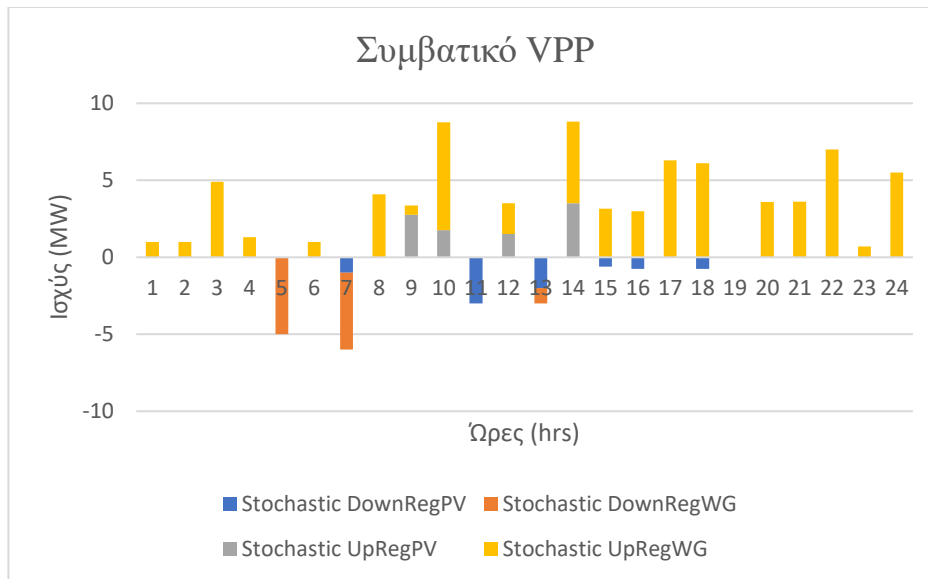
Χρονική Περίοδος	$\Delta_{DownRegPV}$ (MW)	$\Delta_{DownRegWG}$ (MW)	$\Delta_{UpRegPV}$ (MW)	$\Delta_{UpRegWG}$ (MW)
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0
13	0	0	0	0
14	0	0	0	0
15	-0.0732	-0.1338	0	0
16	0	0	0	0
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
20	0	0	0	0
21	0	0	0	0
22	0	0	0	0
23	0	-0.0002	0	0
24	0	0	0	0

Στο Σχήματα 7.47 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αγοράς εξισορρόπησης για ένα συμβατικό VPP κατά την εφαρμογή του **σεναρίου κακής πρόβλεψης της στοχαστικής παραγωγής των VPPs με την πρόβλεψη να είναι χαμηλότερες από την πραγματική παραγωγή τους**. Στο Σχήμα 7.48 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αγοράς εξισορρόπησης των VPPs που διαθέτουν εγκαταστάσεις εξόρυξης κατά την εφαρμογή του ίδιου σεναρίου.

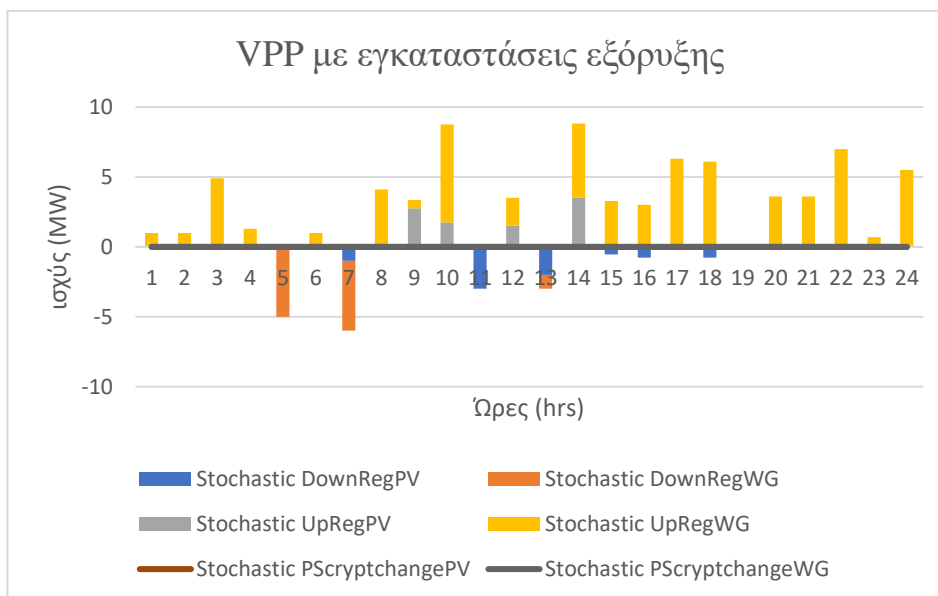
Στον Πίνακα 7.28 παρουσιάζονται τα πραγματικά κέρδη των VPPs κατά την υλοποίηση της αγοράς εξισορρόπησης για το σενάριο υπό εξέταση. Όπως και στα προηγούμενα σενάρια τα υψηλότερα κέρδη παρατηρούνται και πάλι στα VPPs που διαθέτουν τις καλύτερες εγκαταστάσεις εξόρυξης Ethereum, ενώ τα χαμηλότερα κέρδη εντοπίζονται στα συμβατικά VPPs.

**Πίνακας 7.28:** Κέρδη των VPPs για το σενάριο Pessimistic Stochastic Forecast – Στοχαστικός Προγραμματισμός

Εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrency	Έσοδα (€)
No Crypto	10082.925
BTC	12187.16
ETH*	34897.897
ETH	16276.408
DOGE	11294.818



**Σχήμα 7.47:** Ρυθμιστικές κινήσεις ενός συμβατικού VPP για την εξισορρόπηση των δεσμεύσεων του – Pessimistic Stochastic Forecast



**Σχήμα 7.46:** Ρυθμιστικές κινήσεις των VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης για την εξισορρόπηση των δεσμεύσεων τους – Pessimistic Stochastic Forecast

Μέχρι στιγμής, η πλειοψηφία των σεναρίων απαιτούσε την μείωση της παραγωγής των VPPs. Σε αυτό σενάριο όμως, όπως είναι εμφανές, τα VPPs καλούνται να μειώσουν καθώς και να αυξήσουν την παραγωγή τους στην ομάδα εξισορρόπησης που είναι συνδεδεμένες οι στοχαστικές μονάδες τους. Παρόλα αυτά, τα κέρδη των VPPs υπό αυτό το σενάριο εξακολουθούν να υπερβαίνουν τα κέρδη των VPPs με κακές προβλέψεις της ΟΤΣ.

Στον Πίνακα 7.29 παρουσιάζονται οι διαφορές μεταξύ των κινήσεων που καλούνται να υλοποιήσουν τα VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης σε σχέση με τα συμβατικά VPPs. Όπως φαίνεται, τα συμβατικά VPPs και τα VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης δεν συμπεριφέρονται διαφορετικά.



**Πίνακας 7.29:** Σύγκριση των αποτελεσμάτων των συμβατικών VPPs και των VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies – Pessimistic Stochastic Forecast

Χρονική Περίοδος	$\Delta_{DownRegPV}$ (MW)	$\Delta_{DownRegWG}$ (MW)	$\Delta_{UpRegPV}$ (MW)	$\Delta_{UpRegWG}$ (MW)
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0
13	0	0	0	0
14	0	0	0	0
15	-0.0732	0	0	0.1338
16	0	0	0	0
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
20	0	0	0	0
21	0	0	0	0
22	0	0	0	0
23	0	0	0	0.0002
24	0	0	0	0

### 7.12.2 Αποτελέσματα Εύρωστου Προγραμματισμού

Στο Σχήματα 7.47 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αγοράς εξισορρόπησης για ένα συμβατικό VPP κατά την εφαρμογή του **σεναρίου καλής πρόβλεψης των τιμών της αγοράς της επόμενης ημέρας (ΟΤΣ)**. Στο Σχήμα 7.48 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αγοράς εξισορρόπησης των VPPs που διαθέτουν εγκαταστάσεις εξόρυξης κατά την εφαρμογή του ίδιου σεναρίου. Η αρνητική ισχύς συμβολίζει κινήσεις που μειώνουν την παραγωγή των VPPs ενώ με θετική ισχύ αναπαρίστανται οι ρυθμιστικές κινήσεις που αποσκοπούν στην αύξηση της παραγωγής των VPPs. Καθώς τα αποτελέσματα των συμβατικών VPPs δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ του στοχαστικού και του εύρωστου προγραμματισμού για οικονομία χώρου θα παρουσιάζονται γραφικά μόνο τα αποτελέσματα των VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης.

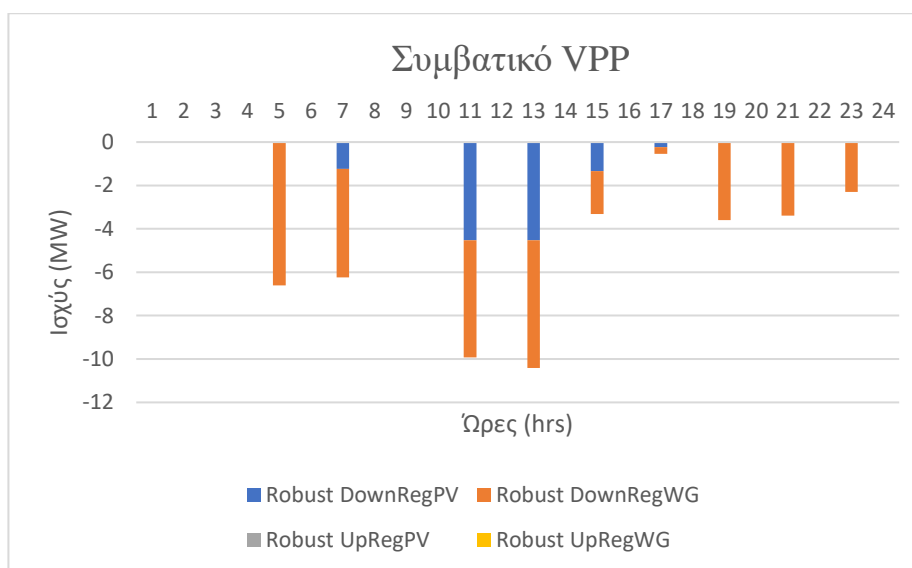
Στον Πίνακα 7.30 παρουσιάζονται τα πραγματικά κέρδη των VPPs κατά την υλοποίηση της αγοράς εξισορρόπησης για το σενάριο καλής πρόβλεψης των τιμών της αγοράς της επόμενης ημέρας. Τα υψηλότερα κέρδη παρατηρούνται στα VPPs που διαθέτουν τις καλύτερες εγκαταστάσεις εξόρυξης Ethereum, ενώ τα χαμηλότερα κέρδη εντοπίζονται στα συμβατικά VPPs.

**Πίνακας 7.30:** Κέρδη των VPPs για το σενάριο Average Price Forecast – Εύρωστος Προγραμματισμός

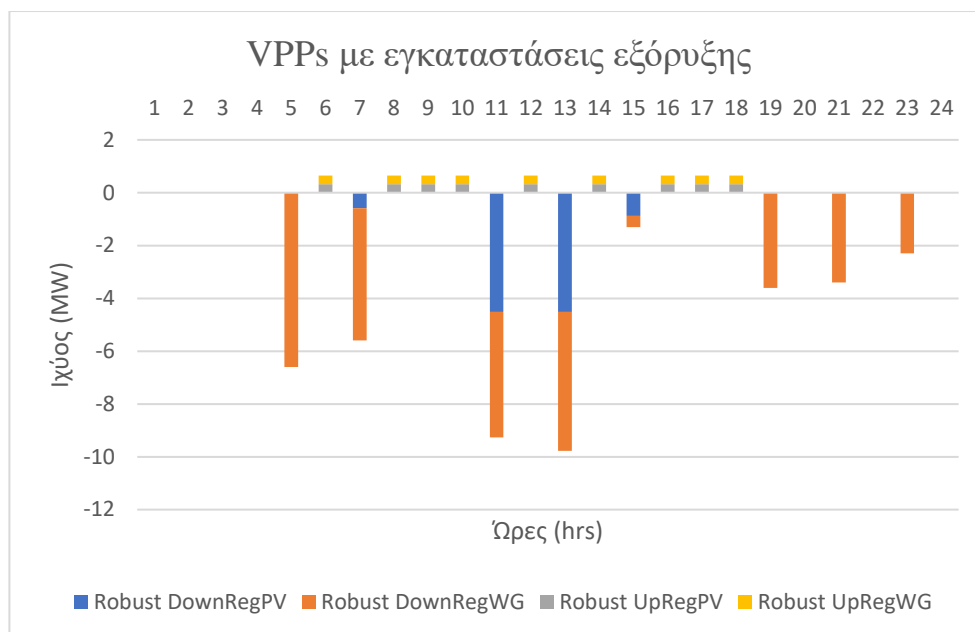
Εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrency	Έσοδα (€)
No Crypto	10140.765
BTC	13243.258
ETH*	35379.407
ETH	18197.866
DOGE	12181.435

Παρατηρώντας τα Σχήματα 7.47 και 7.48 είναι εμφανές ότι κατά τον εύρωστο προγραμματισμό τα VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης συμπεριφέρονται διαφορετικά από τα συμβατικά VPPs. Ο λόγος για τον οποίο παρατηρείται αυτή η διαφορά έγκειται στις εγκαταστάσεις εξόρυξης που δεν είναι προγραμματισμένες να βρίσκονται σε λειτουργία μεταξύ τις 06:00 και 18:00. Όπως φαίνεται, τις ώρες που υπάρχει περίσσια παραγωγή από τις ανανεώσιμες μονάδες τα VPPs εκμεταλλεύονται την περίσσια ενέργεια για την εξόρυξη cryptocurrencies. Αυτό είναι αναμενόμενο αποτέλεσμα. Παρόλα αυτά, ακόμα και τις ώρες που δεν υπάρχει περίσσια ενέργεια από τις στοχαστικές μονάδες τα VPPs οι διαχειριστές των VPPs επιλέγουν να λειτουργήσουν τις εγκαταστάσεις εξόρυξης. Για τον λόγο αυτό, τις ώρες που δεν υπάρχει ανάγκη για μείωση της παραγωγής, τα VPPs αγοράζουν ενέργεια από την αγορά εξισορρόπησης πληρώνοντας το ανάλογο πρόστιμο για να θέσουν σε λειτουργία τις μονάδες εξόρυξης.

Στον Πίνακα 7.31 παρουσιάζονται οι διαφορές μεταξύ των κινήσεων που καλούνται να υλοποιήσουν τα VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης σε σχέση με τα συμβατικά VPPs. Όπως φαίνεται, ενώ τα συμβατικά VPPs είναι υποχρεωμένα να πληρώσουν μεγαλύτερα πρόστιμα στην αγορά εξισορρόπησης, τα VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης επιλέγουν να πληρώσουν ακόμη μεγαλύτερα για την λειτουργία των εγκαταστάσεων εξόρυξης.



**Σχήμα 7.47:** Ρυθμιστικές κινήσεις ενός συμβατικού VPP για την εξισορρόπηση των δεσμεύσεων του – Average Price Forecast



**Σχήμα 7.48:** Ρυθμιστικές κινήσεις των VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης για την εξισορρόπηση των δεσμεύσεων τους – Average Price Forecast

**Πίνακας 7.31:** Σύγκριση των αποτελεσμάτων των συμβατικών VPPs και των VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies – Average Price Forecast

Χρονική Περίοδος	$\Delta_{DownRegPV}$ (MW)	$\Delta_{DownRegWG}$ (MW)	$\Delta_{UpRegPV}$ (MW)	$\Delta_{UpRegWG}$ (MW)
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0.325	0.325
7	-0.65	0	0	0
8	0	0	0.325	0.325
9	0	0	0.325	0.325
10	0	0	0.325	0.325
11	0	-0.65	0	0
12	0	0	0.325	0.325
13	0	-0.65	0	0
14	0	0	0.325	0.325
15	-0.4538	-1.5601	0	0
16	0	0	0.325	0.325
17	-0.2299	-0.3094	0.325	0.325
18	0	0	0.325	0.325
19	0	0	0	0
20	0	0	0	0
21	0	0	0	0
22	0	0	0	0
23	0	-0.0002	0	0
24	0	0	0	0

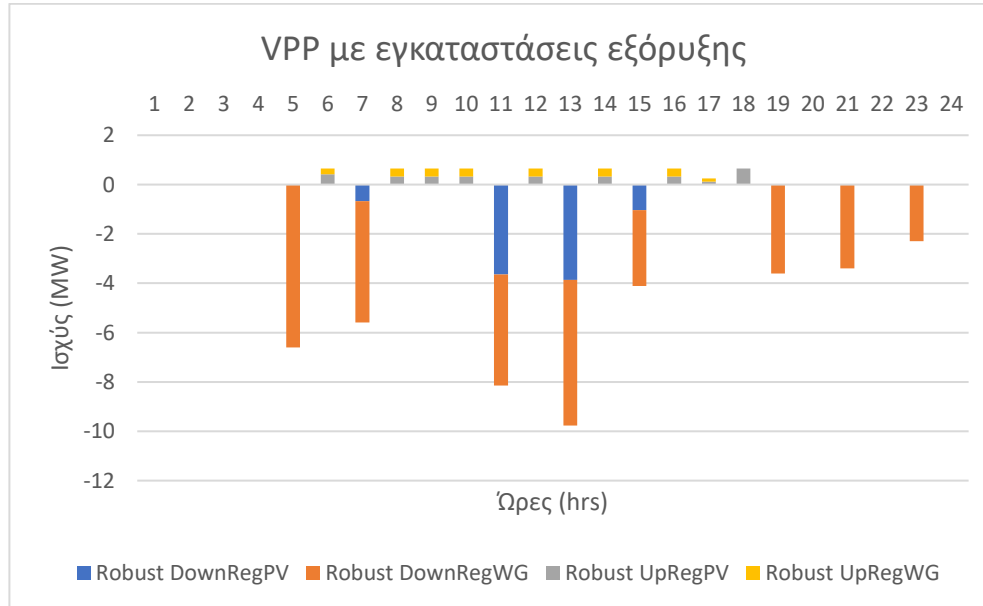
Στο Σχήματα 7.49 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αγοράς εξισορρόπησης των VPPs που διαθέτουν εγκαταστάσεις εξόρυξης κατά την εφαρμογή του **σεναρίου πολύ καλής πρόβλεψης των τιμών της αγοράς της επόμενης ημέρας (ΟΤΣ)**. Η αρνητική ισχύς συμβολίζει κινήσεις που μειώνουν την παραγωγή των VPPs ενώ με θετική ισχύς αναπαρίστανται οι ρυθμιστικές κινήσεις που αποσκοπούν στην αύξηση της παραγωγής των VPPs.

Στον Πίνακα 7.32 παρουσιάζονται τα πραγματικά κέρδη των VPPs κατά την υλοποίηση της αγοράς εξισορρόπησης για το σενάριο καλής πρόβλεψης των τιμών της αγοράς της επόμενης ημέρας. Τα υψηλότερα κέρδη παρατηρούνται στα VPPs που διαθέτουν τις καλύτερες εγκαταστάσεις εξόρυξης Ethereum, ενώ τα χαμηλότερα κέρδη εντοπίζονται στα συμβατικά VPPs.

Στον Πίνακα 7.33 παρουσιάζονται οι διαφορές μεταξύ των κινήσεων που καλούνται να υλοποιήσουν τα VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης σε σχέση με τα συμβατικά VPPs.

**Πίνακας 7.32:** Κέρδη των VPPs για το σενάριο Optimistic Price Forecast – Εύρωστος Προγραμματισμός

Εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrency	Έσοδα (€)
No Crypto	11601.251
BTC	14234.098
ETH*	36502.619
ETH	19323.346
DOGE	13341.756



**Σχήμα 7.48:** Ρυθμιστικές κινήσεις των VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης για την εξισορρόπηση των δεσμεύσεων τους – Average Price Forecast

**Πίνακας 7.33:** Σύγκριση των αποτελεσμάτων των συμβατικών VPPs και των VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies – Average Price Forecast

Χρονική Περίοδος	$\Delta_{DownRegPV}$ (MW)	$\Delta_{DownRegWG}$ (MW)	$\Delta_{UpRegPV}$ (MW)	$\Delta_{UpRegWG}$ (MW)
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0.4126	0.2374
7	-0.5624	-0.0876	0	0
8	0	0	0.325	0.325
9	0	0	0.325	0.325
10	0	0	0.325	0.325
11	-0.4784	-0.4971	0	0
12	0	0	0.325	0.325
13	-0.65	0	0	0
14	0	0	0.325	0.325
15	-0.721	-0.2549	0	0
16	0	0	0.325	0.325
17	-0.2862	-0.4418	0.124	0.124
18	0	0	0.65	0
19	0	0	0	0
20	0	0	0	0
21	0	0	0	0
22	0	0	0	0
23	0	-0.0002	0	0
24	0	0	0	0

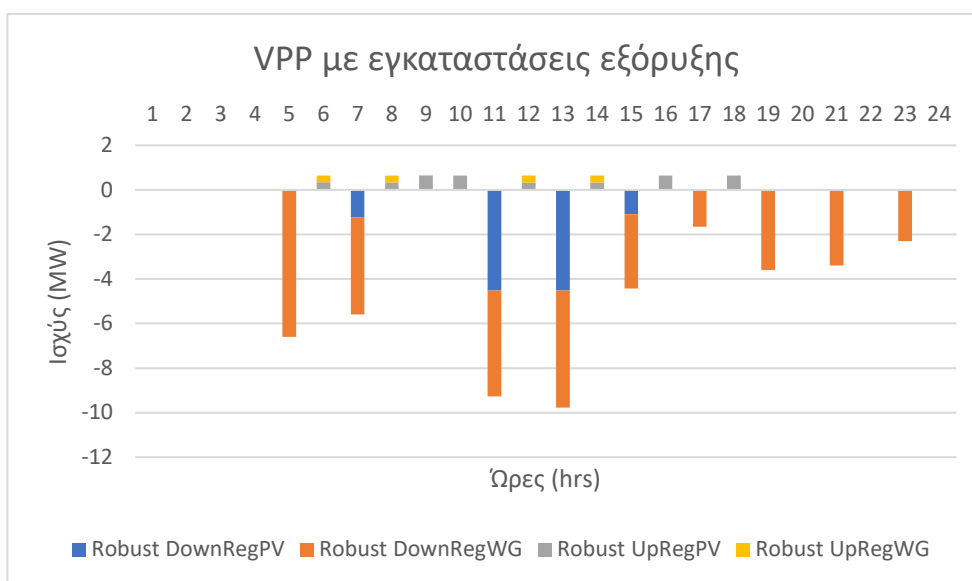
Τα αποτελέσματα του εύρωστου προγραμματισμού κατά το σενάριο πολύ καλής πρόβλεψης της ΟΤΣ είναι παρόμοια με τα αποτελέσματα του σεναρίου καλών προβλέψεων της ΟΤΣ.

Στο Σχήματα 7.49 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αγοράς εξισορρόπησης των VPPs που διαθέτουν εγκαταστάσεις εξόρυξης κατά την εφαρμογή του **σεναρίου κακής πρόβλεψης των τιμών της αγοράς της επόμενης ημέρας με τις προβλεπόμενες τιμές να είναι μικρότερες από τις πραγματικές τιμές**. Η αρνητική ισχύς συμβολίζει κινήσεις που μειώνουν την παραγωγή των VPPs ενώ με θετική ισχύος αναπαρίστανται οι ρυθμιστικές κινήσεις που αποσκοπούν στην αύξηση της παραγωγής των VPPs.

Στον Πίνακα 7.34 παρουσιάζονται τα πραγματικά κέρδη των VPPs κατά την υλοποίηση της αγοράς εξισορρόπησης για το σενάριο κακής πρόβλεψης των τιμών της αγοράς της επόμενης ημέρας. Τα υψηλότερα κέρδη παρατηρούνται και πάλι στα VPPs που διαθέτουν τις καλύτερες εγκαταστάσεις εξόρυξης Ethereum, ενώ τα χαμηλότερα κέρδη εντοπίζονται και πάλι στα συμβατικά VPPs.

**Πίνακας 7.34:** Κέρδη των VPPs για το σενάριο Pessimistic Price Forecast – Εύρωστος Προγραμματισμός

Εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrency	Έσοδα (€)
No Crypto	8543.129
BTC	11271.923
ETH*	33625.651
ETH	16446.378
DOGE	10464.788



**Σχήμα 7.49:** Ρυθμιστικές κινήσεις των VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης για την εξισορρόπηση των δεσμεύσεων τους – Pessimistic Price Forecast

Στον Πίνακα 7.35 παρουσιάζονται οι διαφορές μεταξύ των κινήσεων που καλούνται να υλοποιήσουν τα VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης σε σχέση με τα συμβατικά VPPs. Από τα αποτελέσματα προκύπτει, ότι τα VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης προτίθενται να αγοράσουν ενέργεια από την αγορά εξισορρόπησης για την εξόρυξη cryptocurrencies. Επομένως, ακόμη και κατά το σενάριο που παρατηρούνται τα χαμηλότερα κέρδη για τα VPPs οι διαχειριστές των VPPs κρίνουν ότι είναι προτιμότερο να αγοράσουν ενέργεια από την αγορά εξισορρόπησης, να πληρώσουν το πρόστιμο για αστοχίες μεταξύ των δεσμεύσεων και της παραγωγής τους και να λειτουργήσουν τις εγκαταστάσεις εξόρυξης τους σε πλήρες φορτίο.

**Πίνακας 7.35:** Σύγκριση των αποτελεσμάτων των συμβατικών VPPs και των VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies – Pessimistic Price Forecast

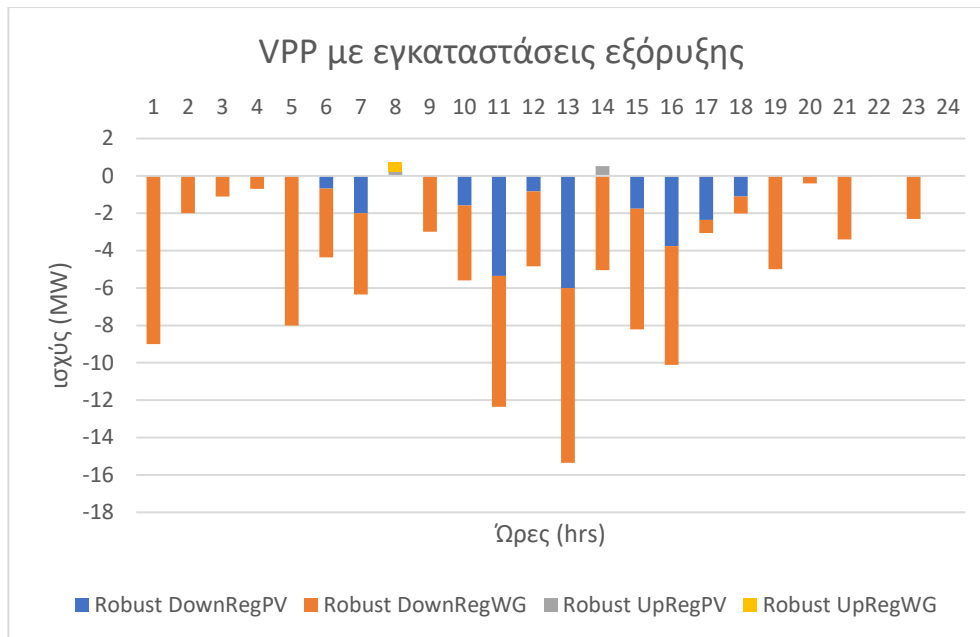
Χρονική Περίοδος	$\Delta_{DownRegPV}$ (MW)	$\Delta_{DownRegWG}$ (MW)	$\Delta_{UpRegPV}$ (MW)	$\Delta_{UpRegWG}$ (MW)
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0.3494	0.3006
7	0	-0.65	0	0
8	0	0	0.325	0.325
9	0	0	0.6468	0.0032
10	0	0	0.65	0
11	0	-0.65	0	-0.5
12	0	0	0.325	0.325
13	0	-0.65	0	-0.5
14	0	0	0.325	0.325
15	-0.7209	-0.2533	0	0
16	0	0	0.65	0
17	-0.4721	-0.5023	0	0
18	0	0	0.65	-0.8003
19	0	0	0	0
20	0	0	0	0
21	0	0	0	0
22	0	0	0	0
23	0	-0.0002	0	0
24	0	0	0	0

Στο Σχήματα 7.50 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αγοράς εξισορρόπησης των VPPs που διαθέτουν εγκαταστάσεις εξόρυξης κατά την εφαρμογή του **σεναρίου κακής πρόβλεψης της στοχαστικής παραγωγής των VPPs με την πρόβλεψη να είναι υψηλότερη από την πραγματική παραγωγή τους**. Η αρνητική ισχύς συμβολίζει κινήσεις που μειώνουν την παραγωγή των VPPs ενώ με θετική ισχύς αναπαρίστανται οι ρυθμιστικές κινήσεις που αποσκοπούν στην αύξηση της παραγωγής των VPPs.

Στον Πίνακα 7.36 παρουσιάζονται τα πραγματικά κέρδη των VPPs κατά την υλοποίηση της αγοράς εξισορρόπησης για το σενάριο κακής πρόβλεψης των τιμών της αγοράς της επόμενης ημέρας. Τα υψηλότερα κέρδη παρατηρούνται και πάλι στα VPPs που διαθέτουν τις καλύτερες εγκαταστάσεις εξόρυξης Ethereum, ενώ τα χαμηλότερα κέρδη εντοπίζονται και πάλι στα συμβατικά VPPs.

**Πίνακας 7.36:** Κέρδη των VPPs για το σενάριο Optimistic Stochastic Forecast – Εύρωστος Προγραμματισμός

Εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrency	Έσοδα (€)
No Crypto	9433.156
BTC	12579.556
ETH*	34679.067
ETH	17600.657
DOGE	11586.048



**Σχήμα 7.50:** Ρυθμιστικές κινήσεις των VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης για την εξισορρόπηση των δεσμεύσεων τους – Optimistic Stochastic Forecast

**Πίνακας 7.37:** Σύγκριση των αποτελεσμάτων των συμβατικών VPPs και των VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies – Pessimistic Price Forecast

Χρονική Περίοδος	$\Delta_{DownRegPV}$ (MW)	$\Delta_{DownRegWG}$ (MW)	$\Delta_{UpRegPV}$ (MW)	$\Delta_{UpRegWG}$ (MW)
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	-0.332	-0.318	0	0
7	0	-0.65	0	0
8	0	0	0.255	0.395
9	-0.24	-0.41	0	0
10	-0.65	0	0	0
11	-0.65	0	0	0
12	-0.65	0	0	0
13	0	-0.65	0	0
14	0	-0.65	0	0
15	-1.1038	-0.9101	0	0
16	0	-0.65	0	0
17	-0.8799	-0.3094	0	0
18	-0.65	0	0	0
19	0	0	0	0
20	0	0	0	0
21	0	0	0	0
22	0	0	0	0
23	0	-0.0002	0	0
24	0	0	0	0

Στον Πίνακα 7.37 παρουσιάζονται οι διαφορές μεταξύ των κινήσεων που καλούνται να υλοποιήσουν τα VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης σε σχέση με τα συμβατικά VPPs. Από τα



αποτελέσματα προκύπτει, ότι τα VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης δεν χρειάζεται να κάνουν όσες κινήσεις απαιτούνται για την εξισορρόπηση των συμβατικών VPPs.

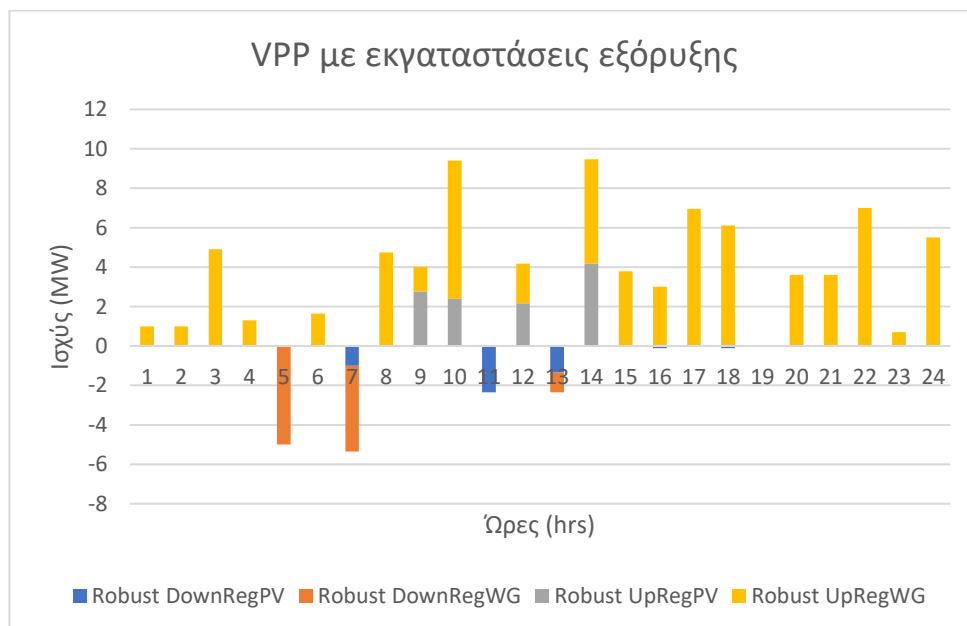
Στο Σχήματα 7.51 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αγοράς εξισορρόπησης των VPPs που διαθέτουν εγκαταστάσεις εξόρυξης κατά την εφαρμογή του **σεναρίου κακής πρόβλεψης της στοχαστικής παραγωγής των VPPs με την πρόβλεψη να είναι χαμηλότερη από την πραγματική παραγωγή τους**. Η αρνητική ισχύς συμβολίζει κινήσεις που μειώνουν την παραγωγή των VPPs ενώ με θετική ισχύ αναπαρίστανται οι ρυθμιστικές κινήσεις που αποσκοπούν στην αύξηση της παραγωγής των VPPs.

Στον Πίνακα 7.38 παρουσιάζονται τα πραγματικά κέρδη των VPPs κατά την υλοποίηση της αγοράς εξισορρόπησης για το σενάριο κακής πρόβλεψης των τιμών της αγοράς της επόμενης ημέρας. Όπως και στα προηγούμενα σενάρια τα υψηλότερα κέρδη παρατηρούνται στα VPPs που διαθέτουν τις καλύτερες εγκαταστάσεις εξόρυξης Ethereum, ενώ τα χαμηλότερα κέρδη εντοπίζονται και πάλι στα συμβατικά VPPs.

Στον Πίνακα 7.39 παρουσιάζονται οι διαφορές μεταξύ των κινήσεων που καλούνται να υλοποιήσουν τα VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης σε σχέση με τα συμβατικά VPPs.

**Πίνακας 7.38:** Κέρδη των VPPs για το σενάριο Optimistic Stochastic Forecast – Εύρωστος Προγραμματισμός

Εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrency	Έσοδα (€)
No Crypto	9696.074
BTC	12894.825
ETH*	35987.673
ETH	16906.132
DOGE	11889.701



**Σχήμα 7.51:** Ρυθμιστικές κινήσεις των VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης για την εξισορρόπηση των δεσμεύσεων τους – Pessimistic Stochastic Forecast

**Πίνακας 7.39:** Σύγκριση των αποτελεσμάτων των συμβατικών VPPs και των VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies – Pessimistic Price Forecast

Χρονική Περίοδος	$\Delta_{DownRegPV}$ (MW)	$\Delta_{DownRegWG}$ (MW)	$\Delta_{UpRegPV}$ (MW)	$\Delta_{UpRegWG}$ (MW)
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0.65
7	0	-0.65	0	0
8	0	0	0	0.65
9	0	0	0	0.65
10	0	0	0.65	0
11	-0.65	0	0	0
12	0	0	0.65	0
13	-0.65	0	0	0
14	0	0	0.65	0
15	-0.8527	0	0	1.1612
16	-0.65	0	0	0
17	-0.2299	0	0	0.9594
18	-0.65	0	0	0
19	0	0	0	0
20	0	0	0	0
21	0	0	0	0
22	0	0	0	0
23	0	0	0	0.0002
24	0	0	0	0

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα, συμπεραίνεται ότι τα VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies ανεξαρτήτως σεναρίου επιλέγουν να θέσουν σε λειτουργία τις εγκαταστάσεις εξόρυξης ακόμα και τις χρονικές περιόδους που καλούνται να πληρώσουν πρόστιμα στην αγορά εξισορρόπησης.

### 7.12.3. Σύγκριση και Συμπεράσματα

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της αγοράς εξισορρόπησης προκύπτει ότι, ανεξάρτητα της μεθόδου προγραμματισμού, τα VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies απολαμβάνουν πολύ υψηλότερα κέρδη από τα συμβατικά VPPs. Επιπλέον, η μέθοδος εύρωστου προγραμματισμού οδηγεί σε υψηλότερα κέρδη στα VPPs που διαθέτουν εγκαταστάσεις εξόρυξης ενώ η μέθοδος στοχαστικού προγραμματισμού οδηγεί σε υψηλότερα κέρδη στα συμβατικά VPPs. Στον Πίνακα 7.40 παρουσιάζεται η ποσοστιαία διαφορά των κερδών μεταξύ του στοχαστικού προγραμματισμού και του εύρωστου προγραμματισμού. Όπως φαίνεται, ο στοχαστικός προγραμματισμός αποφέρει υψηλότερα κέρδη στα συμβατικά VPPs ανεξαρτήτως σεναρίου ενώ ο εύρωστος προγραμματισμός προσφέρει υψηλότερα κέρδη στα VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης.

**Πίνακας 7.40:** Ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των κερδών του στοχαστικού προγραμματισμού και του εύρωστου προγραμματισμού

Εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrency	Σενάριο				
	Average Price Forecast	Optimistic Price Forecast	Pessimistic Price Forecast	Pessimistic Stochastic Forecast	Optimistic Stochastic Forecast
No Crypto	-3.777%	-0.146%	-2.218%	-3.837%	-4.245%
BTC	0.859%	3.824%	4.095%	5.807%	5.241%
ETH*	0.104%	1.457%	1.597%	3.123%	3.017%
ETH	2.690%	2.788%	3.321%	3.869%	3.276%
Dogecoin	3.764%	4.090%	5.320%	5.267%	4.749%

Με βάση τα αποτελέσματα εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

Αρχικά, τα VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης έχουν υψηλότερα κέρδη ανεξάρτητα από το σενάριο που εξετάζεται. Η χρήση του εύρωστου προγραμματισμού είναι προτιμότερη στα VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης ενώ η χρήση του στοχαστικού προγραμματισμού είναι προτιμότερη στα συμβατικά VPPs. Τα έσοδα από την εξόρυξη cryptocurrencies είναι μεγαλύτερα από τα πρόστιμα της αγοράς εξισορρόπησης με αποτέλεσμα οι διαχειριστές των VPPs να αποκλείουν από τις δεσμεύσεις τους συνειδητά για την μεγιστοποίηση των κερδών των VPPs. Τέλος, οι εγκαταστάσεις εξόρυξης βρίσκονται πάντα σε λειτουργία σε μέγιστο φορτίο ανεξαρτήτως του σεναρίου και του cryptocurrency που εξορύσσετε.

### 7.13 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΕΞΟΡΥΞΗΣ ΣΤΑ VPPS

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η αξιολόγηση των επενδύσεων εγκαταστάσεων εξόρυξης των VPPs. Ο στόχος της ενότητας είναι να προσδιορίσει το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την αποπληρωμή των επενδύσεων των εγκαταστάσεων εξόρυξης καθώς και να προσδιορίσει το χρονικό διάστημα κατά το οποίο η εξόρυξη cryptocurrencies είναι κερδοφόρα.

Κατά την αξιολόγηση των επενδύσεων χρησιμοποιούνται οι εξής υποθέσεις:

- Η δυσκολία εξόρυξης cryptocurrencies διπλασιάζεται αν έτος
- Η αξία των cryptocurrencies παραμένει σταθερή
- Η αξία μεταπώλησης των μηχανημάτων εξόρυξης ισούται με το 30% της αρχικής τους τιμής

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η παραπάνω αξιολόγησή δεν προσφέρει μεγάλη ακρίβεια καθώς η δυσκολία εξόρυξης και η τιμή των νομισμάτων είναι συσχετιζόμενα μεγέθη. Παρόλα αυτά, ακόμα και με τον παραπάνω μη ακριβή υπολογισμό μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την χρήση εγκαταστάσεων εξόρυξης cryptocurrencies στα VPPs.

Στον Πίνακα 7.41 παρουσιάζονται τα ωριαία έσοδα των εγκαταστάσεων εξόρυξης cryptocurrencies ανά έτος καθώς και ένα πρόστιμο της αγοράς εξισορρόπησης που ισούται με το 30% τη ΟΤΣ. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το πρόστιμο αυτό είναι σημαντικά υψηλότερο από τα πρόστιμα που συναντώνται σε τυπικές αγορές ενέργειας. Τέλος, στον πίνακα παρουσιάζεται και η

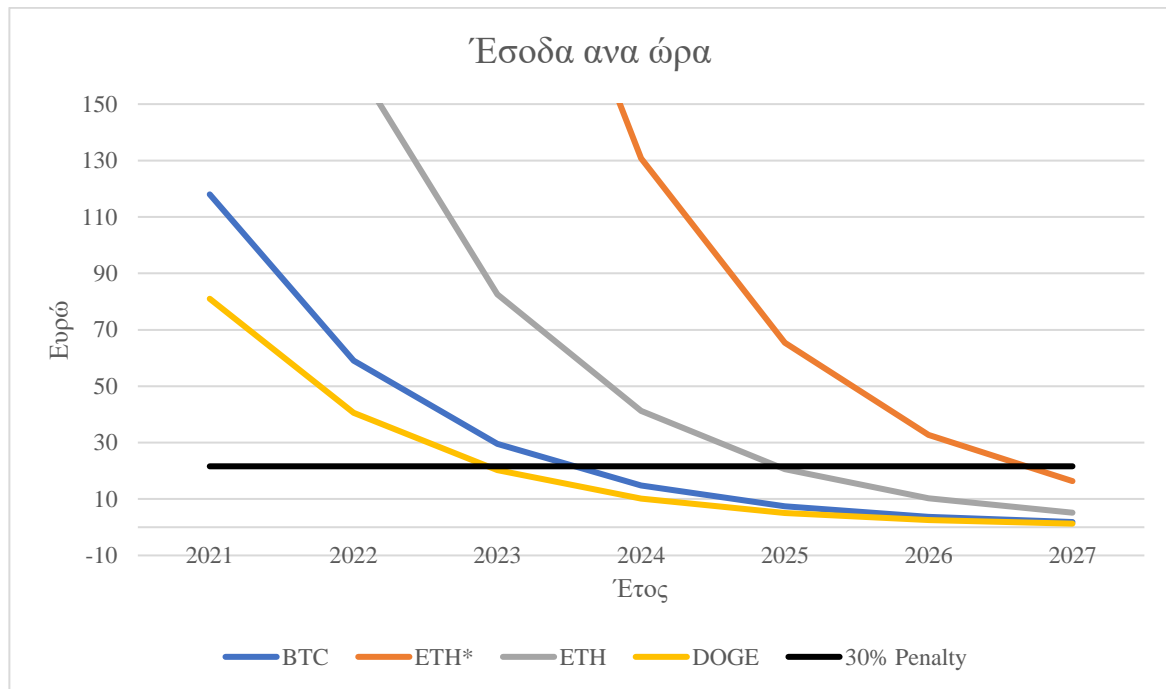
χρονική στιγμή αποκλήρωσης των επενδύσεων. Η αναπαράσταση της χρονικής στιγμής που αποπληρώνονται οι επενδύσεις γίνεται με χρήση του σύμβολου (\*).

Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 7.52.

**Πίνακας 7.41:** Ωριαία έσοδα εξόρυξης αν έτος

Year	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
BTC	118	59 *	29.5	14.75	7.375	3.6875	1.84375
ETH*	1046	523 *	262	130.8	65.38	32.688	16.3438
ETH	330 *	165	82.5	41.25	20.63	10.313	5.15625
DOGE	81	40.5 *	20.3	10.13	5.063	2.5313	1.26563
30% Penalty	21.6	21.6	21.6	21.6	21.6	21.6	21.6

\* 1ο τετράμηνο, \*\* 2ο τετράμηνο, \*\*\* 3ο τετράμηνο, \*\*\*\* 4ο τετράμηνο



**Σχήμα 7.52:** Ωριαία έσοδα εξόρυξης cryptocurrencies ανά έτος

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η εξόρυξη cryptocurrencies αποτελεί μια καλή επένδυση για τα VPPs. Συγκεκριμένα, από το Σχήμα 7.52 φαίνεται ότι η εξόρυξη οποιουδήποτε cryptocurrency υπό εξέταση είναι κερδοφόρα μέχρι το έτος 2023. Επιπλέον, η εξόρυξη με χρήση των καλύτερων εγκαταστάσεων Ethereum μπορεί να επιφέρει κέρδη έως τα τέλη του έτους 2026. Επιπρόσθετα, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 7.41 όλες οι εγκαταστάσεις εξόρυξης αποπληρώνουν το κόστος της επενδύσεως τους πριν την χρονική στιγμή όπου η εξόρυξη τους παύει να είναι κερδοφόρα.



## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

### 8.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η επίδραση που έχει η εισαγωγή εγκαταστάσεων εξόρυξης cryptocurrencies στην λειτουργία των VPPs. Συγκεκριμένα, εξεταστήκαν οι επιπτώσεις των εγκαταστάσεων εξόρυξης στην κερδοφορία των VPPs και μελετήθηκε εάν οι εγκαταστάσεις εξόρυξης μπορούν να δράσουν ως ελεγχόμενα φορτία βοηθώντας στην εξισορρόπηση των δεσμεύσεων των VPPs.

Για την απάντηση των παραπάνω ερωτημάτων και την μελέτη των επιπτώσεων που έχει η εισαγωγή εγκαταστάσεων εξόρυξης στα VPPs μοντελοποιήθηκαν τρεις προσομοιώσεις. Αρχικά, μοντελοποιήθηκε ο προγραμματισμός των VPPs στην αγορά της επόμενης ημέρας με χρήση δύο μεθόδων: του στοχαστικού προγραμματισμού και του εύρωστου προγραμματισμού. Σε επόμενο βήμα μοντελοποιήθηκαν και προσεγγίστηκαν γραμμικά τρία δίκτυα μεταφοράς με 14 ζυγούς, 30 ζυγούς και 500 ζυγούς τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την εκκαθάριση της προσφοράς των VPPs. Από τα τρία δίκτυα που μοντελοποιήθηκαν, το δίκτυο των 30 ζυγών προσέφερε τα καλύτερα αποτελέσματα και ως εκ τούτου επιλέχθηκε για την εκκαθάριση της αγοράς. Τέλος, μοντελοποιήθηκε η αγορά εξισορρόπησης κατά την οποία προσδιοριζόταν το συνολικό κέρδος των VPPs καθώς οι κινήσεις τους στην αγορά εξισορρόπησης.

Στην διπλωματική εργασία εξετάστηκαν 5 διαφορετικά σενάρια. Η επιλογή των σεναρίων έγινε με σκοπό να μελετηθεί πως αλλαγές στις στοχαστικές μεταβλητές του προβλήματος, δηλαδή των ΑΠΕ των VPPs καθώς και των προβλέψεων της ΟΤΣ, επηρεάζουν την λειτουργία και κερδοφορία των VPPs.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα αποτελέσματα καθώς και τα συμπεράσματα που εξάγονται από την διπλωματική εργασία εξαρτώνται από τις υποθέσεις και παραδοχές που χρησιμοποιήθηκαν στην μοντελοποίηση του προβλήματος. Αυτό, δεν μειώνει την αξία της μελέτης που έγινε στην παρούσα διπλωματική αλλά επισημαίνει την ανάγκη για περαιτέρω αναζήτηση.

### 8.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις της λειτουργίας των VPPs στην αγορά ενέργειας. Τα κυριότερα συμπεράσματα είναι τα εξής:

Αρχικά, η καλύτερη μέθοδος προγραμματισμού των συμβατικών VPPs είναι ο στοχαστικός προγραμματισμός. Ο λόγος για τον οποίο ο στοχαστικός προγραμματισμός προσφέρει υψηλότερα κέρδη έναντι του εύρωστου προγραμματισμού στα συμβατικά VPPs έγκειται στον τρόπο εκκαθάρισης της αγοράς εξισορρόπησης και συγκεκριμένα στις ομάδες εξισορρόπησης που χρησιμοποιήθηκαν.

Καθώς οι στοχαστικές μονάδες των VPPs εξισορροπούνται σε διαφορετικές ομάδες από τις μπαταρίες και τις μονάδες παραγωγής δεν είναι δυνατή η εξισορρόπηση των ΑΠΕ χωρίς την συμμετοχή των VPPs στην αγορά εξισορρόπησης. Επομένως, όταν η παραγωγή των στοχαστικών μονάδων αποκλίνει από την προβλεπόμενη παραγωγή τους, τα συμβατικά VPPs καλούνται να πληρώσουν ένα πρόστιμο ανάλογο της απόκλισης στην αγορά εξισορρόπησης.

Αντίθετα, στα VPPs που διαθέτουν εγκαταστάσεις εξόρυξης cryptocurrencies προτιμάται ο εύρωστος προγραμματισμός ο οποίος προσφέρει υψηλότερα κέρδη σε όλα τα σενάρια που εξετάστηκαν. Σε αντίθεση με τα συμβατικά VPPs, τα VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης επιτρέπουν την εξισορρόπηση πιθανών αποκλίσεων στις δεσμεύσεις των VPPs. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν την υπόθεση της διπλωματική εργασίας ότι οι εγκαταστάσεις εξόρυξης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ελεγχόμενα φορτία. Επιπλέον, προκύπτει ότι ανεξαρτήτως των cryptocurrency που εξορύσσονται τα έσοδα των VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης είναι σημαντικά υψηλότερα από τα έσοδα των συμβατικών VPPs.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της λειτουργίας των εγκαταστάσεων εξόρυξης που βρίσκονται σε πλήρες λειτουργία ανεξαρτήτως του σεναρίου, της εγκατάστασης και των cryptocurrencies που εξορύσσονται. Η λειτουργία των εγκαταστάσεων σε πλήρες φορτίο υποδηλώνει ότι τα έσοδα των εγκαταστάσεων εξόρυξης είναι υψηλότερα από τα πρόστιμα της αγοράς εξισορρόπησης. Επομένως, τα θεσμοθετημένα πρόστιμα που έχουν ως στόχο να κρατάνε τους συμμετέχοντες της αγοράς ενέργειας εντός των δεσμεύσεων τους παύουν να επιτελούν τον σκοπό τους. Για λόγους πληρότητας είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι παρόλο που οι διαχειριστές των VPPs θα μπορούσαν να αγνοήσουν τα πρόστιμα της αγοράς εξισορρόπησης ως προς τις οικονομικές τους συνέπειες στην πράξη, δεν θα ήταν εφικτό καθώς συνεχόμενες παραβιάσεις των δεσμεύσεων μπορεί να οδηγήσει στην αφαίρεση της άδειας των διαχειριστών. Παρόλα αυτά, η αδυναμία της αγοράς ενέργειας να συνενώσει τους διαχειριστές των VPPs που διαθέτουν εγκαταστάσεις εξόρυξης παραμένει να είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς οι διαχειριστές των VPPs μπορούν να εκμεταλλεύονται περιστασιακά αυτή την αδυναμία της αγοράς προς όφελος τους.

Συνοψίζοντας, τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας είναι τα εξής:

- Ο στοχαστικός προγραμματισμός προσέφερε καλύτερα αποτελέσματα για τα συμβατικά VPPs ενώ ο εύρωστος προγραμματισμός προσέφερε καλύτερα αποτελέσματα για τα VPPs που διαθέτουν εγκαταστάσεις εξόρυξης
- Αστοχίες στις προβλέψεις της ΟΤΣ επηρεάζουν περισσότερο την κερδοφορία των VPPs από ότι οι αστοχίες της πρόβλεψης των στοχαστικών μονάδων
- Η εισαγωγή εγκαταστάσεων εξόρυξης στα VPPs αυξάνει σημαντικά την κερδοφορία τους
- Οι εγκαταστάσεις εξόρυξης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ελεγχόμενα φορτία για την εξισορρόπηση μέρους της παραγωγής και της κατανάλωσης των VPPs
- Οι επενδύσεις για την κατασκευή εγκαταστάσεων εξόρυξης είναι κερδοφόρες και αποπληρώνουν το αρχικό κεφάλαιο τους σε σύντομο χρονικό διάστημα
- Οι τρέχον ελεγκτικοί μηχανισμοί της αγοράς ενέργειας, όπως η επιβολή προστίμων στην αγορά εξισορρόπησης, δεν μπορούν να εξασφαλίσουν ότι οι διαχειριστές των



VPPs με εγκαταστάσεις εξόρυξης δεν θα παραβιάζουν περιστασιακά τις δεσμεύσεις των μονάδων τους στην αγορά εξισορρόπησης

### 8.3 ΠΙΘΑΝΕΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία μπορεί μελλοντικά να επεκταθεί ως ακολούθως:

- Εμβάθυνση στην μοντελοποίηση των εγκαταστάσεων εξόρυξης με την εισαγωγή περισσότερων παραμέτρων που επηρεάζουν την διαδικασία εξόρυξης cryptocurrencies όπως το κόστος ψύξης των μηχανημάτων και της δυσκολίας εξόρυξης. Με αυτό τον τρόπο θα μπορεί να εξεταστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η βραχυπρόθεσμη αλλά και η μακροχρόνια λειτουργία των εγκαταστάσεων εξόρυξης. Ως αποτέλεσμα, η αξιολόγηση των επενδύσεων θα προσφέρει πιο ακριβή αποτελέσματα.
- Εισαγωγή σφαλμάτων στις μονάδες των VPPs καθώς και τις μονάδες του δικτύου. Με την εισαγωγή σφαλμάτων θα μπορεί να εξεταστεί η ανταπόκριση των VPPs σε απρόσμενες αλλαγές της προσφοράς και της ζήτησης του δικτύου που πιθανός να επηρεάζουν την παραγωγή και την κατανάλωση των VPPs.
- Εισαγωγή σφαλμάτων στις γραμμές μεταφοράς. Ομοίως με την εισαγωγή σφαλμάτων στις μονάδες παραγωγής, σφάλματα στις γραμμές μεταφοράς θα προσφέρουν μια καλύτερη εικόνα για την λειτουργία των VPPs όταν οι διαχειριστές τους καλούνται να κάνουν γρήγορες αλλαγές στην παραγωγή και στην κατανάλωση τους.
- Αναζήτηση του βέλτιστου προγραμματισμού των VPPs που διαθέτουν εγκαταστάσεις εξόρυξης. Πατώντας στα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής, αυτή η επέκταση θα προσφέρει νέες πληροφορίες σχετικά με την βέλτιστη εκμετάλλευση των εγκαταστάσεων εξόρυξης cryptocurrencies από τα VPPs.



**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] I. Αβραμίδης, “Διαχείριση της Ζήτησης για την Αντιμετώπιση των Επιπτώσεων των Τεχνολογιών Χαμηλών Εκπομπών Άνθρακα Στα Δίκτυα Χαμηλής Τάσης,” Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2017.
- [2] K. Βουρνάς και Γ. Κονταξής, Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία, 2010.
- [3] K. Ruby, “Decarbonization pathways European power sector,” 2020. [Online]. Available: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Events/2020/Mar/LTES/session-1/4\\_kristian-ruby.pdf?la=en&hash=C32AAB52594F3B56BA63B88B85A73FA5C1B5E2B4](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Events/2020/Mar/LTES/session-1/4_kristian-ruby.pdf?la=en&hash=C32AAB52594F3B56BA63B88B85A73FA5C1B5E2B4), προσπελάστηκε στις 27/5/2021.
- [4] D. Paolo et al., “How the European Union could achieve net-zero emissions at net-zero cost,” 2020. [Online]. Available: <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/how-the-european-union-could-achieve-net-zero-emissions-at-net-zero-cost>.
- [5] I.-I. Avramidis, F. Capitanescu, and G. Deconinck, “A Comprehensive Multi-Period Optimal Power Flow Framework for Smart LV Networks,” IEEE Trans. Power Syst., 2020.
- [6] A. Garcia, L. Mili, and J. Momoh, “Modeling Electricity Markets: A Brief Introduction,” Econ. Mark. Des. Plan. Electr. Power Syst., pp. 21–44, 2009, doi: 10.1002/9780470529164.ch2.
- [7] J. Morales, A. Conejo, H. Madsen, P. Pinson, and M. Zugno, Integrating Renewables in Electricity Markets - Operational Problems. New York Heidelberg Dordrecht London: Springer, 2014.
- [8] M. Khandelwal, P. Mathuria, and R. Bhakar, “Profit Based Self Scheduling of Virtual Power Plant under Multiple Locational Marginal Prices,” 2018 20th Natl. Power Syst. Conf. NPSC 2018, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/NPSC.2018.8771827.
- [9] S. Nakamoto, “Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System,” 2009.
- [10] H. Nezamabadi, P. Nezamabadi, M. Setayeshnazar, and G. B. Gharehpetian, “Participation of virtual power plants in energy market with optimal bidding based on Nash-SFE Equilibrium Strategy and considering interruptible load,” 2011 Proc. 3rd Conf. Therm. Power Plants, CTPP 2011, pp. 3–8, 2011.
- [11] B. Behi, A. Baniasadi, A. Arefi, A. Gorjy, P. Jennings, and A. Pivrikas, “Cost-benefit analysis of a virtual power plant including solar PV, flow battery, heat pump, and demand management: A Western Australian case study,” Energies, vol. 13, no. 10, pp. 1–23, 2020, doi: 10.3390/en13102614.
- [12] H. Wu, X. Liu, B. Ye, and B. Xu, “Optimal dispatch and bidding strategy of a virtual power

- plant based on a stackelberg game,” IET Gener. Transm. Distrib., vol. 14, no. 4, pp. 552–563, 2020, doi: 10.1049/iet-gtd.2019.0493.
- [13] T. Geng, L. Xiang, M. Ding, and F. Li, “A Bidding Model for a Virtual Power Plant via Robust Optimization Approach,” MATEC Web Conf., vol. 95, 2017, doi: 10.1051/mateconf/20179515001.
- [14] D. Yang, S. He, M. Wang, and H. Pandzic, “Bidding Strategy for Virtual Power Plant Considering the Large-Scale Integrations of Electric Vehicles,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 56, no. 5, pp. 5890–5900, 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.2993532.
- [15] Κ. Βουρνάς, Κ. Παπαδιάς, και Κ. Ντελκης, Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας Έλεγχος και Ευστάθεια Συστήματος. Αθήνα: Συμμετρια, 2011.
- [16] Π. Μπίσκακας, “Μοντέλο Βέλτιστης Ροής Φορτίου σε MILP Μορφή για Δίκτυα Διανομής,” Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2019.
- [17] Ν. Βοβός και Γ. Γιαννακόπουλος, Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας. Θεσσαλονίκη, 2008.
- [18] “ΡΑΕ - Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας,” 2021. [Online]. Available: <https://www.rae.gr>, προσπελάστηκε στις 22/5/2021.
- [19] “ΑΔΜΗΕ: Το Ευρωπαϊκό Μοντέλο Στόχος.” [Online]. Available: <https://www.admie.gr/agora/genika/perigrafia>, προσπελάστηκε στις 22/5/2021.
- [20] J. Jeriha et al., “National balancing and wholesale electricity market’s structure and principles Document,” 2019. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5c3ad0922&appId=PPGMS>, προσπελάστηκε στις 22/5/2021.
- [21] “Καθορισμός Ζωνικών / Συστημικών αναγκών Ισχύος Εξισορρόπησης,” 2020. [Online]. Available: [https://www.admie.gr/sites/default/files/users/dda/KAΕ/ΜΕΘ\\_Ζωνικές-Συστημικές\\_Ανάγκες\\_v1.pdf](https://www.admie.gr/sites/default/files/users/dda/KAΕ/ΜΕΘ_Ζωνικές-Συστημικές_Ανάγκες_v1.pdf), προσπελάστηκε στις 22/5/2021.
- [22] Α. Καρακούσης, “Μετάβαση Στο Ευφυές Ηλεκτρικό Δίκτυο και Ανάπτυξη του Ευφυούς Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας,” Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2015.
- [23] A. Kiss, P. Kaderjak, A. Istvan, A. Mezosi, and P. Szolnoki, “Introduction to Electricity Markets,” ERRANET, 2008. [Online]. Available: <https://erranet.org/download/textbook-introduction-electricity-markets/>, προσπελάστηκε στις 20/4/2021.
- [24] “Energy statistics - an overview,” Eurostat Statistics Explained, 2022. [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy\\_statistics\\_-\\_an\\_overview#Primary\\_energy\\_production](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview#Primary_energy_production), προσπελάστηκε στις 22/5/2021.
- [25] Γ. Δράκος, “Ανάπτυξη αλγορίθμου ενεργειακής διαχείρισης στόλου ηλεκτρικών οχημάτων στα πλαίσια λειτουργίας ενός εικονικού σταθμού παραγωγής,” Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2016.

- [26] Β. . Παπαδιάς, *Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Τόμος 1 , Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας, Εκδόσεις Ε. Αθήνα, 1985.
- [27] G. C. Lazaroiu, V. Dumbrava, M. Roscia, and D. Zaninelli, “Energy trading optimization of a virtual power plant on electricity market,” 2015 9th Int. Symp. Adv. Top. Electr. Eng. ATEE 2015, pp. 911–916, 2015, doi: 10.1109/ATEE.2015.7133932.
- [28] D. Chunfa, A. Xin, W. Shuai, L. Yiran, and L. Le, “A Study on Short-term Trading and Optimal Operation Strategy for Virtual Power Plant,” 5th Int. Conf. Electr. Util. Deregul. Restruct. Power Technol., 2015.
- [29] F. El Zahraa Magdy, D. K. Ibrahim, and W. Sabry, “Energy management of virtual power plants dependent on electro-economical model,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 11, no. 3, pp. 643–649, 2019, doi: 10.1016/j.asej.2019.11.010.
- [30] Ν. Μαγούλα, “Στοχαστικός (Γραμμικός) Προγραμματισμός,” Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2010.
- [31] “In Brief: InfoSpace Buys eCash Technologies | American Banker,” 01-Mar-2002. [Online]. Available: <https://www.americanbanker.com/news/in-brief-infospace-buys-ecash-technologies>, προσπελάστηκε στις 21/5/2021.
- [32] A. Herting and O. Leech, “What Does Hashrate Mean? - CoinDesk,” 05-Feb-2021. [Online]. Available: <https://www.coindesk.com/what-does-hashrate-mean>, προσπελάστηκε στις 21/5/2021.
- [33] “Bitcoin’s Price History.” [Online]. Available: <https://www.investopedia.com/articles/forex/121815/bitcoins-price-history.asp>, προσπελάστηκε στις 20/5/2021.
- [34] “Bitcoin Price | BTC Price Index and Live Chart — CoinDesk 20.” [Online]. Available: <https://www.coindesk.com/price/bitcoin>, προσπελάστηκε στις 20/5/2021.
- [35] A. Hayes, “What Happens to Bitcoin After All 21 million Are Mined?,” Investopedia, 28-Feb-2021. [Online]. Available: <https://www.investopedia.com/tech/what-happens-bitcoin-after-21-million-mined/>, προσπελάστηκε στις 20/5/2021.
- [36] J. Tuwiner, “5 Best Bitcoin Mining Hardware ASIC Machines (2021 Rigs),” 23-Apr-2021. [Online]. Available: <https://www.buybitcoinworldwide.com/mining/hardware/>, προσπελάστηκε στις 21/5/2021.
- [37] S. Tual, “Ethereum Launches | Ethereum Foundation Blog,” 30-Jul-2015. [Online]. Available: <https://blog.ethereum.org/2015/07/30/ethereum-launches/>, προσπελάστηκε στις 21/5/ 2021.
- [38] B. Marr, “Blockchain: A Very Short History of Ethereum Everyone Should Read,” 02-Feb-2018. [Online]. Available: <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2018/02/02/blockchain-a-very-short-history-of-ethereum-everyone-should-read/>, προσπελάστηκε στις 21/5/2021.
- [39] C. Kim, “Ethereum 2.0: how it works and why it matters,” 2020. [Online]. Available: <https://www.coindesk.com/wp-content/uploads/2020/07/ETH-2.0-072120.pdf>, προσπελάστηκε στις 06/6/2021.
- [40] “INNOSILICON.” [Online]. Available: <https://www.innosilicon.com/html/a10prominer/index.html>, προσπελάστηκε στις 20/5/2021].

- [41] H. Prendergast, J. Licata, and M. Inamullah, “The real cost of mining Ethereum | VentureBeat,” 25-Feb-2018. [Online]. Available: <https://venturebeat.com/2018/02/25/the-real-cost-of-mining-ethereum/>, προσπελάστηκε στις 21/5/2021.
- [42] “Dogecoin (DOGE) Definition.” [Online]. Available: <https://www.investopedia.com/terms/d/dogecoin.asp>, προσπελάστηκε στις 22/5/2021.
- [43] “CryptoCompare.” [Online]. Available: <https://www.cryptocompare.com/mining/calculator/btc?HashingPower=19350&HashingUnit=TH%2Fs&PowerConsumption=650000&CostPerkWh=0&MiningPoolFee=1>, προσπελάστηκε στις 11/5/2021.
- [44] Z. Yang, H. Zhong, A. Bose, T. Zheng, Q. Xia, and C. Kang, “A Linearized OPF Model with Reactive Power and Voltage Magnitude: A Pathway to Improve the MW-Only DC OPF,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 2, pp. 1734–1745, 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2718551.
- [45] J. K. Pattanaik, M. Basu, and D. P. Dash, “Review on application and comparison of metaheuristic techniques to multi-area economic dispatch problem,” *Prot. Control Mod. Power Syst.*, vol. 2, no. 1, 2017, doi: 10.1186/s41601-017-0049-x.
- [46] J. Graubger and W. Stevenson, *Power system analysis*. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [47] Z. Yang, H. Zhong, A. Bose, Q. Xia, and C. Kang, “Optimal Power Flow in AC-DC Grids with Discrete Control Devices,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 2, pp. 1461–1472, 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2721971.
- [48] M. B. Cain, R. P. O’neil, and A. Castillo, “History of optimal power flow and formulations,” *Fed. Energy Regul. Comm.*, 2012.
- [49] “About Pages.” [Online]. Available: <https://www.gams.com/about/company/>, προσπελάστηκε στις 27/5/2021.
- [50] “14 Bus Power Flow Test Case.” [Online]. Available: [http://labs.ece.uw.edu/pstca/pf14/pg\\_tca14bus.htm](http://labs.ece.uw.edu/pstca/pf14/pg_tca14bus.htm), προσπελάστηκε στις 01/4/2021.
- [51] Manitoba Hydro International Ltd., “IEEE 14 Bus System,” 2018. [Online]. Available: [https://www.pscad.com/knowledge-base/download/ieee\\_14\\_bus\\_technical\\_note.pdf](https://www.pscad.com/knowledge-base/download/ieee_14_bus_technical_note.pdf), προσπελάστηκε στις 02/4/2021.
- [52] “30 Bus Power Flow Test Case.” [Online]. Available: [http://labs.ece.uw.edu/pstca/pf30/pg\\_tca30bus.htm](http://labs.ece.uw.edu/pstca/pf30/pg_tca30bus.htm), προσπελάστηκε στις 02/4/2021.
- [53] IEEE, “Data Sheets for IEEE 14, 30, 62 Bus System,” 2003.
- [54] “SouthCarolina 500-Bus System: ACTIVSg500.” [Online]. Available: <https://electricgrids.engr.tamu.edu/electric-grid-test-cases/activsg500/>, προσπελάστηκε στις 02/5/2021.
- [55] Π. Σ. Γεωργιάκης, *Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Ηλεκτρονικό Βιβλίο, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών (ΣΕΑΒ), Αθήνα, 2015. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα <http://repository.kallipos.gr/handle/11419/2013>, προσπελάστηκε στις 30 Ιουνίου 2021.

## A.1 ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΙΣ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

AC	Alternating Current
BTC	Bitcoin
DC	Direct Current
DOGE	Dogecoin
ETH	Ethereum
FL	Flexible Loads
GT	Gas Turbine
OPF	Optimal Power Flow
PF	Power Flow
PS	Pump Storage
PV	Photovoltaic
VPP	Virtual Power Plant
WG	Wind Generators
Α/Γ	Ανεμογεννήτριες
α.μ.	Ανά Μονάδα

---

ΑΔΜΗΕ	Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΓΜ	Γραμμή Μεταφοράς
ΕΙΣΠ	Εικονικός Σταθμός Παραγωγής
Μ/Σ	Μετασχηματιστής
ΟΤΑ	Οριακή Τιμή Απόκλισης
ΟΤΣ	Οριακή Τιμή Συστήματος
ΡΑΕ	Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας
ΣΗΕ	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΦΒ	Φωτοβολταϊκά
ΦΣ	Φωτοβολταϊκός Σταθμός



**A.2 ANTIΣΤΟΙΧΙΣΗ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΓΓΛΙΚΩΝ ΌΡΩΝ**

Alternating Current	Εναλλασσόμενο Ρεύμα
Direct Current	Συνεχές Ρεύμα
Distributed Energy Resources	Διεσπαρμένες Πηγές Ενέργειας
Distributed Generators	Διεσπαρμένες Μονάδες Παραγωγής
Electricity System	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας
Flexible Loads	Ελεγχόμενα Φορτία
Gas Turbine	Γεννήτρια Αερίου
Imbalance Price	Οριακή Τιμή Απόκλισης
Independent Power Transmission Operator	Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
Optimal Power Flow	Βέλτιστη Ροή Ισχύος
Per Unit	Ανά Μονάδα
Photovoltaic	Φωτοβολταϊκό
Power Flow	Ροή Ισχύος
Pump Storage	Αντλιοστάσιο
Renewables	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
Robust Programming	Εύρωστος Προγραμματισμός
Regulatory Authority for Energy	Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας
Stochastic Programming	Στοχαστικός Προγραμματισμός
Solver	Επιλυτής
Transmission Line	Γραμμή Μεταφοράς

---

Transformer	Μετασχηματιστής
Virtual Power Plant	Εικονικός Σταθμός Παραγωγής
Wholesale Price	Οριακή Τιμή Συστήματος
Wind Generators	Ανεμογεννήτρια

### A.3 ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

**Πίνακας A.3.1:** Αντιστοίχιση των σεναρίων του στοχαστικού προγραμματισμού με τις στοχαστικές μεταβλητές του προβλήματος

Σενάριο	Πρόβλεψη		
	Τιμή Αγοράς Επόμενης Ημέρας	Φωτοβολταϊκά Πάρκα	Αιολικά Πάρκα
W1	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή
W2	Μεσαία	Μεσαία	Χαμηλή
W3	Υψηλή	Υψηλή	Χαμηλή
W4	Χαμηλή	Χαμηλή	Μεσαία
W5	Μεσαία	Μεσαία	Μεσαία
W6	Υψηλή	Υψηλή	Μεσαία
W7	Χαμηλή	Χαμηλή	Υψηλή
W8	Μεσαία	Μεσαία	Υψηλή
W9	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή

**Πίνακας A.3.2:** Πιθανότητες σεναρίων στοχαστικού προγραμματισμού

Σενάριο	Πιθανότητα
W1	0.08
W2	0.14
W3	0.08
W4	0.08
W5	0.24
W6	0.08
W7	0.08
W8	0.14
W9	0.08

Πίνακας Α.3.3: Καλή πρόβλεψη της τιμής της αγοράς της επόμενης ημέρας

Periods	w1	w2	w3	w4	w5	w6	w7	w8	w9
t1	20	30	40	20	30	40	20	30	40
t2	20	30	40	20	30	40	20	30	40
t3	20	30	40	20	30	40	20	30	40
t4	20	30	40	20	30	40	20	30	40
t5	20	30	40	20	30	40	20	30	40
t6	30	40	50	30	40	50	30	40	50
t7	30	40	50	30	40	50	30	40	50
t8	35	45	55	35	45	55	35	45	55
t9	35	45	55	35	45	55	35	45	55
t10	55	65	75	55	65	75	55	65	75
t11	55	65	75	55	65	75	55	65	75
t12	55	65	75	55	65	75	55	65	75
t13	55	65	75	55	65	75	55	65	75
t14	55	65	75	55	65	75	55	65	75
t15	35	45	55	35	45	55	35	45	55
t16	35	45	55	35	45	55	35	45	55
t17	35	45	55	35	45	55	35	45	55
t18	35	45	55	35	45	55	35	45	55
t19	25	35	45	25	35	45	25	35	45
t20	25	35	45	25	35	45	25	35	45
t21	25	35	45	25	35	45	25	35	45
t22	25	35	45	25	35	45	25	35	45
t23	25	35	45	25	35	45	25	35	45
t24	25	35	45	25	35	45	25	35	45

Πίνακας Α.3.4: Κακή πρόβλεψη της τιμής της αγοράς της επόμενης ημέρας

	w1	w2	w3	w4	w5	w6	w7	w8	w9
t1	10	20	30	10	20	30	10	20	30
t2	10	20	30	10	20	30	10	20	30
t3	10	20	30	10	20	30	10	20	30
t4	10	20	30	10	20	30	10	20	30
t5	10	20	30	10	20	30	10	20	30
t6	20	30	40	20	30	40	20	30	40
t7	20	30	40	20	30	40	20	30	40
t8	25	35	45	25	35	45	25	35	45
t9	25	35	45	25	35	45	25	35	45
t10	45	55	65	45	55	65	45	55	65
t11	45	55	65	45	55	65	45	55	65
t12	45	55	65	45	55	65	45	55	65
t13	45	55	65	45	55	65	45	55	65
t14	45	55	65	45	55	65	45	55	65
t15	25	35	45	25	35	45	25	35	45
t16	25	35	45	25	35	45	25	35	45
t17	25	35	45	25	35	45	25	35	45
t18	25	35	45	25	35	45	25	35	45
t19	15	25	35	15	25	35	15	25	35
t20	15	25	35	15	25	35	15	25	35
t21	15	25	35	15	25	35	15	25	35
t22	15	25	35	15	25	35	15	25	35
t23	15	25	35	15	25	35	15	25	35
t24	15	25	35	15	25	35	15	25	35



Πίνακας Α.3.6: Πρόβλεψη της παραγωγής των Α/Γ

Periods	w1	w2	w3	w4	w5	w6	w7	w8	w9
t1	1	1	1	2	2	2	3	3	3
t2	2	2	2	3	3	3	4	4	4
t3	1	1	1	5	5	5	12	12	12
t4	1	1	1	6	6	6	12	12	12
t5	3	3	3	6	6	6	11	11	11
t6	3	3	3	3	3	3	3	3	3
t7	5	5	5	5	5	5	5	5	5
t8	2	2	2	7	7	7	9	9	9
t9	1	1	1	3	3	3	7	7	7
t10	5	5	5	7	7	7	9	9	9
t11	1	1	1	6	6	6	9	9	9
t12	2	2	2	3	3	3	4	4	4
t13	1	1	1	5	5	5	12	12	12
t14	1	1	1	6	6	6	12	12	12
t15	3	3	3	6	6	6	11	11	11
t16	3	3	3	3	3	3	3	3	3
t17	1	1	1	6	6	6	12	12	12
t18	2	2	2	7	7	7	9	9	9
t19	1	1	1	3	3	3	7	7	7
t20	1	1	1	3	3	3	7	7	7
t21	5	5	5	7	7	7	9	9	9
t22	5	5	5	7	7	7	9	9	9
t23	2	2	2	3	3	3	4	4	4
t24	5	5	5	8	8	8	6	6	6

Πίνακας Α.3.7: Φορτία (Ενεργού Ισχύος) που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο των 14 ζυγών

A/A	t1-t24
1	5
2	0
3	5
4	6
5	0
6	0
7	0
8	0
9	3
10	3.5
11	4
12	0
13	0
14	0

Πίνακας Α.3.8: Φορτία (Αέργου Ισχύος) που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο των 14 ζυγών

A/A	t1-t24
1	5
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0
13	0
14	0

Πίνακας Α.3.9: Φορτία (Ενεργού Ισχύος) που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο των 30 ζυγών

A/A	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8
1	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	8.32	8.32	20
2	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	8.32	8.32	20
3	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	8.32	8.32	20
4	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.416	0.416	1
5	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.416	0.416	1
6	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.416	0.416	1
7	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.416	0.416	1
8	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.416	0.416	1
9	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	4.16	4.16	10
10	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.416	0.416	1
11	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.416	0.416	1
12	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.416	0.416	1
13	2.24	2.24	2.24	2.24	2.24	2.912	2.912	7
14	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.416	0.416	1
15	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.416	0.416	1
16	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.416	0.416	1
17	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	2.08	2.08	5
18	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	2.08	2.08	5
19	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.416	0.416	1
20	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.416	0.416	1
21	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.416	0.416	1
22	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.416	0.416	1
23	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.416	0.416	1
24	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.416	0.416	1
25	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	8.32	8.32	20
26	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	8.32	8.32	20
27	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	4.16	4.16	10
28	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.416	0.416	1
29	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.416	0.416	1
30	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.416	0.416	1



**Πίνακας Α.3.9:** Φορτία (Ενεργού Ισχύος) που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο των 30 ζυγών  
(συνέχεια)

Α/Α	t9	t10	t11	t12	t13	t14	t15	t16
1	20	20	22	22	22	22	18	18
2	20	20	22	22	22	22	18	18
3	20	20	22	22	22	22	18	18
4	1	1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.9	0.9
5	1	1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.9	0.9
6	1	1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.9	0.9
7	1	1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.9	0.9
8	1	1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.9	0.9
9	10	10	11	11	11	11	9	9
10	1	1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.9	0.9
11	1	1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.9	0.9
12	1	1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.9	0.9
13	7	7	7.7	7.7	7.7	7.7	6.3	6.3
14	1	1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.9	0.9
15	1	1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.9	0.9
16	1	1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.9	0.9
17	5	5	5.5	5.5	5.5	5.5	4.5	4.5
18	5	5	5.5	5.5	5.5	5.5	4.5	4.5
19	1	1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.9	0.9
20	1	1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.9	0.9
21	1	1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.9	0.9
22	1	1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.9	0.9
23	1	1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.9	0.9
24	1	1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.9	0.9
25	20	20	22	22	22	22	18	18
26	20	20	22	22	22	22	18	18
27	10	10	11	11	11	11	9	9
28	1	1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.9	0.9
29	1	1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.9	0.9
30	1	1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.9	0.9

**Πίνακας Α.3.9:** Φορτία (Ενεργού Ισχύος) που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο των 30 ζυγών  
(συνέχεια)

A/A	t17	t18	t19	t20	t21	t22	t23	t24
1	18	18	7.2	7.2	7.2	7.2	6.4	6.4
2	18	18	7.2	7.2	7.2	7.2	6.4	6.4
3	18	18	7.2	7.2	7.2	7.2	6.4	6.4
4	0.9	0.9	0.36	0.36	0.36	0.36	0.32	0.32
5	0.9	0.9	0.36	0.36	0.36	0.36	0.32	0.32
6	0.9	0.9	0.36	0.36	0.36	0.36	0.32	0.32
7	0.9	0.9	0.36	0.36	0.36	0.36	0.32	0.32
8	0.9	0.9	0.36	0.36	0.36	0.36	0.32	0.32
9	9	9	3.6	3.6	3.6	3.6	3.2	3.2
10	0.9	0.9	0.36	0.36	0.36	0.36	0.32	0.32
11	0.9	0.9	0.36	0.36	0.36	0.36	0.32	0.32
12	0.9	0.9	0.36	0.36	0.36	0.36	0.32	0.32
13	6.3	6.3	2.52	2.52	2.52	2.52	2.24	2.24
14	0.9	0.9	0.36	0.36	0.36	0.36	0.32	0.32
15	0.9	0.9	0.36	0.36	0.36	0.36	0.32	0.32
16	0.9	0.9	0.36	0.36	0.36	0.36	0.32	0.32
17	4.5	4.5	1.8	1.8	1.8	1.8	1.6	1.6
18	4.5	4.5	1.8	1.8	1.8	1.8	1.6	1.6
19	0.9	0.9	0.36	0.36	0.36	0.36	0.32	0.32
20	0.9	0.9	0.36	0.36	0.36	0.36	0.32	0.32
21	0.9	0.9	0.36	0.36	0.36	0.36	0.32	0.32
22	0.9	0.9	0.36	0.36	0.36	0.36	0.32	0.32
23	0.9	0.9	0.36	0.36	0.36	0.36	0.32	0.32
24	0.9	0.9	0.36	0.36	0.36	0.36	0.32	0.32
25	18	18	7.2	7.2	7.2	7.2	6.4	6.4
26	18	18	7.2	7.2	7.2	7.2	6.4	6.4
27	9	9	3.6	3.6	3.6	3.6	3.2	3.2
28	0.9	0.9	0.36	0.36	0.36	0.36	0.32	0.32
29	0.9	0.9	0.36	0.36	0.36	0.36	0.32	0.32
30	0.9	0.9	0.36	0.36	0.36	0.36	0.32	0.32





Πίνακας Α.3.9: Φορτία (Αέργου Ισχύος) που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο των 30 ζυγών (συνέχεια)

A/A	t17	t18	t19	t20	t21	t22	t23	t24
1	5.36	-3.71	-4.63	5.36	-3.71	-4.63	5.36	-3.71
2	8	8	8	8	8	8	8	8
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας Α.3.11: Τεχνικά χαρακτηριστικά των Γ.Μ. του δικτύου των 500 ζυγών

A.A.	Εκκίνηση	Τέλος	Αντίσταση (α.μ.)	Αντίδραση (α.μ.)	Εγκάρσιες Αντιστάσεις (α.μ.)	Θερμικά Όρια (MVA)
1	2	1	0.00053	0.00314	0	706.5
2	44	1	0.00548	0.05026	0.01781	320.29
3	421	1	0.00537	0.05156	0.01664	320.29
4	4	3	0.00069	0.00352	0	225.06
5	62	3	0.00272	0.0261	0.00842	320.29
6	3	479	0.00726	0.0697	0.0225	320.29
7	6	5	0.00056	0.00356	0	40.49
8	316	5	0.00245	0.02348	0.00758	320.29
9	401	5	0.00489	0.04692	0.01515	320.29
10	8	7	0.00036	0.0129	0	567
11	9	7	0.00012	0.01362	0	680
12	7	232	0.00112	0.01481	0.31205	1493.89
13	7	262	0.00095	0.01375	0.23994	1493.89

Πίνακας Α.3.11: Τεχνικά χαρακτηριστικά των Γ.Μ. του δικτύου των 500 ζυγών  
(συνέχεια)

A.A.	Εκκίνηση	Τέλος	Αντίσταση (α.μ.)	Αντίδραση (α.μ.)	Εγκάρσιες Αντιστάσεις (α.μ.)	Θερμικά Όρια (MVA)
14	8	287	0.00373	0.03579	0.01155	320.29
15	8	457	0.00197	0.01896	0.00612	320.29
16	11	1	0.00066	0.0032	0	30.96
17	342	1	0.00283	0.02712	0.00876	320.29
18	10	349	0.0014	0.01346	0.00434	320.29
19	13	12	0.00062	0.00313	0	65.5
20	12	216	0.00396	0.03805	0.01228	320.29
21	12	304	0.00231	0.02119	0.00751	320.29
22	12	441	0.00157	0.01503	0.00485	320.29
23	15	14	0.00021	0.01122	0	682
24	16	14	0.00033	0.01202	0	596
25	17	14	0.00035	0.01438	0	674
26	18	14	0.00142	0.05115	0	340
27	386	14	0.00032	0.00455	0.08136	1493.9
28	15	91	0.0048	0.04609	0.01488	320.29
29	15	23	0.01089	0.10461	0.03377	320.29
30	367	15	0.00192	0.01842	0.00594	320.29
31	15	369	0.00185	0.01701	0.00603	320.29
32	15	473	0.00923	0.08462	0.02999	320.29
33	20	19	0.00054	0.00389	0	70.53
34	19	112	0.00472	0.04535	0.01464	320.29
35	193	19	0.00222	0.02132	0.00688	320.29
36	19	272	0.00229	0.02202	0.00711	320.29
37	22	21	0.00059	0.00317	0	254.15
38	21	112	0.00509	0.0489	0.01578	320.29
39	21	196	0.00221	0.02025	0.00718	320.29
40	24	23	0.00033	0.01764	0	626
41	151	23	0.00018	0.00261	0.04665	1493.89
42	23	386	0.00164	0.02385	0.41623	1493.89
43	23	464	0.00095	0.01253	0.26411	1493.89
44	23	471	0.00053	0.00704	0.14837	1493.89
45	25	24	0.00061	0.00363	0	3.56
46	26	24	0.00056	0.00373	0	29.46
47	210	24	0.00222	0.02034	0.00721	320.29
48	24	36	0.00237	0.02271	0.00733	320.29
49	28	27	0.00069	0.00396	0	108.61
50	27	68	0.00561	0.05385	0.01738	320.29
51	27	382	0.00337	0.03091	0.01095	320.29
52	30	29	0.00062	0.0033	0	156.98
53	454	29	0.00247	0.02266	0.00803	320.29
54	29	491	0.00561	0.05384	0.01738	320.29
55	32	31	0.00063	0.00343	0	150.7
56	31	85	0.0053	0.05093	0.01644	320.29
57	104	31	0.00553	0.05306	0.01713	320.29
58	31	189	0.00571	0.0548	0.01769	320.29
59	31	205	0.0078	0.07487	0.02417	320.29
60	31	218	0.00827	0.07945	0.02565	320.29
61	267	31	0.0049	0.04702	0.01518	320.29
62	34	33	0.00062	0.00328	0	43.35
63	83	33	0.00529	0.05076	0.01639	320.29
64	112	33	0.00706	0.06781	0.02189	320.29

**Πίνακας Α.3.11:** Τεχνικά χαρακτηριστικά των Γ.Μ. του δικτύου των 500 ζυγών  
(συνέχεια)

A.A.	Εκκίνηση	Τέλος	Αντίσταση (α.μ.)	Αντίδραση (α.μ.)	Εγκάρσιες Αντιστάσεις (α.μ.)	Θερμικά Όρια (MVA)
65	36	35	0.00058	0.00303	0	62.87
66	191	35	0.00404	0.03704	0.01313	320.29
67	35	399	0.00564	0.05412	0.01747	320.29
68	38	37	0.00055	0.00382	0	320.29
69	76	37	0.00147	0.01416	0.00457	320.29
70	37	176	0.00304	0.02918	0.00942	320.29
71	40	39	0.0007	0.02531	0	428
72	39	332	0.0004	0.00579	0.10355	1493.89
73	39	428	0.00052	0.0069	0.14538	1493.89
74	41	4	0.00063	0.00392	0	97.47
75	40	131	0.00291	0.02668	0.00946	320.29
76	43	42	0.00054	0.00312	0	7.7
77	81	42	0.00236	0.02166	0.00768	320.29
78	42	191	0.00637	0.05842	0.0207	320.29
79	45	44	0.00064	0.00388	0	2.84
80	44	2	0.00211	0.01931	0.00684	320.29
81	47	46	0.0006	0.00345	0	63
82	46	156	0.00661	0.06348	0.02049	320.29
83	238	46	0.00313	0.03009	0.00971	320.29
84	49	48	0.01331	0.27853	0	57
85	50	48	0.00715	0.16356	0	70
86	51	48	0.00066	0.00367	0	0.56
87	52	48	0.00062	0.00334	0	37.95
88	358	48	0.0045	0.04128	0.01463	320.29
89	419	48	0.00464	0.04453	0.01437	320.29
90	54	53	0.00068	0.00306	0	51.27
91	233	53	0.00236	0.02167	0.00768	320.29
92	53	276	0.0015	0.01442	0.00466	320.29
93	56	55	0.00064	0.00331	0	3.15
94	55	66	0.00433	0.04158	0.01342	320.29
95	55	5	0.00448	0.0411	0.01457	320.29
96	58	57	0.00012	0.01762	0	675
97	57	123	0.00168	0.02443	0.42627	1493.89
98	440	57	0.0006	0.00873	0.15227	1493.89
99	59	58	0.00062	0.00385	0	252.93
100	58	253	0.00453	0.04352	0.01405	320.29
101	322	58	0.00202	0.01939	0.00626	320.3
102	61	6	0.00053	0.00352	0	320.3
103	60	131	0.00199	0.01821	0.00645	320.29
104	466	6	0.00201	0.01931	0.00623	320.29
105	63	62	0.0032	0.16353	0	70
106	64	62	0.00066	0.00327	0	45.58
107	287	62	0.00545	0.05237	0.0169	320.29
108	62	457	0.00727	0.06979	0.02253	320.29
109	66	65	0.00081	0.03088	0	405
110	80	65	0.00096	0.01377	0.24648	1493.89
111	65	297	0.00092	0.01319	0.23607	1493.89
112	67	66	0.00066	0.00336	0	6.71
113	66	308	0.00718	0.06895	0.02226	320.29
114	69	68	0.00067	0.004	0	27.64
115	68	295	0.00447	0.041	0.01453	320.29

Πίνακας Α.3.11: Τεχνικά χαρακτηριστικά των Γ.Μ. του δικτύου των 500 ζυγών  
(συνέχεια)

Α.Α.	Εκκίνηση	Τέλος	Αντίσταση (α.μ.)	Αντίδραση (α.μ.)	Εγκάρσιες Αντιστάσεις (α.μ.)	Θερμικά Όρια (MVA)
116	68	314	0.00181	0.01733	0.0056	320.29
117	71	7	0.00103	0.04472	0	133
118	72	7	0.00292	0.14481	0	60
119	73	7	0.0127	0.27303	0	49
120	216	7	0.0026	0.02381	0.00844	320.29
121	70	49	0.00213	0.01951	0.00691	320.29
122	75	74	0.00058	0.00334	0	8.81
123	74	189	0.00563	0.05408	0.01746	320.29
124	240	74	0.00443	0.04067	0.01441	320.29
125	77	76	0.0007	0.00331	0	12.16
126	452	76	0.00201	0.01932	0.00624	320.29
127	79	78	0.00062	0.00328	0	320.29
128	78	328	0.00543	0.04983	0.01766	320.29
129	78	387	0.00235	0.02261	0.0073	320.29
130	81	8	0.00065	0.03481	0	529
131	82	8	0.00043	0.03113	0	628
132	407	8	0.00082	0.01083	0.22813	1493.89
133	149	81	0.00288	0.02641	0.00936	320.29
134	84	83	0.00064	0.00366	0	105.41
135	83	342	0.00412	0.03952	0.01276	320.29
136	86	85	0.00065	0.0039	0	30.04
137	272	85	0.00441	0.04047	0.01434	320.29
138	88	87	0.00062	0.00357	0	7.69
139	87	141	0.00185	0.01773	0.00572	320.29
140	87	143	0.00382	0.03504	0.01242	320.29
141	423	87	0.00184	0.01763	0.00569	320.29
142	90	89	0.00055	0.00386	0	10.48
143	89	187	0.00212	0.02032	0.00656	320.29
144	89	457	0.00901	0.08267	0.02929	320.29
145	92	91	0.00057	0.00362	0	104.24
146	91	133	0.00504	0.0484	0.01562	320.29
147	94	93	0.00054	0.00328	0	8.18
148	269	93	0.00392	0.03597	0.01275	320.29
149	336	93	0.0058	0.05316	0.01884	320.29
150	96	95	0.00056	0.00325	0	56.18
151	95	17	0.00211	0.02027	0.00654	320.29
152	95	369	0.00409	0.03932	0.01269	320.29
153	98	97	0.00057	0.00399	0	66.43
154	181	97	0.00299	0.02873	0.00928	320.29
155	358	97	0.00268	0.02455	0.0087	320.29
156	100	99	0.00064	0.00362	0	22.69
157	101	99	0.0007	0.00329	0	1.37
158	99	465	0.00269	0.02582	0.00834	320.29
159	472	99	0.00332	0.03186	0.01029	320.29
160	103	102	0.00061	0.00387	0	64.6
161	102	308	0.00565	0.05425	0.01751	320.29
162	419	102	0.00364	0.03494	0.01128	320.29
163	105	104	0.00067	0.00375	0	144.23
164	104	191	0.00518	0.04749	0.01683	320.29
165	107	106	0.00058	0.00321	0	24.46
166	106	191	0.00447	0.0429	0.01385	320.29



**Πίνακας Α.3.11:** Τεχνικά χαρακτηριστικά των Γ.Μ. του δικτύου των 500 ζυγών  
(συνέχεια)

Α.Α.	Εκκίνηση	Τέλος	Αντίσταση (α.μ.)	Αντίδραση (α.μ.)	Εγκάρσιες Αντιστάσεις (α.μ.)	Θερμικά Όρια (MVA)
167	236	106	0.00312	0.02992	0.00966	320.29
168	109	108	0.00066	0.00301	0	62.91
169	108	472	0.00203	0.01952	0.0063	320.29
170	108	495	0.00361	0.03467	0.01119	320.29
171	111	11	0.00053	0.00371	0	87.02
172	274	11	0.00313	0.03002	0.00969	320.29
173	110	316	0.00344	0.03303	0.01066	320.29
174	113	112	0.00064	0.00312	0	72.98
175	193	112	0.00287	0.02753	0.00889	320.29
176	112	236	0.00633	0.06078	0.01962	320.29
177	112	283	0.00862	0.08276	0.02672	320.29
178	372	112	0.00201	0.01927	0.00622	320.29
179	112	499	0.00558	0.05116	0.01813	320.29
180	115	114	0.00051	0.00336	0	6.74
181	116	114	0.00051	0.00341	0	5.26
182	114	191	0.00556	0.05336	0.01723	320.29
183	114	312	0.00661	0.06346	0.02049	320.29
184	118	117	0.00063	0.00385	0	12.8
185	117	426	0.00317	0.0291	0.01031	320.29
186	490	117	0.003	0.02751	0.00975	320.29
187	120	119	0.00056	0.00306	0	46.58
188	119	129	0.00235	0.02155	0.00764	320.29
189	253	119	0.00149	0.01435	0.00463	320.29
190	122	121	0.00056	0.00385	0	70.42
191	121	276	0.00255	0.02446	0.0079	320.29
192	121	287	0.00709	0.06806	0.02197	320.29
193	124	123	0.0002	0.01438	0	488
194	125	123	0.00028	0.04064	0	346
195	126	123	0.00015	0.02189	0	352
196	127	123	0.00038	0.04792	0	378
197	128	123	0.00016	0.01585	0	391
198	165	123	0.00022	0.00314	0.05475	1493.89
199	124	26	0.00204	0.01871	0.00663	320.29
200	124	369	0.00769	0.07057	0.02501	320.29
201	130	129	0.0007	0.00322	0	165.98
202	304	129	0.00306	0.02941	0.00949	320.29
203	324	129	0.00188	0.01723	0.00611	320.29
204	132	131	0.00067	0.00362	0	41.59
205	131	333	0.00223	0.02139	0.0069	320.29
206	134	133	0.00052	0.00308	0	66.01
207	133	226	0.00644	0.05908	0.02094	320.29
208	133	369	0.00616	0.05646	0.02001	320.29
209	473	133	0.00476	0.04566	0.01474	320.29
210	136	135	0.00055	0.00366	0	45.59
211	135	287	0.00757	0.06942	0.0246	320.29
212	135	457	0.00687	0.06297	0.02232	320.29
213	138	137	0.00056	0.00379	0	122.92
214	137	214	0.00312	0.02996	0.00967	320.29
215	137	426	0.003	0.02879	0.00929	320.3
216	140	139	0.0006	0.00318	0	320.3
217	139	376	0.00268	0.0257	0.0083	320.29

**Πίνακας Α.3.11:** Τεχνικά χαρακτηριστικά των Γ.Μ. του δικτύου των 500 ζυγών  
(συνέχεια)

Α.Α.	Εκκίνηση	Τέλος	Αντίσταση (α.μ.)	Αντίδραση (α.μ.)	Εγκάρσιες Αντιστάσεις (α.μ.)	Θερμικά Όρια (MVA)
218	429	139	0.00147	0.01409	0.00455	320.29
219	142	141	0.00069	0.00342	0	209.78
220	300	141	0.00267	0.0245	0.00868	320.29
221	144	143	0.00152	0.0766	0	336
222	145	143	0.00119	0.0337	0	322
223	143	338	0.00212	0.01941	0.00688	320.29
224	143	401	0.00406	0.03896	0.01258	320.29
225	143	452	0.00754	0.07237	0.02336	320.29
226	496	143	0.00204	0.01958	0.00632	320.29
227	147	146	0.00101	0.05565	0	272
228	146	162	0.00029	0.00408	0.07307	1493.89
229	146	195	0.00033	0.00433	0.09131	1493.89
230	148	147	0.00059	0.00394	0	102.39
231	475	147	0.00319	0.03059	0.00987	320.29
232	150	149	0.00068	0.00369	0	2.36
233	293	149	0.00439	0.04211	0.01359	320.29
234	489	149	0.00244	0.02347	0.00758	320.29
235	152	151	0.00034	0.0203	0	570
236	428	151	0.00045	0.00601	0.12668	1493.89
237	153	152	0.00053	0.00311	0	130.11
238	238	152	0.00216	0.02069	0.00668	320.29
239	155	154	0.00053	0.00301	0	89.97
240	154	429	0.00212	0.02035	0.00657	320.29
241	154	488	0.00801	0.07345	0.02603	320.29
242	157	156	0.0006	0.00358	0	164.26
243	488	156	0.00186	0.01708	0.00605	320.29
244	159	158	0.0006	0.00387	0	31.35
245	158	233	0.0061	0.05593	0.01982	320.29
246	158	291	0.00513	0.04929	0.01591	320.29
247	161	16	0.00056	0.00357	0	44.84
248	160	212	0.00257	0.02465	0.00796	320.29
249	160	399	0.00402	0.03683	0.01305	320.29
250	163	162	0.00037	0.01982	0	510
251	162	195	0.00023	0.00328	0.05716	1493.89
252	162	22	0.00139	0.01839	0.3875	1493.89
253	162	232	0.00053	0.00759	0.13589	1493.89
254	164	163	0.00065	0.00399	0	174.51
255	200	163	0.00327	0.02997	0.01062	320.29
256	166	165	0.00018	0.00871	0	606
257	167	165	0.00046	0.02157	0	411
258	168	165	0.00029	0.03549	0	445
259	169	165	0.00035	0.02558	0	543
260	165	386	0.00072	0.01042	0.18188	1493.89
261	166	228	0.00485	0.04445	0.01575	320.29
262	260	166	0.00199	0.01825	0.00647	320.29
263	166	289	0.00211	0.02029	0.00655	320.29
264	171	17	0.00051	0.00377	0	20.92
265	170	226	0.00463	0.04248	0.01506	320.29
266	173	172	0.00068	0.00313	0	4.69
267	174	172	0.00059	0.00304	0	12.34
268	202	172	0.00407	0.03911	0.01263	320.29

**Πίνακας Α.3.11:** Τεχνικά χαρακτηριστικά των Γ.Μ. του δικτύου των 500 ζυγών  
(συνέχεια)

Α.Α.	Εκκίνηση	Τέλος	Αντίσταση (α.μ.)	Αντίδραση (α.μ.)	Εγκάρσιες Αντιστάσεις (α.μ.)	Θερμικά Όρια (MVA)
269	172	244	0.00329	0.0316	0.0102	320.29
270	176	175	0.00039	0.03857	0	273
271	175	22	0.0011	0.01596	0.27851	1493.89
272	177	176	0.00056	0.00365	0	12.91
273	178	176	0.00068	0.00316	0	10.65
274	318	176	0.00343	0.03291	0.01062	320.29
275	180	179	0.00069	0.0033	0	25.21
276	179	291	0.00596	0.05727	0.01849	320.29
277	345	179	0.00508	0.04661	0.01652	320.29
278	179	374	0.00377	0.03624	0.0117	320.29
279	182	181	0.00063	0.00372	0	145.73
280	181	487	0.00275	0.02642	0.00853	320.29
281	184	183	0.00054	0.00301	0	40.45
282	183	247	0.00197	0.01887	0.00609	320.29
283	183	274	0.00367	0.03527	0.01138	320.29
284	186	185	0.00056	0.00307	0	76.88
285	445	185	0.00307	0.0282	0.00999	320.29
286	185	467	0.00202	0.0185	0.00655	320.29
287	188	187	0.00067	0.00315	0	19.87
288	187	454	0.01385	0.12704	0.04502	320.29
289	190	189	0.00069	0.00301	0	22.9
290	192	191	0.00068	0.00376	0	27.24
291	191	205	0.00533	0.05114	0.01651	320.29
292	191	293	0.00516	0.04959	0.01601	320.29
293	194	193	0.0007	0.0038	0	49.31
294	196	195	0.00023	0.01443	0	560
295	197	195	0.0006	0.03102	0	597
296	198	195	0.00039	0.02185	0	527
297	371	195	0.00045	0.00597	0.12573	1493.89
298	199	196	0.00069	0.00331	0	123.99
299	201	2	0.00069	0.00317	0	14.82
300	203	202	0.00064	0.00362	0	6.57
301	204	202	0.00055	0.00389	0	72.65
302	380	202	0.00536	0.05147	0.01661	320.29
303	206	205	0.00055	0.00303	0	4.37
304	207	205	0.00065	0.0037	0	30.41
305	205	312	0.00677	0.06207	0.022	320.29
306	209	208	0.00051	0.0036	0	141.36
307	322	208	0.00286	0.02746	0.00886	320.29
308	356	208	0.00255	0.02453	0.00792	320.29
309	211	21	0.00068	0.00378	0	54.3
310	488	21	0.00371	0.03564	0.01151	320.29
311	213	212	0.00063	0.00369	0	155.03
312	212	399	0.00334	0.03211	0.01037	320.29
313	408	212	0.00288	0.02765	0.00893	320.29
314	215	214	0.00058	0.00381	0	124.11
315	214	403	0.00422	0.04049	0.01307	320.29
316	217	216	0.0006	0.00313	0	71.72
317	219	218	0.00058	0.00366	0	0.6
318	218	399	0.00455	0.04365	0.01409	320.29
319	221	22	0.00087	0.02901	0	556

Πίνακας Α.3.11: Τεχνικά χαρακτηριστικά των Γ.Μ. του δικτύου των 500 ζυγών  
(συνέχεια)

Α.Α.	Εκκίνηση	Τέλος	Αντίσταση (α.μ.)	Αντίδραση (α.μ.)	Εγκάρσιες Αντιστάσεις (α.μ.)	Θερμικά Όρια (MVA)
320	222	22	0.00049	0.02225	0	228
321	223	22	0.00058	0.03062	0	248
322	224	22	0.00043	0.02404	0	588
323	225	22	0.00018	0.01242	0	628
324	220	471	0.00098	0.01421	0.24789	1493.89
325	221	447	0.00397	0.03812	0.01231	320.29
326	221	478	0.00304	0.02916	0.00941	320.29
327	221	493	0.00341	0.03277	0.01058	320.29
328	227	226	0.00067	0.00335	0	8.92
329	229	228	0.00059	0.00359	0	77.87
330	228	468	0.00489	0.04697	0.01516	320.29
331	228	474	0.00651	0.05975	0.02117	320.29
332	231	23	0.00368	0.18877	0	65
333	285	23	0.00275	0.0264	0.00852	320.29
334	233	232	0.00046	0.0207	0	628
335	262	232	0.00025	0.00363	0.0649	1493.89
336	232	371	0.00049	0.00653	0.13765	1493.89
337	232	453	0.00032	0.00429	0.09045	1493.89
338	234	233	0.00055	0.00342	0	95.68
339	233	486	0.00227	0.02176	0.00702	320.29
340	236	235	0.00024	0.02788	0	507
341	235	271	0.00031	0.00414	0.08716	1493.89
342	235	407	0.00124	0.01637	0.3449	1493.89
343	237	236	0.0007	0.00335	0	4.32
344	283	236	0.00452	0.04143	0.01468	320.29
345	239	238	0.00051	0.00362	0	64.09
346	241	24	0.00054	0.00398	0	27.17
347	240	272	0.01165	0.10682	0.03785	320.29
348	243	242	0.00061	0.0037	0	130.7
349	242	287	0.00705	0.06771	0.02186	320.29
350	242	32	0.00303	0.02907	0.00938	320.29
351	245	244	0.0006	0.00315	0	15.81
352	244	426	0.0037	0.03394	0.01203	320.29
353	247	246	0.00123	0.06785	0	271
354	248	246	0.00131	0.05441	0	336
355	249	246	0.00139	0.05427	0	333
356	250	246	0.00039	0.02016	0	628
357	246	332	0.00092	0.01337	0.23332	1493.89
358	428	246	0.0011	0.01456	0.30689	1493.89
359	246	471	0.00109	0.01437	0.30292	1493.89
360	252	251	0.00066	0.00386	0	171.55
361	251	36	0.00453	0.04155	0.01472	320.29
362	417	251	0.00426	0.04093	0.01321	320.29
363	254	253	0.00422	0.13453	0	134
364	255	253	0.00273	0.10598	0	75
365	256	253	0.00659	0.18871	0	65
366	257	253	0.00255	0.08097	0	142
367	258	253	0.00935	0.25929	0	52
368	259	253	0.00065	0.00358	0	11.94
369	253	347	0.00255	0.02449	0.00791	320.29
370	253	417	0.00533	0.04892	0.01733	320.29

**Πίνακας Α.3.11:** Τεχνικά χαρακτηριστικά των Γ.Μ. του δικτύου των 500 ζυγών  
(συνέχεια)

A.A.	Εκκίνηση	Τέλος	Αντίσταση (α.μ.)	Αντίδραση (α.μ.)	Εγκάρσιες Αντιστάσεις (α.μ.)	Θερμικά Όρια (MVA)
371	261	26	0.00057	0.00332	0	31.44
372	263	262	0.00038	0.01827	0	656
373	264	262	0.00052	0.05005	0	255
374	265	262	0.00023	0.03379	0	241
375	266	263	0.00057	0.00341	0	107.16
376	263	276	0.00086	0.0083	0.00268	320.29
377	263	326	0.00252	0.02423	0.00782	320.29
378	263	476	0.00181	0.01734	0.0056	320.29
379	263	491	0.00346	0.03325	0.01073	320.29
380	268	267	0.0005	0.00358	0	206.87
381	312	267	0.00448	0.04298	0.01388	320.29
382	270	269	0.00057	0.00398	0	10.95
383	475	269	0.00353	0.03394	0.01096	320.29
384	272	271	0.00101	0.03765	0	484
385	273	272	0.00057	0.004	0	15.37
386	275	274	0.0012	0.04081	0	225
387	277	276	0.00054	0.00366	0	0.66
388	278	276	0.00053	0.00385	0	8.45
389	276	32	0.00321	0.03083	0.00995	320.29
390	276	485	0.00263	0.02412	0.00855	320.29
391	280	279	0.00069	0.00308	0	24.56
392	279	34	0.00597	0.05728	0.01849	320.29
393	279	468	0.0032	0.03077	0.00993	320.29
394	282	281	0.00054	0.00362	0	203.73
395	310	281	0.00225	0.02161	0.00698	320.29
396	281	328	0.00497	0.04556	0.01615	320.29
397	281	384	0.00383	0.03678	0.01187	320.29
398	284	283	0.00065	0.00399	0	48.08
399	286	285	0.00067	0.00327	0	13.41
400	285	487	0.00324	0.03109	0.01004	320.29
401	288	287	0.00051	0.00382	0	89.94
402	287	415	0.00428	0.03927	0.01392	320.29
403	287	476	0.00744	0.06826	0.02419	320.29
404	290	289	0.00054	0.00381	0	5.93
405	468	289	0.00577	0.05541	0.01789	320.29
406	292	291	0.00058	0.00322	0	12.61
407	294	293	0.00065	0.00329	0	35.71
408	296	295	0.00053	0.00343	0	10.75
409	314	295	0.00319	0.03066	0.0099	320.29
410	295	447	0.00342	0.03137	0.01112	320.29
411	477	295	0.00349	0.03347	0.0108	320.29
412	298	297	0.00059	0.03135	0	348
413	425	297	0.00028	0.004	0.06976	1493.89
414	297	44	0.00065	0.00935	0.16726	1493.89
415	299	298	0.00054	0.00363	0	20.05
416	298	426	0.00324	0.03112	0.01005	320.29
417	301	3	0.00245	0.08126	0	67
418	302	3	0.00367	0.07834	0	75
419	303	3	0.00065	0.004	0	139.23
420	405	3	0.00337	0.0324	0.01046	320.29
421	300	478	0.00836	0.08032	0.02593	320.29

Πίνακας Α.3.11: Τεχνικά χαρακτηριστικά των Γ.Μ. του δικτύου των 500 ζυγών  
(συνέχεια)

Α.Α.	Εκκίνηση	Τέλος	Αντίσταση (α.μ.)	Αντίδραση (α.μ.)	Εγκάρσιες Αντιστάσεις (α.μ.)	Θερμικά Όρια (MVA)
422	305	304	0.02066	0.53593	0	28
423	306	304	0.00522	0.24992	0	63
424	307	304	0.00055	0.00347	0	122.19
425	309	308	0.00066	0.004	0	13.62
426	308	5	0.00694	0.06669	0.02153	320.29
427	311	31	0.00062	0.00359	0	60.45
428	358	31	0.00293	0.02689	0.00953	320.29
429	313	312	0.00064	0.00398	0	17.95
430	399	312	0.00482	0.0463	0.01495	320.29
431	315	314	0.00054	0.00314	0	0.67
432	317	316	0.00067	0.00305	0	5.45
433	319	318	0.00159	0.07586	0	120
434	318	336	0.00547	0.05015	0.01777	320.29
435	378	318	0.0013	0.0125	0.00403	320.29
436	321	32	0.00063	0.00362	0	269.4
437	323	322	0.00066	0.00311	0	75.55
438	324	322	0.00157	0.01442	0.00511	320.29
439	325	324	0.00054	0.00371	0	146.36
440	327	326	0.00057	0.00319	0	159.77
441	491	326	0.00239	0.02294	0.00741	320.29
442	329	328	0.00055	0.00303	0	40.66
443	331	33	0.00057	0.00388	0	77.39
444	333	33	0.00152	0.01457	0.0047	320.29
445	449	33	0.00207	0.01991	0.00643	320.29
446	333	332	0.00074	0.02644	0	508
447	332	471	0.00026	0.00342	0.07196	1493.89
448	334	333	0.00066	0.0032	0	0.85
449	335	333	0.00063	0.00355	0	1.26
450	337	336	0.00056	0.0039	0	9.71
451	378	336	0.00508	0.04877	0.01574	320.29
452	492	336	0.00632	0.0607	0.01959	320.29
453	339	338	0.00056	0.00363	0	98.2
454	338	459	0.00195	0.0179	0.00634	320.29
455	341	34	0.00062	0.00385	0	43.31
456	460	34	0.0037	0.03551	0.01146	320.29
457	343	342	0.00058	0.00363	0	3.7
458	344	342	0.00057	0.00388	0	3.28
459	346	345	0.00056	0.00319	0	72.41
460	345	415	0.0071	0.06512	0.02308	320.29
461	348	347	0.00058	0.00312	0	138.46
462	347	417	0.00555	0.05092	0.01805	320.29
463	350	349	0.0027	0.0716	0	183
464	351	349	0.00389	0.07925	0	142
465	352	349	0.00305	0.07211	0	150
466	353	349	0.0027	0.0722	0	206
467	349	403	0.00262	0.02513	0.00811	320.29
468	355	354	0.00069	0.00376	0	28.27
469	421	354	0.00477	0.04577	0.01477	320.29
470	479	354	0.00438	0.04202	0.01357	320.29
471	357	356	0.00055	0.00343	0	84.77
472	356	382	0.00285	0.02735	0.00883	320.29

**Πίνακας Α.3.11:** Τεχνικά χαρακτηριστικά των Γ.Μ. του δικτύου των 500 ζυγών  
(συνέχεια)

Α.Α.	Εκκίνηση	Τέλος	Αντίσταση (α.μ.)	Αντίδραση (α.μ.)	Εγκάρσιες Αντιστάσεις (α.μ.)	Θερμικά Όρια (MVA)
473	359	358	0.00067	0.00351	0	25
474	361	36	0.01388	0.33724	0	52
475	362	36	0.00354	0.11798	0	162
476	363	36	0.00224	0.11593	0	75
477	364	36	0.00051	0.00356	0	40.25
478	360	417	0.00812	0.07801	0.02518	320.29
479	366	365	0.00054	0.00392	0	101.52
480	365	374	0.00284	0.02723	0.00879	320.29
481	365	454	0.0023	0.02211	0.00714	320.29
482	368	367	0.00052	0.00321	0	17.62
483	367	461	0.00633	0.05803	0.02056	320.29
484	367	468	0.00832	0.07633	0.02705	320.29
485	370	369	0.00057	0.00306	0	62.18
486	372	371	0.00025	0.03602	0	508
487	373	372	0.00058	0.00318	0	48.53
488	375	374	0.0005	0.00301	0	43.22
489	377	376	0.0005	0.00336	0	162.43
490	376	429	0.00275	0.02636	0.00851	320.29
491	376	46	0.00225	0.02157	0.00696	320.29
492	376	469	0.00491	0.04503	0.01596	320.29
493	376	495	0.00333	0.03194	0.01031	320.29
494	379	378	0.00059	0.00382	0	20.35
495	381	38	0.00053	0.00359	0	14.39
496	493	38	0.00341	0.03274	0.01057	320.29
497	383	382	0.00054	0.00357	0	44.49
498	385	384	0.00057	0.00315	0	48.14
499	441	384	0.00294	0.0282	0.0091	320.29
500	387	386	0.00016	0.01653	0	658
501	388	386	0.00036	0.04243	0	255
502	389	386	0.00043	0.03576	0	374
503	390	386	0.00021	0.02728	0	389
504	391	386	0.00023	0.02451	0	399
505	392	386	0.00029	0.03299	0	297
506	393	386	0.00024	0.03349	0	283
507	394	386	0.00039	0.022	0	318
508	395	386	0.00104	0.05624	0	312
509	396	386	0.00015	0.02168	0	313
510	440	386	0.00086	0.01227	0.21949	1493.89
511	397	387	0.00051	0.0033	0	66.7
512	398	387	0.00069	0.00311	0	24.41
513	387	467	0.00315	0.0289	0.01024	320.29
514	387	47	0.00214	0.01961	0.00695	320.29
515	400	399	0.00069	0.00397	0	31.68
516	408	399	0.00162	0.01554	0.00502	320.29
517	402	401	0.00051	0.00371	0	123.69
518	404	403	0.00062	0.00347	0	26.17
519	406	405	0.00058	0.00355	0	8.23
520	492	405	0.00432	0.0415	0.0134	320.29
521	408	407	0.00036	0.01366	0	595
522	409	407	0.00054	0.0611	0	326
523	410	407	0.00027	0.04197	0	445

**Πίνακας Α.3.11:** Τεχνικά χαρακτηριστικά των Γ.Μ. του δικτύου των 500 ζυγών  
(συνέχεια)

A.A.	Εκκίνηση	Τέλος	Αντίσταση (α.μ.)	Αντίδραση (α.μ.)	Εγκάρσιες Αντιστάσεις (α.μ.)	Θερμικά Όρια (MVA)
524	411	407	0.00016	0.02349	0	441
525	412	407	0.0002	0.02693	0	431
526	413	407	0.00056	0.04036	0	436
527	414	407	0.001	0.04423	0	342
528	416	415	0.00053	0.00383	0	8.66
529	418	417	0.00065	0.00352	0	109.42
530	417	468	0.00356	0.03267	0.01158	320.29
531	417	469	0.00489	0.04483	0.01589	320.29
532	417	474	0.00346	0.03319	0.01072	320.29
533	420	419	0.00057	0.00375	0	8.45
534	422	421	0.00063	0.00311	0	65.44
535	424	423	0.00068	0.00386	0	273.23
536	423	496	0.00374	0.03595	0.0116	320.29
537	426	425	0.00087	0.03219	0	554
538	427	426	0.00068	0.00303	0	18.8
539	429	428	0.00013	0.00868	0	646
540	430	428	0.00118	0.06355	0	207
541	431	428	0.00037	0.03646	0	225
542	432	428	0.00023	0.03175	0	204
543	433	428	0.0008	0.09098	0	218
544	434	428	0.0003	0.02264	0	231
545	435	428	0.00029	0.02826	0	458
546	436	428	0.00022	0.01431	0	457
547	437	428	0.00014	0.01844	0	471
548	438	428	0.00052	0.02322	0	492
549	439	428	0.00012	0.01452	0	474
550	429	466	0.00185	0.01699	0.00602	320.29
551	441	44	0.00058	0.02873	0	649
552	442	44	0.0005	0.04469	0	267
553	443	44	0.00018	0.02669	0	385
554	444	44	0.00108	0.08953	0	202
555	446	445	0.00068	0.00358	0	130.2
556	445	461	0.00331	0.03179	0.01026	320.29
557	448	447	0.00058	0.00384	0	76.12
558	450	449	0.00052	0.00333	0	1.48
559	451	449	0.00053	0.00319	0	3.29
560	495	449	0.00176	0.01617	0.00573	320.29
561	454	453	0.0002	0.03057	0	634
562	455	453	0.00026	0.01616	0	551
563	456	453	0.00015	0.01668	0	651
564	485	454	0.00205	0.01969	0.00636	320.29
565	458	457	0.00201	0.07218	0	207
566	459	496	0.00207	0.019	0.00673	320.29
567	463	462	0.00181	0.09575	0	80
568	462	465	0.00327	0.03141	0.01014	320.29
569	462	477	0.00501	0.04814	0.01554	320.29
570	465	464	0.00036	0.02723	0	384
571	471	464	0.00043	0.00613	0.10966	1493.89
572	470	467	0.00163	0.01497	0.0053	320.29
573	472	471	0.00016	0.01869	0	501
574	476	486	0.0025	0.02402	0.00775	320.29



**Πίνακας Α.3.11:** Τεχνικά χαρακτηριστικά των Γ.Μ. του δικτύου των 500 ζυγών (συνέχεια)

A.A.	Εκκίνηση	Τέλος	Αντίσταση (α.μ.)	Αντίδραση (α.μ.)	Εγκάρσιες Αντιστάσεις (α.μ.)	Θερμικά Όρια (MVA)
575	480	479	0.00242	0.06304	0	221
576	481	479	0.00104	0.05504	0	160
577	482	479	0.00123	0.03182	0	187
578	483	479	0.00343	0.10067	0	187
579	484	479	0.00146	0.05489	0	140
580	485	499	0.00377	0.03462	0.01227	320.29
581	500	489	0.0047	0.04307	0.01526	320.29
582	494	493	0.00119	0.0643	0	75
583	497	496	0.00147	0.0647	0	204
584	498	496	0.00401	0.11755	0	150

**Πίνακας Α.3.12:** Τεχνικά χαρακτηριστικά των γεννητριών του δικτύου των 500 ζυγών

A.A	$P_i^{max}$ (MW)	$P_i^{min}$ (MW)	$Q_i^{max}$ (MVar)	$Q_i^{min}$ (MVar)	$a_i$ ( $\frac{\text{€}}{\text{MW}^2 \text{ hr}}$ )	$b$ ( $\frac{\text{€}}{\text{MW hr}}$ )	$c_i$ ( $\frac{\text{€}}{\text{hr}}$ )
1	771.8	0	359.66	-94.16	3.105	20.45	1.5
2	444.45	0	163.56	-36.44	3.105	21.51	2
3	888.9	0	327.12	-72.89	3.105	19.89	1.7
4	157.6	0	58	-12.92	3.105	20.54	2
5	10.3	0	0.61	-0.16	3.105	20.21	1.8
6	20.6	0	1.21	-0.32	3.105	19.45	1.8
7	30.2	0	1.63	-0.36	3.105	19.89	1.9
8	40	0	1.54	-0.2	3.105	20.54	1.6
9	20	0	0.77	-0.1	3.105	20.21	1.7
10	10.4	0	0.54	-0.07	3.105	19.45	2
11	361.9	0	138.97	-17.73	3.105	20.45	1.5
12	162	0	62.21	-7.94	3.105	21.51	2
13	162	0	62.21	-7.94	3.105	19.89	1.7
14	162	0	62.21	-7.94	3.105	20.54	2
15	162	0	62.21	-7.94	3.105	20.21	1.8
16	602.55	0	221.74	-49.41	3.105	19.45	1.8
17	602.55	0	221.74	-49.41	3.105	19.89	1.9
18	193.5	0	74.3	-9.48	3.105	20.54	1.6
19	193.5	0	74.3	-9.48	3.105	20.21	1.7
20	387	0	148.61	-18.96	3.105	19.45	2
21	293.6	0	136.82	-35.82	3.105	20.45	1.5
22	207.3	0	96.6	-25.29	3.105	21.51	2
23	50.2	0	2	-0.25	3.105	19.89	1.7
24	108	0	6.91	-0.88	3.105	20.54	2
25	511.2	0	196.3	-25.05	3.105	20.21	1.8
26	514.8	0	197.68	-25.23	3.105	19.45	1.8
27	20.9	0	1.35	-0.35	3.105	19.89	1.9
28	133.2	0	67.8	-14.79	3.105	20.54	1.6
29	133.2	0	67.8	-14.79	3.105	20.21	1.7
30	532.8	0	271.2	-59.14	3.105	19.45	2
31	40.1	0	1.91	-0.5	3.105	20.45	1.5

Πίνακας Α.3.12: Τεχνικά χαρακτηριστικά των γεννητριών του δικτύου των 500 ζυγών (συνέχεια)

A.A	$P_i^{max}$ (MW)	$P_i^{min}$ (MW)	$Q_i^{max}$ (MVar)	$Q_i^{min}$ (MVar)	$a_i$ $\left(\frac{\text{€}}{\text{MW}^2 \text{ hr}}\right)$	$b$ $\left(\frac{\text{€}}{\text{MW hr}}\right)$	$c_i$ $\left(\frac{\text{€}}{\text{hr}}\right)$
32	30.3	0	1.54	-0.4	3.105	21.51	2
33	20.9	0	1.35	-0.35	3.105	19.89	1.7
34	50.4	0	2.52	-0.66	3.105	20.54	2
35	10.1	0	0.51	-0.13	3.105	20.21	1.8
36	39.2	0	19.95	-4.35	3.105	19.45	1.8
37	10.6	0	5.4	-1.18	3.105	19.89	1.9
38	101.2	0	51.51	-11.23	3.105	20.54	1.6
39	20.9	0	1.35	-0.35	3.105	20.21	1.7
40	20.9	0	1.35	-0.35	3.105	19.45	2
41	10	0	0.38	-0.05	3.105	20.45	1.5
42	20.4	0	0.92	-0.12	3.105	21.51	2
43	42.3	0	16.24	-2.07	3.105	19.89	1.7
44	105	0	5.76	-0.74	3.105	20.54	2
45	60.2	0	2.38	-0.3	3.105	20.21	1.8
46	14.4	0	5.53	-0.71	3.105	19.45	1.8
47	74	0	28.42	-3.63	3.105	19.89	1.9
48	10.6	0	0.81	-0.18	3.105	20.54	1.6
49	11	0	5.6	-1.22	3.105	20.21	1.7
50	30.2	0	1.63	-0.36	3.105	19.45	2
51	100	0	5.09	-1.11	3.105	20.45	1.5
52	173.33	0	88.23	-19.24	3.105	21.51	2
53	173.33	0	88.23	-19.24	3.105	19.89	1.7
54	173.33	0	88.23	-19.24	3.105	20.54	2
55	116.4	0	59.25	-12.92	3.105	20.21	1.8
56	116.4	0	59.25	-12.92	3.105	19.45	1.8
57	116.4	0	59.25	-12.92	3.105	19.89	1.9
58	116.4	0	59.25	-12.92	3.105	20.54	1.6
59	116.4	0	59.25	-12.92	3.105	20.21	1.7
60	100	0	50.9	-11.1	3.105	19.45	2
61	136.95	0	69.71	-15.2	3.105	20.45	1.5
62	136.95	0	69.71	-15.2	3.105	21.51	2
63	136.95	0	69.71	-15.2	3.105	19.89	1.7
64	136.95	0	69.71	-15.2	3.105	20.54	2
65	111.1	0	56.55	-12.33	3.105	20.21	1.8
66	111	0	0.38	-0.05	3.105	19.45	1.8
67	13.3	0	1.27	-0.16	3.105	19.89	1.9
68	11.2	0	0.46	-0.06	3.105	20.54	1.6
69	16.7	0	2.57	-0.33	3.105	20.21	1.7
70	94.3	0	1.65	-0.21	3.105	19.45	2
71	197	0	75.65	-9.65	3.105	20.45	1.5
72	197	0	75.65	-9.65	3.105	21.51	2
73	197	0	75.65	-9.65	3.105	19.89	1.7
74	197	0	75.65	-9.65	3.105	20.54	2
75	197	0	75.65	-9.65	3.105	20.21	1.8
76	108	0	54.97	-11.99	3.105	19.45	1.8
77	175	0	89.07	-19.43	3.105	19.89	1.9
78	93.3	0	1.68	-0.37	3.105	20.54	1.6
79	222.83	0	113.42	-24.73	3.105	20.21	1.7
80	445.67	0	226.84	-49.47	3.105	19.45	2
81	109.6	0	0	0	3.105	19.89	1.7
82	97.2	0	3.36	-0.88	3.105	20.54	2

**Πίνακας A.3.12:** Τεχνικά χαρακτηριστικά των γεννητριών του δικτύου των 500 ζυγών (συνέχεια)

A.A	$P_i^{max}$ (MW)	$P_i^{min}$ (MW)	$Q_i^{max}$ (MVar)	$Q_i^{min}$ (MVar)	$a_i$ $\left(\frac{\text{€}}{\text{MW}^2 \text{ hr}}\right)$	$b$ $\left(\frac{\text{€}}{\text{MW hr}}\right)$	$c_i$ $\left(\frac{\text{€}}{\text{hr}}\right)$
83	156	0	21.5	-2.74	3.105	20.21	1.8
84	145	0	17.28	-2.21	3.105	19.45	1.8
85	145	0	17.28	-2.21	3.105	19.89	1.9
86	224	0	9.22	-1.18	3.105	20.54	1.6
87	128	0	10.75	-1.37	3.105	20.21	1.7
88	5.8	0	2.7	-0.71	3.105	19.45	2
89	60	0	23.04	-2.94	3.105	20.21	1.7
90	118	0	6.91	-0.88	3.105	19.45	2

**Πίνακας A.3.13:** Φορτία (Ενεργού και Άεργου Ισχύος) που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο των 500 ζυγών

A/A	Ενεργός	Άεργος
	t1-t24	t1-t24
1	0	0
2	5.564	5.705
3	0	0
4	17.2497	17.69
5	0	0
6	0.4173	0.43
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0.3211	0.33
12	0	0
13	4.8308	4.955
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	0	0
20	0.5902	0.605
21	0	0
22	19.331	19.825
23	0	0
24	0	0
25	0.2964	0.305
26	2.8158	2.89
27	0	0
28	8.1809	8.39
29	0	0
30	12.9961	13.33
31	0	0
32	1.2688	1.3
33	0	0
34	3.25	3.335
35	0	0
36	5.6355	5.78
37	0	0
38	0.0169	0.015

**Πίνακας Α.3.13:** Φορτία (Ενεργού και Άεργου Ισχύος) που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο των 500 ζυγών (συνέχεια)

A/A	Ενεργός t1-t24	Άεργος t1-t24
39	0	0
40	0	0
41	7.5387	7.73
42	0	0
43	0.5798	0.595
44	0	0
45	0.2639	0.27
46	0	0
47	5.6433	5.79
48	0	0
49	0	0
50	0	0
51	0.0455	0.045
52	3.0407	3.12
53	0	0
54	4.5253	4.64
55	0	0
56	0.2925	0.3
57	0	0
58	0	0
59	18.3222	18.79
60	0	0
61	0.026	0.025
62	0	0
63	0	0
64	4.5214	4.635
65	0	0
66	0	0
67	0.5941	0.61
68	0	0
69	2.2048	2.26
70	0	0
71	0	0
72	0	0
73	0	0
74	0	0
75	0.689	0.705
76	0	0
77	0.9035	0.925
78	0	0
79	0.0494	0.05
80	0	0
81	0	0
82	0	0
83	0	0
84	7.9833	8.19
85	0	0
86	2.2867	2.345
87	0	0
88	0.6825	0.7
89	0	0
90	0.767	0.785
91	0	0
92	8.4539	8.67
93	0	0

**Πίνακας Α.3.13:** Φορτία (Ενεργός και Άεργος Ισχύος) που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο των 500 ζυγών (συνέχεια)

A/A	Ενεργός t1-t24	Άεργος t1-t24
94	0.6773	0.695
95	0	0
96	4.42	4.535
97	0	0
98	4.8217	4.945
99	0	0
100	1.7576	1.805
101	0.1157	0.12
102	0	0
103	5.044	5.175
104	0	0
105	10.4429	10.71
106	13	0
107	2.0813	2.135
108	0	0
109	6.1854	6.345
110	0	0
111	8.0977	8.305
112	0	0
113	5.9787	6.13
114	0	0
115	0.6578	0.675
116	0.403	0.415
117	0	0
118	1.1479	1.18
119	0	0
120	4.1145	4.22
121	0	0
122	6.9368	7.115
123	0	0
124	0	0
125	0	0
126	0	0
127	0	0
128	0	0
129	0	0
130	13.4212	13.765
131	0	0
132	3.276	3.36
133	0	0
134	5.5445	5.685
135	0	0
136	3.4788	3.57
137	0	0
138	10.2323	10.495
139	0	0
140	0.0338	0.035
141	0	0
142	20.9742	21.51
143	0	0
144	0	0
145	0	0
146	0	0
147	0	0
148	7.4646	7.655

**Πίνακας Α.3.13:** Φορτία (Ενεργός και Άεργος Ισχύος) που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο των 500 ζυγών (συνέχεια)

A/A	Ενεργός t1-t24	Άεργος t1-t24
149	0	0
150	0.195	0.2
151	0	0
152	0	0
153	12.1095	12.42
154	0	0
155	8.6892	8.91
156	0	0
157	13.7085	14.06
158	0	0
159	2.9705	3.045
160	0	0
161	3.3735	3.46
162	0	0
163	0	0
164	12.7595	13.085
165	0	0
166	0	0
167	0	0
168	0	0
169	0	0
170	0	0
171	1.6094	1.65
172	0	0
173	0.4082	0.42
174	0.949	0.975
175	0	0
176	0	0
177	1.1414	1.17
178	0.8853	0.91
179	0	0
180	1.8382	1.885
181	0	0
182	10.7393	11.015
183	0	0
184	3.9234	4.025
185	0	0
186	5.8955	6.045
187	0	0
188	1.4365	1.475
189	0	0
190	1.8291	1.875
191	0	0
192	2.1372	2.19
193	0	0
194	3.7297	3.825
195	0	0
196	0	0
197	0	0
198	0	0
199	11.2307	11.52
200	0	0
201	1.1557	1.185
202	0	0
203	0.6097	0.625

**Πίνακας Α.3.13:** Φορτία (Ενεργός και Άεργος Ισχύος) που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο των 500 ζυγών (συνέχεια)

A/A	Ενεργός t1-t24	Άεργος t1-t24
204	5.9371	6.09
205	0	0
206	0.3913	0.4
207	2.9341	3.01
208	0	0
209	10.6405	10.915
210	0	0
211	4.4564	4.57
212	0	0
213	12.6724	13
214	0	0
215	10.9824	11.265
216	0	0
217	7.163	7.345
218	0	0
219	0.0429	0.045
220	0	0
221	0	0
222	0	0
223	0	0
224	0	0
225	0	0
226	0	0
227	0.7046	0.725
228	0	0
229	7.0317	7.21
230	0	0
231	0	0
232	0	0
233	0	0
234	7.7948	7.995
235	0	0
236	0	0
237	0.3523	0.36
238	0	0
239	5.0869	5.22
240	0	0
241	2.5662	2.63
242	0	0
243	9.6811	9.93
244	0	0
245	1.5379	1.58
246	0	0
247	0	0
248	0	0
249	0	0
250	0	0
251	0	0
252	15.4284	15.825
253	0	0
254	0	0
255	0	0
256	0	0
257	0	0
258	0	0

**Πίνακας Α.3.13:** Φορτία (Ενεργός και Άεργος Ισχύος) που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο των 500 ζυγών (συνέχεια)

A/A	Ενεργός t1-t24	Άεργος t1-t24
259	1.0608	1.09
260	0	0
261	2.4284	2.49
262	0	0
263	0	0
264	0	0
265	0	0
266	8.0314	8.24
267	0	0
268	15.2295	15.62
269	0	0
270	0.884	0.905
271	0	0
272	0	0
273	1.2337	1.265
274	0	0
275	0	0
276	0	0
277	0.0533	0.055
278	0.7501	0.77
279	0	0
280	2.2022	2.26
281	0	0
282	15.249	15.64
283	0	0
284	4.2445	4.355
285	0	0
286	1.0751	1.1
287	0	0
288	7.5543	7.75
289	0	0
290	0.4797	0.49
291	0	0
292	0.9906	1.015
293	0	0
294	3.328	3.415
295	0	0
296	0	1.04
297	0	0
298	0	0
299	1.8941	1.94
300	0	0
301	0	0
302	0	0
303	11.2788	11.57
304	0	0
305	0	0
306	0	0
307	9.8852	10.14
308	0	0
309	1.1739	1.205
310	0	0
311	5.6979	5.845
312	0	0
313	1.6172	1.66



**Πίνακας Α.3.13:** Φορτία (Ενεργός και Άεργος Ισχύος) που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο των 500 ζυγών (συνέχεια)

A/A	Ενεργός t1-t24	Άεργος t1-t24
314	0	0
315	0.0559	0.055
316	0	0
317	0	0.5
318	0	0
319	0	0
320	0	0
321	19.5546	20.055
322	0	0
323	5.8851	6.035
324	0	0
325	13.4498	13.795
326	0	0
327	15.7391	16.14
328	0	0
329	3.3826	3.47
330	0	0
331	7.4321	7.625
332	0	0
333	0	0
334	0.065	0.065
335	0.1079	0.11
336	0	0
337	0.7371	0.755
338	0	0
339	9.763	10.015
340	0	0
341	3.1486	3.23
342	0	0
343	0.3263	0.335
344	0.3159	0.325
345	0	0
346	6.1854	6.345
347	0	0
348	11.232	11.52
349	0	0
350	0	0
351	0	0
352	0	0
353	0	0
354	0	0
355	2.5961	2.66
356	0	0
357	7.2449	7.43
358	0	0
359	1.8967	1.945
360	0	0
361	0	0
362	0	0
363	0	0
364	3.9572	4.06
365	0	0
366	7.3437	7.53
367	0	0
368	1.4885	1.525

**Πίνακας Α.3.13:** Φορτία (Ενεργός και Άεργος Ισχύος) που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο των 500 ζυγών (συνέχεια)

A/A	Ενεργός t1-t24	Άεργος t1-t24
369	0	0
370	4.628	4.745
371	0	0
372	0	0
373	3.7492	3.845
374	0	0
375	3.2188	3.3
376	0	0
377	11.7507	12.05
378	0	0
379	1.6913	1.735
380	0	0
381	1.3169	1.35
382	0	0
383	3.8935	3.995
384	0	0
385	4.7606	4.885
386	0	0
387	0	0
388	0	0
389	0	0
390	0	0
391	0	0
392	0	0
393	0	0
394	0	0
395	0	0
396	0	0
397	5.1935	5.325
398	2.1801	2.235
399	0	0
400	2.9939	3.07
401	0	0
402	11.4855	11.78
403	0	0
404	2.5701	2.635
405	0	0
406	0.6825	0.7
407	0	0
408	0	0
409	0	0
410	0	0
411	0	0
412	0	0
413	0	0
414	0	0
415	0	0
416	0.7878	0.81
417	0	0
418	8.2706	8.48
419	0	0
420	0.6799	0.695
421	0	0
422	6.3934	6.555
423	0	0

**Πίνακας Α.3.13:** Φορτία (Ενεργός και Άεργος Ισχύος) που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο των 500 ζυγών (συνέχεια)

A/A	Ενεργός t1-t24	Άεργος t1-t24
424	20.423	20.945
425	0	0
426	0	0
427	1.8759	1.925
428	0	0
429	0	0
430	0	0
431	0	0
432	0	0
433	0	0
434	0	0
435	0	0
436	0	0
437	0	0
438	0	0
439	0	0
440	0	0
441	0	0
442	0	0
443	0	0
444	0	0
445	0	0
446	11.5284	11.825
447	0	0
448	7.4828	7.675
449	0	0
450	0.1456	0.15
451	0.2873	0.295
452	1.4508	1.49
453	0	0
454	0	0
455	0	0
456	0	0
457	0	0
458	0	0
459	9.6811	9.93
460	3.4242	3.51
461	11.9236	12.23
462	0	0
463	0	0
464	0	0
465	1.6276	1.67
466	5.6342	5.78
467	0.1053	0.11
468	0.4888	0.5
469	16.7089	17.14
470	5.5328	5.675
471	0	0
472	6.4623	6.63
473	0.13	0.135
474	21.7386	22.295
475	0.0208	0.02
476	7.7818	7.98
477	4.0729	4.175
478	1.1908	1.22

**Πίνακας Α.3.13:** Φορτία (Ενεργού και Άεργου Ισχύος) που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο των 500 ζυγών (συνέχεια)

Α/Α	Ενεργός	Άεργος
	t1-t24	t1-t24
479	0	0
480	0	0
481	0	0
482	0	0
483	0	0
484	0	0
485	0	3.715
486	0	9.14
487	0	1.555
488	0	13.055
489	0	0.49
490	0	3.975
491	0	15.935
492	0	7.94
493	0	0.54
494	0	0
495	0	10.025
496	0	0
497	0	0
498	0	0
499	15.9029	16.31
500	3.0459	3.125

**Πίνακας Α.3.14:** Δεδομένα γραμμικοποίησης των θερμοηλεκτρικών μονάδων του δικτύου των 14 ζυγών

i	Intercepts	Slopes	i	Intercepts	Slopes
1	104.899	2.528	26	-685.2	6.426
2	102.468	2.684	27	-748.41	6.582
3	97.606	2.84	28	-814.05	6.738
4	90.313	2.996	29	-882.12	6.894
5	80.588	3.152	30	-952.62	7.05
6	68.433	3.308	31	-1025.6	7.206
7	53.847	3.464	32	-1100.9	7.362
8	36.829	3.62	33	-1178.7	7.518
9	17.38	3.776	34	-1258.9	7.674
10	-4.5	3.932	35	-1341.6	7.83
11	-28.811	4.088	36	-1426.7	7.986
12	-55.553	4.244	37	-1514.2	8.142
13	-84.726	4.399	38	-1604.2	8.297
14	-116.33	4.555	39	-1696.5	8.453
15	-150.365	4.711	40	-1791.3	8.609
16	-186.831	4.867	41	-1888.6	8.765
17	-225.729	5.023	42	-1988.3	8.921
18	-267.057	5.179	43	-2090.4	9.077
19	-310.816	5.335	44	-2194.9	9.233
20	-357.007	5.491	45	-2301.9	9.389
21	-405.628	5.647	46	-2438.8	9.584
22	-456.681	5.803	47	-2579.9	9.779
23	-510.165	5.959	48	-2695.4	9.935
24	-566.08	6.115	49	-2813.3	10.091
25	-624.426	6.271			

**Πίνακας Α.3.15:** Δεδομένα γραμμικοποίησης των θερμοηλεκτρικών μονάδων του δικτύου των 30 ζυγών

i	Intercepts									
	gt1	gt2	gt3	gt4	gt5	gt6	gt7	gt8	gt9	gt10
1	104.899	43.967	39.866	99.975	43.96	99.96	39.97	104.97	43.96	39.96
2	102.468	43.161	36.641	99.57	43.53	99.53	39.60	104.52	43.51	39.51
3	97.606	41.548	30.192	98.759	42.66	98.66	38.86	103.62	42.62	38.56
4	90.313	39.13	20.518	97.542	41.36	97.44	37.76	102.27	41.34	37.13
5	80.588	35.905	7.619	95.92	39.68	95.83	36.29	100.48	39.67	35.21
6	68.433	31.874	-8.506	93.893	0	93.70	34.44	98.237	37.47	0
7	53.847	27.037	-27.855	91.46	0	91.15	32.04	95.543	34.82	0
8	36.829	21.394	-50.428	88.622	0	88.16	29.19	92.4	31.73	0
9	17.38	14.944	-76.226	85.378	0	84.74	26.18	88.809	28.18	0
10	-4.5	7.689	-105.248	81.729	0	80.89	22.51	84.769	24.18	0
11	-28.811	-0.374	-137.496	77.674	0	0	18.39	80.279	0	0
12	-55.553	-9.242	-172.968	73.214	0	0	14.22	75.341	0	0
13	-84.726	-18.917	-211.665	68.348	0	0	9.287	69.954	0	0
14	-116.33	-29.397	-253.587	63.077	0	0	3.908	64.118	0	0
15	-150.365	-40.684	-298.733	57.4	0	0	-1.436	57.833	0	0
16	-186.831	-52.776	-347.104	51.318	0	0	-7.148	51.784	0	0
17	-225.729	-65.675	-398.7	44.831	0	0	0	45.388	0	0
18	-267.057	-79.381	-453.521	37.938	0	0	0	37.846	0	0
19	-310.816	-93.892	-511.566	30.639	0	0	0	29.855	0	0
20	-357.007	-109.209	-572.836	22.935	0	0	0	21.415	0	0
21	-405.628	-125.333	-637.331	15.852	0	0	0	0	0	0
22	-456.681	-142.263	-705.051	8.478	0	0	0	0	0	0
23	-510.165	-164.5	-775.995	-0.342	0	0	0	0	0	0
24	-566.08	-188.115	-850.165	-9.567	0	0	0	0	0	0
25	-624.426	-207.867	-927.558	-	0	0	0	0	0	0
26	-685.203	-228.424	-1008.177	0	0	0	0	0	0	0
27	-748.411	-249.788	-1092.02	0	0	0	0	0	0	0
28	-814.05	-271.958	-1179.089	0	0	0	0	0	0	0
29	-882.12	-294.935	-1269.381	0	0	0	0	0	0	0
30	-952.621	-318.717	-1362.899	0	0	0	0	0	0	0
31	-1025.554	-343.306	-1459.641	0	0	0	0	0	0	0
32	-1100.917	-368.701	-1559.609	0	0	0	0	0	0	0
33	-1178.712	-394.902	-1662.8	0	0	0	0	0	0	0
34	-1258.937	-421.909	-1769.217	0	0	0	0	0	0	0
35	-1341.594	-449.722	-1878.858	0	0	0	0	0	0	0
36	-1426.682	-478.342	-1991.724	0	0	0	0	0	0	0
37	-1514.201	-507.768	-2107.815	0	0	0	0	0	0	0
38	-1604.151	-538	-2227.131	0	0	0	0	0	0	0
39	-1696.532	-569.038	-2349.671	0	0	0	0	0	0	0
40	-1791.344	-600.882	-2475.436	0	0	0	0	0	0	0
41	-1888.587	-633.533	-2604.426	0	0	0	0	0	0	0
42	-1988.261	-666.99	-2736.641	0	0	0	0	0	0	0
43	-2090.367	-701.253	-2872.08	0	0	0	0	0	0	0
44	-2194.903	-736.322	-3010.744	0	0	0	0	0	0	0
45	-2301.87	-772.197	-3152.633	0	0	0	0	0	0	0
46	-2438.821	-808.878	-3297.746	0	0	0	0	0	0	0
47	-2579.925	-846.366	-3483.438	0	0	0	0	0	0	0
48	-2695.401	-884.66	-3674.638	0	0	0	0	0	0	0
49	-2813.309	-923.76	-3831.038	0	0	0	0	0	0	0

**Πίνακας Α.3.15:** Δεδομένα γραμμικοποίησης των θερμοηλεκτρικών μονάδων του δικτύου των 30 ζυγών (συνέχεια)

i	Slopes									
	gt1	gt2	gt3	gt4	gt5	gt6	gt7	gt8	gt9	gt10
1	2.528	3.555	3.98	3.242	2.555	3.615	3.991	3.322	2.562	3.62
2	2.684	3.645	4.16	3.306	2.763	3.823	4.192	3.544	2.784	3.846
3	2.84	3.735	4.339	3.37	2.971	4.031	4.394	3.766	3.006	4.077
4	2.996	3.825	4.519	3.433	3.179	4.228	4.595	3.988	3.217	4.308
5	3.152	3.915	4.699	3.497	3.382	4.426	4.796	4.21	3.428	4.539
6	3.308	4.004	4.878	3.561	0	4.634	4.998	4.433	3.65	0
7	3.464	4.094	5.058	3.624	0	4.842	5.216	4.655	3.873	0
8	3.62	4.184	5.237	3.688	0	5.05	5.434	4.877	4.095	0
9	3.776	4.274	5.417	3.752	0	5.258	5.635	5.099	4.317	0
10	3.932	4.363	5.596	3.815	0	5.466	5.853	5.322	4.539	0
11	4.088	4.453	5.776	3.879	0	0	6.072	5.544	0	0
12	4.244	4.543	5.956	3.943	0	0	6.273	5.766	0	0
13	4.399	4.633	6.135	4.006	0	0	6.491	5.988	0	0
14	4.555	4.723	6.315	4.07	0	0	6.709	6.211	0	0
15	4.711	4.812	6.494	4.134	0	0	6.911	6.433	0	0
16	4.867	4.902	6.674	4.197	0	0	7.112	6.633	0	0
17	5.023	4.992	6.854	4.261	0	0	0	6.833	0	0
18	5.179	5.082	7.033	4.325	0	0	0	7.055	0	0
19	5.335	5.172	7.213	4.389	0	0	0	7.277	0	0
20	5.491	5.261	7.392	4.452	0	0	0	7.499	0	0
21	5.647	5.351	7.572	4.508	0	0	0	0	0	0
22	5.803	5.441	7.751	4.564	0	0	0	0	0	0
23	5.959	5.531	7.931	4.627	0	0	0	0	0	0
24	6.115	5.665	8.111	4.691	0	0	0	0	0	0
25	6.271	5.755	8.29	4.755	0	0	0	0	0	0
26	6.426	5.845	8.47	0	0	0	0	0	0	0
27	6.582	5.935	8.649	0	0	0	0	0	0	0
28	6.738	6.025	8.829	0	0	0	0	0	0	0
29	6.894	6.114	9.008	0	0	0	0	0	0	0
30	7.05	6.204	9.188	0	0	0	0	0	0	0
31	7.206	6.294	9.368	0	0	0	0	0	0	0
32	7.362	6.384	9.547	0	0	0	0	0	0	0
33	7.518	6.473	9.727	0	0	0	0	0	0	0
34	7.674	6.563	9.906	0	0	0	0	0	0	0
35	7.83	6.653	10.086	0	0	0	0	0	0	0
36	7.986	6.743	10.265	0	0	0	0	0	0	0
37	8.142	6.833	10.445	0	0	0	0	0	0	0
38	8.297	6.922	10.625	0	0	0	0	0	0	0
39	8.453	7.012	10.804	0	0	0	0	0	0	0
40	8.609	7.102	10.984	0	0	0	0	0	0	0
41	8.765	7.192	11.163	0	0	0	0	0	0	0
42	8.921	7.282	11.343	0	0	0	0	0	0	0
43	9.077	7.371	11.522	0	0	0	0	0	0	0
44	9.233	7.461	11.702	0	0	0	0	0	0	0
45	9.389	7.551	11.882	0	0	0	0	0	0	0
46	9.584	7.641	12.061	0	0	0	0	0	0	0
47	9.779	7.731	12.286	0	0	0	0	0	0	0
48	9.935	7.82	12.51	0	0	0	0	0	0	0
49	10.091	7.91	12.69	0	0	0	0	0	0	0